

Dem Bechernicken auf der Spur

Investigation of the bucket tilting in bucket elevators

Christian Richter
André Katterfeld
Thomas Rößler

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

In der Fördertechnik stellen Becherwerke ein wichtiges Element zur Vertikalförderung von Schüttgütern dar. Aufgrund der immer größer werdenden Massenströme greift man zunehmend auf Becherwerke mit hohen Geschwindigkeiten zurück. Das dynamische Verhalten des Gesamtsystems spielt bei der Auslegung und Konstruktion neuer Förderanlagen eine funktionsentscheidende Rolle. Der Beitrag stellt eine neuartige Simulationsmethode zur Kopplung von Maschinenmodellen (Mehrkörpersimulation, MKS) mit Stoffmodellen (Diskrete Elemente Methode, DEM) vor. Anhand eines vereinfachten Mehrkörpermodells eines Becherwerkes konnte das Nicken einzelner Becher bei unterschiedlichen Gurtsteifigkeiten und Gurtgeschwindigkeiten simuliert und mit Messwerten des realen Becherwerkes verglichen werden.

[Schlüsselwörter: Becherwerk, Diskrete Elemente Methode, DEM, Mehrkörpersimulation, Kopplung, Schüttgutkalibrierung]

In bulk material handling systems the bucket elevator represents an important element for the vertical transport of bulk materials. Due to increasing mass flow rates, the application of high speed bucket elevators is becoming more and more common. The dynamic behaviour of the entire system is an essential factor in the design and construction of such conveyors. This article presents a new simulation method for coupling machine models (multi-body simulation, MBD) with material models (discrete element method, DEM). Based on a simplified multi-body model of a bucket, the tilting of individual buckets is simulated at different belt stiffnesses and belt speeds. The simulation results are compared with experimentally measured values of a real bucket elevator.

[Keywords: bucket elevator, Discrete Element Method, DEM, multi body simulation, coupling, calibration of bulk solid]

1 EINLEITUNG

Im heutigen Entwicklungsprozess moderner Schüttgutförderanlagen hat sich die Computersimulation des Schüttgutverhaltens in kritischen Zonen, z.B. in Übergabestellen und bei der Entleerung von Becherförderern fest etabliert. Neben der bekannten Diskrete Elemente Methode (DEM) wird immer häufiger das Zusammenspiel von Schüttgut und Förderanlage Gegenstand der Untersuchungen. Dabei muss nicht nur untersucht werden, wie die einzelnen Funktionsbaugruppen miteinander interagieren, sondern ebenso, welchen Einfluss deren dynamisches Verhalten auf den Förderprozess hat.

Am Lehrstuhl Fördertechnik des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik wurde auf Basis einer opensource DEM-Software eine Kopplungsschnittstelle zwischen DEM und Mehrkörpersimulation entwickelt. Diese nutzt das standardisierte Functional-Mockup-Interface (FMI) für den Datenaustausch. Es stehen somit eine Vielzahl an kommerziellen und kostenfreien Werkzeugen für die Modellierung des Mehrkörpersystems zur Verfügung.

Anhand der Problemstellung des Bechernickens wird die Anwendung der gekoppelten DEM-MKS-Simulation dargestellt. Beim Bechernicken handelt es sich um ein Schwingen der einzelnen Becher beim Übergang von der geradlinigen in die kreisförmige Bewegung am Becherwerkskopf, bzw. von der kreisförmigen in die geradlinige Bewegung am Becherwerksfuß. Dies führt vor allem bei kohäsionslosem Schüttgut dazu, dass bereits geschöpftes Gut den Becher wieder verlässt und in den Becherwerksfuß zurückfällt. Dies senkt die Effizienz des Förderprozesses, da das Gut mehrmals gefördert werden muss. Mit Hilfe der gekoppelten DEM-MK Simulation kann anhand eines virtuellen Gesamtmodells des Becherwerkes eine optimale Position der Aufgabeschurre und der Vorspannung des Gurtes in Abhängigkeit des Fördergutes und der Fördergeschwindigkeit ermittelt werden. Weiterhin ist die Ableitung von dynamischen

Lastannahmen für die Festigkeitsberechnung der Becherbefestigung möglich.

Um realistische Randbedingungen für das Mehrkörpersystem aus der DEM zu erhalten ist eine Kalibrierung des Schüttgutes notwendig. Neben der Schüttdichte sind die Coulomb'sche Reibung, die Wandreibung und die Partikelsteifigkeit wichtige Einflussgrößen. Da der kritische Zeitschritt der Gesamtsimulation nach Gl. (1) von der Steifigkeit der Partikel abhängt, kann nicht direkt die physikalische Steifigkeit des jeweiligen Schüttgutes für die Simulation verwendet werden.

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

Stattdessen wird die Steifigkeit um zwei bis drei Zehnerpotenzen herabgesetzt und gleichzeitig der innere Reibwert des Schüttgutes erhöht, um ein identisches Verhalten zu erzielen [KAT07]. In umfangreichen Parameterstudien wird eine geeignete Kombination von Partikelreibwert und Rollreibwert für Partikel mit reduzierter Steifigkeit ermittelt.

2 GEKOPPELTE DEM-MK-SIMULATION

Die gekoppelte Diskrete Elemente Methode und Mehrkörpersimulation basiert auf dem quelloffenen DEM Code LIGGGHTS®. Durch Implementierung einer programm-basierten Kopplungsschnittstelle auf Integrator-ebene [KUN12] ist es möglich, die in der DEM wirkenden Kräfte und Momente zu exportieren und anschließend die daraus resultierenden Bewegungen der Starrkörper in die DEM-Simulation zu importieren. Das Mehrkörpermodell enthält dabei alle mechanischen Komponenten, den Antrieb und die Verbindungselemente, während das Stoffmodell der DEM die kalibrierten Schüttgutparameter sowie die Kontakterkennung und -behandlung enthält. Abbildung 1 zeigt den Informationsfluss bei der programm-basierten Kopplung.

Realisiert wurde die DEM-MKS-Kopplung auf Basis des offenen Funktional-Mockup-Interface (FMI) Standards. Dieser kapselt das Maschinenmodell in einer abgeschlossenen Einheit, der sogenannten Funktional-Mockup-Unit (FMU). Die FMU enthält neben der Modellbeschreibung eine kompilierte Bibliothek der Bewegungsgleichungen des Mehrkörpersystems, welche durch einen internen oder externen Solver zur Laufzeit der Simulation gelöst werden. Durch einen zyklischen Austausch der Berechnungsergebnisse ist die Mehrkörpersimulation immer synchron mit der DEM-Simulation.

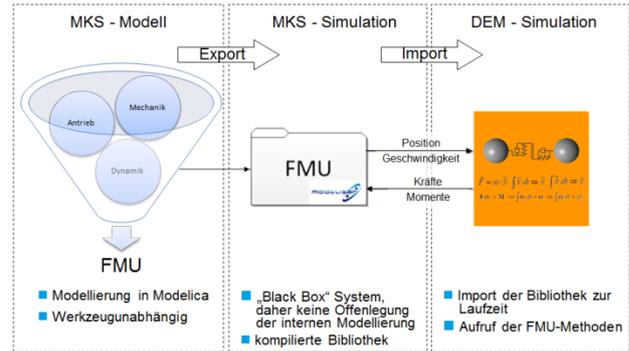


Abbildung 1: Programm-basierte MKS-DEM-Schnittstelle

Neben einer Vielzahl kommerzieller Programme zur Erstellung des Mehrkörpersystems bietet das opensource Programm OpenModelica eine kostenfreie Möglichkeit zur Erstellung der Funktional-Mockup Units.

3 VERIFIZIERUNG DER SIMULATIONSMETHODE

Zur Verifikation der gekoppelten Simulation wurde das Modell eines Pendels in OpenModelica erstellt. Im ersten Schritt wird ein ebenes Pendel (Bewegung in der x,z-Ebene, mit $\mathbf{q} = (x,y,z)^T$) benutzt, dessen Länge $L = 1\text{ m}$ beträgt. Der Ursprung des Pendels, um den die Bewegung ausgeführt wird, liegt in $\mathbf{o} = (0,0,0)^T$. Am Endpunkt des Pendels wird in der DEM-Simulation eine Kugel mit dem Radius $r_k = 0,125\text{ m}$ und der Dichte $\rho_k = 7850\text{ kg/m}^3$ generiert.

Die entstehende Masse von $m_k = 64,23\text{ kg}$ wird der FMU übergeben. Durch die Erdbeschleunigung von $g = -9,81\text{ m/s}^2$ wird die Kugel, deren Anfangszustand sich in $\mathbf{q} = (-L,0,0)^T$ befindet auf einer Kreisbahn um den Ursprung beschleunigt. Bei $\mathbf{q} = (0,0,-L)^T$ trifft sie auf eine zweite ruhende Kugel mit der gleichen Masse, deren Mittelpunkt sich bei $\mathbf{u} = (2r_k,0,-L+r_k)^T$ befindet. Bei einem ideal elastischen Stoß wird eine komplette Energieübergabe der Pendelkugel auf die zweite Kugel erwartet.

Zum Abgleich und zur Verifikation kann hier die kinetische Energie des Systems herangezogen werden, die vor und nach dem Stoß identische sein muss, wenn Dämpfungs- und Reibungsverluste modellseitig ausgeschlossen sind. Das Maximum der kinetischen Energie entspricht der potentiellen Lageenergie des Pendels zu Beginn der Simulation mit:

$$E_{pot} = m_k \cdot g \cdot L = 630,1\text{ J} \quad (2)$$

In einer zweiten Simulation wurde die reine DEM-Kugel am Ende des Pendels durch einen Volumenkörper im STL-Format ersetzt. Mit diesem Dateiformat ist eine Simulation beliebig geformter Körper in der DEM möglich. Der Verlauf der kinetischen Energie sowie ausgewählte Bewegungszustände der zweiten Simulation

sind in Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Simulationszeit t die kinetische Energie des Systems zunimmt.

Bei $t = t_s = 0,6s$ kommt es zum Stoß. Die kinetische Energie vor dem Stoß entspricht der potentiellen Energie in Gl. (1). Der Einbruch der kinetischen Energie bei $t_s = 0.6s$ wird durch die Federelemente des Kontaktmodells verursacht. Nach dem Stoß hat die kinetische Energie im System wieder die gleiche Größe wie vor dem Stoß, wobei sich das Pendel in Ruhe befindet und sich die angestoßene Kugel mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.

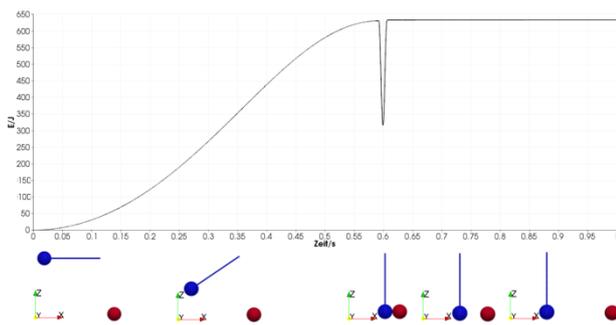


Abbildung 2: Kinetische Energie eines gekoppelten Pendels vor und nach dem Stoß [KUN12]

4 BESCHREIBUNG DES BECHERNICKENS

Das Problem des Bechernickens tritt vor allem bei kohäsionslosen Gütern auf [Di93]. Aufgrund des Überganges von der geradlinigen in die kreisförmige Bewegung müsste die Becherspitze aufgrund des größeren Radius zum Drehpunkt eine unendlich große Beschleunigung von der vertikalen Geschwindigkeit des Zugmittels auf die Umfangsgeschwindigkeit durchführen. Dies ist physikalisch unmöglich. Die Umfangsgeschwindigkeit der Becherspitze ist um den Faktor $\frac{r_S}{r_T}$ größer, als die Umfangsgeschwindigkeit des Gurtes [McBride09]. Abbildung 3 stellt die geometrischen Verhältnisse an der Antriebstrommel (Becherwerkskopf) grafisch dar.

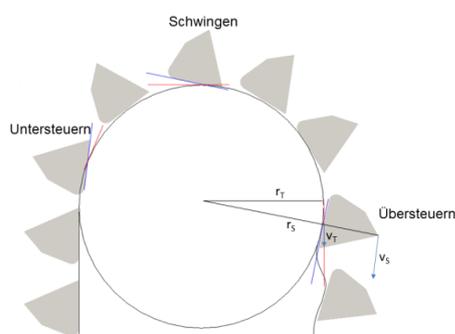


Abbildung 3: Geometrische Verhältnisse an der Antriebstrommel (überzeichnete Darstellung der Becherbewegung)

Das Bechernicken an der Kopftrommel wirkt sich in Form einer gedämpften Schwingung, die durch die Becheraußenkante auf das Schüttgut übertragen wird, aus. Dies führt zu einer Beeinflussung der Entleerungsparabel, sodass die Abgabeschurre nicht von jedem Gutteilchen erreicht wird und dieses somit durch den Leertrum in den Becherwerksfuß zurück fällt und erneut geschöpft und gehoben werden muss. Durch dieses mehrfache Schöpfen und Heben sinkt der erreichbare Massenstrom des Becherwerkes bzw. es muss mehr Energie aufgewendet werden um den gewünschten Massenstrom zu erreichen.

5 MODELLIERUNG DES BECHERWERKES

Das Simulationsmodell beinhaltet neben einem vereinfachten Antrieb ein abstrahiertes Maschinenmodell jedes einzelnen Bechers. Die Elastizität der Becher-Gurt-Verbindung wird dabei durch ein Drehgelenk abgebildet, welches mit einer Drehfeder und einem Dämpfer gekoppelt ist. Abbildung 4 zeigt schematisch das Mehrkörpermodell für einen Becher. Durch Aneinanderreihen mehrerer Bechermodelle kann eine kinematische Kette des gesamten umlaufenden Zugmittels mit beliebiger Länge und Becherteilung erstellt werden.

Die Bewegung der Becher wird von einem in OpenModelica modellierten Zustandsautomaten gesteuert. Dieser setzt die Geschwindigkeitsvorgabe für die translatorische (v_{Ref}) und rotatorische (w_{Ref}) Bewegung der Becher in Abhängigkeit der aktuellen Becherposition. Die externen Kräfte und Momente aus der DEM-Simulation werden über die Kopplungsschnittstelle als lokal wirkende Belastungen am Schwerpunkt des Bechers aufgebracht. Die geometrischen Verhältnisse von Trommeldurchmesser, Gurtstärke und Becherausladung werden über masselose Stäbe abgebildet. Virtuelle Sensoren erfassen die Geschwindigkeit, die Position und Orientierung im globalen Koordinatensystem sowie die Beschleunigung der Becherspitze. Die Simulationsergebnisse lassen sich somit später mit experimentell ermittelten Werten vergleichen.

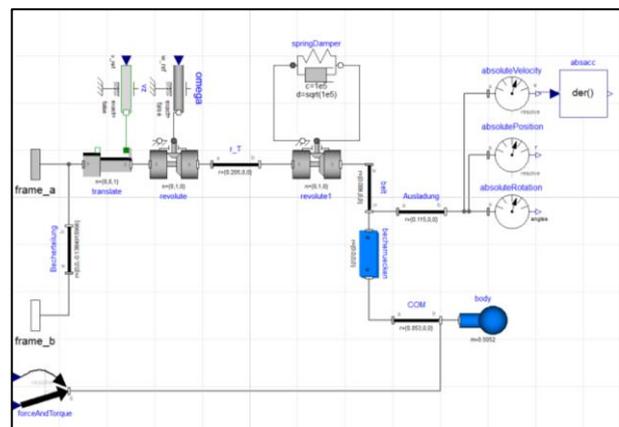


Abbildung 4: Vereinfachtes Simulationsmodell eines Bechers

6 KALIBRIERUNG DES SCHÜTTGUTES

Für die experimentellen Untersuchungen des Bechernickens steht am Lehrstuhl Fördertechnik des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik ein Becherwerk mit 5.500 mm Achsabstand zur Verfügung. Dieses ist mit dem Schüttgut Kunststoffgranulat gefüllt. Das Kunststoffgranulat weist die in Tabelle 1 angegebenen physikalischen Eigenschaften auf.

Tabelle 1: Schüttguteigenschaften Kunststoffgranulat

Parameter	Wert	Einheit
Schüttdichte	675	kg/m ³
Wandreibwert gegen Stahl St 52-2	0,377	-
Innerer Reibwert	0,605	-
d _{min}	2,5	mm
d _{max}	5	mm

Abbildung 5 zeigt repräsentative Kunststoffgranulat-Partikel zur Abschätzung der Kornform. Es handelt sich um meist zylinderförmige Körper mit einem Durchmesser unter 5 mm und einer Länge zwischen 3 mm und 6 mm.

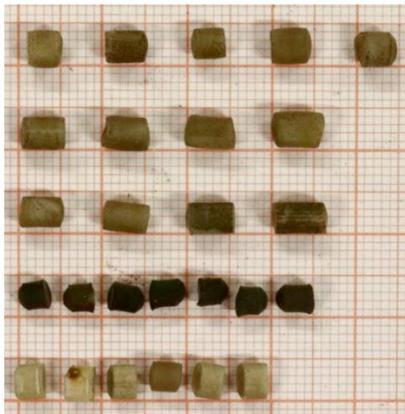


Abbildung 5: Schüttgut Kunststoffgranulat

Zur Kalibrierung wurde eine Parameterstudie, bestehend aus 200 Simulationen, zur Ermittlung des Böschungswinkels in Abhängigkeit der Roll- und Coulomb'schen Reibung durchgeführt. Es wurde ein nichtlineares Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin mit einem Rollreibmodell nach [WEN12] mit elastisch-plastisch Feder-Dämpfer-System verwendet. Tabelle 2 zeigt die verwendeten allgemeinen DEM-Parameter.

Das in Abbildung 6 dargestellte Höhenlinien-diagramm zeigt alle Parameterkombinationen, welche den gleichen Böschungswinkel ergeben. Da eine unendliche Anzahl Kombinationen existiert, die den gleichen Böschungswinkel erzeugen, wurde eine zweite Versuchsreihe mit einem Versuchsstand zur Ermittlung des dynamischen Böschungswinkels durchgeführt [Roessler16].

Tabelle 2: Konstante Kontaktparameter der DEM-Simulation

Parameter	Wert	Einheit
Partikeldurchmesser	2,5-5	mm
Schermodul	1e7	N/mm ²
Poission-Zahl	0,30	-
Partikeldichte	1164	kg/m ³
Stoßzahl	0,20	-
Wandreibwert	0,377	-

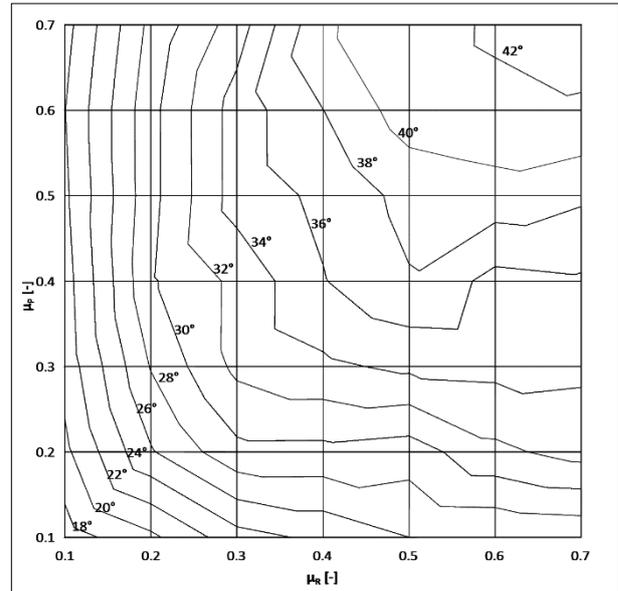


Abbildung 6: Höhenlinien gleicher Böschungswinkel für Kombinationen von Rollreibwert μ_R und Coulomb'scher Reibung μ_P für Kunststoffgranulat

Dieser Versuchsstand ermöglicht die exakte Messung des dynamischen Böschungswinkels für frei fließende Güter. Ein rotierender Trog mit einem Durchmesser von 1000 mm bewegt das Schüttgut auf einer Kreisbahn. In diesem Schüttgutstrom befindet sich ein sogenanntes Schwert als Staustelle. Das Schwert verfügt über eine Kraftmesseinrichtung und einen 2D Laserscanner zur Erfassung der Gutoberfläche vor dem Schwert.

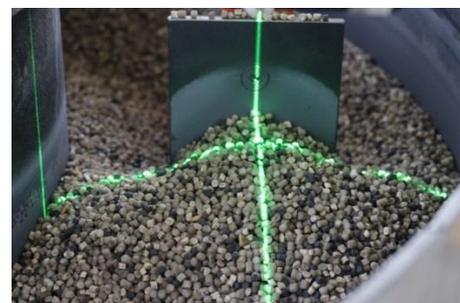


Abbildung 7: Oberflächenscan und Kraftmesseinrichtung an der Staustelle des Versuchsstandes

Durch Vergleich des Oberflächenprofils des dynamischen Böschungswinkels und der auf das Schwert

wirkenden Kräfte mit den Simulationsergebnissen einer äquivalenten DEM-MKS-Simulation kann eine Parameterpaarung für reduzierte Steifigkeiten ermittelt werden, die realistische Simulationsergebnisse ermöglicht.

Tabelle 3: Kalibrierte Reibparameter der Simulation

Parameter	Wert	Einheit
Coulomb'scher Reibwert	0.35	-
Rollreibungwert	0.3	-

7 VALIDIERUNG DER SIMULATIONSPARAMETER

Für die Untersuchungen des realen Schöpf- und Entleerungsverhaltens von Becherwerken steht am Institut für Logistik und Materialflusstechnik ein Becherwerk mit den in Tabelle 4 angegebenen technischen Daten zur Verfügung.

Tabelle 4: Technische Daten des Versuchsbecherwerkes

Parameter	Wert	Einheit
Trommeldurchmesser	400	mm
Trommelbreite	130	mm
Achsabstand	5500	mm
Drehzahl	24-191	U/min
Becherteilung	138	mm
Anzahl der Becher	89	

Das Becherwerk verfügt sowohl im Bereich der Gutaufgabe, als auch am Becherwerkskopf über verglaste Öffnungen durch welche das Bewegungsverhalten des jeweiligen Schüttgutes beobachtet werden kann. Für einen qualitativen Vergleich des Entleerungsverhaltens von Kunststoffgranulat wurde eine reine DEM-Simulation ohne Bechernicken mit Videoaufnahmen bei verschiedenen Drehzahlen verglichen. Der qualitative Vergleich (Abbildung 8) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment.

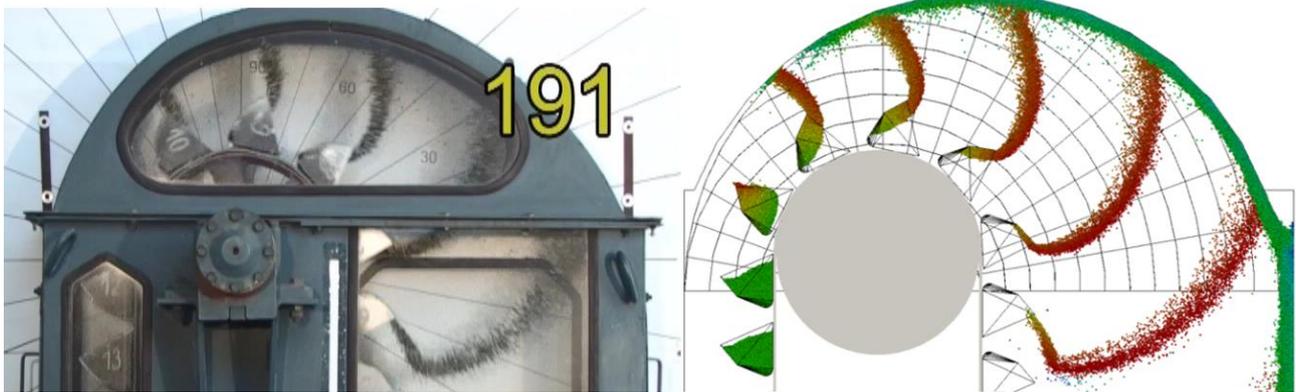


Abbildung 8: Vergleich des Entleerungsverhaltens in Realität [KAT07] und DEM-Simulation

8 STUDIE DES EINFLUSSES DES BECHERNICKENS

Bereits in Kapitel 4 wurden die Ursachen und der Einfluss des Bechernickens auf das Entleerungsverhalten von schnell laufenden Becherwerken diskutiert. Mit der neu entwickelten Kopplungsschnittstelle und den exakt kalibrierten Schüttgutparametern wurde eine gekoppelte DEM-MK-Simulation des Abwurfverhaltens bei unterschiedlichen Steifigkeiten des Zugmittels durchgeführt. Abbildung 9 zeigt die Simulationsergebnisse für eine Gurtgeschwindigkeit von 4 m/s

Für sehr weiche Steifigkeiten ist ein deutliches Übersteuern der Becher beim Übergang von der Kreisbahn in die vertikale Bewegung zu erkennen. Dies führt dazu, dass sehr viel Schüttgut in den Rücktrum zurück fällt, da es durch die Bechervorderkante daran gehindert wird den Becher in Richtung der Abgabeschurre zu verlassen. Für

mittlere Steifigkeiten im Bereich von $5 \cdot 10^5$ N/m bis $5 \cdot 10^6$ N/m ist eine deutliche Beeinflussung der Gutteilchen durch die Schwingung des Bechers zu erkennen. Trotzdem gelangt das gesamte Gut in den Abgabebereich. Es ist zu erwarten, dass die schwingende Bewegung einen vorzeitigen Ausfall der Becher-Gurt Verbindung aufgrund der dynamischen Belastung zur Folge hat. Für Steifigkeiten ab $5 \cdot 10^7$ N/m ist kein Bechernicken in den Simulationsergebnissen zu erkennen. Der Entleerungsbeginn findet jedoch zeitlich verzögert statt, da die Bechervorderkante zu Beginn der Entleerung das Schüttgut an einem Verlassen des Bechers hindert. Daher fällt, verglichen mit den weicheren Modellen, mehr Schüttgut in den Rücktrum des Förderers zurück.

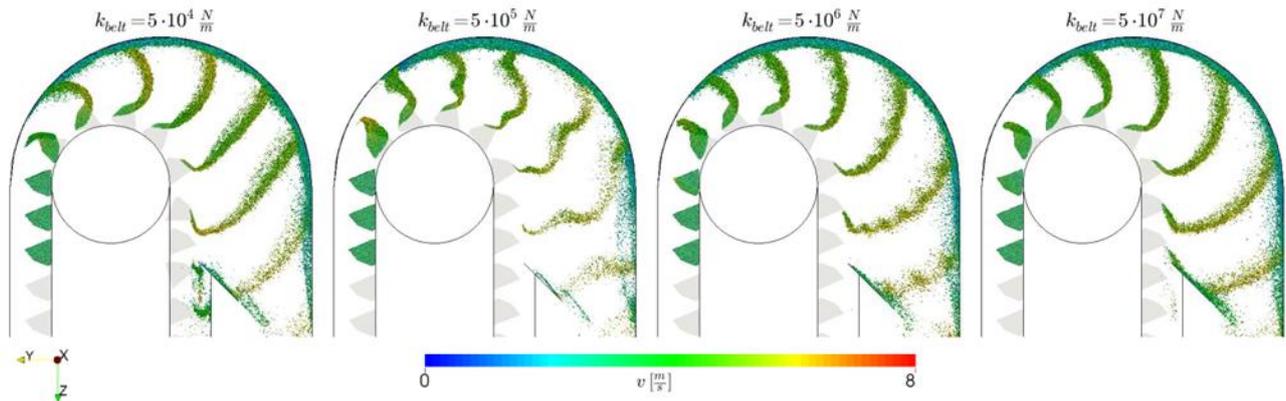


Abbildung 9: Einfluss der Steifigkeit der Becher-Gurt-Verbindung auf das Entleerungsverhalten schnell laufender Becherwerke

9 VERGLEICH DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Um das Bechernicken experimentell zu erfassen wurde ein Becher des Versuchsbecherwerkes mit einem miniaturisierten Datenlogger mit integriertem Beschleunigungssensor ausgestattet. Dieser ermöglicht eine hochgenaue Erfassung des realen Bewegungsverhaltens des Bechers.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Beschleunigungen eines Bechers im Experiment und in der Simulation für

eine Gurtgeschwindigkeit von 4 m/s. Der zeitliche Verlauf und das Abklingverhalten der Schwingung stimmen sehr gut überein. Das laterale Schwingen des Bechers in Y-Richtung kann vom Simulationsmodell bisher noch nicht abgebildet werden und wird in zukünftigen Forschungsarbeiten durch ein detaillierteres Gurtmodell, welches auch flexible Körper abbilden kann, implementiert [OTT15].

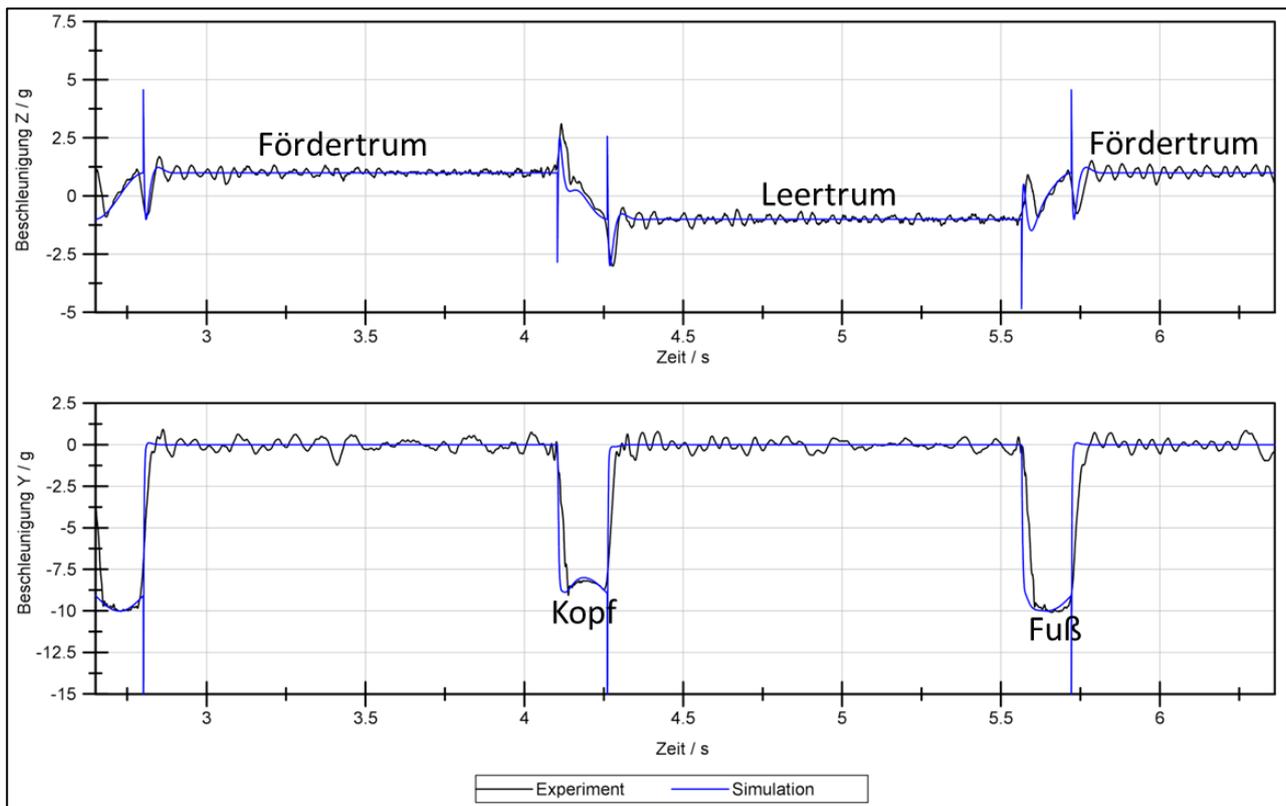


Abbildung 10: Vergleich der auf einen Becher wirkenden Beschleunigungen in Experiment und Simulation

10 ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag stellt eine neuartige Methode zur programm-basierten Kopplung von Maschinen- und Stoff-Simulationsmodellen vor. Die Simulationsmethode wird an einem analytisch berechenbaren Beispiel verifiziert. Das Phänomen des Bechernickens wird zunächst geometrisch hergeleitet und anschließend in einem vereinfachten Mehrkörpermodell abgebildet. Die Ergebnisse der Kalibrierung der Materialparameter, welche für die Partikelsimulation notwendig sind, werden dokumentiert. Es wird gezeigt, dass die neu entwickelte Methode in der Lage ist, das grundsätzliche dynamische Verhalten von Förderanlagen abzubilden. Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der gekoppelten DEM-MK-Simulation stimmen, unter Berücksichtigung der Beschränkungen in der Modellierung, sehr gut mit den durchgeführten Experimenten überein.

In zukünftigen Forschungsarbeiten ist geplant, nicht nur die Becher-Gurt-Verbindung als Mehrkörpermodell abzubilden, sondern ebenso das nichtlineare Verhalten des Fördergurtes und den Kontakt zwischen Antriebs- bzw. Umlenktrummel sowie das Schwingungsverhalten des Fördergurtes in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Erste Vorarbeiten wurden im Projekt „SimBa - Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und -beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen“ (BMBF, 01IS13006A) [KAT16] durch eine Erweiterung der Kopplung um eine Schnittstelle zur Finiten Elemente Methode geschaffen.

11 FÖRDERHINWEIS

Die Kalibrierung der DEM-Parameter wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „SidyW-Simulation dynamischer Widerstände in maschinellen Prozessen von Bau- und Fördermaschinen“ (KA1802/3-1) durchgeführt. Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

LITERATUR

- [KUN12] Kunze, G.; Katterfeld, A.; Richter, C.; Otto, H.; Schubert, C.: Plattform- und softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion In: Fachtagung Baumaschinentechnik 2012. - Frankfurt am Main
- [DIL93] Dilefeld, M.: Zum Schöpfverhalten von Becherwerken, Dissertationsschrift, Magdeburg, 1993
- [MCB09] McBride, W., Sinnott M., Cleary, P.W.: Bucket Elevators: Head Pulley Transition Impact on

Bucket Discharge, In Proceedings of ChoPS+ICBMH S. 378-385, 2009

- [KAT07] Katterfeld, A.; Gröger, T.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Becher- und Kratzerförderer, In: Schüttgut . - : Vogel Trans Tech Publications, Bd. 13.2007, 4
- [ROE16] Rößler, T.; Katterfeld, A.: Scalability of angle of repose tests for the calibration of DEM parameters, In: ICBMH 2016: 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation ; proceedings ; Darwin, Australia, 11-14 July 2016
- [OTT15] Otto, H.; Katterfeld, A.: Prediction and simulation of the mistracking of conveyors belts, In: 8th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids (CHOPS 2015). - Tel-Aviv; 2015.
- [KAT16] Katterfeld, A.; Richter, C.: Softwaresystem zur ganzheitlichen Simulation der Bauteilbelastung und -beanspruchung von Baumaschinen und Förderanlagen - Schlussbericht des im Rahmen der Fördermaßnahme KMU-innovativ: IKT geförderten Verbundprojekts SimBa der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik : (Projektlaufzeit: 01.09.2013-31.08.2015) In: Magdeburg Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, 2016

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

Dipl.-Ing. Christian Richter, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fördertechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

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

Adresse: Lehrstuhl Fördertechnik, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität, Universitätsplatz 2, 39104 Magdeburg, Germany, Tel: +49 391-67-20178, Fax: +49 391-67-12646, E-Mail: christian.richter@ovgu.de

