

Multilevel DEM-Simulation des Bewegungsverhaltens von Getränkeflaschen im Pulk

Multilevel DEM Simulation of Glass Bottles in Bulk Mode

Christian Richter
André Katterfeld
Matthias Pusch

Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die schonende Förderung empfindlicher Güter ist eine der Herausforderungen bei der Planung neuer materialflusstechnischer Anlagen. Leere Glasflaschen weisen aufgrund ihres hohen Schwerpunktes und ihrer Empfindlichkeit gegenüber Stößen einige Besonderheiten in Bezug auf einen schonenden Materialfluss auf. Im Beitrag wird eine neuartige Simulationsmethode vorgestellt, die es ermöglicht, neben dem Bewegungsverhalten von Stückgütern im Pulk auch qualitative Kennzahlen zur Beurteilung eines schonenden Transportes zu ermitteln. Mit dieser Methode ist es zukünftig möglich, Anlagenparameter bereits in der Planungsphase hinsichtlich eines schonenden und dennoch effizienten Materialflusses zu optimieren.

[Flasche, Stetigförderer, Abfüllanlage, Diskrete Elemente Methode, DEM, Multilevel]

Conveying of sensitive goods is one of the challenges when planning new material handling systems. Empty glass bottles generate special requirements on the material handling equipment, due to their high centre of gravity and their sensitivity to impact. In this paper a new simulation approach is presented, which allows the investigation of the movement behaviour of goods in bulk mode as well as the qualitative evaluation of a gentle transport.

[Keywords: bottle, piece goods, bulk mode, conveyor, Discrete Element Method, DEM, Multilevel]

1 EINLEITUNG

Der Beitrag widmet sich der Vorstellung einer neuartigen Simulationsmethode zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von massenhaft anfallenden Stückgütern am Beispiel von Glasflaschen. In Abfüllanlagen werden solche Glasflaschen sowohl vereinzelt aber auch im Pulk gefördert. Die Förderung im Pulk tritt dabei in

Puffer- bzw. Akkumulationszonen auf, bei denen sich mehrere 100 Flaschen sammeln können. Die Flaschen werden dabei über Gliederbandförderer transportiert. Während der Einzelförderung aber auch in Akkumulationszonen würde eine umkippende Flasche dabei den Gutstrom sehr stark stören.

Die hier vorgestellte Simulationsmethode basiert auf der Diskrete Elemente Methode und ermöglicht durch Kombination der Simulationsergebnisse von verschiedenen Betrachtungsebenen die Analyse der mikroskopischen Wechselwirkungen der in Kontakt stehenden Körper, aber auch Aussagen über makroskopische Größen, beispielsweise dem Verschleißverhalten. Da die Methode mehrere Betrachtungsebenen eines Systems vereint, wird sie im Folgenden als Multilevel DEM-Simulation bezeichnet.

2 DISKRETE ELEMENTE METHODE

Insbesondere in der Materialfluss- und Verfahrenstechnik werden granulare Stoffströme mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM) untersucht [1], [2]. Abbildung 1 zeigt den allgemeinen DEM- Berechnungsalgorithmus.



Abbildung 1: DEM Berechnungszyklus

Die vier Phasen Kontakterkennung, Anwendung des Kraft-Verformungsgesetzes, Ermittlung der Kontaktkräfte und Lösung der Bewegungsgleichungen werden dabei zyklisch in kleinen Zeitintervallen durchlaufen.

Das geförderte Schüttgut wird in der Regel durch Kugeln approximiert, da diese eine sehr effiziente Kontakterkennung und damit geringe Rechenzeiten ermöglichen. Die DEM verwendet sogenannte weiche Kontakte. Dabei wird ein Kontakt als Durchdringung zweier Körper definiert (Abbildung 2). Dies ist für zwei Kugeln dann der Fall, wenn der Betrag des Abstandes der Kugelmittelpunkte geringer als die Summe der Radien der Kugeln ist.

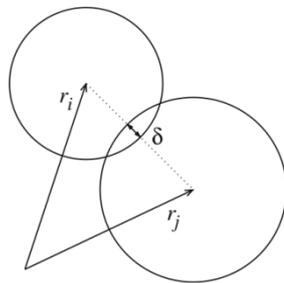


Abbildung 2: Überlappung zweier Kugeln (zwei-dimensionale Darstellung)

Aus dieser Überlappung ergibt sich, basierend auf dem verwendeten Kontaktmodell, eine Reaktionskraft (Gl. (1)), welche der Bewegung der Partikel entgegenwirkt. Dieser Schritt im Berechnungszyklus wird als Anwendung des Kraft-Verformungsgesetzes bezeichnet.

Meist wird ein Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin mit nichtlinearer Federsteifigkeit (Gl. (3)) verwendet. Nach diesem Modell steigt die Steifigkeit k proportional zur Wurzel der Überlappung δ .

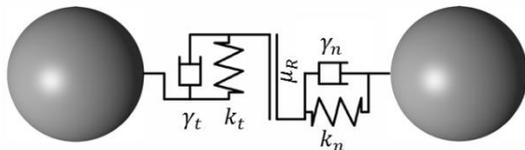


Abbildung 3: einfaches Kontaktmodell mit Normal- und Tangentialkraft sowie Reibung (nach [2])

Die Kontaktkraft führt zu einer Beschleunigung der Kugeln. Durch zweimalige Integration der Beschleunigung (Gl. (5) und Gl. (6)) ergeben sich neue Partikelpositionen. Diese resultieren in neuen Überlappungen und der Berechnungszyklus beginnt von vorn.

Es gelten die folgenden mathematischen Beziehungen:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_n = k_n \delta_n - \gamma_n v_n \quad \mathbf{F}_t = k_t \delta_t - \gamma_t v_t \quad (2)$$

$$k_n = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad k_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_t} \quad (3)$$

$$\gamma_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \quad \gamma_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \quad (4)$$

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_i \Rightarrow \int \ddot{\mathbf{x}}_i dt = \dot{\mathbf{x}}_i \Rightarrow \int \dot{\mathbf{x}}_i dt = \mathbf{x}_i \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{M}_i \Rightarrow \int \dot{\boldsymbol{\omega}}_i dt = \boldsymbol{\omega}_i \Rightarrow \int \boldsymbol{\omega}_i dt = \boldsymbol{\varphi}_i \quad (6)$$

Mit:

$\mathbf{F}_n, \mathbf{F}_t$ = resultierende Kontaktkraft (in normalen- und tangentialer Richtung)

k_n, k_t = Federsteifigkeit

δ_n, δ_t = Überlappung

v_n, v_t = Relativgeschwindigkeit

γ_n, γ_t = Dämpfungskonstante

Y^* = effektives Elastizitätsmodul

G^* = effektives Schubmodul

R^* = effektiver Radius ($R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j}$)

m^* = effektive Masse ($m^* = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$)

Um unregelmäßige Körperformen in der DEM zu berücksichtigen, können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. Es ist möglich, Ellipsoiden oder Superquadrics [3] zu verwenden. Mit diesen einfach geometrisch beschreibbaren Körpern lassen sich jedoch nicht alle gewünschten Formen abbilden. Des Weiteren steigt der Rechenaufwand für die Kontaktdetektion mit steigender Formkomplexität stark an. Aus diesem Grund hat sich die Multisphere-Methode, auch Clumps genannt, etabliert.

Multispheres ermöglichen es, Kugeln zu Konglomeraten (sogenannte Clumps) zusammenzufassen und beliebig geformte Festkörper zu approximieren. So ist es möglich, die DEM nicht nur für die Simulation von granularen Medien einzusetzen, sondern auch für Probleme, die man klassischer Weise der Mehrkörpersimulation (MKS) zuordnen würde. In [4] wurde gezeigt, dass ab einer Körperanzahl von ca. 90 Körpern die effizienten Algorithmen der DEM zur Kontakterkennung und Kontaktkraftberechnung deutlich besser geeignet sind, als die der klassischen Mehrkörpersimulation (Abbildung 4).

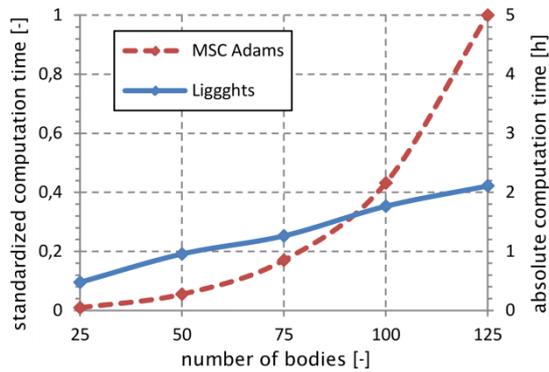


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Berechnungszeit und Körperanzahl für DEM und MKS Simulation [4]

Multispheres wurden bisher bereits eingesetzt, um das Verhalten von Stückgütern im Pulk zu analysieren [5]. Wobei man sich unter dem Begriff „Stückgut“ beispielsweise ein quaderförmiges Paket oder einen beliebig geformten, geschlossenen Ladungsträger bzw. eine Verpackung vorstellen kann. Immer dann, wenn solche Stückgüter massenhaft transportiert werden sollen, kann es zu Problemen aufgrund der Interaktion der Stückgüter untereinander kommen. Ziel ist es, eine möglichst gutschonende und dennoch effiziente Förderung empfindlicher Güter zu realisieren. Daher werden die Simulationsergebnisse der DEM für eine qualitative und quantitative Bewertung des Fördervorgangs genutzt.

3 MULTILEVEL DEM-SIMULATION

Während die Diskrete Elemente Methode die mikroskopischen Wechselwirkungen der in Kontakt stehenden Einzelpartikel beschreibt, ist für eine detaillierte Beschreibung des Bewegungsverhaltens gefüllter Ladungsträger und Verpackungen ebenso die Betrachtung der Bewegung der äußeren Hülle notwendig.

Kern der Multilevel DEM-Simulation mit Hilfe der DEM ist es, alle interagierenden Körper durch Kugeln bzw. Multispheres abzubilden. Im vorliegenden Fall sollen also die Flaschen durch Multispheres und deren Füllung durch einfache Kugeln simuliert werden. Dabei können unterschiedliche Betrachtungsebenen (sogenannte Level) identifiziert werden, die Namensgeber der Methode und entscheidend für die Recheneffizienz des Verfahrens sind. Die Betrachtungsebenen können danach unterschieden werden, welche Körper miteinander interagieren. Im vorliegenden Fall sind dies die folgenden Kontakt-Betrachtungsebenen:

- Kontakte zwischen den Flaschen untereinander, zwischen den Flaschen und dem Förderer sowie zwischen den Flaschen und der Geometrie der Leitbleche;
- Kontakte zwischen dem Inhalt und den Flaschen.

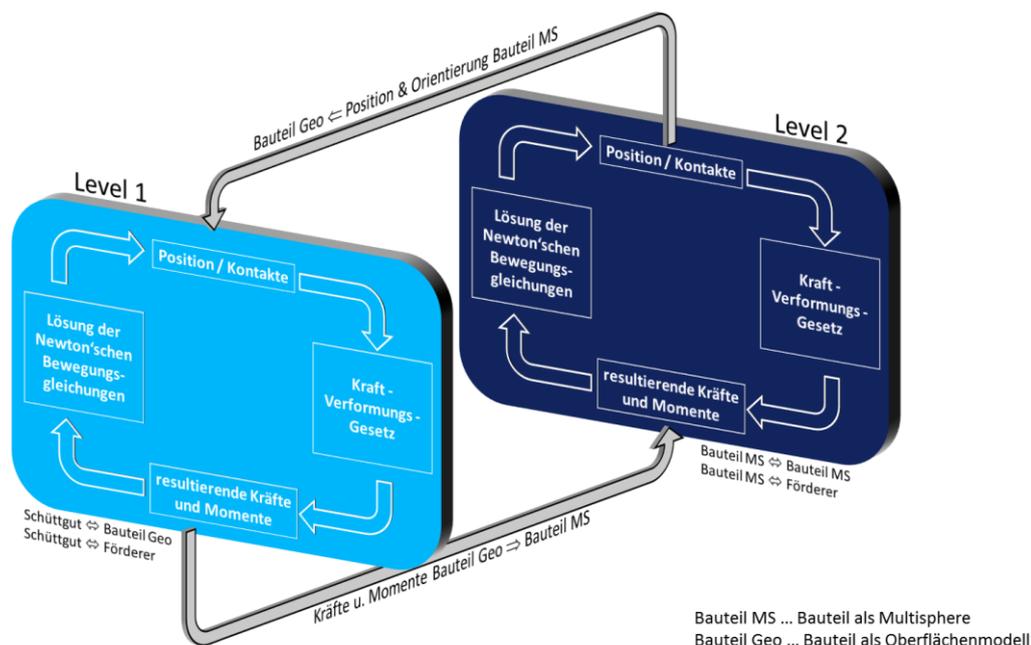


Abbildung 5: Erweiterter DEM Zyklus für die Multilevel DEM-Simulation

Die Multilevel DEM-Simulation transformiert daher die Geometriedaten der äußeren Hülle an die Stelle des für die Kontakterkennung zuständigen Kugelkonglomerates. Dazu wird die Summe aller Kontaktkräfte aus den Einzelpartikelkontakten eines Körpers auf dessen Schwerpunkt bezogen, Gleichung (7) [6].

$$\mathbf{F}_{COM_k} = \sum_{p=1}^{num} \mathbf{F}_p \quad (7)$$

Mit:

\mathbf{F}_{COM_k} = resultierende Kraft auf den Schwerpunkt

\mathbf{F}_p = Kontaktkraft eines Einzelpartikels

num = Anzahl Partikel eines Körpers

p = Partikelindex

Aus der Summe aller Kontaktkräfte resultiert eine Gesamtbeschleunigung für den Einzelkörper und ein Drehmoment entsprechend der Hebelarme vom Schwerpunkt zu den in Kontakt stehenden Partikeln. Durch zweimalige Integration der Beschleunigung ergibt sich eine neue Position des Schwerpunktes des Festkörpers. Anschließend werden alle Einzelpartikel eines Körpers entsprechend ihres aus der Modellierung bekannten Abstandes zum Schwerpunkt an die neue Position innerhalb des Simulationsraumes verschoben. Gleiches geschieht mit der aus dem Moment resultierenden Winkelbeschleunigung, welche zu einer Rotation des Körpers führt.

Die Ergebnisse dieses numerischen Integrations schrittes werden innerhalb des Simulationsprogrammes genutzt, um ebenso das Flächenmodell des Fördergutes im Simulationsraum zu verschieben und zu rotieren. Gleichung (8) stellt die Berechnungsvorschrift für diese Koordinatentransformation dar.

$$\mathbf{x}_i = q_k \cdot \mathbf{x}_{i-1} \cdot \bar{q}_k + \Delta \mathbf{r}_k \quad (8)$$

Mit:

i = Iterationsschritt

\mathbf{x}_i = Koordinaten einer Dreieckfläche,

q = Quaternion der Rotation des Körpers k ,

\bar{q} = Konjugierter Quaternion,

$\Delta \mathbf{r}$ = Verschiebungsvektor des Körpers k .

Die so durchgeführte Koordinaten-transformation hat zur Folge, dass die Position der Flaschengeometrie zu jedem Iterationsschritt mit der zugehörigen Multisphere-Position übereinstimmt (Abbildung 6).

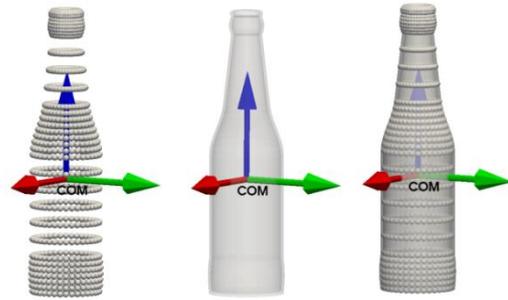


Abbildung 6: interne Koordinatentransformation des Flächenmodells in den Schwerpunkt des Kontaktmodells

Das transformierte Flächenmodell der Flasche wird in einem ersten Schritt für weiterführende Analyseschritte, beispielsweise des Mantel-verschleißes und der Kontakthäufigkeit, genutzt. Erste Ergebnisse werden in Kapitel 6 präsentiert.

Für eine vollumfängliche, industrienahe Simulation ist die Betrachtung gefüllter Ladungsträger notwendig. Typische Anwendungsfälle sind lose Objekte in Ladungsträgern oder Flüssigkeiten in Flaschen. Durch die Beladung ändert sich das dynamische Verhalten des gesamten Körpers signifikant. Zu diesem Zweck wird eine Modellierung der inneren Kontaktkräfte und der daraus resultierenden veränderten Dynamik des Körpers durchgeführt.



Abbildung 7: einzelne, mit DEM-Partikeln gefüllte Flasche

Innere Kräfte können in der DEM aus dem Kontakt der inneren Partikel mit dem transformierten Flächenmodell des äußeren Körpers ermittelt werden. Die Kontakterkennung zwischen den inneren Partikeln und denjenigen Partikeln, welche den Multisphere repräsentieren, wird zu diesem Zweck deaktiviert.

4 MODELLBILDUNG

Zur Simulation des Fördergutes „Glasflasche“ wird deren Form durch Kugelkonglomerate approximiert. Die reale Form wird dabei durch 3D-Scan oder CAD-Konstruktion gewonnen. Die Flaschenoberfläche wird in einem ersten Schritt durch Kugeln unterschiedlicher Durchmesser, die sich auf der Rotationsachse der Flasche befinden, angenähert. Um den Detaillierungsgrad zu erhöhen werden in einem zweiten Schritt Kugeln mit kleinem Radius am Umfang der Flasche angeordnet. Dabei wird darauf geachtet, dass diese Kugeln die Hüllfläche nicht überlappen. Auf diese Weise werden die vier am häufigsten [7] verwendeten Glasmehrweggetränke-flaschen modelliert (Abbildung 8).

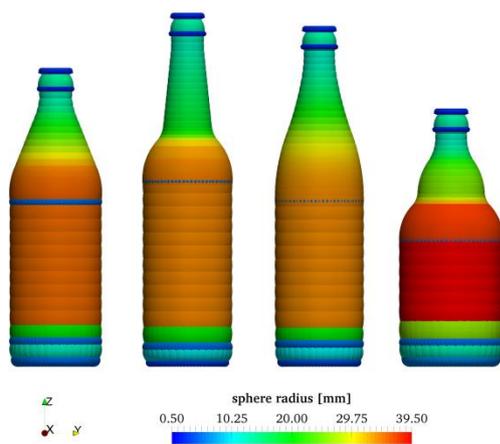


Abbildung 8: Vergleich der erzeugten Multispheres der vier 0,5-l-Flaschen (v.l.n.r.: Euroform 2, Longneck-, NRW-, Steinie-Form), eingefärbt nach Kugelradius

Der Vorteil dieser Art der Kontaktflächenmodellierung, im Vergleich zu einem aus wenigen großen Kugeln zusammengesetzten Volumenmodell [8], [9], besteht darin, die reale Außenhülle sehr detailliert abbilden zu können. Dies ist insbesondere für die in Kapitel 6 betrachteten Verschleiß-untersuchungen des Flaschenkörpers notwendig.

Durch Berechnung des Volumens der erzeugten Clump-Geometrien ist es möglich einen Vergleich mit dem aus dem CAD-Modell bekannten exakten Volumen der jeweiligen Flaschenform durchzuführen. Tabelle 1 zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen Clump-Volumen und exaktem Volumen der modellierten Flaschen-formen.

Tabelle 1: Vergleich des Volumens der erzeugten Flaschenformen

Flaschenform	V_{CAD} [ml]	V_{Clump} [ml]	$\frac{V_{Clump}}{V_{CAD}}$ [%]
Euroform 2	665,281	657,153	98,8
Longneck	673,768	669,054	99,3
NRW	662,557	654,742	98,8
Steinie	659,281	644,123	97,7

Die verbleibenden Abweichungen lassen sich vor allem dadurch erklären, dass gerade Kanten durch mehrere Kreise angenähert werden. Dadurch entstehen kleine Flächen bzw. Räume, die nicht abgedeckt werden können, da die Multisphere Kontur nicht über die CAD-Kontur ragen soll. Weiterhin wurden das Mundstück und die Innenwölbung am Flaschenboden nur grob modelliert.

5 KALIBRIERUNG

Zur Erzielung realitätsnaher Simulations-ergebnisse müssen alle physikalischen Parameter der in Kontakt stehen Materialien kalibriert werden. Diese Parameter werden anhand von Einzelversuchen im Labor ermittelt.

5.1 WANDREIBWERT

Der Wandreibwert für die Materialpaarung Flasche/Flasche wurde mit Hilfe eines schiefen Ebene Versuchsstandes ermittelt. Es wurden drei Flaschen gleichen Umfangs ausgewählt und pyramidenförmig auf der Ebene angeordnet (Abbildung 9). Die Ebene wird langsam geneigt, bis die obere Flasche beginnt über die unteren Flaschen zu gleiten. Ein digitaler Winkelmesser dient zum Ablesen des Gleitwinkels. Aus der Beziehung

$$\mu_{Fl-Fl} = \tan(\alpha) \quad (9)$$

ergibt sich der Reibungskoeffizient für die Coulomb'sche Reibung.

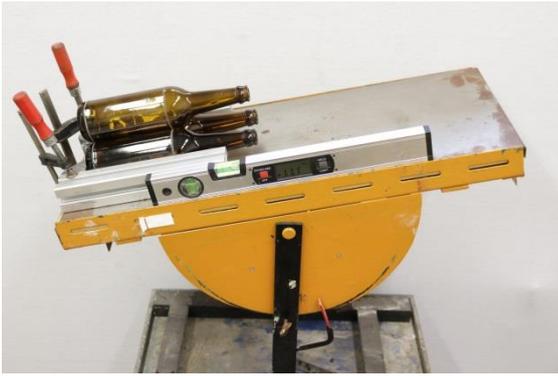


Abbildung 9: Ermittlung des Reibungskoeffizienten

Die Wandreiwerte für die Materialpaarungen Flaschenkontur / Gleitschienen wurden ebenfalls mit Hilfe des schiefen Ebene Versuchsstandes bestimmt. Die unteren Flaschen wurden dabei durch die in der Praxis verwendeten Gleitschienen ersetzt.

Die Wandreibung der Paarung Flaschenboden / Förderanlage, diese besteht in der Regel aus Kunststoffplattenbändern, wird anhand eines weiteren Reibversuches ermittelt. Die Flasche wird mit ihrem Boden auf einen Gliederbandförderer gestellt. Die Bewegung der Flasche wird durch einen Faden, der mit einem Kraftsensor verbunden ist, verhindert.

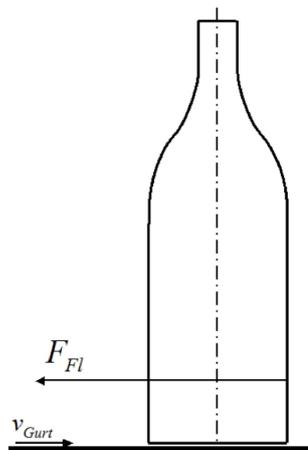


Abbildung 10: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten für den Flaschenboden

Die Masse der Flasche wird in Schritten von 100g durch Einfüllen von trockenem Sand erhöht. Der Quotient der gemessenen Zugkraft geteilt durch die Normalkraft ergibt direkt den Reibkoeffizienten für die Materialpaarung Flaschenboden / Gliederbandförderer (10).

$$\mu_{Fl-Gl} = \frac{F_{Fl}}{m \cdot g} \quad (10)$$

5.2 ROLLREIBWERT

Zur Bestimmung des Einflusses der Rollreibung wurden drei Flaschen gleichen Durchmessers auf dem Gliederbandförderer pyramidenförmig angeordnet. Die translatorischen Freiheitsgrade werden durch mechanische Anschläge gesperrt, sodass die Flaschen nur noch um ihre Längsachse rotieren können. Die unteren Flaschen werden durch den Gliederbandförderer angetrieben, die obere Flasche durch einen Faden, der mit einem Kraftsensor verbunden ist, gefesselt.

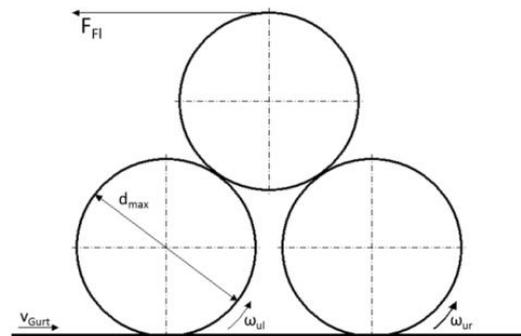


Abbildung 11: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Rollreibungmoments

Die im Versuch ermittelten Tangentialkräfte der oberen Flaschen werden durch Multiplikation mit dem Flaschenradius in ein Drehmoment überführt. Dieses Drehmoment wird mit äquivalenten Multilevel DEM-Simulation verglichen und eine Parameterkombination ausgewählt, welche das gleiche Moment ergibt.

5.3 WEITERE MATERIALPARAMETER

Die weiteren Materialparameter Steifigkeit, Querkontraktionszahl und Stoßzahl können nicht direkt aus der Realität in die Simulation übernommen werden, da der kritische Zeitschritt (11) bei Verwendung realer Steifigkeiten von Glas sehr klein wird und das Modell mit der derzeit zur Verfügung stehenden Rechentechnik nicht in endlicher Zeit lösbar ist.

$$\Delta t_{krit} = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (11)$$

Es werden daher Ähnlichkeitsbetrachtungen mit variierenden Parametern für Reibung und Dämpfung bei reduzierter Steifigkeit durchgeführt und das Simulationsmodell somit kalibriert.

5.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERMITTELTEN MATERIALPARAMETER

Mit den in Tab. 2 zusammengefasst dargestellten kalibrierten DEM-Parametern ist es möglich, ein

realistisches Verhalten des Fördergutes „Glasflasche“ zu realisieren.

Tabelle 2: Ermittelte Materialparameter

Reibwert Flasche / Flasche	μ_{FL-FL}	0,33
Reibwert Flasche / Kunststoffgleitschiene	μ_{FL-KST}	0,46
Reibwert Flaschen /Gliederband	μ_{FL-GL}	0,18
Reibwert Flasche / Stahl	μ_{FL-ST}	0,31
E-Modul	Y	10^7 Pa
Stoßzahl	COR	0.2
Querkontraktionszahl	ν	0.3

6 ANWENDUNG DER MULTILEVEL DEM-SIMULATION

6.1 QUALITATIVE ANALYSE DES FÖRDERVORGANGS

Die Ergebnisse der Computersimulation werden genutzt, um den Fördervorgang und den Einfluss auf die Flaschen qualitativ zu untersuchen. Dabei wurden zunächst nur leere Flaschen simuliert. Die Multilevel DEM-Simulation wurde trotzdem verwendet, um den auf der Multisphere-Ebene (Level 2) gemessenen Verschleiß und die Belastung (Kontaktanzahl) der Flaschen auf dem Flächenmodell der Flaschen (Level 1) zu visualisieren.

Basierend auf den in Abschnitt 5 vorgestellten Äquivalenzuntersuchungen wird zunächst der Verschleiß des Flaschenmantels im direkten Kontakt der Flaschen untereinander qualitativ untersucht. Es wird ein vereinfachtes Verschleißmodell nach Finnie [10] verwendet.

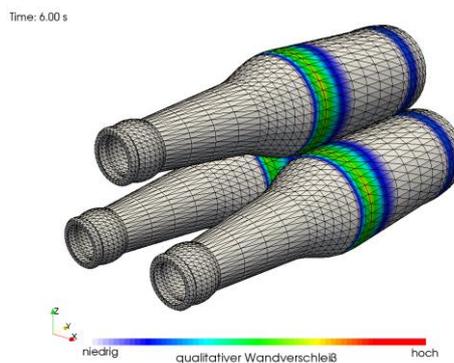


Abbildung 12: Qualitativer Mantelverschleiß (Darstellung zeigt Überlagerung der Kugelpackung mit realer Flaschengeometrie)

Die Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den realen Verschleißmarkern an handelsüblichen Mehrweggetränkeflaschen. Diese befinden sich üblicherweise kurz unterhalb des Flaschenhalses und ca. 14 mm oberhalb des Flaschenbodens, da die Flaschenform an dieser Stelle einen größeren Durchmesser als der restliche Flaschenkörper aufweist.



Abbildung 13: Typische Verschleißmarker an der Berührungslinie zweier Flaschen

Für eine quantitative Beurteilung ist es notwendig den Abrieb in Langzeituntersuchungen genau zu bestimmen und den Verschleißbeiwert der Simulation entsprechend zu kalibrieren.

Beispielhaft wird im Anschluss an die Einzelversuche eine Förderanlage zur Zusammenführung zweier Förderströme modelliert. Anhand von Videosequenzen kann beurteilt werden, ob einzelne Flaschen an bestimmten Positionen im Förderstrom zum Umkippen neigen.

Weiterhin können die Fördergeschwindigkeiten der zufördernden und abfördernden Förderer variiert werden, um einen optimalen Materialfluss zu generieren. Es ist ebenso möglich, den Förderern eine beschleunigte Bewegung aufzuprägen, um so beispielsweise das Wiederanfahren nach einem Stillstand zu simulieren. Durch Einbau weiterer Elemente in den abfördernden Gurtförderer kann eine Vereinzelungsfunktion implementiert werden, in deren Anschluss sich beispielsweise eine Flaschenwasch- oder Abfüllanlage befinden kann.

Abbildung 14 zeigt Ausschnitte aus der erstellten Videosequenz. Die Flaschen sind dabei farblich nach der Häufigkeit von Stößen mit anderen Flaschen eingefärbt.

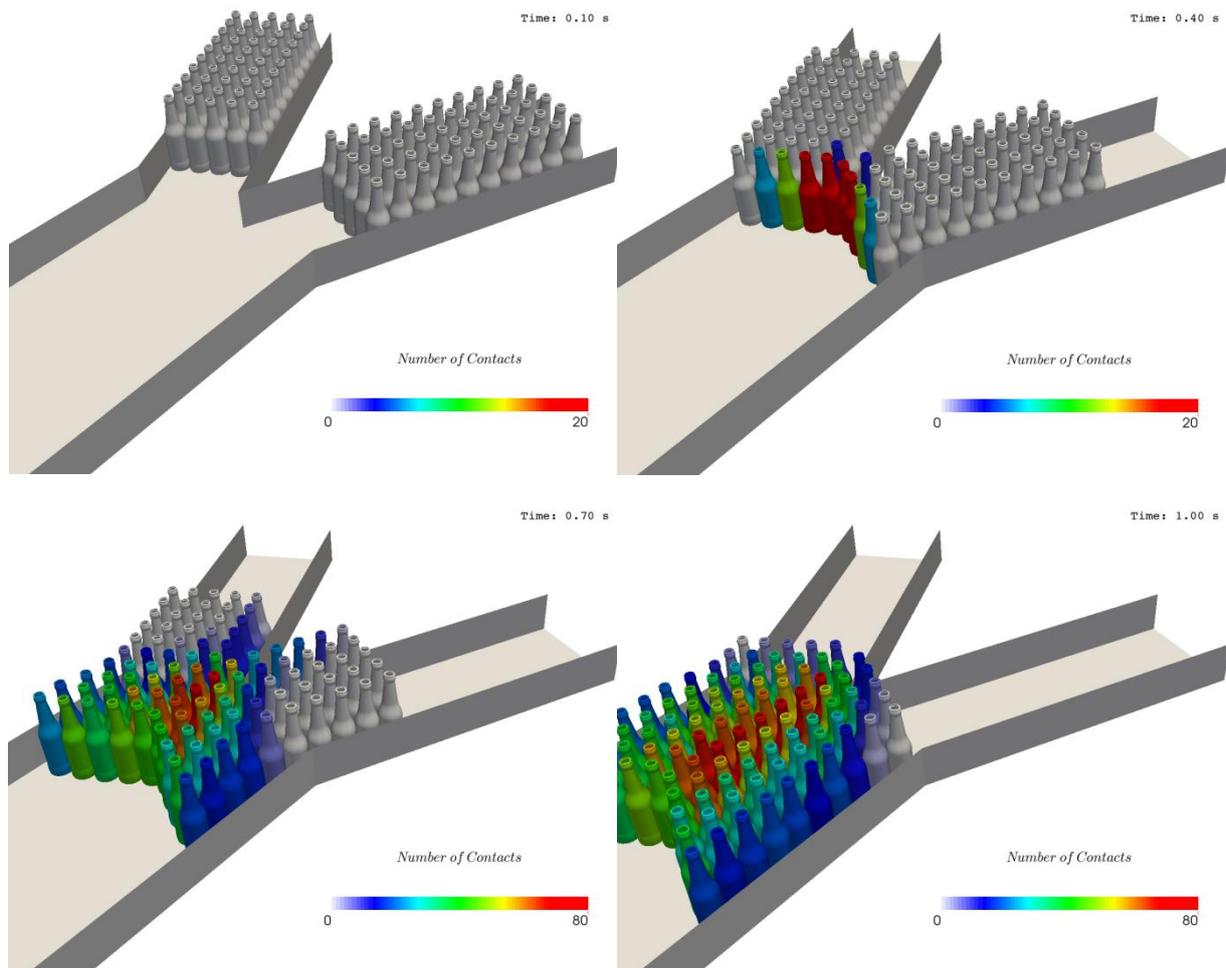


Abbildung 14: Qualitative Darstellung der Kontakthäufigkeit im Förderprozess

Durch Implementierung eines Zählers auf Partikelebene wird für jeden Kontaktpunkt einer Flasche mit einer anderen Flasche ein Wert ermittelt, der die absolute Häufigkeit von Interaktionen für jede einzelne Flasche erfasst. Gut zu erkennen ist, dass bei dieser Art der Zusammenführung die inneren Flaschen am stärksten belastet werden.

Der Wert der absoluten Häufigkeit von Stößen kann als Qualitätsmerkmal für den schonenden Transport von Flaschen bzw. Fördergütern im Allgemeinen genutzt, und somit unterschiedliche Konfigurationen von Förderanlagen miteinander verglichen werden.

Die gewonnen Daten sollen zukünftig genutzt werden, um Anlagenherstellern und -betreibern Empfehlungen bezüglich einer optimalen Förderergeometrie und Auswahl geeigneter Anlagenparametern, beispielsweise der Fördergeschwindigkeit, geben zu können.

6.2 QUANTITATIVE ANALYSE DES FÖRDERVORGANGS

Die DEM-Simulation ermöglicht es, bei entsprechend kalibrierten Parametern, die wirkenden Kräfte auf das

Fördergut „Glasflasche“ und die Förderanlage zu ermitteln. Mit Hilfe dieser kumulierten Kräfte können Aussagen über die Schädigung einzelner Flaschen während des Fördervorganges getroffen werden. Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Kraft-Zeit Verlauf der am höchstem belasteten Flasche für den untersuchten Förderprozess.

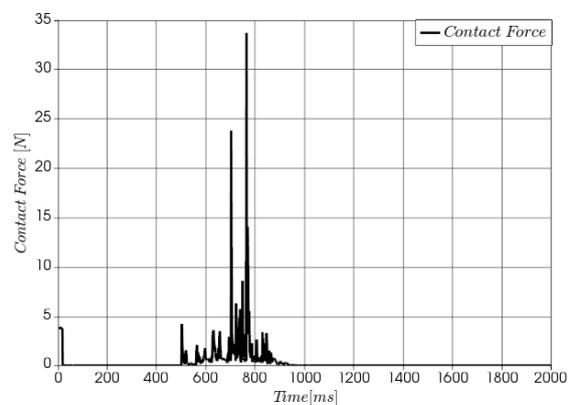


Abbildung 15: Kontaktkräfte einer ausgewählten Flasche

Wie bereits in Abschnitt 6.1 gezeigt, ist neben den wirkenden Kräften auf die Flaschen die Häufigkeit von Stößen ein wichtiger Aspekt für einen schonenden Transport. Anhand einer der Simulation nachgeschalteten Auswertung der Kontakthistorie ausgewählter Flaschen wird mittels statistischer Methoden ein Häufigkeits-Zeit Diagramm erstellt. Durch quantitativen Vergleich der statistischen Werte kann anhand mehrerer Einzelsimulationen ein Optimum bezüglich maximalem Stückgutstrom und minimaler Kontaktanzahl gefunden werden.

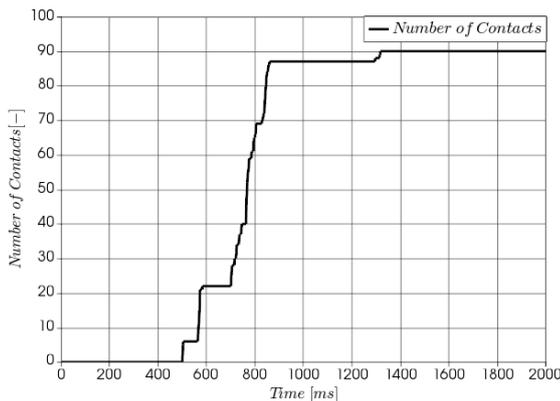


Abbildung 16: Kontakthäufigkeit einer ausgewählten Flasche während des Förderprozesses

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Beitrag wird eine Simulationsmethode zur Berechnung des Bewegungsverhaltens von Glasflaschen auf Basis der DEM vorgestellt. Es wird gezeigt, dass es bei entsprechender Kalibrierung der Materialparameter möglich ist, qualitative und quantitative Kenngrößen zu bestimmen, welche die Güte des Förderprozesses hinsichtlich eines schonenden Transportes des empfindlichen Fördergutes Glasflasche bewerten. Dies ermöglicht einen Vergleich unterschiedlicher Förderer, Förderstrategien und Flaschenformen.

Weiterführende Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf eine detailliertere Beschreibung der Flaschenfüllung. Dabei bleibt die grundlegende Idee der Multilevel DEM-Simulation erhalten. Jedoch kann auf Level 1 auch eine alternative Simulationsmethode verwendet werden. Wurden bisher reibungsfreie DEM Partikel genutzt, soll durch eine programm-basierte Kopplung mit der Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Methode zur netzfreien Modellierung von Flüssigkeiten ein realitätsnahes Verhalten der Füllung ermöglicht werden. Abbildung 17 zeigt ein erstes Ergebnis dieses Modellierungsansatzes.

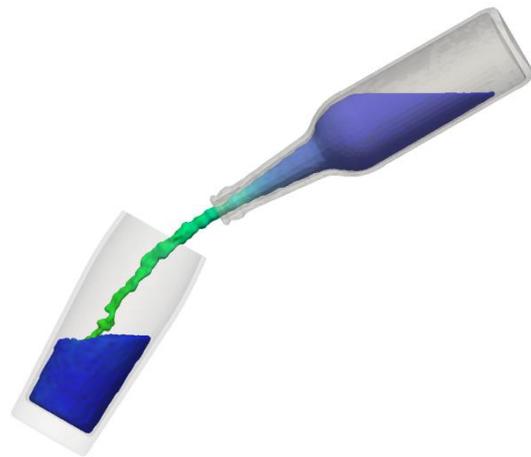


Abbildung 17: Multilevel Simulation der Flaschenentleerung unter Nutzung der SPH-Simulation zur Berücksichtigung des Flascheninhaltes

8 FÖRDERHINWEIS

Die Entwicklung der Multilevel DEM-Simulationsmethode wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „SIMPPL - Simulation des Bewegungsverhaltens gefüllter Pakete und Ladungsträger im Pulk“ (KA 1802/2-1) durchgeführt. Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

LITERATUR

- [1] Katterfeld, A.; Krause, F.: Anwendung der Diskrete Elemente Methode in der Schüttgut-Fördertechnik. In: Tagungsband zur Schüttguttagung 2003, Verlag Logisch GmbH, Magdeburg 2003.
- [2] Gröger, T.; Katterfeld, A.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttgut-technik: Grundlagen der Kalibrierung. In: Schüttgut, Würzburg: Vogel Transtech Publications, Vol. 12 (2006) Nr. 7, S. 480-486
- [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] Fritz, M.; Wolfschluckner, A.; Jodin, D. (2013). Simulation of parcels in a bulk. In: Logistics Journal, vol. 2013. doi: 10.2195/lj_NotRev_fritz_de_201311_01
- [5] Cao, L.; Richter, K.; Richter, C.; Katterfeld, A.: Simulation der peristaltischen Förderung von Stückgütern als Schüttgut. In Logistics Journal : referierte Veröffentlichungen, Vol. 2014.
- [6] Höhner, D.; Wirtz S.; Kruggel-Emden, H.; Scherer, V.: Comparison of the multi-sphere and polyhedral approach to simulate non-spherical particles within the discrete element method: Influence on temporal force evolution for multiple contacts, In: Powder Technology, Vol. 208, S. 643-656, 2011
- [7] Deloitte: Umlaufzahlen und Transport-entfernungen in der Getränkeindustrie. Deloitte & Touche GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Berlin: 2013
- [8] Dallinger, N.: Simulation of bottle conveyors – Opportunities of the Discrete Element Method (DEM), In: Proceedings of GKT 17, 2017
- [9] Dallinger N; Risch T.: Die Diskrete Elemente Methode in der Flaschenförderung. In: Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2017.
- [10] Finnie, I.: Some observations on the erosion of ductile metals, Wear, Vol. 19, S. 81-91, 1972

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld, Lehrstuhlleiter
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik an der Otto-
von-Guericke-Universität Magdeburg.

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

Matthias Pusch, B. Sc., Hilfwissenschaftlicher
Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und
Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-
Universität Magdeburg.

Adresse:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Logistik und Materialflusstechnik,
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik,
Universitätsplatz 2,
39104 Magdeburg,
Germany,
Tel: +49 391-67-50178,
Fax: +49 391-67- 42624,
E-Mail: christian.richter@ovgu.de