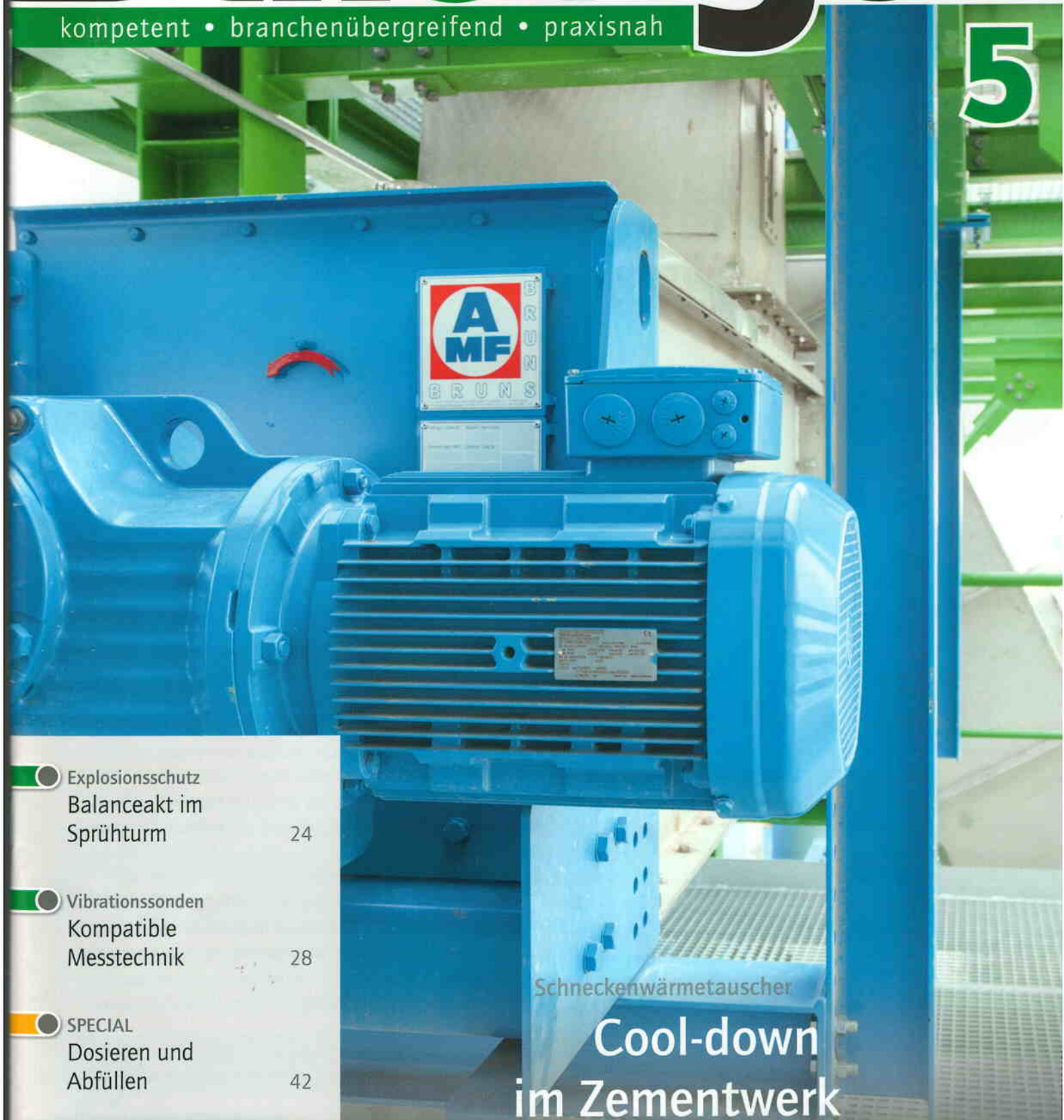


30711

Schüttgut

kompetent • branchenübergreifend • praxisnah

5



Schneckenwärmetauscher

Cool-down im Zementwerk

- Explosionsschutz
 Balanceakt im
 Sprühturm 24

- Vibrationssonden
 Kompatible
 Messtechnik 28

- SPECIAL
 Dosieren und
 Abfüllen 42

Entwicklungswerkzeuge in der Schüttguttechnik

Klassische Analyse versus numerische Simulation

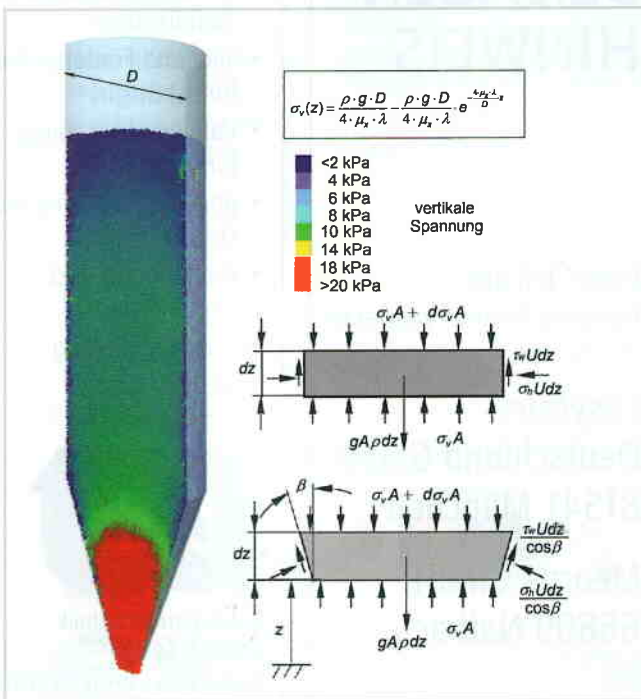
Das analytische Auslegungsverfahren basiert auf relativ komplexen Schüttgut-Parametern, die das Schüttgutverhalten geeignet beschreiben. Diese sind oft schwer zu ermitteln und nur für sehr spezielle Situationen gültig. Die Diskrete Elemente Methode hingegen basiert auf wenigen Eigenschaften des einzelnen Kornes und ist prinzipiell sehr allgemein einsetzbar. Allerdings stellt sich die Frage, ob mit diesen wenigen Eigenschaften des einzelnen Kornes das komplexe Verhalten des Schüttguts hinreichend genau abgebildet werden kann. Der Betrag vergleicht beide Methoden.

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

Für analytische Auslegungsverfahren ist die Bestimmung der Schüttgutparameter im Allgemeinen sehr aufwändig und oft auch schwierig. Als Beispiel wird das Horizontallastverhältnis entsprechend DIN EN 1991-4 [1] angeführt. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen den beiden Hauptnormalspannungen im Schüttgut und ist vor allem für die Auslegung von Silos und den dazugehörigen Austragsgeräten erforderlich. Aber woher bekommt man verlässliche Werte für diesen Parameter? In der Literatur [1,2] findet man sowohl standardisierte Prozeduren zur Bestimmung –

also auch grobe Richtwerte aus bisherigen Erfahrungen. Nachteilig dabei ist, dass die Bestimmungsmethoden an sehr spezielle Rahmenbedingungen gebunden sind, und die angegebenen Richtwerte oft nur in Form ungenauer Bereichsangaben dargestellt werden können. Es bedarf also viel zusätzlicher Erfahrung, um eine sinnvolle Auslegung zu garantieren.

Im Gegensatz dazu lässt sich mit der numerischen Simulation das Verhalten des Schüttguts auf Basis weniger physikalischen Partikeleigenschaften berechnen. Die benötigten Parameter sind allgemein gültig und nicht an spezielle Rahmenbedingungen gebunden. Damit ergibt sich ein enormes Potenzial innovative Lösungen ohne vorhandener praktischer Erfahrung einer Berechnung zugänglich zu machen.



Bilder: FH Weis

Wie beschreibt man ein Schüttgutverhalten?

Das Verhalten des Schüttgutes ist von mehreren geometrischen bzw. physikalischen Eigenschaften sowie von der Belastungsgeschichte und sehr oft von der Zeit abhängig. Wichtige Einflussgrößen sind:

- Korndurchmesser, Korngrößenverteilung, Kornform, Kornhärte
- Kornsteifigkeit, Feststoffdichte
- Feuchtigkeit, Verdichtung
- Reibung der Partikel gegeneinander, Reibung der Partikel gegen das Wandmaterial.

Geringe Veränderungen in den Eigenschaften können zu starken Veränderungen im Verhalten führen. In der Schüttguttechnik ist es üblich, auch das Verhalten eines Schüttguts direkt über Kennwerte zu beschreiben. Diese sind wesentlich komplexer als die Eigenschaften und vielseitig miteinander verknüpft, wie Böschungswinkel, Schüttdichte, Horizontallastverhältnis, Druckfestigkeit, Fließfähigkeit, Verschiebewiderstandsbeiwert, Lufthaltevermögen usw.

In der Praxis werden sowohl Eigenschaften als auch Verhaltenskennwerte eingesetzt. Empfehlungen für die minimale Form der Schüttgutbeschreibung über solche Parameter findet man in diversen Normen [3, 4]. Für eine präzise Vorhersage des Schüttgutverhaltens sind diese Angaben aber meist nicht ausreichend. Hinsichtlich seines Verhaltens ist ein Schüttgut zwischen Festkörper und Flüssigkeit angesiedelt. Ein Grund dieser Zwitterstellung ist darin zu finden, dass

Klassische analytische Auslegungsverfahren oder numerische Simulationsverfahren? Die Wege, um das komplexe Verhalten des Schüttguts hinreichend genau abzubilden, sind oft mühsam, aber machbar.

sich die praktisch vorkommenden Korngrößen im Bereich von 10^{-2} bis 10^{-7} m bewegen und damit das Verhältnis zwischen Oberflächen- und Volumkräften maßgeblich das Verhalten beeinflusst. Mit kleiner werdender Korngröße verschwinden die Volumkräften bis ins Bedeutungslose und so zeigt bei gleicher chemischer Zusammensetzung ein Korn mit 5 mm Durchmesser ein anderes Verhalten als ein Korn mit 5 μ m. Anerkannte Literaturquellen (z.B. [2]) gehen davon aus, dass eine Beschreibung des Schüttgut-Verhaltens in Abhängigkeit weniger physikalischer Parameter nicht möglich ist und die effektivste Methode darin besteht, das relevante Schüttgutverhalten für die jeweilige Anwendung messtechnisch zu bestimmen. Die klassischen Auslegungsverfahren basieren auf diesem Prinzip. Dennoch werden Innovationserwartungen an numerische Simulationsprogramme wie die Diskrete-Elemente-Methode gesetzt, die von einem physikalischen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Kornes und dem daraus resultierenden Verhalten des Schüttguts ausgehen.

Klassische analytische Berechnung

Für die Anwendung der Kontinuums-Mechanik auf die das Schüttgut bildenden Partikel muss eine räumliche Verteilung der Kontaktkräfte ähnlich der eines Kontinuums existieren. In der Anwendung geht man davon aus, dass dies so ist. Theoretische Überlegungen diesbezüglich werden in [5] beschrieben. Mit dieser Voraussetzung eignen sich die Mohr-Coulomb Bruchkriterien zur Berechnung der Druckverteilungen im Schüttgut, des Massendurchsatzes oder für die Vorhersage des Leistungsbedarfs beim Fördern. Sobald der im Schüttgut vorherrschende Spannungszustand das angenommene Bruchkriterium erfüllt, kommt es zum Abgleiten in der kritischen Schüttgutebene, zum so genannten Fließen des Schüttguts. Die Verhältnisse können sehr übersichtlich mithilfe so genannter Fließorte und den entsprechenden Mohrschen-Spannungskreisen dargestellt werden. Abbildung 1 zeigt die mit einer Scherzelle aufgenommenen Fließorte eines nahezu kohäsionslosen Schüttgutes für einen bestimmten Verdichtungszustand σ_1 . Aus solchen gemessenen Fließorten werden Kennwerte abgeleitet, die das Verhalten des Schüttguts quantifizieren und so einer analytischen Behandlung zugänglich machen, wie:

- Schüttdichte ρ
- Horizontallastverhältnis: $\lambda = \sigma_2 / \sigma_1$
- Druckfestigkeit σ_c
- Fließfähigkeit $ff_c = \sigma_1 / \sigma_c$
- Effekt. Reibungswinkel ϕ_e bzw. linearisierter Reibungswinkel ϕ_{lin}
- Wandreibungszahl μ_x zwischen Gut und Fördererbauteilen.

Je nach Vereinfachungsgrad führen diese Modelle auf gewöhnliche Differentialgleichungen (bei Betrachtung von nur einer Dimension) oder eben auf schwer lösbare partielle Differentialgleichungen bei mehrdimensionaler Betrachtungsweise. Der wahrscheinlich berühmteste Vertreter dieser Vorgehensweise ist die so genannte Janssen-Gleichung [6] für die Berechnung des Vertikaldrucks σ_v im Silo bzw. in weiterer Folge für die Berechnung des Leistungsbedarfs von Ausstragsgeräten wie Bunkerabzugsband oder Bunkerabzugsschnecke. Die Janssen-Gleichungen wurden Ende des 19. Jahrhunderts veröffentlicht und bilden noch immer die Grundlage für die normative Berechnung [1] von Schüttgutsilos. Das Ergebnis ist dabei eine mathematische Formel, die die Gesamtheit aller Lösungen beschreibt. Im Gegensatz zur Simulation oder auch zum Versuch am realen Prototyp, wo immer nur eine konkrete Parameterkonfiguration untersucht wird. Die Janssen-Gleichung setzt voraus, dass die aus den Mohr-Coulomb Bruchkriterien abgeleiteten Kennwerte die Situation geeignet beschreiben, und dass der Druck über dem Silo-Durchmesser konstant ist. Beide Voraussetzungen sind nicht 100%ig erfüllt,

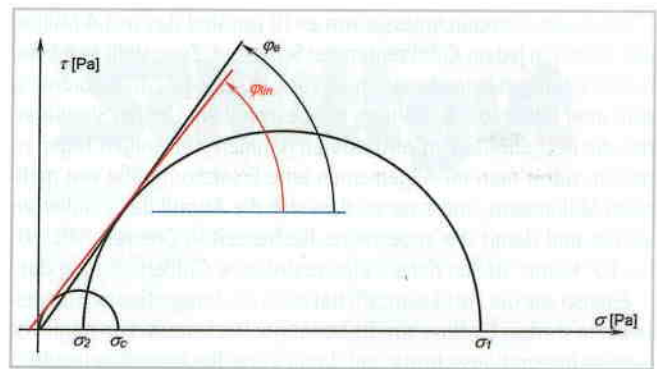


Abbildung 1: Gemessener Fließort für Kantkorn 4-8 bei einer Dichte $\sigma = 1202 \text{ kg/m}^3$

aber nichts desto trotz ist die präzise mathematische Beschreibung und deren Ergebnis enorm wichtig für das Verständnis der vorherrschenden Situation. Darüber herrscht sicherlich kein Zweifel.

Die Vorgehensweise über analytische mathematische Modelle vermittelt vor allem ein tiefes Verständnis der Situation, sie ist aber limitiert auf sehr einfache geometrische Randbedingungen (Rund-Silo, ...) und nicht brauchbar für die Optimierung von komplexen Geometrien. Trotz ständig steigender Rechenleistungen und Fortschritten in der numerischen Partikelsimulation werden die klassischen Berechnungsverfahren auch in absehbarer Zukunft unverzichtbar sein, da man zumindest für den ersten Entwurf auf analytische Berechnungsverfahren zurückgreifen wird. Numerische Partikelsimulationen sind mit hohem Zeit- und Infrastrukturaufwand verbunden und daher nicht immer wirtschaftlich einsetzbar. Teilweise sind die Softwarekosten hoch und erfahrene Anwender sind kaum verfügbar. Aufgrund der Komplexität der Simulationsprogramme sowie der Unsicherheit der angesetzten Parameter und Randbedingungen werden zur Ergebniskontrolle analytische Berechnungen eingesetzt.

Numerische Simulation (DEM)

Jedes Partikel wird mit seinen Wechselwirkungen zu den anderen Körnern bzw. mit der Umgebung für sich betrachtet. Die resultierenden Kontaktkräfte beschleunigen die Partikel. Durch Integration der Beschleunigung über einen kurzen Zeitschritt werden die Geschwindigkeiten und in weiterer Folge auch die Position jedes einzelnen Partikels berechnet. Die Grenzen dieser Methode sind einerseits simulationstechnisch durch die beschränkte Partikelanzahl aufgrund des Rechenaufwandes und andererseits physikalisch, durch die fehlende Abbildung einer plastischen Verformung, da das einzelne Partikel starr abgebildet wird. So wird schematisch ein kugelförmiges Partikel mit einfachem Kontaktmodell und den relevanten Parametern verwendet. In der Realität treten jedoch auch nicht-kugelförmige Partikel auf. Es gibt daher intensive Bestrebungen die reale Kornform in der Simulation durch Aneinanderreihung mehrerer Kugeln zu Kugel-Cluster bzw. durch mit Kanten begrenzte Volumenkörper, so genannte Superquadrics abzubilden. Da die Anzahl der beteiligten Körner in einer realen Anlage sehr groß ist, stellt die Berechnung der Partikelbahnen in der Regel ein recht aufwendiges Unterfangen dar. Für eine idealisierte, hexagonale Packung befinden sich entsprechend Gleichung (1) in einem betrachteten Volumen V die Anzahl n einheitlich kugelförmiger Körner mit Korndurchmesser a .

$$n = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{a^3} \quad (1)$$

Bei einem Korndurchmesser von $a=10\ \mu\text{m}$ sind das $n=1,4$ Milliarden Körner in jedem Kubikzentimeter Schüttgut. Zwar stellt sich beim realen Schüttgut keine hexagonale Packung ein, die Größenordnung wird aber mit obiger Beziehung gut beschrieben. Um bei Simulationen die Rechenzeiten im vertretbaren Rahmen von einigen Tagen zu halten, wählt man im Allgemeinen eine Ersatzkorngröße von mehreren Millimetern, und zwar so, dass sich die Anzahl der simulierten Körner und damit die angestrebte Rechenzeit in Grenzen hält. 10^5 bis 10^6 Körner stellen derzeit eine realistische Größenordnung dar.

Ebenso wie die Partikelanzahl hat auch die Integrationsrittweite einen starken Einfluss auf die benötigte Rechenzeit. Für möglichst wenige Integrationsritte und damit kurze Rechenzeiten benötigt man relativ weiche Partikel-Kontakte. Aus diesem Grund wählt man in der Simulation einfach geformte, meist sphärische Partikel mit einer Steifigkeit die wesentlich weicher ist als die des realen Schüttguts.

Für einen geeigneten Zusammenhang zwischen Partikeleigenschaften und Zeitschrittweite nutzt man den Ausdruck der Rayleigh-Zeit T_R entsprechend Gleichung (2). Sie ist abhängig vom Korndurchmesser a , der Feststoffdichte ρ_0 sowie von der Kornsteifigkeit E . Die Rayleigh-Zeit wird anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rayleigh-Wellen ermittelt, da diese Oberflächenwellen für etwa 67% des Energietransports von einem Partikel auf ein anderes Partikel verantwortlich sind. Mit zunehmendem Korndurchmesser a und geringer werdender Steifigkeit E nimmt die Rayleigh-Zeit T_R zu.

$$T_R \approx 5,47 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{E}} \quad (2)$$

Die Erfahrung zeigt, dass Werte zwischen zehn und 30% der Rayleigh-Zeit als Zeitschrittweite geeignet sind, um einen stabilen Simulationslauf zu erreichen. Bei einer Zeitschrittweite von $50\ \mu\text{s}$ bedarf es pro Partikel etwa einer Million Rechenschritte für zehn Sekunden Simulationszeit. Entsprechend der Abänderung des Korndurchmessers, sowie der Partikelsteifigkeit müssen auch die anderen physikalischen Eigenschaften angepasst werden, sodass die Simulation ein ähnliches Schüttgut-Verhalten zeigt wie das des realen Schüttguts. Zusammenfassend werden in der Simulation folgende Simulationsparameter von den realen Schüttguteigenschaften abweichen, um die Rechenzeit in Grenzen zu halten:

- Korngröße: Im Allgemeinen werden größere Partikel simuliert
- Korngrößenverteilung: Meist einheitlicher Korndurchmesser der simulierten Partikel
- Kornform: Einheitl. sphärische Kornform der simulierten Partikel
- Kornsteifigkeit: Das simulierte Partikel ist wesentlich weicher als das reale Material z.B. Faktor 100-1000.

Tabelle 1 zeigt einen Satz geeigneter Simulationsparameter für realistische Rechenzeiten. Reale Schüttgutpartikel sind meist kleiner und wesentlich steifer als die numerischen Partikel der DEM. Folgende Simulationsparameter stehen in weiterer Folge noch zur Verfügung, um das Verhalten des Schüttguts in der Simulation an das reale Verhalten in einem Referenzversuch anzupassen:

- Feststoffdichte
- Gleitreibwert und Rollreibwert zwischen den Partikeln bzw. Gleitreibwert und Rollreibwert zwischen Partikel und Wand
- Restitutionskoeffizient zwischen den Partikeln bzw. zwischen Partikel und Wand.

Erste Priorität bildet ein Anpassen der Feststoffdichte ρ_0 , sodass die Schüttdichte ρ in der Simulation richtig errechnet wird. In weiteren Kalibrierschritten werden die verbleibenden Simulationsparameter angepasst. Für eine eindeutige Aussage bedarf es allerdings einer komplexeren Versuchsanordnung.

Tabelle 1: Wahl der Simulationsparameter für realistische Rechenzeiten

Korngröße a	Feststoffdichte ρ_0	Kornsteifigkeit E	Rayleigh-Zeit T_R	Zeitschrittweite
$8 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$	$2400\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$1,3 \cdot 10^8\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	$T_R = 188 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$	$\Delta t = 50 \cdot 10^{-6}\ \text{s}$

Tabelle 2: Dimensionsanalyse der wichtigen Schüttgutparameter Korndurchmesser a , Steifigkeit des Kornmaterials k und Feststoffdichte ρ_0 im Schwerfeld der Erde.

Symbol	Physikalische Größe	Einheit
a	Korndurchmesser	m
k	Steifigkeit des Kornmaterials	$\frac{\text{N}}{\text{m}} = \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$
ρ_0	Feststoffdichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
g	Erdbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Abbildung 2 zeigt das im Rahmen der Forschungstätigkeit entwickelte Konzept des Scher-Fall-Rutschversuches. Im oberen Bereich wird das Schüttgut zwischen oberer und unterer Box abgesichert und die dabei erforderliche Kraft gemessen. Im mittleren Bereich wird auf der Rutsche das Roll- bzw. Gleitverhalten der Partikel gegen das Wandmaterial berücksichtigt. Im unteren Auffangbehälter wird der statische Böschungswinkel ermittelt. Als Zielgrößen für den Vergleich zwischen realem Versuch und Simulation eignen sich z.B.:

- Schiebekraft an der oberen Box
- Auftreffhöhe nach dem Rutschen
- statischer Böschungswinkel im Auffangbehälter
- Durchlaufzeit.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind vielfältig: Einerseits können Anlagenparameter wie Antriebsmoment, Abzugskräfte, Massenströme usw. ermittelt werden, andererseits liegen als Ergebnis die Trajektorien sowie die Reaktionskräfte sämtlicher Partikel vor. Mit diesen Daten können Geschwindigkeits- und Druckverläufe der sich einstellenden Schüttgutströmung abgeleitet werden. Wie bei vielen numerischen Verfahren ist auch bei der DEM für eine Interpretation der Ergebnisse eine Nachbearbeitung der Daten erforderlich.

Für jeden berechneten Zeitschritt liegt eine enorme Menge an Information bezüglich Position, Geschwindigkeit und Reaktionskräfte der Partikel vor. Die Momentaufnahme hat meist keinerlei Aussagekraft. Entscheidend ist eine geeignete zeitliche und örtliche Mittelwertbildung der berechneten Daten.

Das Experiment

Im Konstruktionsprozess ist es nicht möglich, aus einer theoretischen Berechnung eine eindeutige Konstruktion abzuleiten. Viel mehr wird zunächst ein Entwurf erstellt, die darin enthaltenen Strukturen werden in einem entsprechend vereinfachten Modell abgebildet und so einer Berechnung zugänglich. Diese erste Auslegung erfolgt im Allgemeinen analytisch auf Basis von Auslegungsrichtlinien, soweit für das zu lösende Problem welche vorhanden sind. Sind keine Richtlinien verfügbar, wird man auf allgemeine physikalische Zusammenhänge zurückgreifen. Aufgrund der Berechnung wird der Entwurf

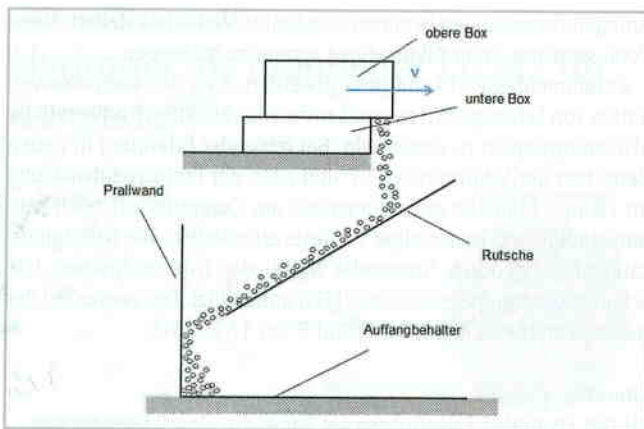


Abbildung 2: Referenzversuch: Konzept des Scher-Fall-Rutschversuches

dann entsprechend abgeändert und verbessert. In den darauffolgenden Optimierungsschritten können numerische Berechnungsverfahren wie die DEM zum Einsatz kommen. Letztendlich handelt es sich dabei bereits um ein Experiment, das allerdings in einer virtuellen Umgebung durchgeführt wird. Das Verhalten der Natur wird dabei vom Computer nachgebildet. Weiterführend oder alternativ können reale Experimente an Prototypen durchgeführt werden. Insbesondere bei fehlender Erfahrung ist dies wohl die einzige Möglichkeit zu überprüfen, inwieweit die Modellvoraussetzungen der Berechnungsverfahren erfüllt sind und die Ergebnisse vertrauenswürdig sind.

Die intuitive Weiterentwicklung der Anlagen und Werkzeuge durch Experimente ist langwierig, unabhängig davon ob es sich um einen realen Prototyp oder um ein numerisches Computermodell handelt. Im Fall des realen Prototyps kommen noch der Materialaufwand sowie die mit dem Versuch verbundenen Risiken für Personal und die Infrastruktur hinzu. Die große Anzahl an möglichen Parametervariationen macht eine systematische Suche nach einer idealen Lösung sehr schwierig. Bei der Entwicklung von Prototypen ist es hilfreich das Schüttgutverhalten zunächst an kleineren, leicht handhabbaren Versuchsaufbauten zu untersuchen. Es stellt sich dann aber die Frage, wie daraus das Schüttgutverhalten für die reale Anlage abgeleitet werden kann.

Die Dimensionsanalyse stellt ein mathematisches Verfahren dar, um das Zusammenspiel physikalischer Größen bei Naturphänomenen zu erfassen. Die Beschreibung hochkomplexer Mechanismen, wie eben z.B. die Wechselwirkung tausender Partikel untereinander, kann oft nicht direkt aus physikalisch-mathematischen Modellen abgeleitet werden, sondern muss über sinnvolle Experimente, numerischer oder messtechnischer Natur, beschrieben werden.

Um aus diesen Ergebnissen auf das Verhalten einer geometrisch abweichenden Anlage zu schließen, müssen gewisse Bedingungen erfüllt werden:

Geometrische Ähnlichkeit: Alle Längenabmaße von Prüfstand und realer Anlage stehen im gleichen, konstanten Verhältnis. Bei schüttguttechnischen Experimenten ist die geometrische Ähnlichkeit allerdings schwer realisierbar. Im Falle einer verkleinerten Versuchsanlage müssten auch die Schüttgutabmessung a der charakteristischen Länge L des Prüfstandes angepasst werden. Aus rechentechnischen Gründen wird man im Falle der numerischen Simulation aber eher zum umgekehrten Weg gezwungen: Die Anlage wird in Originalmaßen abgebildet, die Partikel werden zugunsten kurzer Rechenzeiten hingegen vergrößert modelliert. Zur Beschreibung der geometrischen Verhältnisse wird in Gleichung (3) eine dimensionslose Kennzahl Π_c definiert.

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

Redaktionsassistentz:

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 Mittelinitialen 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 Auflagenwahrheit.

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 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

$$\Pi_G = \frac{a}{L} \quad (3)$$

Physikalische Ähnlichkeit: Die physikalischen Vorgänge sollen am Prüfstand oder in der Simulation denen der realen Anlage möglichst genau entsprechen. Dies führt auf Verhältnisse physikalischer Größen, die beim Prüfstand, in der numerischen Simulation und in der realen Anlage gleich sein müssen. Für vergleichbares Verhalten müssen beispielsweise Oberflächen- und Volumenkräfte im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Wendet man die Methode der Dimensionsanalyse auf die drei wichtigen Schüttguteigenschaften Korndurchmesser a , Steifigkeit des Kornmaterials k und Feststoffdichte ρ_0 im Schwerfeld der Erde an, lässt sich der unbekannte Zusammenhang der vier dimensionsbehafteten Größen $f(a, k, \rho_0, g) = 0$ durch eine einzige dimensionslose Kennzahl Π_1 darstellen:

Es ist davon auszugehen, dass das Verhalten des Schüttgutes bei gleicher Kennzahl Π_1 entsprechend Gleichung (4) jeweils identisch ist, unabhängig davon, ob es sich um die Realität, die numerische Simulation oder das Experiment handelt.

$$\Pi_1 = \frac{k}{\rho_0 \cdot g \cdot a^2} \quad (4)$$

Aus dem Ergebnis der Dimensionsanalyse muss der Schluss gezogen werden, dass sich große steife Partikel ähnlich verhalten wie kleine weiche Partikel bei gleicher Feststoffdichte. Dieser Umstand mag physikalisch plausibel erscheinen, ist aber weder für die numerische Simulation noch für skalierte Versuche hilfreich. In der numerischen Simulation werden große und weiche Partikel verwendet. Um die Kennzahl Π_1 gleich dem realen Schüttgut zu machen, müssten sehr kleine Feststoffdichten angesetzt werden. Bei skalierten Versuchen ist die geometrische Ähnlichkeit zwischen Versuchsanlage, den Schüttgutabmessungen und der realen Anlage wohl schwer herzustellen, denn der Maßstab für die Versuchsanlage ist auch auf das Schüttgut anzuwenden. Dementsprechend ändern sich aber auch die anderen Schüttguteigenschaften. Obige Beziehung (4) liefert einen Zusammenhang der Schüttguteigenschaften für das notwendige skalierte Schüttgut.

Zusammenfassung

Aktuell werden sehr unterschiedliche Entwicklungswerkzeuge in der Schüttguttechnik eingesetzt: Zur rechnerischen Auslegung sind für viele Bereiche einerseits klassische analytische Berechnungsrichtlinien verfügbar und andererseits hat sich die numerische Simulation als Entwicklungswerkzeug etabliert. Die beiden Verfahren basieren auf unterschiedlichen Schüttgutparametern. Die klassische analytische Berechnung bedient sich relativ komplexer Kennwerte die das Schüttgutverhalten beschreiben, wohingegen die numerisch Simulation grundsätzlich auf den physikalischen Eigenschaften des Schüttgutes basiert. Allerdings können aufgrund der üblicherweise vorherrschenden sehr hohen Partikelanzahlen nur in den seltensten Fällen die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften des Schüttgutes herangezogen werden. Die verfügbaren Rechenleistungen erfordern den Einsatz von großen und weichen Ersatzpartikel. Damit liefert die numerische Simulation kein absolutes Ergebnis und muss über Referenzversuche kalibriert werden. Eine durchgeführte Dimensionsanalyse kann die physikalische Sinnhaftigkeit dieser Vorgehensweise nicht bestätigen. Durch derartige Simulationen wird weder die geometrische noch die physikalische Ähnlichkeit zwischen Modell und Realität erfüllt. Auch die experimentelle Entwicklung auf verkleinerten Anlagen ist dieser Problematik ausgesetzt. Zur Erfüllung der geometrischen Ähnlichkeit müssten Schüttgutabmessungen und

Anlagenabmessungen in einem konstanten Verhältnis stehen. Diese Voraussetzung ist im Allgemeinen schwer zu realisieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das komplexe Verhalten von Schüttgütern es meist nicht erlaubt, einfach anwendbare Skalierungsregeln zu entwickeln. Bei fehlender Erfahrung in neuen Bereichen der Schüttguttechnik sind nach der Prototypentwicklung im kleinen Maßstab oder numerisch am Computer oft noch sehr aufwändige und kostspielige 1:1 Tests erforderlich. Die Forschungstätigkeit wird durch finanzielle Mittel der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützt. Der zweite Teil des Beitrags erscheint in der Schüttgut 6 am 17.11.2016. ●

Literatur

- [1] DIN EN 1991-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter, 12.2012
- [2] Dietmar Schulze, Pulver und Schüttgüter, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [3] DIN ISO 3435, Stetigförderer; Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern, 02.1979
- [4] FEM 2582, Stetigförderer; Schüttguteigenschaften und ihre Darstellung in Kurzform, Ausgabe 26.11.2002
- [5] Molerus O., Schüttgut-Mechanik, Springer, 1985
- [6] Janssen. H. Getreidedruck in Silozellen, Z. Ver. Dt. Ing., 1895

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 verfasste 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
Steizhaimerstraße 23, 4600 Wels, Österreich
Tel. +43-50804-43235, E-Mail: Martin.Egger@fh-wels.at
Internet: www.fh-wels.at