

Feststoffturbine zur Reduzierung von Entmischungseffekten

*Dipl.-Ing. Dr.mont. Michael Denzel, Dipl.-Ing. Dr.mont. Michael Prenner,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Nikolaus A. Sifferlinger, Leoben**

In vielen Anwendungen ist eine konstante Partikelgrößenverteilung erwünscht. Verschiedene Effekte führen zur Entmischung während Lagerprozessen. Insbesondere bei der Bunkerbefüllung treten Segregationseffekte auf, die durch mögliche Kernflusseffekte beim Ausfluss noch verstärkt werden. In dieser Arbeit wurden Diskrete-Elemente-Simulationen durchgeführt, um einen Bunker zur Lagerung von Hochofensinter zu analysieren, der mit einem Gurtbandförderer befüllt wird, wobei signifikante Entmischungseffekte festgestellt werden. Verschiedene Vorrichtungen, einschließlich Feststoffturbinen zur Verringerung der Entmischung während der Bunkerbefüllung, wurden mit Hilfe der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) bewertet. Es wird eine Durchströmturbine vorgestellt, die Entmischungseffekte bei der Bunkerbefüllung signifikant reduziert. Die Ergebnisse zeigen einen gleichmäßigeren Bunkerausfluss in Bezug auf die Partikelgröße. Da Sinter ein sehr abrasives Material ist, wurde der zu erwartende Verschleiß an der Turbine ebenfalls mit der DEM abgeschätzt. Weil die Turbine auch zur Energierückgewinnung in anderen Anwendungen eingesetzt werden könnte, wurde auch die Leistungsabgabe untersucht. Zusätzlich wird der Partikelbruch an der Durchströmturbine untersucht. Dazu wird ein neu entwickeltes Bruchmodell für die DEM verwendet. Das Modell basiert auf einem probabilistischen „Particle Replacement“ mit Voronoi-tessellierten Fragmenten. Das bereits validierte Bruchmodell ermöglicht eine Vorhersage der Fragmentgrößenverteilung mit hoher Genauigkeit. Die Fragmente sind weiter bruchfähig, was die Simulation von Prozessen mit mehreren schädigenden Ereignissen ermöglicht. Das Bruchmodell wurde mit einem speziell entwickelten Prüfstand für Einzelpartikel-Prallversuche zur schnellen Analyse der Bruchcharakteristik von Schüttgut kalibriert.

Einleitung

Zur Lagerung oder Pufferung werden meist Bunker verwendet. Verschiedene Entmischungseffekte führen zu Schwankungen der Partikelgrößenverteilung beim Bunkerausfluss. In den meisten Anwendungen und für deren nachfolgende Prozesse ist aber ein gleichmäßig verteilter Bunkerabzug hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung erwünscht. Dies gilt insbesondere bei Bunkern für Hochofensinter, da eine konstante Korngrößenverteilung für den Hochofenbetrieb erforderlich ist, um einen ausreichenden Gasstrom zu gewährleisten.

* *Dipl.-Ing. Dr.mont. Michael Denzel*
Senior Researcher
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik
und Bergwirtschaft - Fördertechnik und
Konstruktionslehre
Montanuniversität Leoben
Tel.: +43 3842/4022814
E-Mail: michael.denzel@unileoben.ac.at

Dipl.-Ing. Dr.mont. Michael Prenner
Senior Scientist
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik
und Bergwirtschaft - Fördertechnik und
Konstruktionslehre
Montanuniversität Leoben
Tel.: +43 3842/4022803
E-Mail: michael.prenner@unileoben.ac.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Nikolaus A. Sifferlinger
Professor
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik
und Bergwirtschaft - Fördertechnik und
Konstruktionslehre
Montanuniversität Leoben
Tel.: +43 3842/4022097
E-Mail: nikolaus-august.sifferlinger@
unileoben.ac.at

Diese Studie wurde im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten RFCS-Projekts MinSiDeg durchgeführt, das von der Montanuniversität Leoben und mehreren Industriepartnern aus Österreich und Deutschland durchgeführt wurde. Ein Ziel von MinSiDeg war es, innovative Förder- und Lagereinrichtungen zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln, um Degradations- und Entmischungseffekte bei Förder- und Lagerungsprozessen von Hochofensinter zu reduzieren. Eine dieser Vorrichtungen ist die Feststoffturbine, die ursprünglich in^[1] entwickelt und patentiert wurde und in^[2-4] zur Energierückgewinnung beschrieben wurde. In dieser Arbeit wurde die Feststoffturbine weiterentwickelt und optimiert, um Entmischungseffekte zu reduzieren. Dieser Beitrag ist eine aktualisierte und erweiterte Version von^[5] und^[6] und wurde teilweise bereits in^[7] und^[8] präsentiert.

Entmischungseffekte beim Befüllen von Bunkern

Signifikante Entmischungseffekte bei der Bunkerbefüllung treten vor allem durch die folgenden zwei Effekte auf. Aufgrund von Vibrationen während des Transports mit dem Förderband sammeln sich kleine Partikel am Boden und große Partikel an der Spitze des Schüttguthaufens im Förderband. Dadurch haben die großen Partikel beim Abwurf eine andere Flugbahn als die kleinen Partikel. Je nach Neigung und Geschwindigkeit des Förderbandes können

die großen Partikel bei der Entladung eine höhere Geschwindigkeit haben als die kleinen Partikel, da die großen Partikel einen größeren Abstand zur Mitte der Entladetrommel haben. Dies kann zu einer Anhäufung von großen Partikeln in Förderrichtung und einer Anhäufung von kleinen Partikeln entgegen der Förderrichtung des auslaufenden Förderbandes im Bunker führen^[9].

Der zweite Entmischungseffekt tritt immer dann auf, wenn sich ein Schüttguthaufen bildet. Da größere Partikel einen größeren Impuls haben als kleinere Partikel, bewegt sich das grobe Material weiter an der Seite der Halde hinunter als das feine Material. Das Material, das die Böschung eines Haufens hinunterrollt, wird als Überlauf bezeichnet. Größere Partikel neigen dazu, über die gesamte Länge der Böschung hinunterzurollen, während feine Partikel dazu neigen, sich an der Seite des Haufens abzusetzen. Dieser Effekt des Überlaufs führt dazu, dass die äußeren und unteren Bereiche des Haufens aus gröberem Material bestehen, während die inneren und oberen Bereiche des Haufens aus feinerem Material bestehen^[9].

Aktuelle Situation

Untersucht wurde der Ist-Zustand bei einem Stahlhersteller in Österreich. Hochofensinter wird in quadratischen Bunkern mit Füllständen von bis zu 600 t gelagert, die über Förderbänder mit einem Massenstrom von 300 t/h und einer nahezu kons-



Bild 1: a) Befüllung eines Sinterbunkers mittels Gurtbandförderers^[5] b) Grobkörniges Material an den äußeren Zonen des Schüttguthaufens^[6]

tanten Korngrößenverteilung befüllt werden (Bild 1 (a)). Niedrige Füllstände führen zu hohen Fallhöhen, was auch als einer der Hauptgründe für die Materialdegradation angenommen wird. In Bild 1 (b) bildet das Schüttgut eine Senke, die durch den Kernströmungseffekt bei der vorherigen Entladung verursacht wurde. Wie in Kapitel 2 beschrieben, bestehen die äußeren und unteren Bereiche des Haufens aus großen Partikeln, was zu einer Anhäufung von grobem Material in den äußeren Bereichen des gesamten Bunkers führt.

Der Ist-Zustand wurde mittels DEM mit EDEM simuliert (Bild 2). Die Parameter für die Simulationen wurden in Schüttwinkel- und Gleitversuchen in^[10], Rückprallversuchen in^[11] und weiteren Untersuchungen zu Kontaktprozessen in^[12] ermittelt. In den Simulationen wurde der Bunker mit 350 t mit der in Tabelle 1 aufgeführten ursprünglichen Korngrößenverteilung befüllt. Die

kleinen Fraktionen 6, 10 und 16 mm wurden in der Simulation kombiniert (insgesamt 52,25 %), und alle Partikel wurden aus Gründen der Berechnungseffizienz um den Faktor 3 hochskaliert.

Bei einem Füllstand von 350 t wurde der Bunker entleert und die Partikelgrößenverteilung am Auslauf in der Simulation ermittelt. In Bild 3a ist der Massenanteil für jede

Passing [mm]	Mass fraction [%]
100	9.39
50	6.40
40	17.03
25	14.93
16	17.56
10	22.04
6	12.65

Tabelle 1: Partikelgrößenverteilung am Gurtbandförderer beim Befüllen des Bunkers

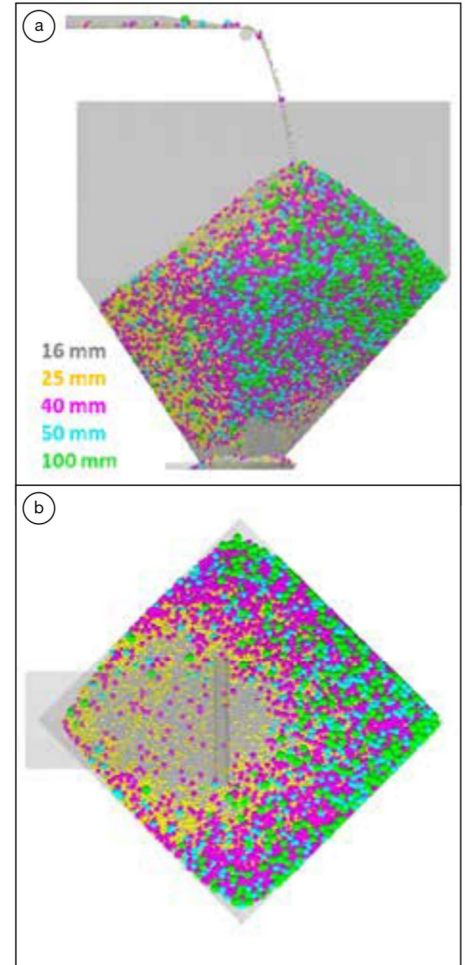


Bild 2: DE-Simulation des Bunkers im aktuellen Zustand a) Seitenansicht b) Draufsicht^[13]

Partikelgröße in Verbindung mit dem Bunkerfüllstand dargestellt. Kleine Partikel (6+10+16mm) tragen zu Beginn mit ca. 80 % zum Gesamtmassenstrom bei und nehmen am Ende des Entleerungsprozesses auf ca. 10 % ab. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, wäre ein konstanter Fluss von 52,25 % für die kleinen Partikel während des gesamten Entleerungsprozesses das

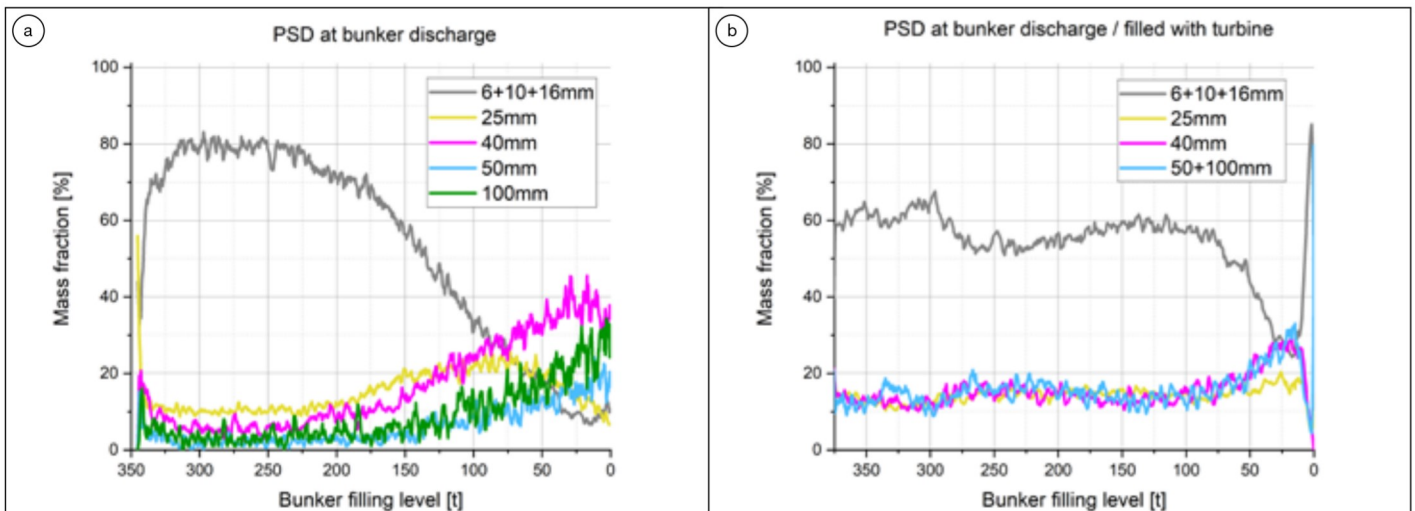


Bild 3: Partikelgrößenverteilung beim Bunkerausfluss a) Im aktuellen Zustand b) Befüllung mit Feststoffturbine^[5]

Optimum. Im Gegensatz dazu ist der Massenanteil der großen Partikel zu Beginn des Entladevorgangs relativ gering und beginnt bei ca. 50 % des Füllstandes anzusteigen. Dieser Effekt lässt sich durch den Kernströmungseffekt erklären, bei dem sich während der Entleerung ein Kernstrom bildet. Dies führt zu einem frühzeitigen Austrag von Material in den inneren Zonen des Bunkers, die aus kleineren Partikeln bestehen. Die größeren Partikel sammeln sich in den äußeren Zonen an.

Massnahmen zur Reduzierung von Entmischungseffekten

Da der Kernflusseffekt einer der Hauptgründe für Schwankungen in der Partikelgrößenverteilung während des Bunkerausstrags ist, besteht die einfachste Maßnahme zur Verringerung dieser Schwankungen darin, die Wandreibung zwischen dem Bunker und dem Schüttgut zu minimieren. In Versuchen wurde ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,89$ zwischen der Stahlwand und dem Sinter gemessen^[11]. Die Simulationen wurden mit einem fiktiv verringerten Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,4$ wiederholt, wodurch die Entmischungseffekte deutlich verringert wurden^[5]. Ein solch niedriger Reibungskoeffizient ist jedoch zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts fiktiv, da ein mit Sinter interagierendes Material mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,4$ und ausreichender Verschleißfestigkeit nach dem derzeitigen Stand der Technik kaum erhältlich ist.

Ein weiterer einfacher Ansatz zur Verringerung von Entmischungseffekten wäre ein intelligentes Befüllungs- und Entleerungsverfahren. Wenn der Bunker nicht vollständig entleert, sondern bei Erreichen eines Füllstandes von 50 % wieder befüllt wird, zeigt sich in Simulationen auch eine konstantere Korngrößenverteilung während der Entleerung. Aufgrund des Kernflusseffekts wird das Material in der Nähe der Wände nie ausgetragen, was zu einer unerwünschten Materialalterung in der Nähe der Wände führen würde.

In den Simulationen wurden verschiedene Arten von Anlagen zur Verringerung von Entmischungseffekten bei der Bunkerbefüllung getestet, darunter Kaskadenrutschen und verschiedene Arten von feststoffbetriebenen Turbinen mit unterschiedlichen Drehzahlen. Der Abwurf von einem Förderband wurde mit und ohne diese Einrichtungen simuliert. Zur Bestimmung der Entmischung wurde die Draufsicht auf die Schüttguthalbe mit nur einer eingblendeten Partikelgröße ausgewertet, Details siehe^[5]. Mit einer rückenschlächtigen Turbine wurde eine deutliche Verbesserung der Entmischung bei niedrigen Drehzahlen festgestellt. Der Nachteil ist, dass eine rückenschlächtige Turbine ein Leitblech benötigt, das als zusätzliches Teil dem Verschleiß ausgesetzt ist. Gute Ergebnisse wurden auch mit einer überschlächtigen Turbine bei niedrigen Drehzahlen erzielt. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Reduzierung von Entmischungseffekten wurden mit einer Durchströmturbine bei niedrigen Drehzahlen erzielt.

Durchströmturbine

Im Vergleich zu anderen simulierten Vorrichtungen und Typen von Feststoffturbinen wurden die besten Ergebnisse hinsichtlich der Verringerung von Entmischungseffekten mit der in Bild 4 dargestellten Durchströmturbine erzielt. Die Durchströmturbine besteht aus 10 segmentierten Schaufeln, die eine ideale Krümmung für den Materialfluss bilden. In diesem Fall beträgt der Turbinendurchmesser 1,6 m. Die Mitte der Durchströmturbine ist hohl, so dass das Material durch die Turbine fließen kann. Der Materialfluss durch die Turbine ist in Bild 9 (a) dargestellt, die mit der in Tabelle 1 gelisteten Partikelgrößenverteilung simuliert wurde. Die Farbskala stellt die Translationsgeschwindigkeit der Sinterpartikel dar. Es wurden Simulationen mit verschiedenen Drehzahlen durchgeführt. Das Optimum

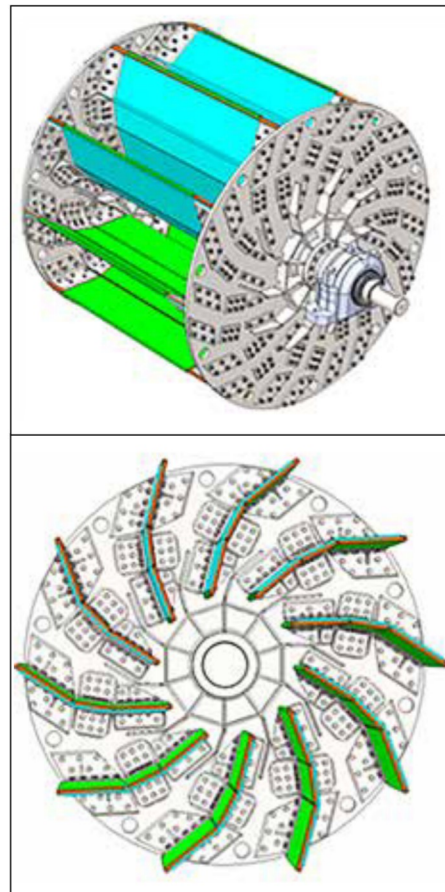


Bild 4: CAD-Modell der Durchströmturbine (Durchmesser 1.6 m)^[5]

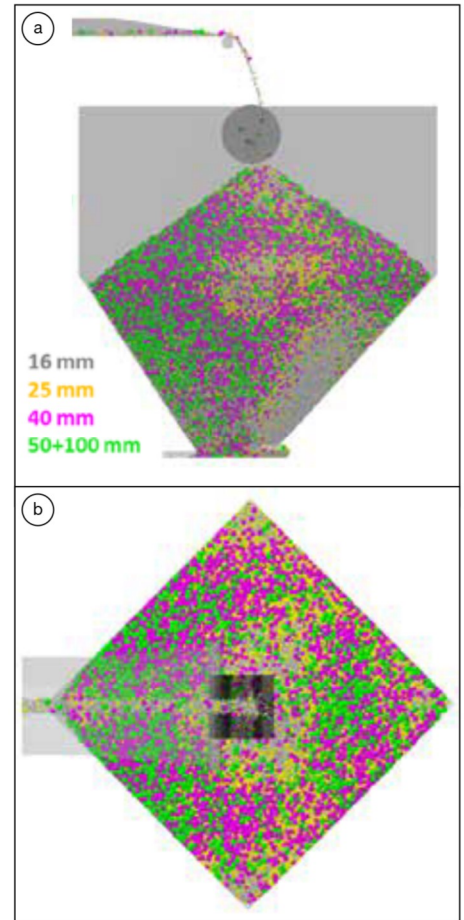


Bild 5: DE-Simulation der Bunkerbefüllung mit der Durchströmturbine a) Seitenansicht b) Draufsicht^[5]

hinsichtlich Minimierung von Entmischungseffekten wurde bei 5 U/min gefunden. Je nach Massenstrom kann diese niedrige Drehzahl durch regeneratives Bremsen oder durch einen elektrischen Antrieb bei geringen Massenströmen erreicht werden. Der Bunkerbefüllungsprozess wurde erneut mit der Durchströmturbine simuliert (Bild 5). Der Abstand zwischen Gurtabwurf und Turbinenmitte betrug 2,556 m. Die 100 mm großen Partikel wurden durch 50 mm große Partikel repräsentiert, da sie sonst aufgrund der Aufskalierung um den Faktor 3 die Turbine nicht passieren würden. Bei der Bunkerbefüllung mit der Durchströmturbine ist eine deutliche Reduzierung der Entmischungseffekte am Bunkerauslauf festzustellen (Bild 3 (b)). Es wird eine nahezu konstante Korngrößenverteilung bis zu einem Füllstand von 100 t festgestellt, was eine große Verbesserung im Vergleich zu Bild 3 (a) darstellt. Die Durchströmturbine wurde entwickelt und optimiert, um Entmischungseffekte zu reduzieren. Die Energierückgewinnung ist eine sekundäre Anwendung. Andere Typen von Feststoffturbinen^[2-4] sind für die Energierückgewinnung optimiert und erzielen eine höhere Leistung.

Partikelbruch

Die Durchströmturbine verringert die Entmischungseffekte erheblich, kann aber auch schädliche Auswirkungen auf die Partikel haben. Da für den Hochofenbetrieb eine Mindestkorngroße von 6,3 mm erforderlich ist, ist die Entstehung von Feinanteilen bei Hochofensinter besonders kritisch und stellt neben dem Verschleiß der Anlagen ein Hauptproblem bei Förder- und Lagerprozessen dar. Nach^[14] sind im EU-Durchschnitt 6 % des gesamten am Hochofen bereitgestellten Sintermassenstroms Feingut, das durch Förder- und Lagerungsprozesse entsteht. Dieses Feingut muss vor Erreichen des Hochofens ausgesiebt und erneut gesintert werden (Rückgut), was ein sehr energieintensiver Prozess ist, der hohe Emissionen und Kosten verursacht^[14].

Einerseits teilt die Durchströmturbine den freien Fall auf und verringert die freie Fallhöhe um ihren Durchmesser. Andererseits verursacht sie zusätzliche Stöße gegen die Turbine und zwischen den Partikeln. Um die durch die Turbine verursachte Materialdegradation und Feinmaterialerzeugung zu quantifizieren, war eine detaillierte Untersuchung erforderlich. Daher wurde ein kürzlich entwickeltes Bruchmodell für die DEM verwendet^[7, 15-17]. Das neuartige Bruchmodell basiert auf einem probabilistischen Partikeltausch („Particle Replacement“) mit tesselierten „Voronoi-Fragmenten“. Abhängig von der Belastung des einzelnen Partikels wird der Initialpartikel probabilistisch durch verschiedene Bruchmuster ersetzt (Bild 6). Abhängig von den resultierenden Fragmentgrößen wird das Bruchmuster mit Hilfe des Voronoi-Algorithmus^[18-20] mit einer bestimmten Anzahl von „Seeds“ erzeugt. Im Gegensatz zu^[21] und anderen Particle-Replacement-

Modellen^[22-26], bei denen der Partikel durch eine Anzahl von kleineren Kugeln ersetzt wird, wird in diesem Modell der Initialpartikel durch eine exakte Kopie des Ausgangspartikels ersetzt, die zuvor tesseliert wurde. Dadurch wird Massen- und Volumenkonstanz gewährleistet. Es können polyedrische Partikel beliebiger Form verwendet werden. Da das Modell auf Wahrscheinlichkeiten basiert, ist eine hohe Anzahl von Partikeln erforderlich, damit das Modell eine hohe Genauigkeit in Bezug auf die Fragmentgrößenverteilung liefert. Es können auch weiterer Brüche von Fragmenten simuliert werden, was die Simulation langer und komplexer Fördersysteme mit Mehrfachbruch ermöglicht (Bild 8). Wie oft ein Partikel und die daraus resultierenden Fragmente weiter gebrochen werden können, wird in Bild 8 durch die Bruchebene bzw. Bruchgrad L beschrieben. Eine Bruchgrad von $L = 2$ bedeutet beispielsweise, dass der Initialpartikel für diesen Bruchvorgang ein Fragment eines vorherigen Bruchvorgangs mit $L = 1$ ist. Das Bruchmodell wurde in C++ unter Verwendung einer API (Application Programming Interface) in der Simulationssoftware ThreeParticle von Becker3D programmiert. Eine detaillierte Beschreibung des Konzepts findet sich in^[7, 15-17]. Die Wahrscheinlichkeit für jedes Bruchmuster ist abhängig von der mechanischen Beanspruchung und wird durch Einzelpartikel-Prallversuche in^[27-29] ermittelt. Die Prallversuche wurden mit einer speziell entwickelten automatisierten Druckluftkanone mit integrierter Fragmentanalyse (Bild 7) durchgeführt, das in^[27] ausführlich beschrieben ist und eine schnelle Analyse des Bruchverhaltens von Schüttgut ermöglicht. Das Modell wurde in^[7, 15-17] anhand von Fallversuchen und Versuchen mit zwei verschiedenen Übergabesyste-

men verifiziert und validiert, wobei unterschiedliche Sinterchargen von zwei verschiedenen Herstellern verwendet wurden.

Um den durch die Durchströmturbine verursachten Partikelbruch zu quantifizieren, wurde in ThreeParticle ein Vergleich des Falls mit und ohne Turbine durchgeführt (Bild 9). Aus Gründen der Recheneffizienz wurde die Simulation vereinfacht, um weniger Partikel im Bunker simulieren zu müssen. Um den Fall ohne Turbine zu simulieren, wurde der oberste Teil des Haufens mitsimuliert, da ein Fall in ein Schüttgutbett eine dämpfende Wirkung hat. Das Schüttgutbett wurde auf der gleichen Höhe wie der Boden der Turbine platziert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Die Turbine verringerte die Fallhöhe für das abgeworfene Material von $h=3,356$ m auf $h_1=1,756$ m, verursachte aber zusätzliche Stöße mit der Turbine und im Material. Zur Auswertung wurde eine Auffangbox implementiert, da sonst die entstehenden Fragmente außerhalb des Simulationsvolumens gelöscht worden wären. Der Auffangbox wurden sehr weiche Materialeigenschaften zugewiesen, so dass es zu keinem Bruch durch Stöße auf die Auffangbox kommen würde. Es wurde ein Zeitschritt von 5×10^{-6} und das Hooke-Kontaktmodell verwendet. Eine detaillierte Beschreibung dieser Simulation und der Parameter ist in^[5, 7] zu finden.

Zum Vergleich der durch die Turbine verursachten Partikelbrüche wurde derselbe Prozess mit der Durchströmturbine bei verschiedenen Drehzahlen von 5, 10, 20, 30, 40 und 50 U/min simuliert. 5 U/min ist das Optimum für die Verringerung von Entmischungseffekten und 30 – 40 U/min für die Energierückgewinnung. Die Simulationen in^[6, 7] zeigen, dass bei 5 U/min das Material durch die Turbine fließt, was zu einer Durchmischung führt und Entmi-

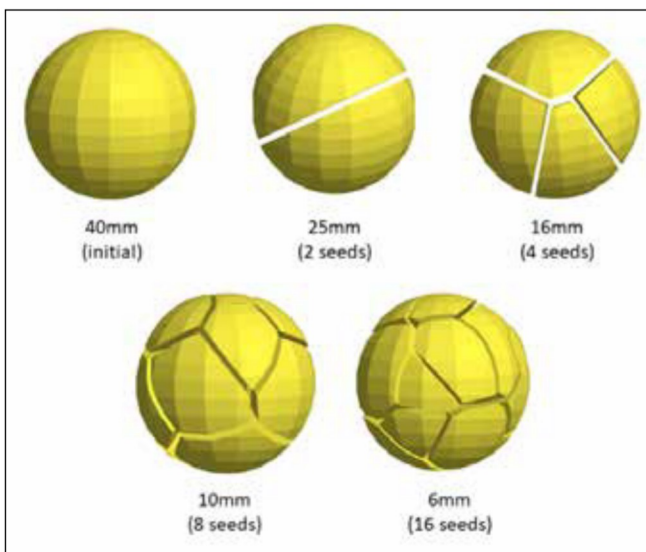


Bild 6: Bruchmuster, generiert mit dem Voronoi-Algorithmus aus einem polyedrischen Partikel^[17]

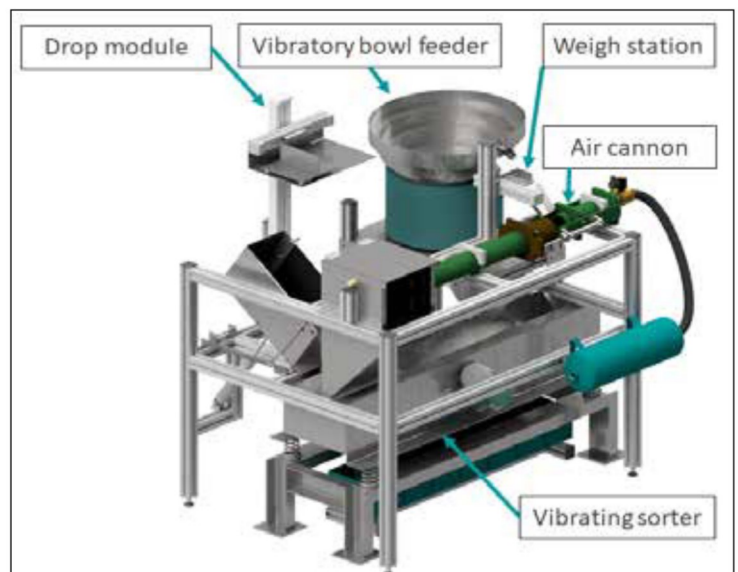


Bild 7: Automatisierter Prüfstand für Einzelpartikel-Prallversuche^[27]

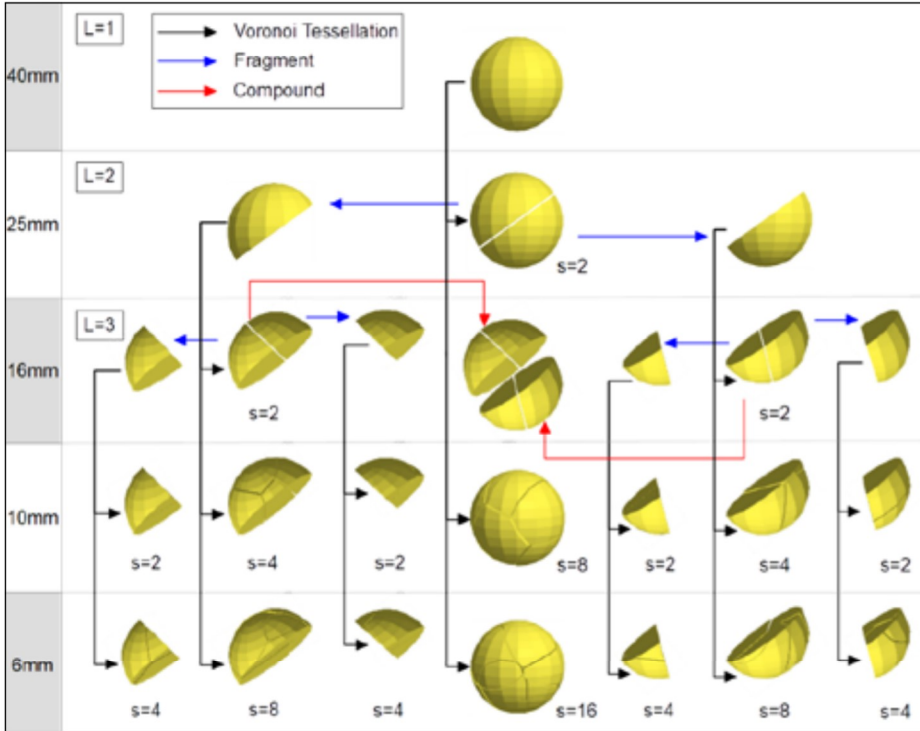


Bild 8: Multipler Bruch auf 3 Bruchebenen (L=1...3) mit Teilung in jeweils 2 Fragmente (s=2)^[7]

schungseffekte reduziert. Dies ist bei 30 U/min nicht der Fall, da das Material auf derselben Turbinenschaufel verbleibt. Dadurch wird ein höheres Drehmoment auf die Turbine ausgeübt. Das Material bildet in der Turbine ein Schüttgutbett, von dem angenommen wird, dass es eine erhebliche Dämpfungswirkung hat. Da der Dämpfungseffekt von der Partikelgrößenverteilung im Materialbett abhängt und kleinere Partikel zu einer höheren Dämpfung führen, wurden in diesem Fall auch die kleinen Partikel simuliert. Die Partikelgrößenverteilung für die Simulation entspricht der ursprünglichen Partikelgrößenverteilung aus der Schüttgutprobe der Sinteranlage (Tabelle 1). Es ist zu erwähnen, dass in diesem Fall nur die Größenfraktionen 10 – 16, 16 – 25 und 25 – 40 mm bruchfähig waren. Diese wurden in der Simulation durch polyedrische, kugelförmige Partikel mit den Durchmessern von 16, 25 und 40 mm dargestellt. Für die Fraktionen 6 – 10, 40 – 50 und 50 – 100 mm liegen keine experimentellen Daten vor. Der Feinanteil und die nicht bruchfähigen Partikel wurden in den Simulationen durch Kugeln mit einem Durchmesser von 6, 10, 50 und 100 mm dargestellt. Es wurde eine Gesamtmasse von 122,9 kg Sinter simuliert, was bei dieser Partikelgrößenverteilung 160.512 Partikeln entspricht.

Die Ergebnisse der Evaluierung des Partikelbruchs für 5 U/min (Verringerung der Entmischungseffekte) und 30 U/min (Energierückgewinnung) sind in Bild 10 dargestellt, die den Anstieg der Massenanteile für jede Partikelgröße aufgrund des

Bunkerfüllprozesses zeigt. Das Diagramm enthält nicht die Größenfraktionen 40 – 50 und 50 – 100 mm, da 50- und 100-mm-Partikel in dieser Simulation nicht bruchfähig waren. Beim Fall mit der Durchströmerturbine bei 5 U/min tritt mehr Partikelbruch auf, und im Vergleich zum Fall ohne Turbine wird in diesem Fall etwa 1 % mehr Feingut erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass der Partikelbruch hauptsächlich durch Schläge auf die Schaufelkanten erfolgt, wo auch der meiste Verschleiß auftritt, und dass die Erzeugung von Feingut hauptsächlich auf den Abrieb zwischen den Sinterpartikeln innerhalb der Turbine zurückzuführen ist. Deutlich weniger Parti-

kelbruch tritt auf, wenn die Turbine zur Energierückgewinnung mit einer höheren Drehzahl von 30 U/min betrieben wird. Bei 30 U/min fallen 0,5 % weniger Feinanteile an als im Fall ohne Turbine. Es wurde angenommen, dass die Turbine bei höheren Drehzahlen eine noch partikelschonendere Wirkung hat, aber auf eine bestimmte Drehzahl begrenzt ist, da die partikelschonende Wirkung eines dämpfenden Materialbettes auf den Schaufeln bei höheren Drehzahlen ebenfalls abnimmt. Zu diesem Zweck wurde für diesen Fall die Feingutproduktion in Abhängigkeit von der Drehzahl untersucht (Bild 13). Ein Minimum für die Feingutproduktion wird bei 30 U/min festgestellt, was die Vermutung bestätigt.

Verschiedene Studien bestätigen, dass das Ersetzen eines freien Falls durch mehrere kleinere Fallereignisse zu weniger Partikelbruch führt^[30]. Die Materialdegradation ist also nicht nur von der Drehzahl, sondern auch von der Einbauhöhe der Turbine und dem Bunkerfüllstand abhängig. Die Verringerung des Partikelbruchs durch die Aufteilung der Fallhöhe in zwei kleinere Fallereignisse konnte mit den in dieser Arbeit beschriebenen Simulationen nicht bewertet werden. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass die Turbine zu einem geringeren Partikelbruch während eines gesamten Bunkerbefüllungsprozesses führt, was jedoch durch weitere Untersuchungen bestätigt werden muss.

Verschleiss

Da Sinter ein sehr abrasives Material ist, wurden Verschleißuntersuchungen durchgeführt. Die Versuche wurden in einer Sinteranlage mit einem Massenstrom von 300 t/h und Förderbandgeschwindigkeiten von 1,43 m/s durchgeführt. Es wurde das verschleißfeste Material Hardox 600 verwenden-

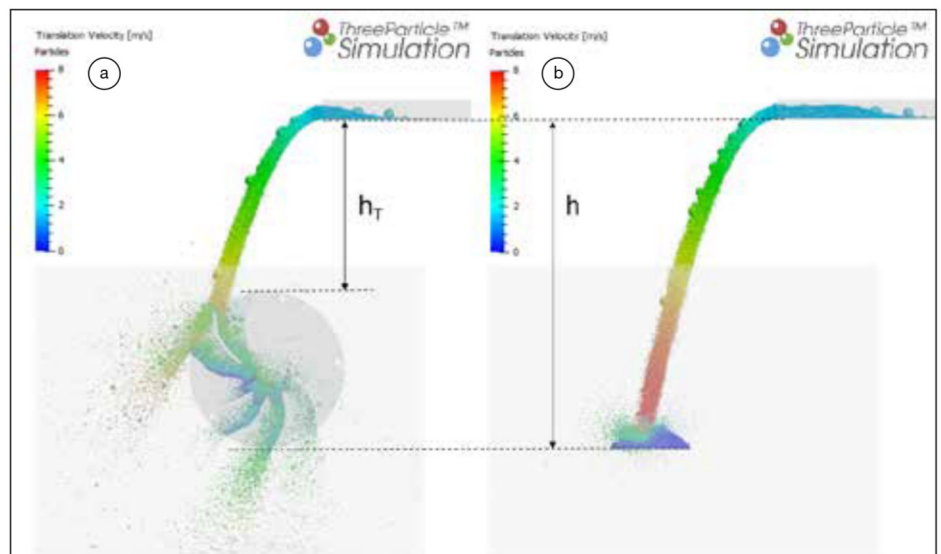


Bild 9: Bruchsimulation des Bunkerfüllprozesses mit dem neuartigen Bruchmodell für die DEM a) mit Durchströmerturbine mit 5 U/min ($h_T=1.756$ m) b) ohne Durchströmerturbine ($h=3.356$ m)^[5]

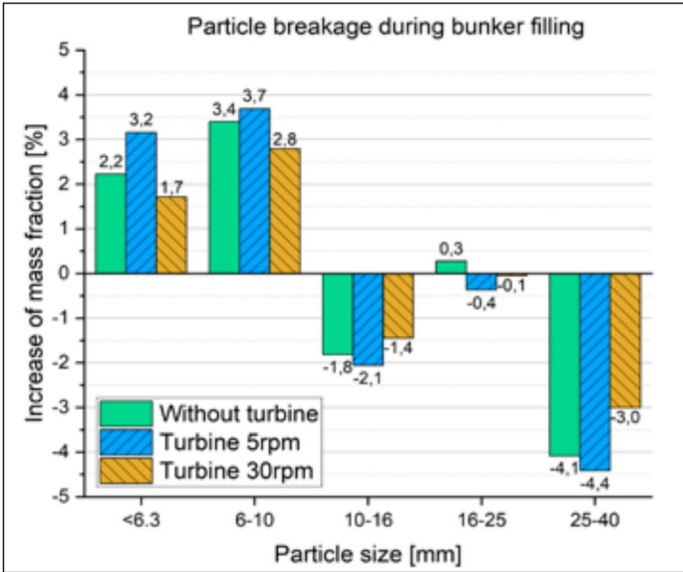


Bild 10: Partikelbruch während dem Befüllen des Bunkers ohne und mit der Durchströmturbine mit 5 U/min (Segregation) und 30 U/min (Energierückgewinnung) [7]

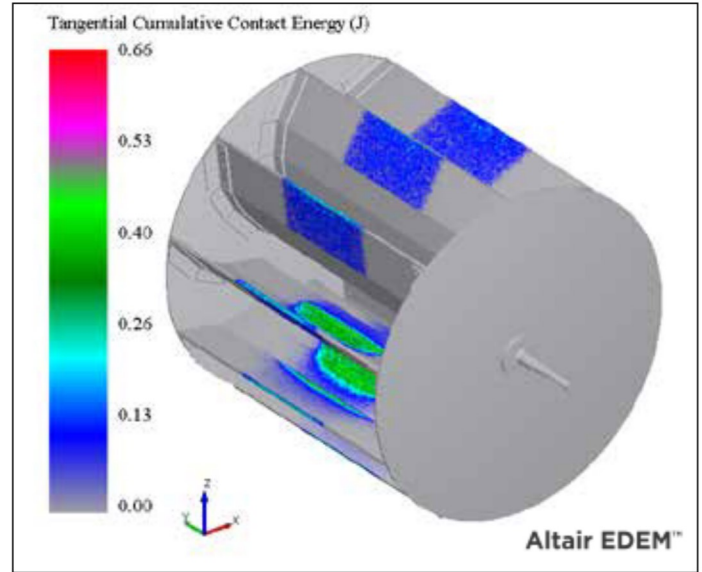


Bild 11: Verschleißuntersuchung an der Durchströmturbine mit kumulativen Kontaktenergien bei 35 U/min. [6]

det. Eine Platte (300x300 mm) von 15 mm Dicke wurde verschlissen (erste Durchgangslöcher), nachdem 23.114 t Sinter auf die Platte prallten. Dieser Versuch wurde mit Hilfe der DEM mit EDEM simuliert. Es wurde ein Dreiecksnetz von 10 mm verwendet und die Summe der tangentialen und normalen kumulativen Kontaktenergie nach 50 s Betrieb bestimmt. Anhand dieser Daten und der Simulationsergebnisse der Durchströmturbine bei verschiedenen Drehzahlen wurde der zu erwartende Verschleißwiderstand der Durchströmturbine im Betrieb unter den gleichen Bedingungen berechnet. Die Berechnungen ergaben, dass 102.980 t Sinter bei 5 U/min bzw. 174.791 t Sinter bei 35 U/min von der Durchströmturbine bewältigt werden können bis zu einer Oberflächenerosion von

15 mm auftritt, wenn die Turbine mit Hardox 600 ausgerüstet ist. Die Verschleißmaxima wurden an den Schaufelkanten festgestellt [5]. Da verschlissene Schaufelkanten nicht zu einem Betriebsausfall der Turbine führen, ist die tatsächliche Lebensdauer der Turbine wesentlich höher.

Leistung

Zusätzlich wurde das Drehmoment für verschiedene Drehzahlen ausgewertet (Bild 12). Die vom Auslauf des Förderbandes bis zur Unterkante der Turbine gemessene Fallhöhe beträgt 3,356 m (Turbindurchmesser 1,6 m). Die Geschwindigkeit des Förderbandes beträgt 1,43 m/s. Die Analyse der Simulationen zeigt eine starke Streuung und Spitzen aufgrund der Ein-

schläge von Partikeln unterschiedlicher Größe. Die Drehmomentdaten wurden mit der LOWESS-Methode (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) in der Visualisierungssoftware Origin geglättet. Aus den geglätteten Drehmomentkurven wurde das durchschnittliche Drehmoment für jede Drehzahl bestimmt und die durchschnittliche Ausgangsleistung berechnet, die beide in 13 dargestellt sind. Die höchste Leistungsabgabe wird bei 35 U/min festgestellt, was frühere Untersuchungen mit EDEM bezüglich der optimalen Drehzahl für die Energierückgewinnung in [5, 6, 8] bestätigt. Die berechnete theoretische Leistung unter Berücksichtigung der potentiellen und kinetischen Energie beträgt in diesem Fall 2.829 W bei 300 t/h. Somit beträgt der Wirkungsgrad der Turbine $\eta=39,5\%$

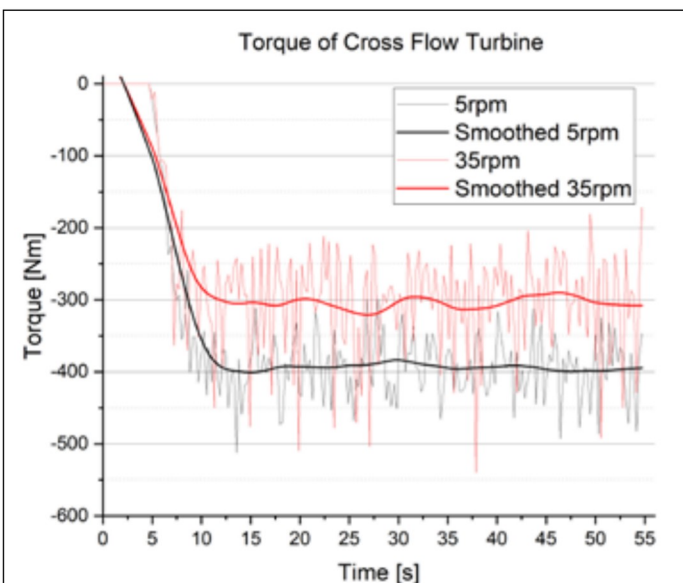


Bild 12: Evaluierung des Drehmoments an der Turbine bei unterschiedlichen Drehzahlen (300 t/h Sinter, Fallhöhe 3.356 m)

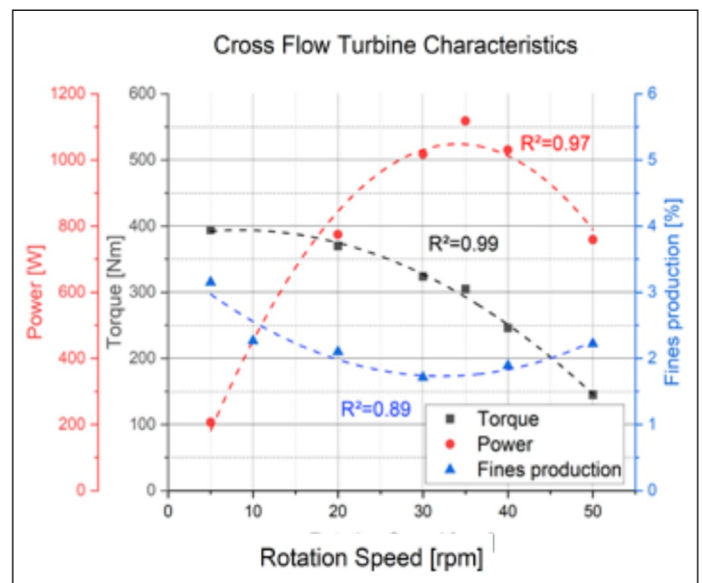


Bild 13: Feinguterzeugung, Drehmoment und Leistung der Turbine bei unterschiedlichen Drehzahlen mit 300 t/h Sinter.



Bild 14: Durchströmturbine a) im Betrieb mit 5 U/min b) überschüttet

bei 35 U/min. Bild 13 zeigt auch, dass die maximale Leistung bei einer ähnlichen Drehzahl wie jene für das Minimum der Feinguterzeugung liegt. Es wird angenommen, dass ein hoher Energietransfer vom Schüttgut zur Turbine ebenfalls zu einer Verringerung der für den Partikelbruch verfügbaren Energie führt.

Fazit

Die in dieser Arbeit vorgestellte Durchströmturbine reduziert Entmischungseffekte bei Lagerungsprozessen erheblich. Dies wurde am Beispiel eines Bunkers für Hochofensinter nachgewiesen. Es wird eine gleichmäßigere Korngrößenverteilung am Bunkerauslauf festgestellt. Die optimale Drehzahl zur Verringerung von Entmischungseffekten liegt bei 5 U/min und zur Energierückgewinnung bei 35 U/min. Die Erzeugung von Feingut durch die Turbine wurde anhand eines neuartigen Bruchmodells für die DEM bewertet. Bei 5 U/min wird durch die Turbine etwas mehr Feingut erzeugt, aber es wird angenommen, dass die Verringerung der Fallhöhe durch die Turbine diesen Effekt kompensiert. Bei höheren Drehzahlen (30 – 40 U/min) wird durch die Turbine deutlich weniger Feingut erzeugt. Dieser Turbine bietet somit eine einfache Vorrichtung zur Reduzierung von Entmischungseffekten oder zur Energierückgewinnung, die in bestehende Anlagen integriert werden kann. Die Durchströmturbine wurde kürzlich in einem Stahlwerk installiert und eine Versuchsreihe zur Bestätigung der beschriebenen Effekte wird durchgeführt (Bild 14 (a)). Eine Überschüttung der Turbine ist problemlos möglich, somit wird die Bunkerkapazität nicht beeinflusst (Bild 14 (b)).

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts MinSiDeg durchgeführt, das vom „Re-

search Fund for Coal and Steel (RFCS)“ der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 847285 finanziell unterstützt wurde. Besonderer Dank geht an A. Becker von Becker3D für die Unterstützung bezüglich der Simulationssoftware ThreeParticle, in der das neuartige Bruchmodell unter Verwendung eines API entwickelt wurde.

Quellenverzeichnis:

- [1] M. Prenner (2012) Solid state material driven turbine: International Patent F03G3/02 F03G3/04
- [2] M. Prenner (2015) Feststoffturbine zur Energierückgewinnung in Kombination mit Gurtförderanlagen. Berg Huettenmaenn Monatsh 160:21–31. <https://doi.org/10.1007/s00501-014-0327-0>
- [3] M. Prenner, C. Grübler, S. Zeiler (2018) Vorteile von Feststoffturbinen. Schüttgut: 68–72
- [4] M. Prenner (2019) Energy Recovering System for Moving Bulk Materials. EARTH 8:20. <https://doi.org/10.11648/j.earth.20190801.13>
- [5] M. Denzel, M. Prenner, N.A Sifferlinger (2023) Solid State Material Driven Turbine to Reduce Segregation during Bunker Filling. Berg Huettenmaenn Monatsh. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01311-6>
- [6] M. Prenner, M. Denzel, N.A Sifferlinger (2023) Cross Flow Turbine to Reduce Size Segregation Effects in Storage Processes. ICBMH 2023 - 14th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation
- [7] M. Denzel (2023) A Breakage Model for Discrete Element Simulations Applied to Iron Ore Sinter. PhD Thesis, University of Leoben. <https://doi.org/10.34901/mul.pub.2023.01>
- [8] M. Denzel, M. Prenner (2022) Solid State Material Driven Turbine to Reduce Segregation Effects in Bunkers. In: CHoPS 2022 - 10th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids, Salerno, Italy
- [9] J. Nohl, B. Dornick (2000) Stockpile Segregation: Technical Paper T - 551. Superior Industries
- [10] M. Prenner (2018) Simulationsparameterstudie - Sinterbunker (Simulation parameter study - Sinter bunkers). Project report, University of Leoben
- [11] M. Bruggler (2021) Rücksprungverhalten von Hochofensinter (Rebound behaviour of blast furnace sinter). Bachelor Thesis, University of Leoben
- [12] P. Kogler (2020) Analyse von Kontaktvorgängen und Optimierung von fördererischen Anlagen hinsichtlich Partikelbruchs bei Sinter. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben
- [13] M. Denzel, M. Prenner (2021) Minimierung des Sinterzerfalls mittels DEM (Minimization of Sinter Degradation with DEM). Berg- und Huettenmaennische Monatshefte (BHM) 166:76–81. <https://doi.org/10.1007/s00501-021-01081-7>
- [14] R. Remus, M.A Aguado-Monsonet, S. Roudier et al. (2013) Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control. Scientific and technical research series, vol 25521. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- [15] M. Denzel (2022) Partikelbruch in der Fördertechnik: Prüfmethode und Simulation mittels Diskrete Elemente Methode. Bergbau - Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt 73:436–440. <https://doi.org/10.34901/mul.pub.2023.03>
- [16] M. Denzel (2022) Partikelbruch in der Fördertechnik - Prüfmethode und Simulation mittels Diskrete Elemente Methode (Particle breakage during conveying processes - Test method and simulation with the discrete element method). In: Langefeld O (ed) 10. Kolloquium - Fördertechnik im Bergbau, 1st edn. Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, pp 89–101
- [17] M. Denzel, M. Prenner, N.A Sifferlinger (2022) A probabilistic particle replacement model to simulate bulk material degradation during conveying processes using DEM. Montanuniversität Leoben. Proceedings MHCL 2022 - 24th International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics in Belgrad, Serbia:29–36. <https://doi.org/10.34901/mul.pub.2023.02>
- [18] S. Kumar, S.K Kurtz (1993) Properties of a two-dimensional Poisson-Voronoi tessellation: A Monte-Carlo study. Materials Characterization 31:55–68. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(93\)90045-W](https://doi.org/10.1016/1044-5803(93)90045-W)
- [19] S. Kumar, S.K Kurtz (1994) Simulation of material microstructure using a 3D voronoi tessellation: Calculation of effective thermal expansion coefficient of polycrystalline materials. Acta Metallurgica et Materialia 42:3917–3927. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90170-8](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90170-8)
- [20] R. Riedinger, M. Habar, P. Oelhafen et al. (1988) About the Delaunay-Voronoi tessellation. Journal of Computational Physics 74:61–72. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(88\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90068-X)
- [21] L.M Tavares, A.S das Chagas (2021) A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM. Powder Technology 377:222–232. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.091>
- [22] P. Cleary (2001) Modelling comminution devices using DEM. Int J Numer Anal Meth Geomech 25:83–105. [https://doi.org/10.1002/1096-9853\(200101\)25:1<83:AID-NAG120>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1096-9853(200101)25:1<83:AID-NAG120>3.0.CO;2-K)
- [23] M. Sousani, A. Chagas, A. Saxena et al. (2019) Simulation of Surface Damage and Body Breakage by using DEM
- [24] P.W Cleary, M.D Sinnott (2015) Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 – Compression crushers. Minerals Engineering 74:178–197. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.021>
- [25] G.W Delaney, R.D Morrison, M.D Sinnott et al. (2015) DEM modelling of non-spherical particle breakage and flow in an industrial scale cone crusher. Minerals Engineering 74:112–122. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.013>
- [26] G.K Barrios, N. Jiménez-Herrera, L.M Tavares (2020) Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model. Advanced Powder Technology 31:2749–2758. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.011>
- [27] M. Denzel, M. Prenner, N.A Sifferlinger (2022) Development of an automated single particle impact tester for iron ore sinter. Minerals Engineering 175:107291. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107291>
- [28] M. Denzel, M. Prenner (2022) Partikelbruchvorhersage an einem dynamischen Übergabesystem und Vergleich mit einer herkömmlichen Schurre mittels DEM (Particle breakage prediction on a dynamic transfer system and comparison with a conventional chute using DEM). Berg Huettenmaenn Monatsh 167:66–75. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01197-4>
- [29] M. Denzel, M. Prenner (2021) Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs (Dynamic transfer system to reduce particle breakage). 25. Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2021:233–242. <https://doi.org/10.25673/36794>
- [30] R.K Sahoo (2007) Degradation characteristics of steel making materials during handling. Powder Technology 176:77–87. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.02.013>