

Untersuchungen zur quantitativen Bestimmung von abrasivem Verschleiß mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode

Investigations on the quantitative determination of abrasive
wear using the Discrete Element Method

Thomas Rößler
Andre Katterfeld

Lehrstuhl Fördertechnik
Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Der hohe Verschleiß, der durch die Handhabung von abrasiven, mineralischen Schüttgütern und Pulvern entsteht, ist im Bereich der Baumaschinen und Schüttgut-fördertechnik einer der Hauptgründe für Anlagenausfälle und reduzierte Standzeiten. Bisherige standardisierte Prüfverfahren zur Bewertung von Verschleißschutzmaterialien erlauben lediglich qualitative Aussagen über deren Eignung ohne Berücksichtigung der jeweiligen Anlagengeometrie. In diesem Beitrag wird die Möglichkeit einer standardisierten Kalibrierung der Parameter der Verschleißmodelle in der Diskrete Elemente Methode zur quantitativen Bestimmung von abrasivem Verschleiß untersucht.

[Schlüsselwörter: Abrasiver Verschleiß, Diskrete Elemente Methode, DEM, Kalibrierung]

In the field of construction machinery and bulk material handling technology, one of the main reasons for system failures and reduced service life time is the high wear caused by the handling of abrasive, mineral bulk materials and powders. Up to now, standardized test methods for the evaluation of wear-resistant materials only permit qualitative statements on their suitability without considering the respective plant geometry. This article examines the possibility of a standardized calibration of wear model parameters in the Discrete Element Method for the quantitative determination of abrasive wear.

[Keywords: Abrasive Wear, Discrete Element Method, DEM, Calibration]

1 EINLEITUNG

Nach einer Studie der Aachener Gesellschaft für Tribologie werden die Kosten für die jährlich durch Reibung

und Verschleiß – ohne Berücksichtigung der Aufwendungen für Instandsetzungen und Produktionsausfall – entstehenden Schäden in Deutschland auf 35 Mrd. EUR geschätzt [HIL15]. Im Bereich der Baumaschinen und Schüttgut-fördertechnik ist der Hauptgrund für Anlagenausfälle und Stillstandzeiten der hohe Verschleiß, der durch die Handhabung von hoch abrasiven, mineralischen Schüttgütern und Pulvern entsteht. Dieser Verschleiß ist dabei durch die Aufgabe der Förderanlage oder Baumaschine bedingt und lässt sich nicht gänzlich vermeiden. Auf Grund der komplexen Geometrie der Förderanlagen und Baumaschinen und der Interaktion zwischen Schüttgut und Anlage sind herkömmliche analytische und experimentelle Methoden zur Bestimmung der Art und Lage von Verschleißbildern daher nur bedingt geeignet. Die bestehenden Ansätze der Verschleißvorhersage auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) beruhen überwiegend auf der qualitativen Lokalisierung von Verschleißerscheinungen und der quantitativen Beschreibung von wirkenden Kräften. Daher können bisher nur eingeschränkt Empfehlungen erstellt werden, wo Verschleißschutzmaßnahmen notwendig sind, jedoch nicht welche am besten geeignet sind und welche Lebensdauer bei der Wahl eines spezifischen Verschleißschutzmaterials zu erwarten ist.

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über die in der Schüttguttechnik relevanten Verschleißmechanismen sowie deren Implementierung und Verifizierung in der DEM gegeben. Aufbauend werden die Ergebnisse experimenteller Langzeitversuche an einem Verschleißversuchsstand für verschiedene Paarungen aus Schüttgut und Verschleißprobenmaterialien unter variierenden Belastungen präsentiert. Es wird gezeigt wie auf Basis der Experimente die Kalibrierung des DEM-Verschleißmodells für die jeweiligen Paarungen durchgeführt werden kann. Abschließend werden die Ergebnisse aus den Kurzzeitsimulationen (< 10 s) mit den Langzeitexperimenten (> 50 h) gegenübergestellt und diskutiert.

2 GRUNDLAGEN DES ABRASIVEN VERSCHLEISSES

Die Komplexität des Verschleißes ergibt sich in der Regel aus der Überlagerung verschiedener Wirkmechanismen, auf die der Volumenverlust eines Probekörpers zurückzuführen ist. Je nach mechanischem Kontakt kann der Verschleiß in die in Abb. 1 dargestellten Gruppen und Untergruppen eingeteilt werden. Diese setzen sich in der Regel aus den Hauptmechanismen Abrasion, Adhäsion, tribochemische Reaktion und Oberflächenermüdung zusammen [DIN50320].

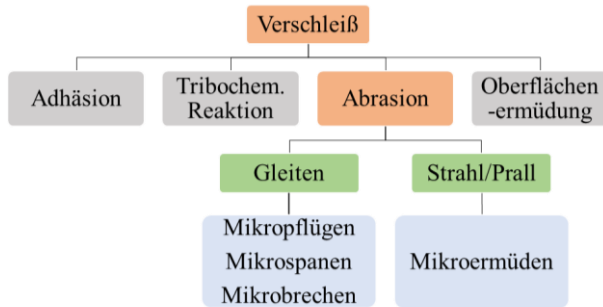


Abbildung 1. Systematische Gliederung der Verschleißmechanismen in Anlehnung an [DIN50320][FOR14]

Für die meisten Anwendungsfälle in der Schüttgutfortertechnik ist der durch Abrasion induzierte Verschleiß dominierend. Dieser lässt sich nach der Art der Relativbewegung zwischen dem Schüttgut und der beanspruchten Oberfläche in Gleitverschleiß und Strahlverschleiß untergliedern (Abb. 2). Häufig werden diese Verschleißarten zusätzlich durch eine Roll- oder Wälzbewegung der einzelnen Partikel überlagert, deren Einfluss auf den Gesamtverschleiß der Bauteile im Allgemeinen vernachlässigbar ist und nicht weiter berücksichtigt wird.

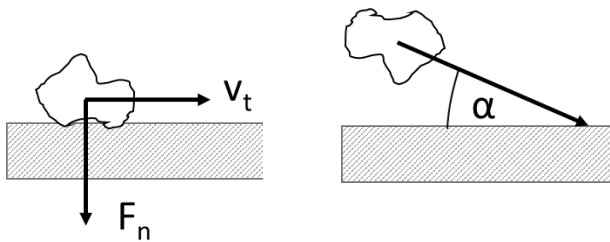
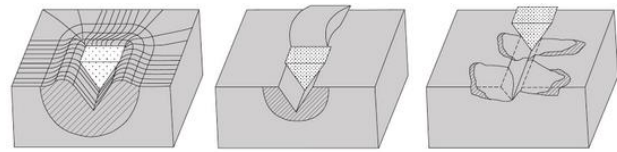


Abbildung 2. Relativbewegung zwischen Partikel und Probenoberfläche beim Gleit- (links) und Strahlverschleiß (rechts)

In Folge des Gleitverschleißes einzelner Partikel kommt es zur Veränderung der Oberfläche in Form des Mikrospanens und des Mikropflügens. Das Mikrospanen tritt insbesondere bei Partikeln mit scharfen, harten Kanten auf, während das Mikropflügen durch die Belastung der Oberfläche durch weichere Partikel mit einer runderen Partikelform hervorgerufen wird. Diese verdrängen das Material in der Werkstückoberfläche ohne es von diesem zu

trennen. Das Mikrobrechen ist durch das Ausbrechen einzelner Materialteilchen gekennzeichnet und tritt zusätzlich bei spröden Werkstoffen auf.



Mikropflügen Mikrospanen Mikrobrechen

Abbildung 3. Arten der Werkstoffschädigung durch abrasiven Verschleiß [HE114]

Die Grundlagen zur analytischen Beschreibung des Volumenverlustes durch abrasiven Gleitverschleiß für duktile Werkstoffe, wie beispielsweise Stahl- oder Aluminiumlegierungen, bilden die experimentellen Untersuchungen an Festkörpern von Archard [ARC53]. Das resultierende Verschleißgesetz nach Archard besagt, dass der Festkörperverschleiß eines metallischen Pins sowohl proportional zur wirkenden Normalkraft F_N als auch zu der zurückgelegten Strecke Δs ist und sich reziprok proportional zur Härte H der Verschleißoberfläche des weicheren Kontaktpartners verhält. Daraus folgt für den durch Gleitverschleiß verursachten Volumenverlust:

$$\Delta V_{Gleit} = \frac{K}{H} F_N \Delta s = \frac{K}{H} F_N v_t \Delta t . \quad (1)$$

Der Faktor K ist ein dimensionsloser Beiwert, der von den Werkstoffeigenschaften der Kontaktpartner und den Bedingungen des Kontaktes abhängig ist [ARC53]. Weiter vereinfacht wird die Formel (1) häufig wie folgt angegeben:

$$\Delta V_{Gleit} = k_{A,V} F_N \Delta s = k_{A,V} F_N v_t \Delta t . \quad (2)$$

In diesem Fall ist k_A (in mm^3 / Nm) der Koeffizient des Gleitverschleißes nach Archard und abhängig von den Eigenschaften der beiden Kontaktpartner. Dabei berücksichtigt dieser Faktor eine Vielzahl von Eigenschaften der Kontaktparameter, die den Verschleiß beeinflussen, wie beispielsweise die Form und die Härte des Partikels sowie die Härte und die Rauheit der Werkstückoberfläche. Die voranstehende Beschreibung gilt für den Kontakt eines Einzelpartikels mit einer Probenkörperoberfläche.

Zur Beschreibung des abrasiven Strahlverschleißes bei duktilen Werkstoffen hat das Finnie-Modell [FIN60] weite Verbreitung gefunden, welches sich vereinfacht in der folgenden Form darstellen lässt [JAY07]:

$$\Delta V_{Strahl} = k_{f,v} m_P v_P^2 f(\alpha) , \quad (3)$$

mit:

$$f(\alpha) = \begin{cases} (\sin 2\alpha - 3 \sin^2 \alpha) & \forall \alpha \leq 18,5^\circ \\ \left(\frac{1}{3} \cos^2 \alpha\right) & \forall \alpha \geq 18,5^\circ \end{cases} \quad (4)$$

Hierbei ist m_p die Masse des Partikels, v_p die Aufprallgeschwindigkeit des Partikels und α der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Partikels und der Oberfläche (Abb. 2) und $k_{f,v}$ (in mm^3 / Nm) der Verschleißkoeffizient nach Finnie. Das Modell besagt, dass der Volumenverlust des Strahlens bei kleineren Aufprallwinkeln kritischer zu bewerten ist als bei größeren Aufprallwinkeln, da die einzelnen Körner eine Schnittbewegung in dem Grundkörper ausführen. Dieses ergibt sich aus experimentellen Untersuchungen an duktilen metallischen Werkstoffen. Unter Berücksichtigung beider Modelle gilt für den Gesamtverschleiß, der durch ein Einzelkorn an einem Probekörper verursacht wird:

$$\Delta V_{ges} = \Delta V_{Gleit} + \Delta V_{Strahl} \quad (5)$$

Die Koeffizienten $k_{A,v}$ und $k_{f,v}$ werden allgemein durch experimentelle Untersuchungen bestimmt, wobei bisher keine standardisierte Vorgehensweise in der Schüttguttechnik existiert. Eine Bestimmung kann beispielweise auf Basis des Kontaktes eines einzelnen Kornes erfolgen [JAY07][CHE17]. Da die Korneigenschaften innerhalb eines Schüttgutes stark variieren können, ist bei dieser Vorgehensweise eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen notwendig, um eine verlässliche Aussage zu einem gemittelten k -Wert für das gesamte Schüttgut zu treffen [CHE17]. Nachteilig in Bezug einer realitätsnahen Darstellung ist zudem, dass die Körner für die Versuche in der Regel an einem Probenhalter fixiert werden und eine freie Interaktion zwischen den einzelnen Körnern untereinander als auch mit der Werkstückoberfläche nicht berücksichtigt wird.

Aus diesem Grund erscheint es für die Anwendung in der Schüttguttechnik realitätsnäher, Experimente zu verwenden, bei denen es zu einer nahezu freien Interaktion zwischen der Probenoberfläche und einem Schüttgutagglomerat kommt [FOR14][WIC99][WIC04]. Analog zu den Untersuchungen am Einzelkorn werden bei diesen die Randbedingungen (Normalkraft, Verschleißstrecke) variiert und ein makroskopischer abrasiver Verschleiß (Volumen-/Massenverlust) eines Probekörpers gemessen. Aus diesem kann eine makroskopische Verschleißintensität I_v ermittelt werden, die charakteristisch für die Kombination aus Schüttgut und Probekörper ist.

Obwohl das Finnie-Modell in der Schüttgutförder-technik meist universeller eingesetzt werden kann als das Archard-Modell, konzentrieren sich die Untersuchungen im ersten Schritt auf den reinen Gleitverschleiß. Die Grundidee zur Simulation von abrasiven Gleitverschleißes mit Hilfe der DEM besteht folglich in der Kalibrierung des Koeffizienten des Gleitverschleißes k_A des Einzelpartikels anhand einer makroskopischen Verschleißintensität I_v un-

ter Berücksichtigung einer realitätsnahen Interaktion zwischen den einzelnen Partikeln und der Werkstückgeometrie. Bevor in Kapitel 4 der Aufbau eines solchen Kalibrierungsexperimentes für die Ermittlung des Koeffizienten des Gleitverschleißes k_A erläutert wird, wird zunächst kurz die DEM sowie die Verifizierung des Verschleißmodells innerhalb dieser Methode vorgestellt.

3 DISKRETE ELEMENTE SIMULATIONEN

3.1 GRUNDLAGEN DER DEM

Die von Cundall und Strack erstmal 1979 vorgestellte Diskrete Elemente Methode dient der Modellierung der Bewegung und der Interaktion einer großen Anzahl an Partikeln in einem Mehrkörpersystem wie es z.B. durch Schüttgüter gebildet wird [CUN79][KUN12]. Grundlage des Verfahrens ist die Berechnung der wirkenden Kräfte zwischen den Partikeln bzw. zwischen einem Partikel und einer angrenzenden Fläche. Dabei werden die Partikel und Wände zu Beginn der Simulation mit einer Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit generiert. Anschließend wird für jedes Partikel auf Basis der Summe der einwirkenden Kräfte (Kontakt-, Gravitationskräfte) eine resultierende Kraft ermittelt. Durch die Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichung wird für jedes Partikel i des Mehrkörpersystems durch zweifache zeitliche Integration über einen kurzen Zeitschritt die neue Position und Geschwindigkeit für jedes Teilchens bestimmt [KUN12]:

$$m_i \ddot{x}_i = F_i \rightarrow \int \ddot{x}_i dt = \dot{x}_i \rightarrow \int \dot{x}_i dt = x_i \quad (6)$$

$$J_i \dot{\omega}_i = M_i \rightarrow \int \dot{\omega}_i dt = \omega_i \rightarrow \int \omega_i dt = \varphi_i \quad (7)$$

Die Verschiebung der Teilchen führt zur Neubildung und Auflösung von Kontakten, sodass nach jedem Integrationsschritt eine erneute Ermittlung der Kontaktpaare erfolgen muss. Dieser Ablauf aus Kontakterkennung und Integration der Bewegungsgleichungen ist in Abb. 4 dargestellt und wird bis zum Erreichen einer zuvor definierten Realzeit bzw. eines Abbruchkriteriums wiederholt.

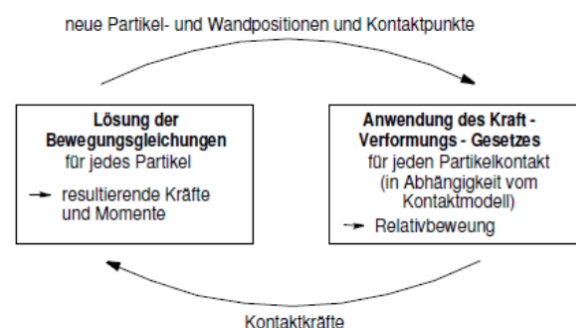


Abbildung 4. Berechnungszyklus der DEM [KUN12]

Die auf ein Partikel wirkenden Kräfte werden anhand geeigneter Kontaktmodelle ermittelt. Dabei wird der Ansatz starrer Partikel mit „weichen“ Kontakten verwendet, bei dem die Kontaktinteraktion auf einer virtuellen Überlappung zwischen den einzelnen Partikeln untereinander bzw. zwischen den Partikeln und den Wandelementen beruht. Durch diese Überlappung wird eine Rückstellkraft zwischen den Partikeln bewirkt, die durch geeignete Kontaktmodelle (z.B. lineares Federmodell, nicht lineares Modell nach Hertz-Mindlin) berechnet werden kann. Während des Kontakts kann Energie durch Berücksichtigung einer Dämpfungskraft (meist viskoses Dämpfungsmodell) sowie durch Reibung (Coulomb'sche Gleitreibung und Rollreibung) dissipiert werden (Abb. 5).

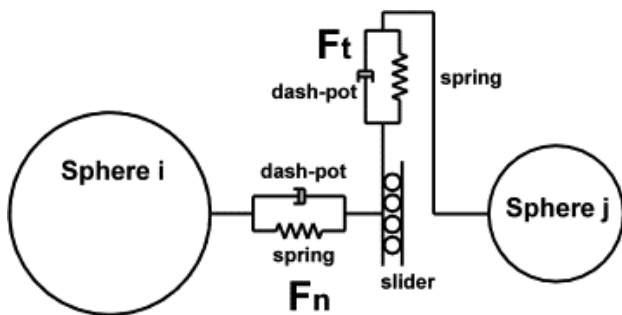


Abbildung 5. Klassisches DEM-Kontaktmodell [CHU08]

Zur Simulation der Kräfte wird in diesem Beitrag das Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin (no-slip) angewendet. Es enthält überwiegend bekannte Materialparameter und beschreibt jeweils die Normal- und Tangentialkräfte, die auf ein Partikel an den Kontaktstellen wirken.

Da in der DEM aufgrund der numerischen Effizienz meist kugelförmige Partikel verwendet werden, kommt dem Rollreibmodell eine besondere Bedeutung zu. Nach [WEN12] kann unter dieser Rollreibung der Widerstand eines realen Kornes gegen eine Rollbewegung verstanden werden, der auf Grund der nicht-kugelförmigen Kornform entsteht. Als numerisch effizient, physikalisch korrekt und gleichzeitig realitätsnahes Rollreibmodell hat sich das Rollreibmodell nach [WEN12] mit elastisch-plastischen Feder-Dämpfer-System etabliert.

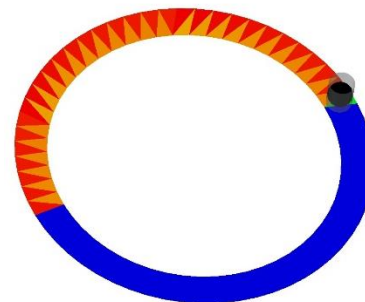
Für eine detailliertere Darstellung der Diskrete Elemente Methode sind u. a. [KLO10], [CUN79] heranzuziehen.

3.2 VERIFIZIERUNG DES VERSCHLEISSMODELLS

In dieser Arbeit wird zur Durchführung der DEM-Simulationen die Open-Source Software LIGGGHTS® in der Version 3.4 verwendet [KLO10]. Durch die Verwendung einer Open-Software ist es möglich, eigene Modelle zu implementieren bzw. bestehende Modelle an die Anforderungen anzupassen. Zur Beschreibung des Verschleißes durch Strahlen kann auf ein bereits in der Software imple-

mentiertes Finnie-Modell für den Kontakt zwischen weichen, sich überlappende Partikeln und Wandgeometrien zurückgegriffen [KLO10]. Da in dieser Arbeit der durch Gleiten verursachte Verschleiß im Vordergrund steht, wird zusätzlich das Gleitverschleißmodell nach Archard implementiert.

Um die korrekte Implementierung des Gleitverschleißmodells in der DEM zu verifizieren, wird ein einfaches Pin-on-Disk-Testszenario simuliert und mit den Ergebnissen der analytischen Berechnungen aus dem voranstehenden Kapitel verglichen. Zur Verifizierung des Gleitverschleißes wird ein Partikel in einem reibungsfreien Rohrabchnitt auf einem Ring positioniert, der anschließend mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit ω rotiert (Abb. 6). Der Abstand vom Partikelmittelpunkt zum Mittelpunkt der Scheibe beträgt $a = 0,125$ m. Folglich berechnet sich die Tangentialgeschwindigkeit zwischen Partikel und Ring als $v_r = \omega a$, sowie die zurückgelegte Strecke des Partikels pro Umdrehung $s/U = 2\pi a$.



Verschleiß: 0 > 0.00072 mm³

Abbildung 6. Simulationsmodell eines Pin-on-Disk Versuchs mit farblicher Darstellung des Volumenverlustes der einzelnen Elemente nach 1/2 Umdrehungen

Für die Verifizierungssimulationen werden die Einflüsse der in Tabelle 1 zusammengefassten Material- und Kontaktparameter für unterschiedliche Drehzahlen der Scheibe untersucht.

Tabelle 1. Material- und Kontaktparameter der Simulation

Parameter	Si	Basis	Intervall
Partikeldurchmesser	m	0,01	0,01 ; 0,04
Partikelmasse	kg	0,01	0,01 ; 0,04
Scherrmodul	N mm ⁻¹	10e7	10e7 ; 10e9
Poission-Zahl	-	0,3	0,1 ; 0,5
Stoßzahl	-	0,5	0,1 ; 0,9
Wandreibwert	-	0,5	0,1 ; 0,9
Wandrollreibwert	-	0,5	0,1 ; 0,9
Zeitschritt	s/step	1e-6	-
Verschleißkoeff	mm³ / Nm	1	1-3

Im Fokus der Untersuchungen stehen der Einfluss der Partikelmasse und der Partikelgeschwindigkeit, da diese die Berechnung des Verschleißes direkt beeinflussen. Die verbleibenden Parameter hingegen sind zu untersuchen, da diese die Berechnung der Kontaktkräfte innerhalb der DEM beeinflussen.

Das folgende Diagramm (Abb. 7) zeigt exemplarisch den Vergleich des simulierten Gleitverschleißes (Messpunkte) und der analytischen Berechnungen (Geraden) nach Gleichung (2) für unterschiedliche Partikelmasse. Der aus der DEM-Simulation berechnete Volumenverlust für die unterschiedlichen Belastungen stimmt mit dem analytischen Volumenverlust überein. Die mittlere Abweichung beträgt 0,13%.

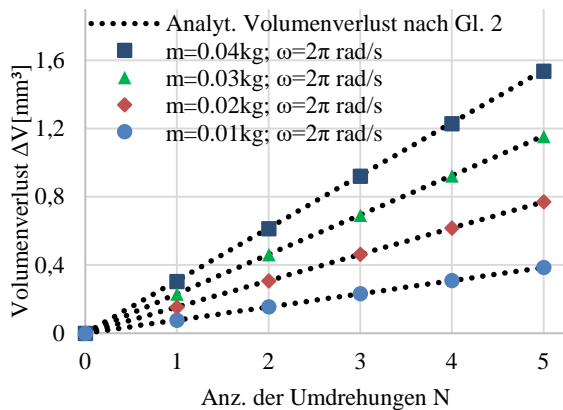


Abbildung 7. Vergleich des simulierten und des analytisch berechneten Volumenverlustes nach Archard

Diese Übereinstimmung des analytischen und simulierten Volumenverlustes wird auch für die variierende Tangentialgeschwindigkeiten des Partikels bzw. zurückgelegte Strecke und Verschleißfaktor erreicht. Die Variation der restlichen Parameter aus Tabelle 1 zeigt außer für die Stoßzahl keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Die Abweichungen gegenüber der Basis-Konfiguration betragen 0,000025%. Bei der Stoßzahl hingegen kommt es für den Maximalwert von 0,9 zu einer Abweichung von 1,23% gegenüber der Basiskonfiguration.

4 EXPERIMENTELLE VERSCHLEISSUNTERSUCHUNGEN

4.1 VERSUCHSSTAND

Der für die Bestimmung des abrasiven Gleitverschleißes entwickelte Versuchsstand ist in Abb. 8 dargestellt und orientiert sich grundsätzlich an den schon in [WIC99] und [WIC04] beschriebenen Versuchsständen. Jedoch ist er mit zusätzlicher Messtechnik zur Bestimmung der sich einstellenden Schüttgutoberfläche und der Schwertkraft ausgestattet.



Abbildung 8. Aufbau des Verschleißversuchsstandes

Zur Vereinfachung zeigt Abb. 9 den prinzipiellen Aufbau des Versuchsstandes in der Draufsicht. Der Versuchsstand beinhaltet einen rotierenden ringförmigen Aufnahmetrog mit einem inneren Durchmesser von 500 mm und einem äußeren Durchmesser von 1000 mm, in dem sich das Schüttgut befindet. Der Aufnahmetrog fördert das Schüttgutbett unter der eingezeichneten Kompaktierungsplatte (130 x 180 mm) und den Verschleißprobenplatten (100 x 130 mm) mit einer variabel einstellbaren Drehzahl von 1 U/min bis 20 U/min entlang. Dieses entspricht einer Geschwindigkeit von 0,04 m/s bis 0,785 m/s bezogen auf den mittleren Durchmesser des Troges von 750 mm. Das eingezeichnete Schwert steht senkrecht im Schüttgutbett und bewirkt eine stetige Umwälzung des Schüttgutes, um eine gleichmäßige Beanspruchung des gesamten Schüttgutes zu gewährleisten.

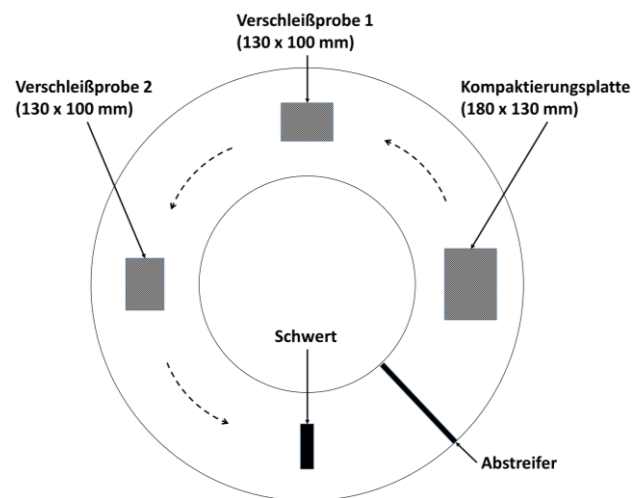


Abbildung 9. Prinzipieller Aufbau des Verschleißversuchsstandes in der Draufsicht

Die Lagerung der Kompaktierungsplatten- und Verschleißprobenhalterungen erfolgt über einen gegengewichteten Lastarm (Abb. 10), der es ermöglicht, die Positionierung der Verschleißproben entsprechend der Höhe des Schüttgutbettes anzupassen. Darüber hinaus sind die Probenhalterungen durch ein Kippgelenk mit den Lastarmen verbunden, wodurch eine Neigung der Verschleißproben gegenüber der Oberfläche des Schüttgutes und so eine

Feinjustierung (Anstellwinkel 0° bis 3°) während der Experimente möglich sind. Dies ist notwendig, um ein Überlaufen der Platten (zu geringe Neigung) und einen ungleichmäßigen Verschleiß (zu große Neigung) zu vermeiden. Durch die Platzierung von Gewichten auf den Probenplattenhalterungen wird die wirkende Normalkraft eingestellt.

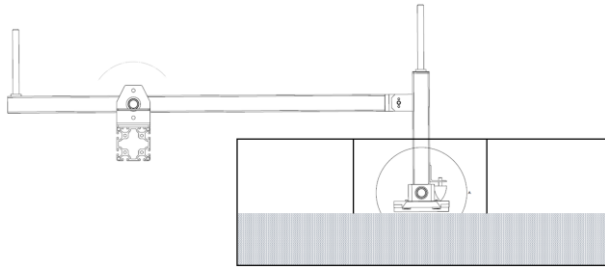


Abbildung 10. Aufbau und Funktionsweise der gegengewichtig gelagerten Lastarme in der Schnittansicht

Der Verschleiß kann sowohl an den zwei Hauptverschleißproben als auch an der Kompaktierungsplatte durch die Ermittlung des Massenverlustes der einzelnen Proben in definierten Messintervallen mittels Feinmesswaage bestimmt werden, wozu ein Ausbau der Proben notwendig ist.

4.2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND VERWENDETE VERSUCHSMATERIALIEN

Für die experimentellen Verschleißuntersuchungen wird als Schüttgut Porphyrspilit gegen zwei Verschleißprobenmaterialien unter variierenden Randbedingungen getestet. Um die Versuchsdauer möglichst kurz zu halten, werden in den Untersuchungen zunächst Verschleißprobenmaterialien mit geringen Härtewerten eingesetzt. Der erste Verschleißprobenwerkstoff ist eine Aluminiumlegierung mit einer Festkörperdichte von 3200 kg/m^3 und einer Vickershärte von 64 HV. Der zweite Verschleißprobenwerkstoff ist ein Werkzeugstahl ST-52 mit einer Festkörperdichte von 7800 kg/m^3 und einer Vickershärte von 136 HV.

Als abrasives, hartes Schüttgut wird das in Abb. 11 dargestellte Porphyrspilit verwendet, das eine hohe mineralische Härte von 7 Mohs [SCHÖ10] aufweist. Die zugehörige Korngrößenverteilung ist der Abb. 12 zu entnehmen. Der Porphyrspilit hat eine Schüttdichte von 1394 kg/m^3 . Der Wandreibungskoeffizient beträgt für die Paarung zwischen Porphyrspilit und der Aluminiumlegierungsprobe 0,34 und für die Paarung zwischen Porphyrspilit und St-52 0,37. Der Böschungswinkel, der mit Hilfe eines Zylinder-Hochziehversuches ermittelt wird [ROE16], beträgt $37,4^\circ$.



Abbildung 11. Probe des Porphyrsplits

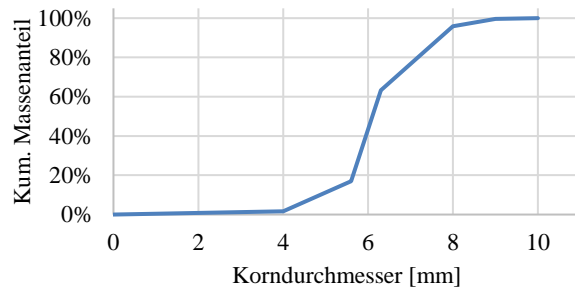


Abbildung 12. Korngrößenverteilung des Porphyrsplits gemäß Siebturmanalyse

Zu Beginn der Versuche wird der Trog bis zu einer Höhe von 120 mm mit Schüttgut befüllt, was einem Volumen von ca. $0,15 \text{ m}^3$ entspricht. Anschließend werden die Versuchsplatten in den jeweiligen Halterungen der zuvor austarierten Lastarme befestigt und mit den gewünschten Gewichten belastet. In Abhängigkeit des Schüttgutes, des Gesamtgewichtes der Proben und der gewählten Geschwindigkeit des Schüttgutbettes wird der Winkel der Probenplatte so eingestellt, dass es gerade nicht zu einem Überlaufen der Probenplatten mit Schüttgut kommt.

Die Gesamtverschleißstrecke beträgt 60 km. Die ersten 20 km dienen dabei dem Einfahren der Verschleißproben, da sich der Verschleiß zu Beginn degressiv und nicht linear verhält bis eine verschlissene Oberfläche hergestellt ist. Da dieser degressive Verschleiß für die Untersuchungen von Langzeitverschleiß nicht relevant ist, erfolgt die Messung des Massenverlustes für die verbleibenden 40 km Messstrecke in einem Intervall von $8 \pm 2 \text{ km}$. So wird sichergestellt, dass für alle Proben die gleichen Bedingungen gelten. Nach jedem Versuch wird das Schüttgut ausgetauscht.

In den Versuchen werden drei verschiedene Belastungszustände $m = \{2, 3, 4\} \text{ kg}$ für die Kombinationen aus Schüttgut und Verschleißprobenmaterialien durchgeführt. Die Geschwindigkeit beträgt 15 U/min. Daraus ergeben sich 6 Kombinationen bzw. 3 Versuche, da je Versuch 2 Kombinationen gleichzeitig getestet werden können. Die Belastung der größeren Kompaktierungsplatte wird während der Versuche unverändert mit $m = 3,15 \text{ kg}$ belastet.

4.3 ERGEBNISSE DER EXPERIMENTE

Die folgenden Abbildungen zeigen die Materialabnahme über die Strecke der einzelnen Verschleißproben für die Paarungen Porphyrsplit gegen die Aluminiumlegierung (Abb. 13) bzw. Stahl (Abb. 14) für die Belastungen mit 1, 2 und 3 kg der Verschleißprobenplatten. Es ist zu erkennen, dass der Masseverlust von der zurückgelegten Strecke linear abhängig ist. Vergleicht man zudem die Steigung der einzelnen Geraden, ist zu erkennen, dass der Masseverlust von der Belastung der Proben linear abhängig ist.

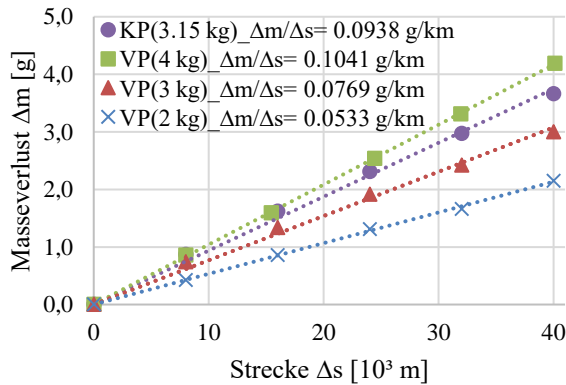


Abbildung 13. Experimenteller Masseverlust der Probplatten Aluminiumlegierung für unterschiedliche Belastungen

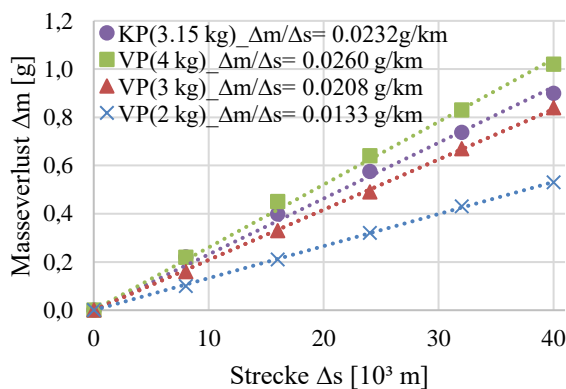


Abbildung 14. Experimenteller Masseverlust der Probplatten St-52 für unterschiedliche Belastungen

Setzt man den Massenverlust je Strecke der Verschleißprobenplatten VP ins Verhältnis zu der jeweiligen normalen Belastung, ergibt sich die folgenden mittleren massenbezogene Verschleißintensitäten:

$$I_{m, Al, exp} = 2,56 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-1} \text{ kg}^{-1} \quad (8)$$

$$I_{m, St, exp} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ kg m}^{-1} \text{ kg}^{-1} \quad (9)$$

Unter Berücksichtigung der Festkörperdichte der beiden Verschleißmaterialien und der wirkenden Normalkraft folgt für die volumetrischen Verschleißintensitäten:

$$I_{V, Al, exp} = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm} \quad (10)$$

$$I_{V, St, exp} = 8,76 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}. \quad (11)$$

5 KALIBRIERUNG DER DEM – VERSCHLEISSPARAMETER DES EINZELPARTIKELKONTAKTES

5.1 AUFBAU UND ABLAUF DER SIMULATION

Bevor die Kalibrierung der Verschleißparameter erfolgen kann, müssen die übrigen Parameter des Kontaktmodells durch Kalibrierung ermittelt und als konstante Werte übernommen werden. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die kalibrierten Material- und Kontaktparameter zusammengefasst.

Tabelle 2. Material- und Kontaktparameter der Simulation

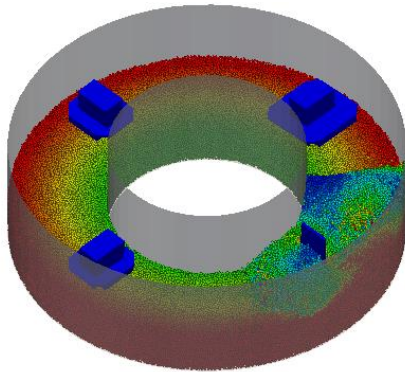
Parameter	Wert	Einheit
Partikeldurchmesser	3-12	mm
Scherrmodul	1e7	N/mm ²
Poisson-Zahl	0,30	-
Partikeldichte	2050	kg/m ³
Porosität	0,42	-
Stoßzahl	0,30	-
Wandreibwert Partikel - Stahl	0,37	-
Wandreibwert Partikel - Alu.	0,34	-
Reibwert Partikel - Partikel	0,50	-
Rollreibwert	0,50	-

Dabei werden die Parameter Partikeldurchmesser und -verteilung und die Wandreibwerte zwischen dem Schüttgut und den Wandproben direkt aus experimentellen Versuchen übernommen. Aus der Schüttdichte kann die Partikeldichte und die Porosität ermittelt werden. Die Reib- und Rollreibwerte zwischen den einzelnen Partikeln werden über eine Kalibrierung mittels Böschungswinkelexperiment und -simulation bestimmt [ROE16]. Die Werte Scherrmodul, Stoßzahl und Poissonzahl werden wegen dem zu erwartenden geringen Einfluss auf das Simulationsergebnis auf Basis von Erfahrungswerten approximiert.

Zur Durchführung der DEM-Kalibrierungssimulationen wird der Versuchsstand im Maßstab 1:1 in der DEM reduziert nachgebildet, wobei lediglich die Geometrien, die mit dem Schüttgut interagieren berücksichtigt werden. Abb. 15 zeigt den Versuchsstand im befüllten Zustand mit den Verschleißprobenplatten, der Kompaktierungsplatte, dem Schwert und dem Abstreifer. Die Einfärbung der Partikel kennzeichnet ihre aktuelle Geschwindigkeit.

Die vertikale Belastung der Verschleißproben- und Kompaktierungsplatte wird über eine gekoppelte DEM-MKS-Simulation realisiert. Die Verwendung einer MKS-DEM-Kopplung ermöglicht die notwendige Interaktion

zwischen den Partikeln und den über einen Lastarm gelagerten Verschleiß- und Kompaktierungsplatten. Zu weiteren Grundlagen der DEM-MKS-Kopplung wird auf [KUN12] verwiesen. So können in der Simulation die Positionen und Winkeleinstellungen sowie die Belastungen der einzelnen Proben und die Drehzahl des Troges 1:1 aus den Experimenten übernommen werden.



Partikelgeschwindigkeit: 0 > 0.75 m/s

Abbildung 15. Aufbau des Simulationsmodells des Verschleiß-Versuchsstandes zur Kalibrierung des Gleitverschleißes

Für die Kalibrierung des Verschleißes werden nach dem Aufsetzen der Verschleißplatten zwei Umdrehungen ausgeführt und der Masse- bzw. Volumenverlust der einzelnen Verschleißprobenplatten während der zweiten Umdrehung ermittelt, sodass entstehender Verschleiß während des Aufsetzens der Platten und des Anfahrens nicht berücksichtigt wird. Ziel der Kalibrierung ist es durch systematische Anpassung des Verschleißkoeffizienten des Einzelpartikels die ermittelten Verschleißraten entsprechend den experimentell erzielten Werten zu ermitteln.

5.2 ERGEBNIS DER KALIBRIERUNG

Aus der Kalibrierung ergeben sich die folgenden Werte für die Verschleißparameter $k_{A,V}$ des abrasiven Gleitverschleißes auf Basis des Einzelpartikels:

$$k_{A,V,Al,sim} = 1,349 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3 / \text{Nm} \quad (12)$$

$$k_{A,V,St,sim} = 1,479 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{Nm} \quad (13)$$

Die folgenden Abbildungen (Abb. 16, Abb.17) zeigen den Verlauf des simulierten Massenverlusts der Probenplatten der Verschleißsimulationen unter Verwendung der kalibrierten Verschleißkoeffizienten.

Der Vergleich der simulierten Verschleißraten (Abb. 16, Abb.17) mit den experimentellen Verschleißraten (Abb. 13, Abb.14) zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung. Die mittlere Abweichung der Werte beträgt 1,0 % für die Kalibrierung der Paarung Porphyrsplit gegen Aluminiumlegierung. Für die Kalibrierung gegen Stahls St-52

beträgt die mittlere Abweichung zwischen simulierten und experimentellen Verschleißraten 3,6 %.

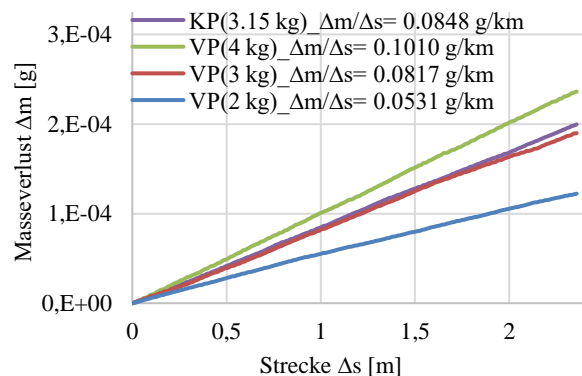


Abbildung 16. Simulierter Masseverlust der Probeplatten Aluminiumlegierung für unterschiedliche Belastungen

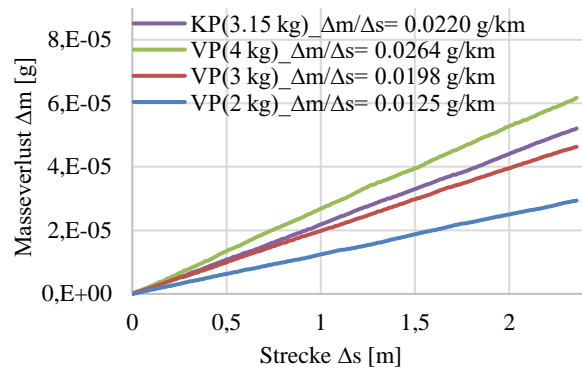


Abbildung 17. Simulierter Masseverlust der Probeplatten St-52 für unterschiedliche Belastungen

Durch Extrapolation der Geraden des simulierten Massenverlustes ist es somit möglich, den Verschleiß zu einem beliebigen Zeitpunkt vorherzusagen. Abb. 18 und Abb. 19 zeigen abschließend den Vergleich des extrapolierten simulierten Verschleißes mit den experimentellen Messwerten nach einer Strecke von 40 km für beide Paarungen inklusive der Abweichungen.

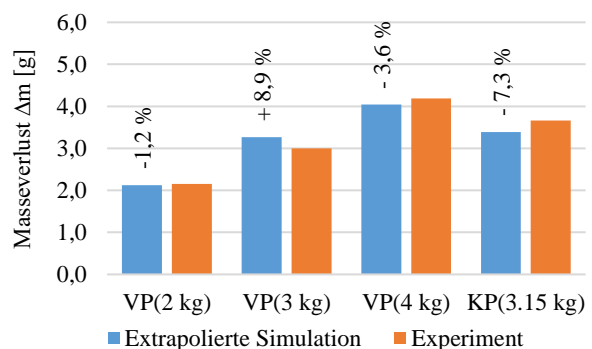


Abbildung 18. Vergleich des simulierten, extrapolierten Massenverlustes mit den experimentellen Werten für Aluminiumlegierung nach einer Strecke von 40 km

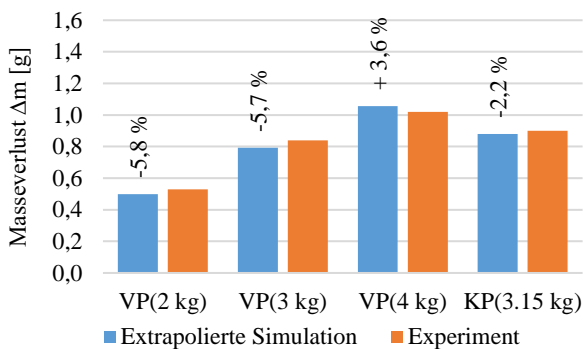


Abbildung 19. Vergleich des simulierten, extrapolierten Massenverlustes mit den experimentellen Werten für St-52 nach einer Strecke von 40 km

Die Ergebnisse zeigen, dass es mit der DEM auf Basis von Kurzzeitsimulationen einiger Sekunden durch Extrapolation möglich ist, den realen Gleitverschleiß mehrerer Stunden an Bauteilen durch Kalibrierung abzubilden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Ziel der vorgestellten Untersuchungen war es, die Möglichkeit zur quantitativen Bestimmung des abrasiven Verschleißes mit Hilfe der DEM aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurde ein klassisches Gleitverschleißmodell nach Archard in die Software LIGGGHTS[®] implementiert und verifiziert.

Für die notwendige Kalibrierung der Parameter des Verschleißmodells wurde ein Experiment vorgestellt, bei dem es zu einer freien Interaktion des Schüttgutes mit der Verschleißprobenoberfläche kommt. Dieses bietet gegenüber den Untersuchungen am Einzelkorn den Vorteil einer realitätsnahen Bestimmung eines gemittelten Parameters. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse des Verschleißes der Probekörper unter variierenden Belastungen konnten die Verschleißkoeffizienten des DEM-Verschleißmodells kalibriert werden, sodass es durch Extrapolation möglich ist, den Verschleiß zu einem beliebigen Zeitpunkt vorherzusagen.

Um die hier vorgestellten Ergebnisse der Kalibrierung weiter zu verallgemeinern, ist eine Validierung der Parameter notwendig. Dazu sind weitere Versuche und DEM-Simulationen zur Bestimmung des Verschleißes unter abweichenden Belastungen und an starr eingebauten Geometrien geplant. Die Validierungsuntersuchungen sollen anhand von industrierelevanten Problemstellungen, z.B. dem Verschleiß an Schurrenwandungen einer Übergabestelle untersucht werden. Lässt sich an diesen der Verschleiß mit den kalibrierten Parametern sicher vorhersagen, kann die Methode der Kalibrierung des Gleitverschleißes endgültig als erfolgreich angesehen werden.

Analog zu dem vorgestellten Vorgehen ist es notwendig ein geeignetes Experiment zur Kalibrierung des Verschleißkoeffizienten des Strahl- / Prallverschleißes zu entwickeln. Erst bei erfolgreicher Kalibrierung und Validierung der Parameter dieses Modells und der Zusammenführung beider Verschleißmodelle in der DEM wird es möglich sein, auf Basis der DEM-Simulation den Verschleiß an beliebigen Bauteilen mit beliebigem Fließverhalten einer Anlage vorherzusagen.

7 LITERATUR

- [ARC53] Archard, J.F.: Contact and rubbing of flat surfaces. In: Appl. Phys., 1953. 24: 981-988.
- [CHE17] Chen, G.: Surface Wear Reduction of Bulk Solids Handling Equipment Using Bionic Design. PhD Thesis, Tu Delft, Netherland, 2017
- [CHU08] Chung, Y.-C.; Ooi, J.Y.: Study of influence of gravity on bulk behaviour of particulate solid. In: Particuology, 6 (2008), pp. 467-474, 2008
- [CUN79] Cundall, P.A.; Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies. In: Géotechnique, No. 29 (1), 1979
- [DIN50320] DIN50320: Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. In: Beuth Verlag, Berlin, 1979
- [FIN60] Finnie, I.: Erosion of surfaces by solid particles. In: Wear, 1960. 3: 87-103.
- [FOR14] Forsström, D.: Numerical prediction of wear in industrial raw material flow. PhD Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2014
- [HEI14] Heisel, U. et al.: Handbuch Spanen, Hanser Verlag, 2014
- [HIL15] Hilgraf, P.: Verschleiß in Ihren Förderleitungen – muss das sein?. In: <http://www.process.vogel.de>, Stand: 12.10.2015
- [JAY07] Jayasundara, C.T.; Yang, R.Y.; Yu, A.B.; Curry, D.: DEM modelling of disc wear in the IsaMill process. In: 9th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Newcastle (Australia), 2007

- [KLO10] Kloss, C.; Goniva, C.: LIGGGHTS – A New Open Source Discrete Element Simulation Software. In: Proceedings of The Fifth International Conference on Discrete Element Methods, London, UK, 2010
- [KUN12] Kunze, G.; Katterfeld, A.; et al.: Plattform- und Softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion. In: 5. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden, Germany, 2012.
- [ROE16] Roessler, T.; Katterfeld, A.: Scalability of angle of repose tests for the calibration of DEM parameters. In: 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, 2016
- [SCHÖ10] Schönburg, K.: Naturstoffe an Bauwerken - Eigenschaften, Anwendung, Gestaltung, Beuth Verlag, 2010
- [WEN12] Wensrich C.M.; Katterfeld A.: Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM. In: Powder Technology, 2012
- [WIC99] Wiche, S.J.: Linear abrasion wear tests on 360 Brinell and EHSP steel plate with black coal. Tunra Bulk Solids Handling Research Associates, Report, 1999
- [WIC04] Wiche, S.J.; Keys, S.; Roberts, A.W.: Abrasion wear tester for bulk solids handling application. In: Wear, Volume 258, Issues 1–4, 2005

M. Sc. Thomas Rößler, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fördertechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld, Lehrstuhlleiter Fördertechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Address: Lehrstuhl Fördertechnik, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität, Universitätsplatz 2, 39104 Magdeburg, Germany, Phone: +49 391-67-12245, Fax: +49 391-67-12646, E-Mail: thomas.roessler@ovgu.de