

# Die Diskrete Elemente Methode in der Flaschenförderung

## The Discrete Element Method in bottle conveying

Niels Dallinger  
Thomas Risch

Professur Fördertechnik  
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Chemnitz

**D**ie Diskrete Elemente Methode wird als Berechnungsmethode für die Entwicklung und Optimierung von neuen kontinuierlichen Fördersystemen im Bereich der Flaschenförderung angewandt. Dabei werden verschiedene Arten der Fördergutmodellierung betrachtet und verglichen.

[Schlüsselwörter: Diskrete Elemente Methode, Flaschenförderer, Flaschensimulation ]

**T**he discrete element method is applied as a calculation method for the development and optimization of new continuous conveying systems in the field of bottle handling. Different types of bottle modelling are considered and compared.

[Keywords: discrete element method, bottle handling, bottle simulation]

### 1 EINLEITUNG

Die Konstruktion, Entwicklung und Optimierung von neuen kontinuierlichen Fördersystemen, Puffern, Ausschleußern und Weichen im Bereich der Flaschenförderung erfordern die Kenntnis unterschiedlicher Prozessparameter. Zu diesen Parametern gehören die Eigenschaften der einzelnen Güter, deren Bewegungswege innerhalb des Fördersystems sowie die Zielkriterien Durchsatz- und Fördergeschwindigkeit. In vielen industriellen Bereichen sind Simulationen Stand der Technik. Sie unterstützen den industriellen Entwurfsprozess und vermindern die hohe Anzahl an teuren Prototypen und realexperimentellen Tests.

Simulationen der Förderprozesse in Flaschenförderern, die Darstellung von Stausituationen, die Auswertung von Kräften auf Seitenführungen und die Tendenz zu Flaschencrashes erfordern numerische Modelle der zu fördernden Flaschen. Insbesondere die numerische Untersuchung von Prozessen innerhalb von gefüllten Puffern und Weichen erfordern eine große Anzahl von approximierten Flaschenmodellen innerhalb einer Simulation. Diese und andere Anforderungen führen oft zum Ausschluss von

Simulationen. Zum Beispiel werden Multibody-Simulationen, mit einer exponentiellen Verbindung zwischen der Körperanzahl und der Simulationszeit, durch die hohe Anzahl benötigter Körpermodelle sehr langsam. Im Gegensatz dazu hat die Diskrete Elemente Methode eine nahezu lineare Beziehung zwischen der Anzahl der abgebildeten Partikel und der absoluten Simulationszeit. Dieser Zusammenhang schafft die Möglichkeit gutmengenintensiver Prozesse numerisch abzubilden.

### 2 DISKRETE ELEMENTE METHODE

#### 2.1 GRUNDLAGEN

Die diskrete Elemente Methode (DEM) ist eine numerische Berechnungsmethode. Sie beschreibt die Bewegung und das Verhalten von Partikelsystemen als Summe der einzelnen Kontakt Ereignisse innerhalb des Systems. Sie wurde von Cundall und Strack [1] in den 1970er Jahren entwickelt. In den letzten Jahren ist die DEM zu einem wichtigen Werkzeug bei der Analyse granularer Medien geworden. Die Methode ist weit verbreitet im Bereich der Schüttgutsimulation. Diese Entwicklung wird durch den anhaltenden Anstieg der Rechenleistung begünstigt. Dennoch ist es ein rechnerisch intensiver Simulationsansatz. Die Korrelation zwischen der Anzahl der Teilchen innerhalb eines Simulationssystems und den zu lösenden Gleichungen begrenzt die Systemabmessungen.

Die DEM beschreibt jeden einzelnen Partikel mittels seiner Masse  $m$ , seiner Beschleunigung  $\vec{\ddot{x}}_p$  und der Summe der auf ihn wirkenden Kräfte  $F_n$ . Das Massenträgheitsmoment  $J_p$  und die Drehbeschleunigung  $\vec{\ddot{\varphi}}_p$  befinden sich im Gleichgewicht mit der Summe der auf den Partikel wirkenden Momente  $T_n$ . Das daraus resultierende Lagrange'sche Kräftegleichgewicht wird über alle Zeitschritte integriert.

$$m_p \cdot \vec{\ddot{x}}_p = \sum F_n$$
$$J_p \cdot \vec{\ddot{\varphi}}_p = \sum T_n$$
(1)

Die innerhalb des Simulationssystems gültigen Kräfte werden durch das Kontaktmodell definiert. Es existieren verschiedene Kontaktmodelle, wobei das einfachste das lineare Feder-Dämpfermodell ist. Abb. 1 zeigt den Kontaktfall der Partikel  $\{i, j\}$  mit den Partikelmassen  $m$ , dem Reibungskoeffizienten  $\mu$ , der Tangential- und Normalkomponente der Federsteifigkeit  $k$  und der Dämpfung  $\gamma$ .

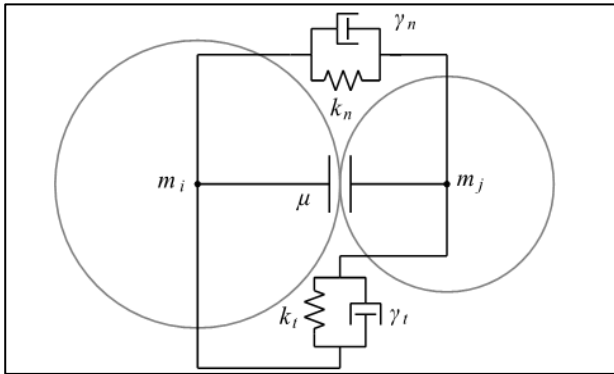


Abbildung 1. Feder-Dämpfer Kontaktmodell (Partikel-Partikel-Kontakt)

Neben den Kontaktmodellen existieren auch verschiedenen Partikelmodelle. Diese definieren die geometrische Form der Partikel und bilden die Grundlage für die Modellierung realistischer Partikelsimulationen. Die numerische Beschreibung der virtuellen Partikelform bestimmt die Qualität der Approximation von realen Partikelgeometrien. Gleichzeitig beeinflusst sie aber auch den notwendigen Rechenaufwand erheblich. Mit dem Anstieg der geometrischen Komplexität eines Partikelmodells steigt auch die numerische Komplexität einer Simulation. Demzufolge muss ein Kompromiss zwischen Formkomplexität und Berechnungsbedarf gefunden werden.

Die am häufigsten verwendeten Partikelmodelle sind Kreise im 2D-Fall und Kugeln im 3D-Fall. Sphärische Partikel lassen sich hinsichtlich der Kontaktalgorithmus und der numerischen Kontaktberechnung am schnellsten berechnen. Partikel oder Körper mit komplexeren Formen können durch kugelförmige Partikel unter Verwendung des sog. Multisphere-Ansatzes gebildet werden. Im Gegensatz dazu sind Polygone und Superquadrics komplexere Partikelformen. Die Möglichkeit der Verwendung von Superquadrics als Partikelmodell war zum Zeitpunkt der Bearbeitung in der verwendeten DEM-Software LIGGGHTS® [2] nicht vorhanden. Podlozhnyuk beschreibt in [3] die geplante Umsetzung dieser Partikelart in der verwendeten Software.

Die große Anzahl abbildbarer Partikel innerhalb einer Simulation gehört zu den Stärken der DEM. Mit dem derzeitigen Stand der Rechentechnik können Partikelsysteme mit bis zu einer Million Einzelpartikeln auf einem herkömmlichen Desktop PC binnen weniger Stunden berech-

net werden. Die benötigte Zeit ist dabei stark vom verwendeten Kontaktmodell und der Komplexität der abzubildenden Realsituation abhängig

Für die in dieser Veröffentlichung beschriebenen Simulationen und Parameterstudien wurde die Software LIGGGHTS-PUBLIC [2] verwendet. Diese wird unter der GNU General Public License veröffentlicht und ist speziell für den Einsatz auf Multi-Core-Prozessoren optimiert.

## 2.2 DIE SIMULATIONSZEIT

Die Energieübertragung innerhalb eines granularen Partikelsystems basiert auf sog. Körper- und Oberflächenwellen. Es wird angenommen, dass der Hauptteil der Energie über Rayleigh-Wellen (Oberflächenwellen) übertragen wird. In diesem Fall werden die Übertragungsanteile der Transversal- und Longitudinalen Körperwellen vernachlässigt. Um das Phänomen der Wellenausbreitung innerhalb der Simulation abzubilden, müssen die gewählten Iterationszeitschritte entsprechend kurz gewählt werden. Der kritische Iterationszeitschritt  $t_{krit}$  hängt von der Ausbreitungszeit der Rayleighwelle  $t_{Ray}$  für den betreffenden Partikel ab. Gleichung (2) zeigt die Abschätzung der Rayleigh-Zeit  $t_{Ray}$  und eine Möglichkeit den kritischen Zeitschritt der Simulation  $t_{krit}$  daraus zu bestimmen.

$$t_{krit} = 0,1 \cdot t_{Ray}$$

$$t_{Ray} = \frac{\pi \cdot r_p \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{G_p}}}{0,1631\nu_p + 0,8766} \quad (2)$$

$$t_{C,t} = \frac{t_{R,t}}{t_{krit}} \cdot t_{C,I}$$

Die gesamte für die Simulation benötigte Zeit  $t_{C,t}$  setzt sich aus der real benötigten Zeit für die Berechnung eines einzelnen Zeitschrittes  $t_{C,I}$ , der zu simulierenden Gesamtzeit des virtuellen Systems  $t_{R,t}$  und dem kritischen Zeitschritt  $t_{krit}$  zusammen. Der Quotient  $t_{R,t}/t_{krit}$  entspricht der Anzahl der benötigten Simulationszeitschritte. Der Anwender muss beim Kalibrieren der Kontaktmodellparameter des Ersatzgutes oft einen Kompromiss zwischen der kritischen Zeitschrittgröße  $t_{krit}$  und den physikalischen Partikeleigenschaften finden. Die Dichte  $\rho_p$ , das Schubmodul  $G_p$ , die Querkontraktionszahl  $\nu_p$  und der Partikelradius  $r_p$  beeinflussen neben den Kontaktkräften und Dämpfungen auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Oberflächenwellen und somit die Zeitschrittgrößen.

Im Allgemeinen stellen die Algorithmen der Kontakterkennung und das sog. neighbour sorting den Flaschenhals bzgl. der absoluten Simulationszeit einer DEM-Simulation dar. Innerhalb der Software LIGGGHTS® existiert im Falle von Multi-Core-Simulationen außerdem

ein fester Zeitaufwand für die Verwaltung der Prozessorkerne über die MPI-Schnittstelle (Message Passing Interface).

### 3 AUFBAU DER SIMULATIONEN

#### 3.1 GEOMETRIEN, FLÄCHEN UND NETZE

Für die Simulation von Gütern die Handling-Systeme und Produktionsmaschinen innerhalb der Förderstrecke passieren, ist es notwendig, die Schnittstellen zwischen dem Fördergut und der Maschine zu modellieren. Die Geometrien der Förderstrecke mit direktem Gutkontakt können als STL-Netze in die DEM-Simulationen eingebunden werden. Das STL-Format beschreibt die Oberflächen als Dreiecksnetze mit Hilfe der Eckpunkte und der dazu gehörigen Flächennormalen des entsprechenden Dreiecks.

Die importierten Geometrien können dabei mit vorgegebenen Bewegungsmustern beaufschlagt werden. Dazu zählen Translation, Rotation sowie translatorische und rotatorische Schwingungen. Außerdem können dem Netz ebenfalls Oberflächengeschwindigkeiten aufgeprägt werden, ohne das Netz direkt zu bewegen. Diese Oberflächengeschwindigkeiten können bspw. zur Umsetzung von Band- und Kettenförderern innerhalb einer DEM-Simulation genutzt werden. Alle möglichen Bewegungsvorgaben können mittels des Superpositionsprinzips überlagert werden. Dadurch ist es möglich, den Polygoneffekt von Förderketten, Schwingungserregungen, Start- und Bremsprozesse in die Simulation einzubeziehen.

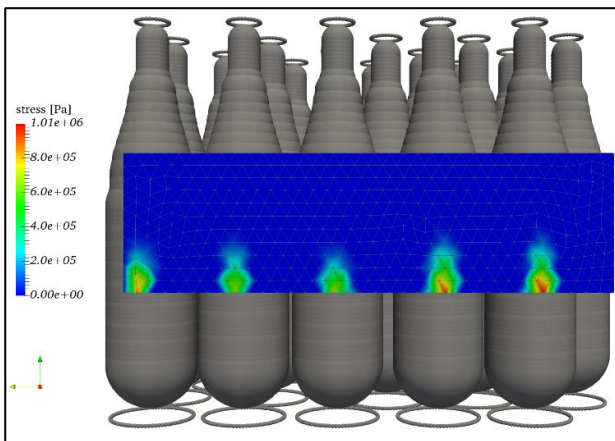


Abbildung 2. Beispiel für den Kontaktdruck auf eine Netzstruktur (Staudruck auf ein Rückhalteblech)

Die DEM-Software berechnet die Häufigkeit der Kontakte und die Kontaktkräfte zwischen den Partikeln und den Wänden. Diese berechneten Größen ermöglichen es die Kontaktkräfte auf die Multisphere-Partikel, d.h. die Flaschenmodelle, detailliert auszuwerten. Diese Kräfte repräsentieren bspw. die seitlichen Kräfte der Seitenführungen oder die Kräfte auf Rückhaltebleche im Staubetrieb. Im Falle feinmaschig vernetzter Geometrien können die Kontaktzonen entsprechend fein aufgelöst werden. Mit einer

zunehmenden Anzahl von Dreiecksfacetten eines Oberflächennetzes erhöht sich auch die erforderliche Berechnungszeit für einen Iterationsschritt. Somit sollten die Netzstrukturen nur so fein wie nötig aufgelöst werden.

Abb. 2 zeigt ein Rückhalteblech vor den grauen Flaschenmodellen. Die Farben des vernetzten Bleches visualisieren die normale Spannung innerhalb der Kontaktzone. Die Flaschen bewegen sich gegen das Rückhalteblech und befinden sich im Staubetrieb. Der Graph in Abb. 3 repräsentiert die Normalgesamtkraft auf das Rückhalteblech über der Simulationszeit. Die dargestellten Kraftspitzen ergeben sich aus den Auffahrstößen zwischen den Flaschen während der Staubbildung.

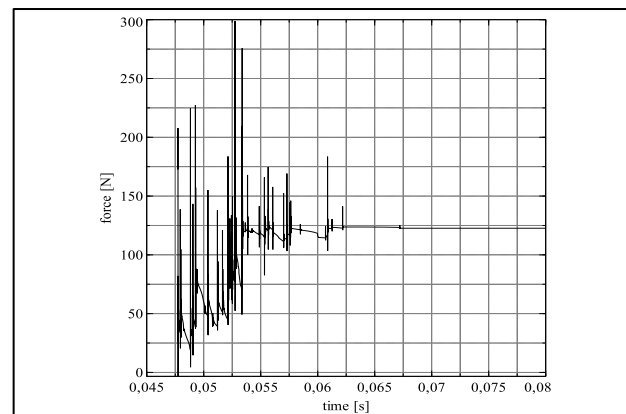


Abbildung 3. Beispiel für die berechneten Kräfte auf eine Netzstruktur (Normalkraft auf ein Rückhalteblech über der Zeit)

#### 3.2 PARTIKELMODELLE UND FLASCHENGEOMETRIE

Für die Simulation komplexer Güter können einzelne sphärische Partikel miteinander verbunden werden. Diese Partikelverbände werden als clumps oder Multisphere-Partikel bezeichnet. Bei der Multisphere-Erzeugung können sich die einzelnen Partikel innerhalb der Verbände überlappen. Für die folgenden Simulationen werden starre Kopplungen zwischen den verbundenen Partikeln verwendet.

Die durch die Überlappungen einzelner sphärischer Partikel erzeugten Kräfte innerhalb eines Multisphere-Partikels werden von den Berechnungen des Kräftegleichgewichts ausgeschlossen. Um eine realistische Bewegung der verketteten Strukturen zu ermöglichen, werden der Körperschwerpunkt und die Trägheiten in Bezug auf die Hauptachsen der Multisphere-Partikel als Randbedingungen vorgegeben. Es gibt verschiedene Strategien für den Aufbau der Multisphere-Strukturen. Die Strategie hängt von den Zielen der Simulation und den tatsächlichen Prozessen, welche modelliert werden sollen, ab. Die Veröffentlichungen [6-9] geben einen detaillierten Überblick über die Multisphere interne Kraftberechnung und die Validierungsmethoden für diese Partikelklasse.

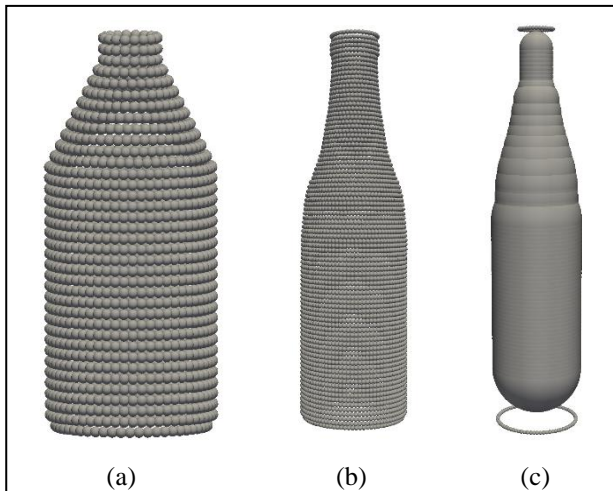


Abbildung 4. Flaschenmodelle als Multisphere-Partikel; (a) Molkerei-Flasche, (b) NRW-Bierflasche (Mod. A), (c) NRW-Bierflasche (Mod. B)

Abb. 4 skizziert zwei verschiedene Ansätze für die Modellierung einer Getränkeflasche. Das Flaschenmodell in Abb. 4a zeigt eine Molkereiflasche. Das Flaschenmodell in Abb. 4b repräsentiert eine NRW-Bierflasche bestehend aus 6172 Einzelpartikeln. Die Durchmesser der einzelnen Partikel entsprechen etwa der Wanddicke einer NRW-Bierflasche [4]. Die Modelle laut Abb. 4a und Abb. 4b sind im Inneren hohl, ähnlich einer realen Flasche. Die Glas-hülle wird durch eine große Anzahl kleiner Kugeln entlang

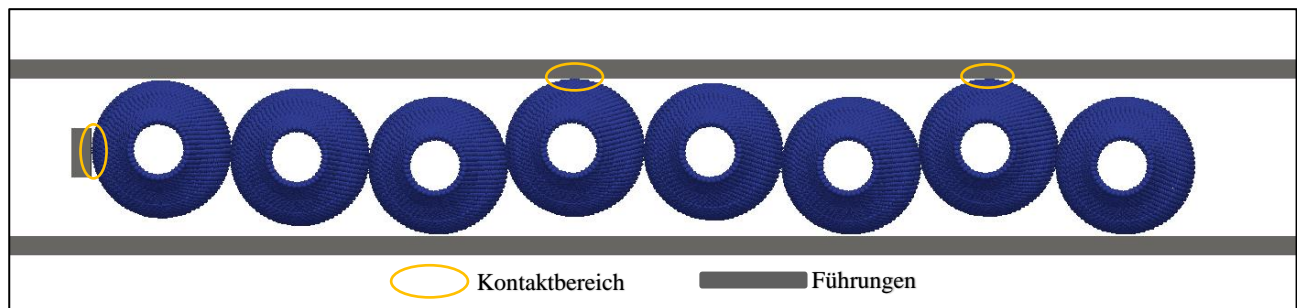


Abbildung 5. Verhakungen und Blockaden im Falle des Staubetriebs eines Flaschenförderers

Das in Abb. 4c dargestellte Flaschenmodell besteht aus 182 verbundenen Einzelpartikeln. Eine transparente Ansicht der detaillierten Struktur ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Partikeldurchmesser entspricht dem Flaschendurchmesser, mit Ausnahme der Kugeln, die den Boden und den Kopf der Flasche bilden. Durch die Verwendung der großen Partikeldurchmesser ist die Flasche im Inneren nicht mehr hohl. Um die Standsicherheit der Modellflaschen zu gewährleisten, wird der Boden als Ring modelliert. Auch der Flaschenkopf ist als Ring einzelner sphärischer Partikel aufgebaut. Beide Partikelringe gehören noch

des Umfangs dargestellt. Dieser Ansatz hat jedoch eine Reihe von Nachteilen.

Erstens begrenzt die hohe Anzahl von sphärischen Partikeln innerhalb eines Verbundkörpers die Anzahl der berechenbaren Flaschen innerhalb der Simulation. Diese Tatsache ist eine Folge der begrenzten Rechenleistung. Zweitens verursachen kleine Partikeldurchmesser kurze Iterationszeitschritte und eine Erhöhung der absoluten Simulationszeit. In Abschnitt 2.2 wurde die Beziehung zwischen der Simulationszeit und den Partikeleigenschaften bereits im Detail beschrieben.

Ein weiteres Problem bei der Verkettung der Kugeln entlang des Umfangs sind die zwischen den einzelnen Teilchen entstehenden Einkerbungen. Auch wenn sich die Partikel überlappen, gibt es Vertiefungen aufgrund ihrer sphärischen Form. Diese Vertiefungen führen zu Verhakungen und Blockaden während des Flasche-Flasche-Kontakts, vgl. Abb. 5. Während des Staubetriebs knickt die Flaschengirlande gegen die Seitenführungen. Durch das Verhaken der runden Partikel in den Vertiefungen sind nur zwei Flaschen während des stationären Stauzustands in Kontakt mit den seitlichen Führungen. Dieses Problem und die unruhige Flaschenoberfläche entlang des Umfangs führen zu einer falschen Kraftberechnung zwischen den Seitenführungen und den Flaschen.

zum Multisphere-Partikel, obwohl sie nicht physisch verbunden sind. Die verknüpften Partikel innerhalb eines einzigen Multisphere-Körpers müssen sich nicht unbedingt berühren. In den Bereichen ohne Partikelabdeckung können innerhalb des Multisphere-Verbundes keine Kontaktkräfte übertragen werden. Im Falle des Kippens der Flaschen könnten sich die Ringe des Kopfes und der Standfläche ineinander verhakten. Dies würde zu einem falschen Gutstromverhalten führen. Dieser Störeffekt wird derzeit bearbeitet um Komplikationen während Flaschen-Crashes zu vermeiden.

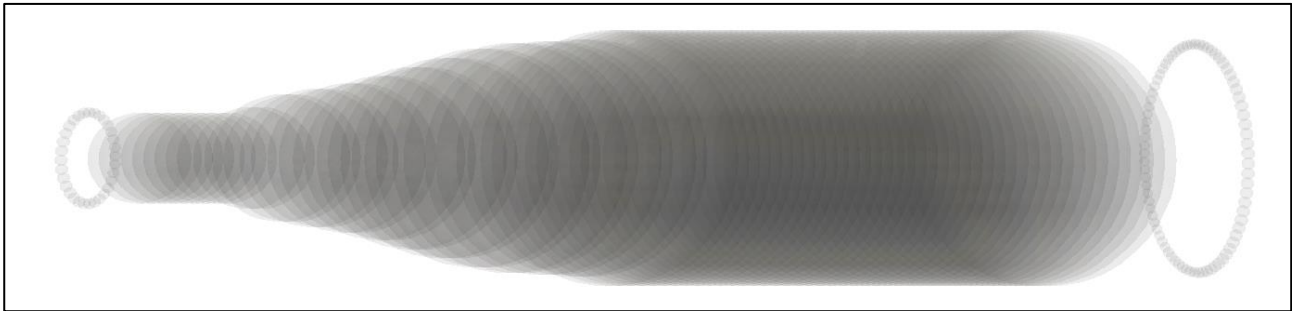


Abbildung 6. transparente Struktur des Multisphere-Flaschenmodells (Mod. B) im Detail

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der unterschiedlichen NRW-Bierflaschenmodelle hinsichtlich der Anzahl der möglichen Flaschen in der Simulation. Zum Vergleich wird die Anzahl der Einzelpartikel in den Simulationen konstant gehalten. Obwohl die Simulationszeiten direkt mit der Partikelanzahl verknüpft sind, sind diese nicht notwendigerweise konstant. Die Flaschenmodelle wurden mit Hilfe von Matlab-Skripten erstellt, die speziell für die Flaschenförderung entwickelt wurden. Diese beschleunigen und vereinfachen den Vorgang des Preprocessing.

Tabelle 1. Vergleich zwei verschiedener Modellierungsansätze bzgl. einer NRW-Bierflasche

Modell	A	B
Partikel im Verbund	6172	182
Anzahl der Einzelpartikel	50000	50000
Flaschen pro Simulation	8	274

### 3.3 RANDBEDINGUNGEN UND MATERIALMODELL

Neben der geometrischen Form eines Körpers sind auch die Materialeigenschaften relevant. Diese Materialeigenschaften hängen vom verwendeten Kontaktmodell ab. Die Kontaktmodelle der DEM definieren die Kontakteigenschaften auf mikroskopischer Ebene. Das makroskopische Verhalten der simulierten Güter ergibt sich aus der Vielfalt der einzelnen Kontaktfälle. Diese fundamentalen Eigenschaften der DEM führen zum experimentellen Charakter der Simulationen und erlauben es, makroskopische Gesetzmäßigkeiten direkt aus den Simulationsergebnissen abzuleiten.

Die durchgeführten Simulationen verwenden ein speziell für granulare Medien geeignetes Kontaktmodell. Es ist in Abb. 1 dargestellt. Die elastische Kontaktkraft in normaler Richtung beruht auf dem Hertz-Kontakt von Kugeln. Die elastische tangential Kontaktkraft wird durch das Integral der relativen tangentialen Geschwindigkeit über die Dauer des Kontaktes berechnet.

Die notwendigen Randbedingungen umfassen den Elastizitätsmodul, den Reibungskoeffizienten, den Restitutionskoeffizienten, die Querkontraktionszahl und die Dichte. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, Kraftkomponenten, welche die Kohäsion und die Rollreibung der Partikel darstellen, hinzuzufügen. Die angegebenen Materialeigenschaften beschreiben die mikroskopische Ebene des einzelnen Kontaktes. Für diese Eigenschaften stehen in der Regel kaum geeignete Datensätze zur Verfügung. Besonders für komplexe Multisphere-Partikel ist es schwierig, geeignete Eingangswerte zu finden. Physikalische Größen wie der Restitutionskoeffizient, der von der geometrischen Form des Kontakts und den Materialeigenschaften abhängt, werden für den Einzelkontakt definiert. Sie spiegeln aber in der Summe aller Kontaktereignisse nicht immer das makroskopische Verhalten des Realsystems wieder.

Um möglichst realistische Ergebnisse zu erzielen, ist es notwendig, die Simulationen und die Grenzparameter mit Hilfe zusätzlicher Experimente zu kalibrieren. Die Kalibrierung basiert auf verschiedenen grundlegenden Realexperimenten. Jedes dieser Experimente hat ein numerisches Gegenstück. Die realexperimentellen Ergebnisse werden mit den entsprechenden Ergebnissen der äquivalenten numerischen DEM-Experimente verglichen. Mit Hilfe von Parameterstudien werden bestimmte Materialeigenschaften innerhalb der Simulationen angepasst, bis das numerische System mit dem realen Experiment korreliert. Die Experimente hängen von der zu kalibrierenden Materialcharakteristik und dem zu simulierenden System ab. In vielen Fällen werden die Experimente speziell für eine bestimmte Anwendung entwickelt. Die Referenzen [9-12] skizzieren die Notwendigkeit von Kalibrierungstests und zeigen Beispiele auf dem Gebiet der Schüttgutkalibrierungen.

Für die DEM-Simulationen von Flaschenförderern werden derzeit geeignete Methoden zur Kalibrierung entwickelt. Dabei werden bspw. der Reibwert und der Einfluss des Restitutionskoeffizienten auf die Kontaktcharakteristik während der Flaschenkollisionen untersucht. Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Einbeziehung von elektrostatischen Anziehungskräften innerhalb der DEM zur Simulation der Eigenschaften einzelner Plastikflaschen, der Seitenführungen und der Förderkette.

#### 4 BEISPIELE

Bisher wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, um die Eignung der DEM als Simulationsverfahren für Flaschenhandhabungssysteme zu testen. Zu diesem Zweck wurden ausgewählte Abschnitte von Förderstrecken modelliert, vernetzt, mit virtuellen Flaschen beladen und

simuliert. Die aktuellen Modelle wurden nur für die qualitative Überprüfung verwendet. Diese Untersuchungen zeigten eine gute Korrelation mit den erwarteten Fördereigenschaften. Die Entwicklung der notwendigen Kalibrierungsmethoden ermöglicht es, mittels der DEM-Simulation von Flaschenförderern, auch quantitative Ergebnisse zu erzielen.

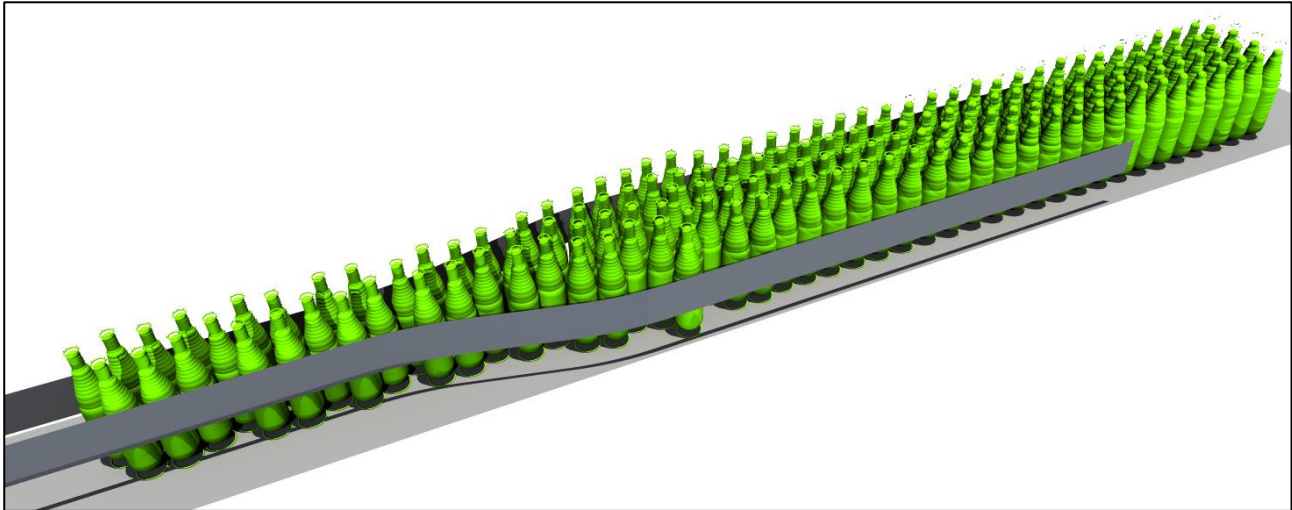


Abbildung 7. DEM-Simulation eines Flaschenförderers mit 145 einzelnen Flaschen beladen

Abb. 7 zeigt einen Förderabschnitt mit seitlichen Führungen und 145 Flaschenmodellen. Diese Seitenführungen verjüngen den Gutstrom der Flaschen. Die dargestellten Flaschen entsprechen dem in Tabelle 1 genannten Flaschenmodell B. Die Materialparameter basieren auf den Eigenschaften von Glas.

#### 5 FAZIT

Es wurde eine Methode vorgestellt um numerische Simulationen von beladenen Handhabungs- und Förderanlagen für Getränkeflaschen durchzuführen. Dabei ist die DEM eine effiziente Berechnungsmethode für die Implementierung von Simulationssystemen mit einer hohen Anzahl von betrachteten Körpern.

Die untersuchten Flaschen wurden aus starr verbundenen Einzelpartikeln, sog. Multisphere-Partikeln, aufgebaut. Verschiedene Ansätze für den Bau der Multisphere-Partikel wurden mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Durch die gezielte Modellierung eines Körpers aus sehr großen Einzelpartikeln konnte die Anzahl der Partikel im Multisphere-Verbund deutlich reduziert werden. Diese Methode kann die Simulation beschleunigen oder die Möglichkeit schaffen mehr Flaschen innerhalb eines Simulationslaufs zu berechnen.

Die Verwendung der DEM als direkter Ersatz für Prototypen-Tests erfordert zuverlässige quantitative Ergeb-

nisse. Um diese quantitativen Ergebnisse zu erhalten, müssen Kalibrierverfahren entwickelt werden, welche die realen Randbedingungen abdecken, die Eingangsparameter des DEM-Kontaktmodells liefern und damit zu einem realistischen Simulationsverhalten führen. Die Ziele der geplanten numerischen Experimente sind die Bestimmung und Bewertung der Kräfte und der Kontaktfrequenzen an den Stützwänden. Zukünftig sollen außerdem deutlich größere Mengen an Multisphere-Körpern in die Simulationen implementiert werden. In diesem Zusammenhang sind auch Benchmarks zur Simulationslaufzeit und parametrische Studien zur geometrischen Optimierung der Multisphere-Partikel geplant.

## LITERATUR

- [1] PA Cundall and ODL Strack. „A discrete numerical model for granular assemblies“. In: *Geotechnique* 29.1 (1979), S. 47–65.
- [2] Christoph Kloss u.a. „Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD–DEM“. In: *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal* 12.2-3 (2012), S. 140–152. URL: <http://www.cfdem.com>
- [3] Alexander Podlozhnyuk, Stefan Pirker und Christoph Kloss. „Efficient implementation of superquadric particles in Discrete Element Method within an open-source framework“. In: *Computational Particle Mechanics* (2016), S. 1–18. ISSN: 2196-4386. DOI: 10.1007/s40571-016-0131-6
- [4] Packmittel - Flaschen - Teil-1: Vichyform 1 (DIN 6075-1:1976-08); Normungsausschuss Verpackungswesen (NAVp)
- [5] Thorsten Pöschel und Thomas Schwager. *Dynamics Computational Granular*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. ISBN: 3-540-21485-2.
- [6] Stefan Amberger u.a. „Approximation of objects by spheres for multisphere simulations in DEM“. In: *ECCOMAS 2012*. 2012.
- [7] H. Kruggel-Emden u.a. „A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method“. In: *Powder Technology* 188.2 (2008), S. 153–165. ISSN: 0032-5910. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04>.
- [8] Madhusudhan Kodam u.a. „Force model considerations for glued-sphere discrete element method simulations“. In: *Chemical Engineering Science* 64.15 (2009), S. 466–475. ISSN: 0009-2509. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.04.025>
- [9] Thorsten Gröger und André Katterfeld. „On the numerical calibration of discrete element models for the simulation of bulk solids“. In: *Computer Aided Chemical Engineering* 21.A (2006), S. 533.
- [10] Michele Marigo und Edmund Hugh Stitt. „Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical pellets“. In: *KONA Powder and Particle Journal* 32 (2015), S. 236–252. DOI: 10.14356/kona.2015016.
- [11] J Favier, D Curry und R LaRoche. „Calibration of DEM material models to approximate bulk particle characteristics“. In: *Proceedings of the 6th World Congress on Particle Technology, Nuremberg, Germany*. 2010.
- [12] Mical William Johnstone. „Calibration of DEM models for granular materials using bulk physical tests“. Diss. University of Edinburgh, 2010

---

**Dipl.-Ing. Niels Dallinger**, Scientific Assistant at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering.

Niels Dallinger was born 1983 in Burgstädt, Germany. Between 2003 and 2011 he studied Mechanical Engineering at the University of Technology Chemnitz.

Address: Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, TU Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany, Phone: +49 371 531-37436, Fax: +49 371 531-837436, E-Mail: [niels.dallinger@mb.tu-chemnitz.de](mailto:niels.dallinger@mb.tu-chemnitz.de)

**Dr.-Ing. Thomas Risch**, Scientific Assistant at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering.

Thomas Risch was born 1979 in Karl-Marx-Stadt, Germany. Between 1999 and 2005 he studied Mechanical Engineering at the University of Technology Chemnitz.

Address: Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, TU Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany, Phone: +49 371 531-35166, Fax: +49 371 531-835166, E-Mail: [thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de)

