

Anwendung der DEM-MK-Simulation am Beispiel von Becherwerken

Application of coupled DEM-MBD simulation at the example of bucket elevators

Christian Richter
André Katterfeld

*Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg*

Die Berechnung des Schöpfwiderstandes von Becherwerken stützt sich nach aktuellem Stand der Technik auf empirisch ermittelte Kenngrößen. Der Gültigkeitsbereich des dabei verwendeten Abminderungsfaktors ist auf bestimmte geometrische Randbedingungen begrenzt. Am Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde eine neuartige Simulationsmethode zur Kopplung von Maschinenmodellen (Mehrkörpersimulation, MKS) mit Stoffmodellen (Diskrete Elemente Methode, DEM) entwickelt und anhand zahlreicher Versuche validiert. Die entwickelte Simulationsmethode wird in diesem Beitrag genutzt, um den Schöpfwiderstand von Senkrechtbecherwerken für unterschiedliche Beschickungsarten und Guteigenschaften zu analysieren.

[Schlüsselwörter: Fördertechnik, Simulation, Becherwerk, Diskrete Elemente Methode, Schöpfarbeit]

The calculation of the scooping resistance of bucket elevators is based on empirically determined parameters. The range of validity of the used mathematical expressions is limited to certain geometrical boundary conditions. A new simulation method for coupling machine models (multi body dynamic simulation, MBD) with material models (discrete element method, DEM) was developed and validated using numerous tests. In this article the method of coupled DEM-MBD simulation is used to analyze the scooping resistance of vertical bucket elevators for different loading types and bulk solid properties.

[Keywords: Materials handling, simulation, bucket elevator, discrete element method, scooping]

1 EINLEITUNG

Für die komplexe Interaktion von Förderanlagen, Baumaschinen, Gewinnungsmaschinen und Anlagen zur Schüttgutaufbereitung ist die Rückwirkung des Schüttgutes, und die daraus resultierende maschinendynamische Reaktion auf den Prozess, von besonderer Bedeutung. Die Diskrete Elemente Methode (DEM) kann dies jedoch nicht ohne externe Berechnungsmethoden leisten. Eine Kopplung der DEM mit der etablierten Methode der Maschinensimulation, welche wiederum alle Zusammenhänge der Domänen Mehrkörpermodellierung, Elektronik, Hydraulik und Regelungstechnik abbildet, ist daher notwendig [Ric20]. Zur Analyse des Bewegungsverhaltens schnelllaufender Becherwerke wird in diesem Beitrag eine Simulationsmethode zur Berechnung des Bewegungsverhaltens von Maschinenmodellen im Kontakt mit Schüttgütern vorgestellt. Dabei werden die bekannten Methoden der Diskrete Elemente (DEM) Simulation und der Mehrkörpersimulation (MKS) auf Programmebene gekoppelt.

2 SIMULATIONSMETHODE

Für die Kopplung der DEM und der Mehrkörpersimulation wird in diesem Beitrag das standardisierte *Functional Mockup Interface* (FMI) verwendet. Dieser Standard wurde auf Bestreben der Daimler AG im Rahmen des MODELISAR¹ Projektes (2008-2011) in Zusammenarbeit von 29 Partnern entwickelt. Ziel war es, eine Plattform- und Simulationsprogramm unabhängige Methode zum Modellaustausch der Hersteller und ihren verschiedenen Lieferanten zu entwickeln [BOA11]. Für den Export der sogenannten *Functional Mockup Unit* (FMU) aus dem Modellierungswerkzeug wird das zuvor erstellte Mehrkörpermodell kompiliert und als dynamische Bib-

¹ <http://www.functional-mockup-interface.org>

liothek zusammen mit einer digitalen Modellbeschreibung in einem Archivformat verpackt. Die FMU verfügt über eine standardisierte Schnittstelle zur Kommunikation mit anderen Simulationsprogrammen, das Functional Mockup Interface (FMI). Die Kopplungsstrategien werden in die Kopplungsmethode zum Modellaustausch (*FMU for Modelexchange*) und die Kopplungsmethode zur wechselseitigen Simulation (*FMU for Co-Simulation*) unterschieden. Beim Konzept der FMU zum Modellaustausch enthält die FMU den Programmcode der Bewegungsgleichungen des mechanischen Systems sowie der FMI Schnittstelle, eine kompilierte Bibliothek des Programmcodes und die XML-Modellbeschreibung, welche die Bezeichnungen und Speicherreferenzen der Ein- und Ausgänge des Modells angibt. Das Lösen der Bewegungsgleichungen wird dem importierenden Programm überlassen. Dies hat den Vorteil, dass die Art des numerischen Lösungsalgorithmus vom Endanwender selbst bestimmt werden kann. Dadurch erhöht sich jedoch der Implementierungsaufwand seitens des importierenden Programms signifikant, da zumindest ein numerischer Lösungsalgorithmus für die Integration der Bewegungsgleichungen zur Verfügung gestellt werden muss. Im Gegensatz zur FMU zum Modellaustausch ist beim Konzept der FMU für die wechselseitige Simulation der Algorithmus zur numerischen Lösung der Gleichungssysteme bereits in der FMU implementiert. Dabei kommt ein Algorithmus mit variabler Schrittweite zum Einsatz, um die Berechnungszeiten - bei gleichzeitig guter Genauigkeit der Ergebnisse - möglichst gering zu halten. Je nach Komplexitätsgrad des Modelles sind somit selbst MK-Simulationen in Echtzeit problemlos möglich. Die wechselseitige Simulation eignet sich zur Lösung zeitabhängiger, gekoppelter Systeme. Diese können aus zeitkontinuierlichen Teilsystemen, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden, oder zeitdiskreten Teilsystemen bestehen. Der Standard für die wechselseitige Simulation definiert die Schnittstellen für die Kommunikation zwischen einem Hauptprozess (Master) und den einzelnen Teilsystemen (Slaves) in der Simulationsumgebung. Der Datenaustausch ist auf diskrete Kommunikationszeitpunkte beschränkt und die Teilsysteme werden unabhängig voneinander zwischen diesen Kommunikationszeitpunkten numerisch gelöst [NBN11]. In diesem Beitrag wird eine programm-basierte Kopplung auf Integratorebene [Dro04] verwendet. Dies bedeutet, dass beide Simulationseinheiten ihren eigenen Integrationsalgorithmus anwenden und in bestimmten Intervallen Zustände miteinander austauschen.

3 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die für die Auslegung des Zugmittels von Becherwerken maßgebliche Kraft F_1^{max} tritt am Aufnahmepunkt des Zugmittels auf die Antriebsstrommel bzw. das Antriebskettenrad auf. Sie setzt sich aus dem Steigungswiderstand, dem

Schöpfungswiderstand und der Spannkraft zusammen (Gl. (1)).

$$F_1^{max} = F_{WSt} + F_{WS} + F_{Wf} + F_{WU} + F_{Sp} + F_R. \quad (1)$$

Ein zusätzlicher Bewegungswiderstand resultiert bei Kettenbecherwerken aus der Reibung in den Kettengelenken (Kettenknickwiderstände) und der Lagerreibung der Kettenräder. Für Gurtbecherwerke wird ein zusätzlicher Umlenk-widerstand für den Gurt berücksichtigt. Bei geneigten Becherförderern kommen Reibkräfte zwischen dem Zugmittel und den notwendigen Führungsschienen im Lasttrum hinzu. Abbildung 1 fasst die Bewegungswiderstände für Senkrechtbecherwerke grafisch zusammen.

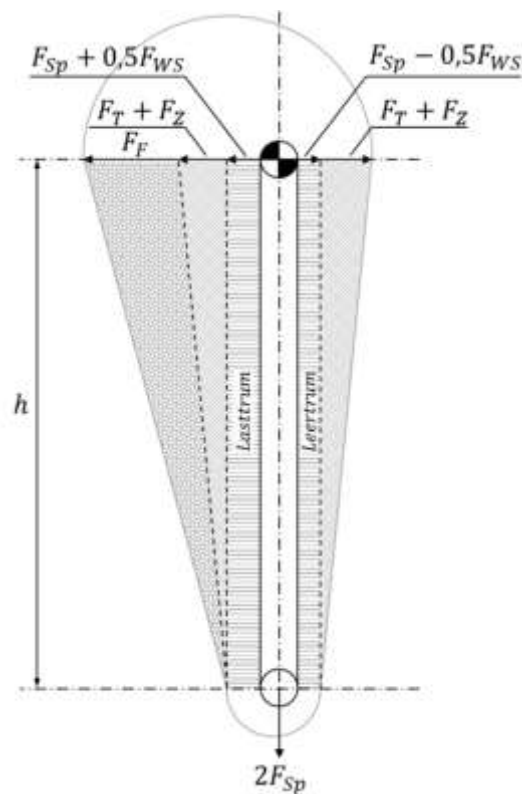


Abbildung 1: Bewegungswiderstände an Senkrechtbecherwerken (nach [GF14])

Der für Senkrechtbecherwerke maßgebliche Bewegungswiderstand ist der aus der Hubarbeit resultierende Steigungswiderstand F_{WSt} im Lasttrum. Die Einzelbewegungswiderstände teilen sich wie folgt auf:

$$F_{W(Leer.)} = -(F_T + F_Z + F_{Sp} - 0,5F_{WS}), \quad (2)$$

$$F_{W(Last.)} = F_F + F_T + F_Z + F_{Sp} + 0,5F_{WS}, \quad (3)$$

$$F_{WSt(Leertrum)} = -(F_T + F_Z), \quad (4)$$

$$F_{WSt(Lasttrum)} = F_F + F_T + F_Z. \quad (5)$$

Die Einzelbewegungswiderstände des Fördergutes, der Tragmittel und des Zugmittels berechnen sich nach Gl. (6) bis Gl. (8) aus den längenbezogenen Gewichtskräften und der Höhe des Becherwerkes.

$$F_F = q_F h = \frac{m_0 g h}{l_T}, \quad \text{mit } m_0 = V_B \rho \eta_F. \quad (6)$$

$$F_T = q_T h = \frac{m_B g h}{l_T}. \quad (7)$$

$$F_Z = q_Z h = m'_Z g h. \quad (8)$$

Der Schöpfwiderstand F_{WS} im Becherwerkfuß ist abhängig von der Art der Beschickung, der Neigung des Gutes zur Kohäsion, der Fördergeschwindigkeit sowie der Becherform und Becherteilung [GF14]. Nach BEUMER UND WEHMEIER setzt sich der Schöpfwiderstand aus den Einzelbewegungswiderständen der:

- 1) Stoßkräfte beim Aufprallen der Becherkante bzw. des Becherbodens auf das Schüttgutbett,
- 2) Reibkräfte F_{R1} , welche aus der Relativbewegung zwischen Becher und Gut resultieren,
- 3) Reibkräfte F_{R2} , welche in Ketten und Lagern während des Schöpfens auftreten,
- 4) Beschleunigungskräfte F_B zur Beschleunigung der vom Becher beeinflussten Schüttguteilchen,
- 5) Hubkräfte F_H für das im Becher befindliche Schüttgut

zusammen [Dil93]. Die zur Berechnung des Schöpfwiderstandes benötigte spezifische Schöpfarbeit W_{SS} wird von BEUMER UND WEHMEIER in ihrer gemeinsamen Veröffentlichung „Zur Frage des Schöpfwiderstandes und der Abwurfverhältnisse bei Becherwerken“ [BW60] als Funktion der Fördergeschwindigkeit für einige charakteristische Schüttgüter angegeben. Die Ergebnisse gelten für den von BEUMER UND WEHMEIER verwendeten Versuchsbecherförderer mit einer Becherbreite von 0,4 m und einer Becherausladung von 0,224 m. Mit der auf ein Kilogramm geförderten Schüttguts bezogenen spezifischen Schöpfarbeit W_{SS} und der aus dem Fördergut resultierenden Meterlast q_F (Gl. (6)) wird der spezifische Schöpfwiderstand F_{WS} nach Gl. (9) berechnet.

$$F_{WS} = K W_{SS} q_F. \quad (9)$$

Mit Hilfe des Abminderungsfaktors K in Gl. (9) wird die empirisch ermittelte spezifische Schöpfarbeit auf andere, vom Versuchsbecherwerk abweichende Becherwerke, umgerechnet. Der Abminderungsfaktor $K = f(t_F)$ wird mit Hilfe der relativen Becherfolgezeit

$$t_F = \frac{e_0 l_T}{e_1 v_Z}, \quad (10)$$

ermittelt. Das Verhältnis der Becherausladung $e_0 = 0,224 \text{ m}$, aus den Untersuchungen von BEUMER UND WEHMEIER, zu e_1 , für vom Versuchsbecherwerk abweichende Bechergrößen, skaliert die Bechertiefe auf die von BEUMER UND WEHMEIER verwendeten Schöpfbecher. Der Quotient aus Becherteilung l_T und der Zugmittelgeschwindigkeit v_Z erfasst den Einfluss der zeitlichen Becherfolge auf den Schöpfwiderstand. Die Becherfolgezeit t_F führt mit Gl. (10) zwei geometrische Beziehungen zur Übertragung der experimentellen Ergebnisse für den Schöpfwiderstand eines bestimmten Becherwerkes auf Becherförderer mit anderen geometrischen Abmessungen der Becher ein:

- a) die Becherausladung e_1 der verwendeten Becher des anderen Becherförderers im Verhältnis zur Becherausladung des Versuchsbecherwerkes e_0 an dem die Funktion empirisch ermittelt wurde,
- b) das Verhältnis der Becherteilung l_T zur Zugmittelgeschwindigkeit v_Z

DILEFELD stellt in seiner Dissertation dar, dass sich mit der Änderung der Becherausladung in vielen Fällen ebenso die Durchmesser der Antriebs- und Spanntrommeln ändern. DILEFELD stellt fest, dass „der Quotient aus dem Trommelradius und dem Schöpfkantenradius und der Winkel zwischen den Bechern beim Umlaufen der Trommel annähernd konstant sind.“ [Dil93] Daher solle für die Umrechnung empirisch ermittelter Werte für den Schöpfwiderstand nicht der Abminderungsfaktor K berücksichtigt werden, da die geometrischen Größen, welche Einfluss auf diesen Faktor haben, für verschiedene Becherdimensionen nahezu identisch sind. Die Computersimulation mittels gekoppelter Diskrete Elemente und Mehrkörpersimulation ermöglicht die genaue Bestimmung der spezifischen Schöpfarbeit von Becherwerken.

4 ANWENDUNG DER GEKOPPELTEN DEM-MK SIMULATION ZUR BESTIMMUNG DER SPEZIFISCHEN SCHÖPFARBEIT VON BECHERWERKEN

In diesem Beitrag wird das bereits in [RRK17] und [Ric20] vorgestellte Mehrkörpersimulationsmodell eines realen Versuchsbecherwerkes für die gekoppelte DEM-MK Simulation verwendet. Das Versuchsgut PVC Granulat entspricht ebenfalls dem in [RRK17] verwendeten Schüttgut. Die zugehörigen Schüttguteigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dieses Versuchsgut wird gewählt, da bereits in vorangegangenen Arbeiten umfangreiche empirische Untersuchungen zum Schöpfwiderstand an einem Versuchsbecherwerk durchgeführt wurden, sodass eine umfangreiche Datenbasis am Institut für Logistik und Materialflusstechnik zur Verfügung steht.

Tabelle 1: Materialparameter des Versuchsgutes Kunststoffgranulat

Parameter	Wert
Schüttdichte	675 kg/m ³
Wandreibwert gegen Stahl	0,377
innerer Reibwert	0,605
Kornform	Zylinder
d _{min}	2,5 mm
d _{max}	6 mm
Feuchte	0 %

Zur Analyse des Einflusses der Beschickungsart und der Neigung des Schüttguts zur Kohäsion auf den Schöpfwiderstand werden gekoppelte DEM-MK-Simulationen mit einer Zugmittelgeschwindigkeit von 4,22 m/s für kohäsionsloses und kohäsives Schüttgut bei last- und leertrumseitiger Beschickung durchgeführt. Der auf einen Becher wirkenden Bewegungswiderstand im Becherwerkfuß wird in der gekoppelten DEM-MK-Simulation auf Basis der tangentialen Kraft F_{tan} entgegen der Bewegungsrichtung des Bechers nach Gl. (11) berechnet. Diese Kraft entspricht dem durch das Schüttgut hervorgerufenen Schöpfwiderstand F_S eines Bechers. Da der Bewegungswiderstand positiv definiert ist, wird das Vorzeichen der in der Simulation ermittelten Kräfte in den folgenden Untersuchungen entsprechend invertiert. Es gilt:

$$F_S = -F_{tan} = -F_{B_{ges}} \cdot \frac{v_{tan}}{|v_{tan}|}. \quad (11)$$

Negative Schöpfwiderstände verringern dementsprechend die notwendige Schöpfarbeit. Die Schöpfarbeit eines Bechers wird durch numerische Integration des Schöpfwiderstandes über den Schöpfweg berechnet (Gl. (12)).

$$W_S = \int_{s_1}^{s_2} F_S ds. \quad (12)$$

Zum Vergleich der in diesem Beitrag vorgestellten DEM-MK-Simulationen wird der ermittelte Bewegungswiderstand über den Schöpfweg s , ausgehend von $s = -0,5$ m bis $s = 1,5$ m, für jeweils einen ausgewählten Becher aufgetragen. Abbildung 2 kennzeichnet den Schöpfweg und die Einteilung des Becherwerkfußes in vier Quadranten.

Tabelle 2 stellt die in der Simulation ermittelte Schöpfarbeit eines Bechers für den Geschwindigkeitsbereich der Fliehkraftentleerung bei last- und leertrumseitiger Gutaufgabe für kohäsionslose und kohäsive Schüttgüter gegenüber.

In den Diagrammen der leertrumseitigen Gutaufgabe ist ersichtlich, dass der Schöpfwiderstand im Bereich $-0,5$ m $< s < 0$ m zunächst negativ ist, da das Schüttgut in Bewegungsrichtung aufgegeben wird und im Bereich der Gutaufgabe auf den Becherrücken prallt. Nach dem Schöpfen aus dem Becherwerkfuß tritt eine Teilentleerung der Becher aufgrund der Fliehkräfte auf. Die auf den Becher wirkende Kraft reduziert sich daher im Bereich $0,5$ m $< s < 0,75$ m auf ein lokales Minimum. Ein Teil des herausgeschleuderten Schüttguts prallt im vierten Quadranten erneut auf die Becher und bewirkt einen zusätzlichen Bewegungswiderstand von 38 N. Das Schüttgut muss erneut auf die Zugmittelgeschwindigkeit beschleunigt werden. Der Vorteil der Gutaufgabe in Bewegungsrichtung lässt sich daher nicht vollständig nutzen.

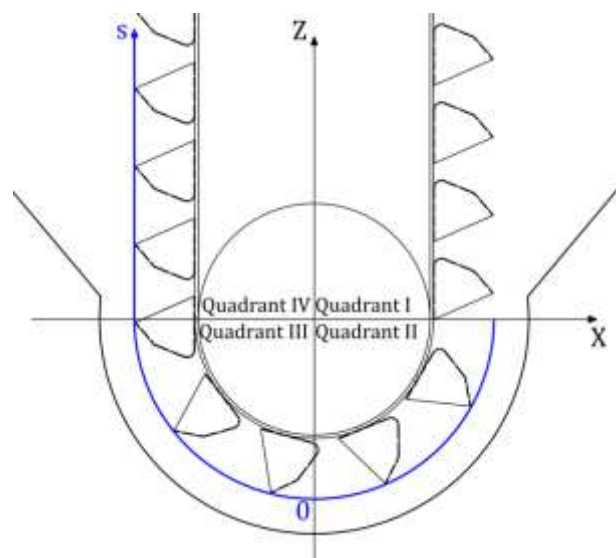


Abbildung 2: Einteilung des Schöpfbereichs anhand der zurückgelegte Strecke eines Bechers im Becherwerkfuß

Für den Fall der lasttrumseitigen Gutaufgabe kohäsionsloser Schüttgüter wird das Schüttgut hauptsächlich im zweiten und dritten Quadranten von den Bechern aufgenommen. Der größte Schöpfwiderstand tritt an der Stelle der Aufgabeschurre auf, da das Gut entgegen der aufgegebenen Geschwindigkeit beschleunigt werden muss. Aufgrund der Fliehkräfte beim Auslaufen des Bechers aus der Spanntrommel wird ein Teil des Gutes aus dem Becher geworfen und prallt aufgrund der Schwerkraft oberhalb der Gutaufgabe zurück in den Becher. Dies verursacht einen zusätzlichen Bewegungswiderstand in Höhe von 30 N. Es wird weniger Schüttgut aus den Bechern geschleudert als bei der leertrumseitigen Gutaufgabe kohäsionsloser Schüttgüter, da das Schüttgut aus der Aufgabeschurre in den Bechern befindlichen Schüttgutteilchen entgegen strömt und diese daran hindert, den Becher zu verlassen. Es sammelt sich daher weniger Gut im Becherwerkfuß, sodass der Betrag des Schöpfwiderstandes geringer ist. Die Schöpfarbeit ist mit der leertrumseitigen Gutaufgabe kohäsionsloser Schüttgüter vergleichbar und beträgt 21 Nm.

Bei der lasttrumseitigen Gutaufgabe kohäsiver Schüttgüter ist der Becherfüllungsgrad sehr klein, da das kohäsive Schüttgut von den Bechern nicht aufgenommen wird. Nur ein kleiner Teil des Schüttgutes wird von der Becherspitze gelöst und zur Gutabgabe gefördert. Der Becherwerkfuß ist nach einer relativ kurzen Simulationszeit von 6 Sekunden bereits überfüllt. Das in der Aufgabeschurre verbleibende Schüttgut lässt den in den Bechern

befindlichen Schüttgutteilchen keinen Raum diesen zu verlassen. Daher ist ein erneutes Herausschleudern des Schüttgutes nicht zu beobachten. Becherwerke sind typischerweise nicht für stark kohäsive Schüttgüter geeignet. Die hier diskutierten Ergebnisse der lasttrumseitigen Beschickung kohäsiver Schüttgüter zeigen, dass eine ausreichende Gutaufnahme bei hohen Fördergeschwindigkeiten nicht möglich ist.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der in der Simulation ermittelten Schöpferarbeit eines Bechers für den Geschwindigkeitsbereich der Fliehkraftentleerung bei last- und leertrumseitiger Gutaufgabe für kohäsionslose und kohäsive Schüttgüter

	lasttrumseitige Gutaufgabe	leertrumseitige Gutaufgabe
kohäsionsloses Schüttgut		
kohäsives Schüttgut		

Tabelle 3 fasst die spezifische Schöpferarbeit (Schöpferarbeit bezogen auf ein Kilogramm gefördert Schüttgut) für alle untersuchten Becher im stationären Zustand der Simulationen zusammen. Die durchschnittliche spezifische Schöpferarbeit der lasttrumseitigen Gutaufgabe ist höher, als die der leertrumseitigen Gutaufgabe, obwohl die

reine Schöpferarbeit entlang des Schöpferweges vergleichbar ist. Dies ist mit dem deutlich größeren Becherfüllungsgrad in der Simulation für den Fall der leertrumseitigen Gutaufgabe zu begründen. Die spezifische Schöpferarbeit für kohäsive Güter ist für die lasttrumseitige Befüllung aufgrund des geringen Becherfüllungsgrad sehr hoch, da das

Schüttgut von den Bechern nicht aufgenommen werden kann. Das Schöpfen kohäsiver Güter bei der leertrumseitigen Beschickung erfordert die niedrigste spezifische Schöpfarbeit. Dies ist mit dem hohen Becherfüllungsgrad

in der Simulation und der geringen Schöpfarbeit zu begründen. Weiterführende Untersuchungen des Schöpf- und Entleerungsverhaltens von Becherwerken sind in [Ric20] enthalten.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der spezifischen Schöpfarbeit im stationären Zustand der Simulation für last- und leertrumseitige Gutaufgabe kohäsionsloser und kohäsiver Schüttgüter

	lasttrumseitige Gutaufgabe	leertrumseitige Gutaufgabe
kohäsionsloses Schüttgut	<p>Spezifische Schöpfarbeit in der Simulation mit $v=4\text{ m/s}$ Kohäsion: keine; Beschickung: Lasttrum</p> <p>63.16 Nm</p>	<p>Spezifische Schöpfarbeit in der Simulation mit $v=4\text{ m/s}$ Kohäsion: keine; Beschickung: Leertrum</p> <p>51.96 Nm</p>
kohäsives Schüttgut	<p>Spezifische Schöpfarbeit in der Simulation mit $v=4\text{ m/s}$ Kohäsion: hoch; Beschickung: Lasttrum</p> <p>97.78 Nm</p>	<p>Spezifische Schöpfarbeit in der Simulation mit $v=4\text{ m/s}$ Kohäsion: hoch; Beschickung: Leertrum</p> <p>19.59 Nm</p>

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die gekoppelte DEM-MK-Simulationsmethode ist für detaillierte Untersuchungen von Förderprozessen, welche in der Realität nicht oder nur indirekt beobachtet werden können, geeignet. An dem in diesem Beitrag vorgestellten Beispiel des Schöpfwiderstandes von Senkrechtbecherwerken ermöglichen die Simulationsergebnisse ein tieferes Systemverständnis der Vorgänge bei unterschiedlichen Beschickungsarten und Güteeigenschaften. Die bisher nur empirisch ermittelten Funktionen der spezifischen Schöpfarbeit können anhand des Simulationsmodells analysiert werden. Für die Gestaltung neuer Förderanlagen und die Effizienzsteigerung bestehender Anlagen, beispielsweise durch optimierte Umlenk- oder Bechergeometrien, liefert die gekoppelte DEM-MK-

Simulationsmethode die dafür notwendigen Vergleichsgrößen.

In zukünftigen Arbeiten kann durch die Kopplung der DEM-MK-Simulation mit der Finiten Elemente Methode (FEM) weiterhin das Verformungsverhalten der einzelnen Bauteile, beispielsweise der Becher-Gurt-Verbindung, untersucht werden. Die dafür notwendige Entwicklung und Implementierung einer gekoppelten DEM-MK-FEM-Simulationsmethode wird in [KR16] und [Dra16] vorgestellt.

Literatur

- [RRK17] Richter, C.; Rößler, T.; Katterfeld, A.: Dem Bechernicken auf der Spur, 2017.
- [Dro04] Dronka, S.: Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2004. Shaker, Aachen, 2004.
- [GF14] Grote, K.-H.; Feldhusen, J. Eds.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Ric20] Richter, C.: Gekoppelte Diskrete Elemente und Mehrkörpersimulation am Beispiel von Becherförderern. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2020.
- [NBN11] Noll, C. et al.: Implementation of Modelisar Functional Mock-up Interfaces in SimulationX. In (Technical Univeristy, D. Ed.): The 8th International Modelica Conference. Linköping University Electronic Press, 2011; pp. 339–343.
- [Dra16] Dratt, M.: Kopplung von FEM- und DEM-Simulationen zur Analyse der Gut-Bauteil-Interaktionen in der Fördertechnik. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016.
- [KR16] 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). Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, 2016.
- [BOA11] Blochwitz, T. et al.: The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models: The 8th International Modelica Conference. Linköping University Electronic Press, 2011; pp. 105–114.
- [Dil93] Dilefeld, M.: Zum Schöpfverhalten von Becherförderern. Dissertation, Magdeburg, 1993.
- [BW60] Beumer, B.; Wehmeier, K.-H.: Zur Frage des Schöpfwiderstandes und der Abwurfverhältnisse bei Becherwerken. In Fördern und Heben, 1960.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld, Head of Institute of Logistics and Material Handling Systems, Chair of Materials Handling, Otto-von-Guericke-University Magdeburg.

Dr.-Ing. Christian Richter, Research Assistant at Chair of Materials Handling, Otto-von-Guericke-University Magdeburg.

Adresse: Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Germany
Phone: +49 391 67-50178, Fax: +49 391 67-42646
E-Mail: christian.richter@ovgu.de