

307/1

# Schüttgut

kompetent • branchenübergreifend • praxisnah

6



Radarfüllstandmessung mit 80 GHz

## Nachhaltiger Eindruck

-  SPECIAL  
Messen und  
Automatisieren 8
-  Schiffsentladung  
Staubarmer  
Materialtransport 28
-  Explosionsschutz  
Glimmnerster als  
Zündquelle 48

Entwicklungswerkzeuge in der Schüttguttechnik – am Beispiel einer Bunkeranlage

## Simulation im Praxistest

Anhand einer Versuchsanlage, bestehend aus einem rechteckigen Bunker mit keilförmigem Auslauftrichter und einem Abzugsförderband, wird die klassische analytische Berechnung der numerischen Simulation, konkret der Diskreten Elemente Methode gegenübergestellt. Von Interesse ist die Druckverteilung im Bunker und am Abzugsförderband sowie in weiterer Folge das erforderliche Antriebsmoment bei verschiedenen Schieberöffnungen. Die Ergebnisse beider Entwicklungswerkzeuge werden mit Messungsergebnissen verglichen. Dabei werden neben der Genauigkeit der Verfahren auch deren zeitlicher Aufwand sowie deren Flexibilität betrachtet.

Prof. (FH) Priv. Doz. Dr. Martin Egger, Dipl.-Ing. Alexander Haber, Dipl.-Ing. Dr. Klaus Decker

Bilder: FH Weis



Die Versuchsanlage besteht aus einem rechteckigen Bunker mit keilförmigem Auslauftrichter und einem Abzugsförderband. Daran wurde die klassische analytische Berechnung der numerischen Simulation gegenübergestellt.

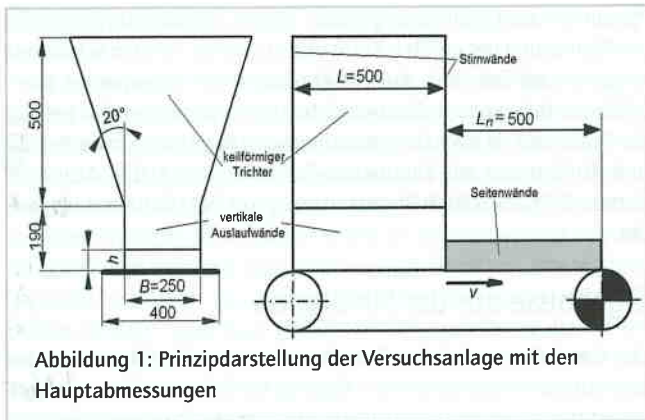


Abbildung 1: Prinzipdarstellung der Versuchsanlage mit den Hauptabmessungen

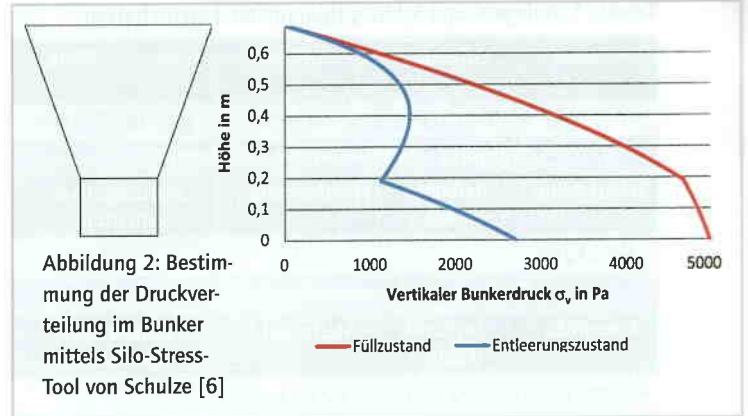


Abbildung 2: Bestimmung der Druckverteilung im Bunker mittels Silo-Stress-Tool von Schulze [6]

Nimmt man das klassische Auslegungsverfahren zur Hand, liefert die Janssen-Gleichung [1] den Vertikaldruck im vertikal verlaufenden Abschnitt des Bunkers. Die Berechnung der Spannungen im keilförmigen Bereich ist aufwändig und erfordert zum Teil numerische Lösungen wie z.B. in [2]. Bei den Spannungen im Silo sowie bei den Belastungen auf die Abzugseinrichtungen ist immer zwischen dem Füllzustand und dem Entleerungszustand zu unterscheiden. Beim Füllzustand wird der leere Bunker gefüllt. Der sich einstellende Spannungszustand resultiert aus der Erdanziehung und der Fließbehinderung durch die Bunkerwände. Die Spannungen sind in vertikaler Richtung größer als in horizontaler Richtung. Ein großer Teil des Schüttgutgewichtes lastet direkt auf der Abzugseinrichtung die den Bunker verschließt, der Rest stützt sich über Reibung an der Bunkerwand ab. Somit ergeben sich durch die Spannungsverhältnisse relativ hohe Kräfte auf das Bunkerabzugsband und relativ geringe Kräfte auf die Bunkerwand [3].

Beim Öffnen der Auslauföffnung und Anfahren des Abzugsförderbandes stellt sich der Entleerungszustand ein. Das Schüttgut fließt im Bunker nach unten ab. Es wird dabei im Trichter horizontal verdichtet und vertikal entspannt. Der Druck auf die Bunkerwand steigt, der Druck auf das Abzugsförderband nimmt ab und ist kleiner als im Füllzustand. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Schieberöffnung groß genug ist und sich ein entsprechend großer Massenstrom einstellen kann bzw. das Schüttgut sich nach unten ausreichend entspannen kann. Durch das unter dem Bunker befindliche Abzugsband weichen die Verhältnisse, je nach Massenstrom zum Teil gravierend vom theoretisch betrachteten Massenflusssilo ab. Damit können die verwendeten Ansätze in diesem Zusammenhang nur noch als grobe Näherung betrachtet werden. Bereits hier stoßen die analytischen Methoden an ihre ersten Grenzen.

### Analytische Berechnung des vertikalen Drucks

Der Vertikaldruck im Bunker hat einen entscheidenden Einfluss auf die Abzugskraft und damit auf die Antriebsleistung des Abzugsförderbandes. Für die Behandlung der im Zuge dieser Arbeit herangezogenen Anlage entsprechend Abbildung 1 mit keilförmigem Trichter sowie sich darunter befindlichen vertikalen Auslaufwänden soll außerdem die Reibung an den Stirnwänden berücksichtigt werden. In der Literatur [4] findet man mehrere Ansätze zur Berechnung dieser Konfiguration, u.a. könnte die DIN EN 1991 4:2012 12 [5] herangezogen werden. Da die Berücksichtigung der Reibung an den Stirnwänden jedoch eine numerische Lösung der bestimmenden Differentialgleichung erfordert, wird an dieser Stelle auf das Silo-Stress-Tool von Schulze [6] zurückgegriffen. Für den Füllzustand wird

der Ansatz von Motzkus [7] herangezogen, für den Entleerungszustand wird auf die Methode von Arnold und McLean [8] zurückgegriffen. Die Anwendung des Programms gestaltet sich intuitiv und als Ergebnis folgt die Druckverteilung entsprechend Abbildung 2.

### Berechnung der Bunkerabzugskraft

Die Bunkerabzugskraft setzt sich zusammen aus der Kraft, die notwendig ist, das Schüttgut in der Scherzone abzuscheren und der Kraft, die benötigt wird, um die Reibungskräfte des Schüttgutes an den seitlichen Wänden zu überwinden.

$$F = F_s + F_{wu} + F_{wn} \quad (1)$$

mit Scherkraft

$$F_s = \tan(\varphi_e) \cdot \sigma_{vs} \cdot L \cdot B \quad (2)$$

Reibkraft unter dem Trichter

$$F_{wu} = \tan(\varphi_x) \cdot \lambda \cdot \left( \frac{\sigma_{vs} + \sigma_{vb}}{2} \right) \cdot L \cdot h \quad (3)$$

Reibkraft nach dem Trichter

$$F_{wn} = \tan(\varphi_x) \cdot \lambda \cdot g \cdot \rho \cdot L_n \cdot h^2 \quad (4)$$

In den Gleichungen (1)-(4) bezeichnet  $\sigma_{vs}$  den Vertikaldruck im Bunker an der oberen Schieberauslasskante und  $\sigma_{vb}$  den Vertikaldruck im Bunker an der unteren Schieberauslasskante am Band. Die relevanten Anlagenparameter sowie die Schüttgutparameter für das verwendete Schüttgut Kantkorn 4/8 sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Schüttgutparameter werden dabei aus Scherzellenmessungen abgeleitet. Aus diesen Größen kann der laterale Druck gegen die Bunkerwände und damit die Reibwirkung errechnet werden. Die in Tabelle 1 ebenso angeführten physikalischen Eigenschaften des einzelnen Kornes sind insbesondere für die numerische Simulation interessant.

Damit es zwischen Abzugsförderband und Schüttgut zu keinem Durchrutschen kommt, muss das Schüttgut in einer Scherzone oberhalb des Abzugsförderbandes zum Fließen gebracht werden. Überlegungen hinsichtlich der dafür notwendigen Voraussetzungen findet man z.B. bei A. W. Roberts [9].

Allein anhand der Vielzahl an dokumentierten Ansätzen und der Bandbreite ihrer Ergebnisse lässt sich über die Genauigkeit dieser Methoden mutmaßen. In der Tat berücksichtigt nur der Ansatz von Roberts den Einfluss der Schieberöffnung auf die Scherebene. Die Abzugskraft F wird bei den kleinen Schieberöffnungen (bis 20 mm beim Füllzustand und bis 15 mm beim Entleerungszustand) nicht

Tabelle 1: Anlagen- und Schüttgutparameter, Eigenschaften

Volumen $V$	Öffnung $h$	Geschwindigkeit $v$	Länge $L$	Breite $B$
0,1216 m <sup>3</sup>	0–140 mm	0,2 m/s	500 mm	250 mm
Schüttgutparameter: Kankorn 4/8 Kennwerte:				
Schüttdichte $\rho$	Reibungswinkel $\varphi_s$	Wandreibung $\varphi_w$	Horizontallastverhältnis $\lambda$	
1202 kg/m <sup>3</sup>	52°	24°	0,15	
Physikalische Eigenschaften Kankorn 4/8:				
Korngröße $d$	Feststoffdichte $\rho_s$	Steifigkeit $E$	Restitutionskoeffizient	
4–8 mm (94%)	2600 kg/m <sup>3</sup>	$77 \cdot 10^9$ N/m <sup>2</sup>	0,3	

durch Gleichung (1) beschrieben, sondern ist durch die maximal zwischen Band und Schüttgut übertragbare Reibungskraft limitiert. In diesem Fall kommt es zu einer ungewünschten Relativbewegung zwischen Band und Schüttgut. Die Ergebnisse der klassischen analytischen Berechnung der Abzugskräfte werden mit jenen der Simulation verglichen und in Abbildung 6 dargestellt.

### Numerische Simulation (DEM)

Die für die klassische analytische Berechnung notwendigen Schüttgutkennwerte setzen bestimmte Rahmenbedingungen voraus und nur für diese haben sie in weiterer Folge auch Gültigkeit. Die Anwendung der klassischen analytischen Auslegung wird damit stark auf bereits definierte Situationen eingeschränkt und ist nur für einen begrenzten Parameterraum geeignet. Wegen der schwierigen Rahmenbedingungen durch das Abzugsförderband und die möglichen unterschiedlichen Schieberöffnungen, stößt die klassische analytische Auslegung hier bereits an ihre Grenzen. Es bietet sich daher an, die Versuchsanlage mit einer numerischen Simulation zu behandeln.

Für qualitativ wie auch quantitativ richtige Ergebnisse müssen die Simulationsparameter zuvor, dem Material entsprechend, richtig kalibriert werden, d.h. im Allgemeinen weichen die für die Simulation gewählten Eigenschaften von den tatsächlichen physikalischen Eigenschaften des Korns ab. Um die Rechenzeiten möglichst gering zu halten, werden die Partikel in der Simulation meist größer und vor allem wesentlich weicher abgebildet als sie in der Realität sind. Bei den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Simulationen werden ausschließlich kugelförmige Partikel mit einem einheitlichen Durch-

messer von acht Millimeter gewählt. Dieser Durchmesser entspricht der Abmessung des größten Korns des zu untersuchenden Schüttguts entsprechend Tabelle 1. Auf die Abbildung der vorliegenden Korngrößenverteilung wird also verzichtet. Im vorliegenden Fall beträgt die Rechenzeit, je nach der gewählten Schieberöffnung, zwischen 33 und 40 Stunden. Als Simulations-Software wird EDEM Academic Version 2.7 (Lizenz für 8 Prozessorkerne) von DEM Solutions verwendet.

### Ergebnisse aus der Simulation

Die klassische analytische Berechnung hat große Schwierigkeiten den aus der Praxis bekannten Einfluss der Schieberöffnung hinreichend genau zu berücksichtigen. Die numerische Simulation hat dieses Problem nicht, denn hinsichtlich geometrischer Randbedingungen gibt es bei der numerischen Simulation praktisch keinerlei Einschränkungen auf die Anwendung.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den Einfluss der Schieberöffnung auf den Partikelfluss. Dargestellt werden die z-Komponenten der Partikelgeschwindigkeiten, wobei die Farbe Rot eine Aufwärtsbewegung signalisiert. Bei einer Schieberöffnung von 80 mm zeigt sich ein relativ homogener Partikelfluss über die gesamte Bunkerlänge. Sämtliches Schüttgut, das vom Förderband aufgenommen wird, kann auch durch die Schieberöffnung abtransportiert werden. Das Schüttgut wird relativ gleichmäßig über die Bunkerlänge  $L$  abgezogen und an der Schieberkante kommt es nicht zum Aufstauen der Partikel.

Ganz anders verhält es sich bei einer Schieberöffnung von 15 mm. Aus dem hinteren Bereich des Bunkers wird wesentlich mehr Material vom Förderband aufgenommen, als schlussendlich durch die kleine Schieberöffnung abtransportiert werden kann. Damit kommt es zu einem Aufstauen der Partikel vor dem Schieber und weil stets mehr Partikel nachkommen, müssen die Partikel schließlich im Bunker vor dem Schieber nach oben ausweichen. Dies führt wiederum zu Kräften, die entgegen der Bewegungsrichtung der Partikel den vertikalen Druck im Schüttgut erhöhen. Damit steigt schließlich auch die horizontale Abzugskraft. Der Effekt des Aufstauens wird durch eine Veränderung der Bandgeschwindigkeit nicht beeinflusst und kann daher nur durch geeignete geometrische Maßnahmen verhindert werden.

Wie aus der Literatur [3] bekannt, sollte daher zunächst die Schieberöffnung unabhängig von dem gewünschten Volumenstrom im Sinne einer Minimierung der Bandabzugskräfte eingestellt werden. Die Steuerung des Volumenstroms erfolgt dann durch Veränderung der Bandgeschwindigkeit. Verschiedene Einbauten an der Überga-

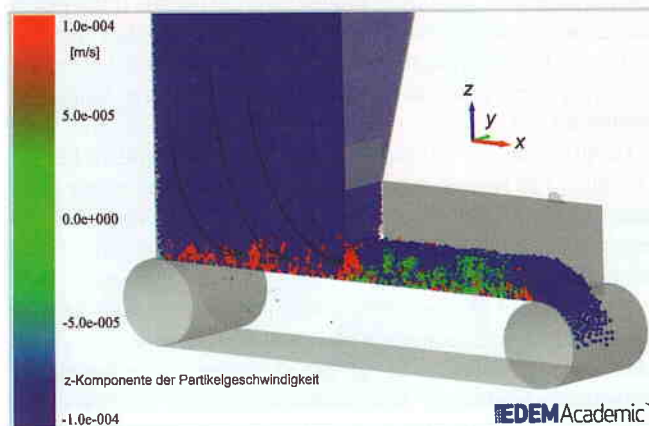


Abbildung 3: Partikelbewegung im Bunker bei 80 mm Schieberöffnung

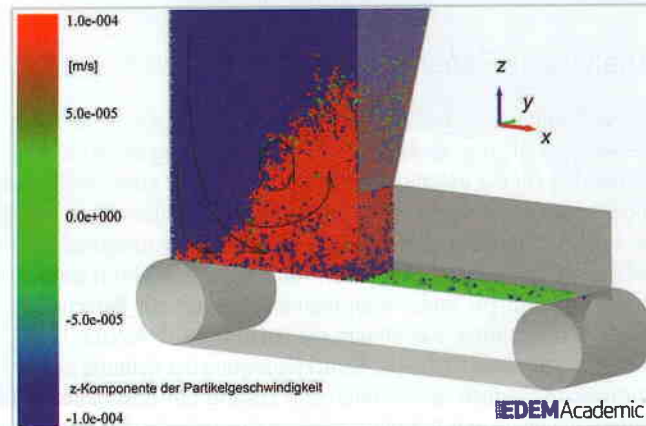


Abbildung 4: Partikelbewegung im Bunker bei 15 mm Schieberöffnung

bestelle zwischen Bunker und Band können sich zusätzlich positiv auswirken.

Für die Berechnung der Antriebsleistung ist der vertikale Druck in der Scherzone relevant. Mit der eingesetzten Software kann dieser allerdings nicht einfach ermittelt werden. Hingegen kann aber die Wechselwirkung zwischen Abzugsförderband und Schüttgut berechnet werden. In Abbildung 5 werden die Simulationsergebnisse des zeitlichen Verlaufs der vertikalen Kraft auf das Förderband betrachtet. Dazu wird zunächst Schüttgut in einer Höhe von einem Meter generiert und durch Herabfallen füllt dieses den Bunker. Das Auftreffen auf dem Förderband bewirkt zunächst eine kurze Kraftspitze. Im Laufe eines Setzvorganges nähert sich die vertikale Kraft dem Füllzustand von etwa 750 N. Nach einer Sekunde Simulationszeit wird das Band gestartet: Bei einer Schieberöffnung von 80 mm stellt sich innerhalb einer weiteren Sekunde allmählich der Entleerungszustand mit einer verringerten vertikalen Kraft auf das Band von nur noch 400 N ein. In diesem Fall ist eindeutig der Füllzustand für die Dimensionierung des Antriebes relevant.

Bei einer Schieberöffnung von nur 15 mm steigt hingegen die vertikale Kraft nach dem Füllzustand und erreicht etwa 900 N im Entleerungszustand. Die Erklärung liegt im sich aufstauenden Schüttgut, wie in Abbildung 4 dargestellt.

## Vergleichende Messung

Für die Validierung der analytischen sowie der simulierten Ergebnisse werden die auf das Bunkerabzugsband wirkende Gewichtskraft des Schüttguts sowie das Antriebsmoment am Abzugsförderband gemessen. Die Messung des Antriebsmoments erfolgt über eine Strom- und Drehwinkelmessung am Antriebs-Servomotor. Über das Antriebsmoment wird in weiterer Folge auf die Abzugskraft rückgeschlossen. Die Kraft auf das Förderband wird ermittelt, indem die Lastverteilung zwischen dem Bunkerabzugsbands und dem Bunker mittels Kraftmessdosen gemessen wird. Dabei können für den Füllzustand sowohl die Ergebnisse der numerischen Simulation als auch der analytischen Berechnung weitgehend bestätigt werden:

Nach dem Füllen und einiger Wartezeit lasten bei der Messung etwa 610 N auf dem Abzugsförderband. Das entspricht einem mittleren Vertikaldruck auf das Band von 4880 N/m<sup>2</sup>. Die numerische Simulation liefert eine vertikale Kraft auf das Band von etwa 750 N, die analytische Berechnung liefert entsprechend Abbildung 2 einen Vertikaldruck von 4620 N/m<sup>2</sup>. Der von der numerischen Simulation vorhergesagte Einfluss der Schieberöffnung auf die Abzugskraft kann durch die Messung des Antriebsmomentes bestätigt werden. Unter

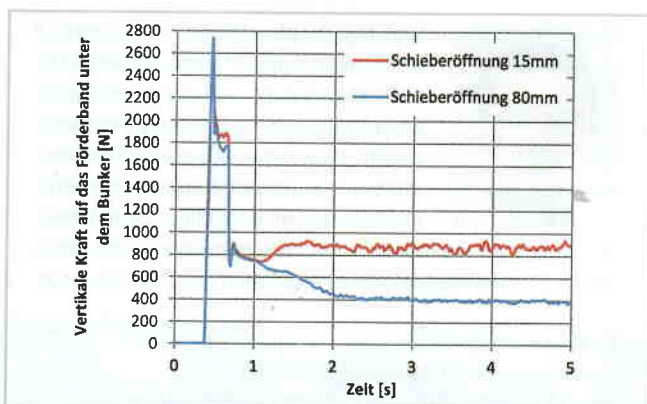


Abbildung 5: Simulation des Zeitverlaufs der vertikalen Kraft auf das Band bei 15 mm und 80 mm Schieberöffnung

# Schüttgut

ISSN 0946-7939

**Redaktions- und Verlagsanschrift:**  
Vogel Business Media  
GmbH & Co. KG  
Max-Planck-Str. 7/9  
97082 Würzburg

**Publisher:**  
Gerd Kielburger  
E-Mail: gerd.kielburger@vogel.de

**Redaktionsleitung:**  
Dipl.-Ing. Sabine Mühlenkamp  
Tel. +49-721-8304118  
E-Mail: sabine.muehlenkamp@vogel.de

**CvD:**  
Stephanie Röll

**Redaktionsassistenz:**  
Gabriele Ilg  
Tel. +49-931-418-2107  
Fax: +49-931-418-2750  
E-Mail: gabriele.ilg@vogel.de

**Firmen- und Produktnamen:**  
Wir schreiben sie gemäß Duden wie normale Substantive. So entfallen etwa Großbuchstaben und Mittel- initiale in Firmennamen.

**Verkaufsleiter:**  
Reiner Öttinger  
Tel. +49-931-418-2613  
E-Mail: reiner.oettinger@vogel.de

**Anzeigenverkauf:**  
Sven Gehwald  
Tel. +49-931-4 18-2256  
E-Mail: sven.gehwald@vogel.de

**Auftragsmanagement:**  
Werner Wolz  
Tel. +49-931-418-2470  
E-Mail: werner.wolz@vogel.de

**Anzeigenpreise:**  
Zur Zeit gültig: Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 01.01.2016

**Erscheinungsweise:**  
Sieben Mal jährlich.  
Angeschlossen der Informationsgemeinschaft zur Feststellung der Verbreitung von Werbeträgern – Sicherung der Auftragswahrheit.

**Inhaber- und Beteiligungsverhältnisse:**  
Persönlich haftende Gesellschafterin: Vogel Business Media Verwaltungs GmbH, Max-Planck-Str. 7/9 in 97082 Würzburg.  
Kommanditistin: Vogel Medien Holding GmbH & Co. KG, Max-Planck-Str. 7/9 in 97082 Würzburg

**Geschäftsführung:**  
Stefan Rühling (Vorsitz)  
Florian Fischer, Günter Schürger

**Herstellung:**  
Andreas Hummel

**Layout:**  
Agentur Print/Online

**Druck:**  
Vogel Druck und Medienservice GmbH, 97204 Höchberg

**Vertrieb und Abonnentenservice:**  
DataM-Services GmbH,  
Franz-Horn-Str. 2, 97082 Würzburg  
Martina Grimm  
Tel. +49-931-4170-473,  
Fax: +49-931-4170-494  
E-Mail: mgrimm@datam-services.de  
Bestellungen nehmen der Verlag sowie alle Buchhandlungen im In- und Ausland entgegen.

**Bezugsbedingungen für Abonnements:**  
Deutschland: 227,00 Euro inkl. Versandkosten pro Jahr. Europäisches Ausland auf Anfrage.  
Kosten für Luftpostlieferung auf Anfrage. Einzelheft: 40,00 Euro zuzügl. Versandkosten. Innerhalb des EG-Binnenmarktes werden Lieferungen an Kunden ohne USt-ID-Nummer mit der gesetzlich vorgeschriebenen Mehrwertsteuer belastet. Der Abonnementpreis gilt für eine Mindestbezugszeit von zwölf Monaten. Kündigungen sind jederzeit mit einer Frist von vier Wochen möglich. Im Falle höherer Gewalt erlischt jeder Anspruch auf Nachlieferung oder Rückerstattung des Bezugsgeldes.

**Erfüllungsort und Gerichtsstand:**  
Würzburg. Reklamationen wegen nicht erhaltener abonniertes Hefte können nur in einem Zeitraum von vier Monaten nach Erscheinen akzeptiert werden.

**Copyright:**  
Vogel Business Media GmbH & Co. KG.  
Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt

**Nachdruck und elektronische Nutzung:**  
Wenn Sie Beiträge dieser Zeitschrift für eigene Veröffentlichung wie Sonderdrucke, Websites, sonstige elektronische Medien oder Kundenzeitschriften nutzen möchten, erhalten Sie Information sowie die erforderlichen Rechte über [www.mycontentfactory.de](http://www.mycontentfactory.de) oder Manuela Maurer, Tel. +49-931-418-2786.

**Datenbank:**  
Die Artikel dieses Heftes sind in elektronischer Form kostenpflichtig über die Wirtschaftsdatenbank Genios zu beziehen: [www.genios.de](http://www.genios.de)

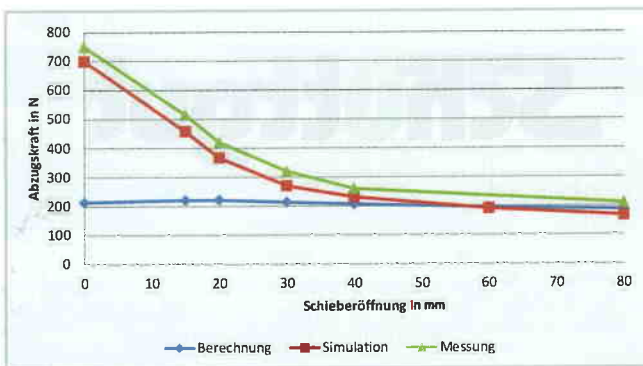


Abbildung 6: Abzugskraft im Entleerungszustand in Abhängigkeit von der Schieberöffnung; Vergleich analytische Berechnung, numerische Simulation und Ergebnisse aus der Messung des Antriebsmomentes

Last variiert das Gesamtmoment je nach Schieberöffnung. Allerdings wird bei dieser Art von Messung nur die Gesamtheit der Bewegungswiderstände erfasst. Über Leerlaufmessungen werden die Leerlaufverluste ermittelt und zwar sowohl vor als auch nach der eigentlichen Messung unter Last. Die Leerlaufverluste werden in weiter Folge vom Messergebnis abgezogen. Lastabhängige Bewegungswiderstände können auf diese Weise nicht erfasst werden. Abbildung 6 zeigt die vergleichende Auswertung der Abzugskräfte im Entleerungszustand von analytischer Berechnung, numerischer Simulation und Messung des Antriebsmomentes in Abhängigkeit von der Schieberöffnung. Die analytische Berechnung liefert eine von der Schieberöffnung weitgehend unabhängige Abzugskraft, obwohl für den äquivalenten inneren Reibkoeffizienten der Ansatz nach Roberts gewählt wurde. Die Messung und Simulation zeigen allerdings, dass die Abzugskraft im Entleerungszustand sehr stark von der Schieberöffnung abhängig ist. Die zu gering berechneten Abzugskräfte der analytischen Berechnung bei kleinen Schieberöffnungen sind darin begründet, dass es durch die zu kleine Öffnung zu einem Hochwandern des Schüttguts an der Bunkerwand über der Schieberöffnung kommt und sich daher der vertikale Bunkerdruck auf das Abzugsband erhöht. Dieser Effekt wird im analytischen Berechnungsansatz nicht berücksichtigt und es wurde in der Literatur bisher auch keine alternativer Ansatz für eine Berechnung des Bunkerdruckes in Abhängigkeit der Schieberöffnung gefunden.

### Zusammenfassung

Anhand eines Bunkerabzugsbandes wird die klassische analytische Berechnungsmethode der Simulation mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode gegenübergestellt. Als besonderer Vorteil der Simulation erweist sich deren Flexibilität in Bezug auf die möglichen Randbedingungen. So kann nicht nur ein reiner Massenflusssilo untersucht werden, sondern auch jegliche sich einstellende Fließform, ohne vorher über die sich einstellende Form Bescheid wissen zu müssen. Dieser Umstand führt jedoch keineswegs dazu, dass die wesentlich schnelleren analytischen Methoden damit hinfällig werden. Vielmehr führt die Simulation zu einem besseren Verständnis des Schüttgutverhaltens. Massenströme und Strömungsformen können analysiert werden. Die erlangten Erkenntnisse helfen bei der Entwicklung genauerer analytischer Methoden. In der vorliegenden Versuchsanlage stellt sich ein Abzugsverhalten von hinten her ein. Dies konnte durch die Messungen bestätigt werden und wird in der Simulation ebenfalls richtig wiedergegeben. Die bekannten analytischen Ansätze berücksichtigen den Einfluss der Schieberöffnung nicht und gehen stets

von einem optimal eingestellten Schieber aus. Das führt bei kleinen Schieberöffnungen zu unbrauchbaren Ergebnissen.

Die Forschungstätigkeit wird durch finanzielle Mittel der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützt. **Den ersten Teil des Beitrags finden Sie in der Schüttgut 5-2016. Diese Ausgabe können Sie kostenlos anfordern.**

### Literatur

- [1] Janssen, H. A.: Getreidedruck in Silozellen, Z. Ver. Dt. Ing., Vol. 39, 1895.
- [2] Molerus O.: Schüttgut-Mechanik, Springer, 1985
- [3] Schulze D.: Pulver und Schüttgüter, 2. Auflage, Springer, 2009
- [4] Schulze, D.: Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan, Dissertation TU Braunschweig, 1991.
- [5] DIN EN 1991-4, Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, 12.2012
- [6] Schulze, D.: SILO STRESS TOOL Version 1.2.0.2, <http://www.dietmar-schulze.de/download.html>, 2014.
- [7] Motzkus, U.: Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter, Dissertation TU Braunschweig, 1974.
- [8] Arnold, P.C., McLean, A.G.: An analytical solution for the stress function at the wall of a converging channel, Powder Technology, Vol. 13, 1976.
- [9] Roberts, A. W.: Recent developments in feeder design and performance, Handbook of Powder Technology, Vol. 10, 2001.

### Die Autoren



**Priv. Doz. Dr. Martin Egger:** Er studierte an der TU Wien Maschinenbau. Nach der Promotion am Institut für Konstruktionslehre und Fördertechnik der TU Wien im Jahr 2000 folgten Forschungsaufenthalte in Ancona und in Genf. Seit 2002 ist Martin Egger Professor an der Fachhochschule Oberösterreich und leitet dort den Fachbereich für Konstruktionswissenschaften. 2008 habilitierte er an der TU Wien im Fach Fördertechnik.



**Dipl.-Ing. Alexander Haber:** Er studierte an der TU Wien Maschinenbau. Seit 2015 arbeitet er am Inst. für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik der TU Wien an mehreren Forschungsprojekten zur Schüttgutsimulation mit DEM-Simulation. Seine Doktorarbeit verfasst er in der Partikelsimulation.



**Dipl.-Ing. Dr. Klaus Decker:** Er studierte an der TU Wien Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau. Seit 2003 ist er dort am Inst. für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik tätig, wo er sich bis zur Promotion 2006 mit der diskreten Simulation von Materialflusssystemen beschäftigte. Seine Schwerpunkte sind die Grundlagen der maschinenbaulichen Konstruktion und die Untersuchung des Schüttgutverhaltens mit DEM-Simulation.

FH Oberösterreich  
 Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, Österreich  
 Tel. +43-50804-43235, E-Mail: [Martin.Egger@fh-wels.at](mailto:Martin.Egger@fh-wels.at)  
 Internet: [www.fh-wels.at](http://www.fh-wels.at)