

23. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2018

Fördergurtsimulation – Entwicklungen und Anwendung der Methodik zur Simulation von Fördergurten mittels der DEM

Dipl.-Ing. Eric FIMBINGER



Dipl.-Ing. Eric FIMBINGER
eric.fimbinger@unileoben.ac.at

Lehrstuhl für Bergbaukunde –
Fördertechnik und Konstruktionslehre
Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben, Österreich

Fördergurtsimulation – Entwicklungen und Anwendung der Methodik zur Simulation von Fördergurten mittels der DEM

In der Fördertechnik wird die „Diskrete Elemente Methode“ (DEM) eingesetzt um die Schüttgutbewegungen in Förderanlagen numerisch zu simulieren. Fördergurte werden in DEM-Simulationen üblicherweise als ideal starre Körper modelliert, wodurch das Gurtverhalten, wie auftretende Spannungen, Deformationen, Laufverhalten etc., keine Berücksichtigung finden. Auch die Wechselwirkungen zwischen dem geförderten Material, dem Gurt und weiteren Anlagenkomponenten wie Tragrollen oder Trommeln können mit starren Gurtmodellen nicht abgebildet werden.

Zur detaillierten Simulation von Schüttguttransportprozessen unter Berücksichtigung dynamischen Fördergurtverhaltens, wurde von Fimbinger am Lehrstuhl für Bergbaukunde - Fördertechnik und Konstruktionslehre an der Montanuniversität Leoben eine Methodik entwickelt, mit welcher eine realitätsnahe Simulation von Fördergurten in komplexen Gurtförderanlagen mittels der DEM ermöglicht wird. Diese Methodik zur Fördergurtsimulation basiert darauf, den Gurt aus regelmäßig angeordneten Partikeln aufzubauen, welche über Partikel-Partikel-Verbindungen (sog. „Bondings“ oder „Bondingelemente“ [2]) zu einem Netz miteinander verbundenen werden („particle-buildup-model“). Die Gurteigenschaften werden zum einen durch die Partikel- und zum anderen durch die Bondingparameter definiert, so dass sich der als Netz modellierte „Diskrete Elemente“-Gurt (DE-Gurt) wie der reale Gurt verhält.

Die entwickelte Methodik zur Fördergurtsimulation eignet sich vor allem zur DEM-Simulation von Gurtförderanlagen, bei denen die Gurtverformungen bzw. allgemein das Verhalten des Gurtes oder auch die Wechselwirkungen zwischen dem geförderten Schüttgut, dem Gurt und weiteren Anlagenkomponenten erheblichen Einfluss auf den Förderprozess haben. Solche Anlagen sind beispielsweise Doppelgurtförderer („Sandwich Conveyor“, [5]), Schlauchgurtförderer („Pipe Conveyor“ [9]) und weitere schlauchförmige Gurtförderer (wie z.B. „Sicon® Conveyor“ [3]).

Die erforderlichen DEM-Modelle für die entwickelte Methodik wurden in Zusammenarbeit mit BECKER 3D GmbH in die DEM-Software ThreeParticle™ implementiert und an unterschiedlichen Gurtfördersystemen angewandt. Kooperative Entwicklungen mit BECKER 3D GmbH beschäftigen sich zudem auch mit Algorithmen und diversen Modellansätzen, wie beispielsweise zur Leistungssteigerung bei DEM-Simulationen – im Allgemeinen und im Speziellen bei der Fördergurtsimulation.

Die entwickelte Methodik eignet sich des Weiteren auch zur DEM-Simulation von Komponenten anderer Anwendungsbereiche. Durch den Aufbau von Objekten als particle-buildup-model (durch Bondings verbundene, gezielt angeordnete Partikel) lassen sich diese als deformierbare DE-Objekte (ähnlich DE-Gurten) modellieren. Generell wird dadurch die Modellierung deformierbarer Komponenten in der DEM-Umgebung ermöglicht. Interessante Anwendungsbereiche bieten beispielsweise Textilien oder Folien (Säcke, Big-Bags, Gummielemente etc.). Simulationen von Drahtseilen bzw. Drahtseilnetzen als particle-buildup-

model haben zudem gezeigt, dass in ähnlicher Weise auch DE-Seile bzw. DE-Netze modelliert und simuliert werden können.

1 Einleitung – DEM-Simulation in der Fördertechnik

DEM-Simulationen ermöglichen einen virtuellen Einblick in verschiedenste fördertechnische Anlagen, sowie einen iterativen Optimierungs- und Analyseprozess in digitaler Form. Auf Basis von Simulationsergebnissen können geometrische, sowie förderspezifische Kriterien angepasst und virtuell optimiert werden.

Solche Kriterien betreffen beispielsweise die Auslegung von Komponenten (auftretende Kräfte, Verschleiß an Bauteilen etc.), sind leistungsbezogene Kenngrößen (Wirkungsgrad, Auslastung, Verluste etc.), oder betreffen das Schüttgut an sich (Bruchverhalten von Schüttgutpartikeln, Durchmischung/Entmischung etc.) – aber auch die generelle Eignung konstruktiver Adaptionen stellt häufig ein solches Kriterium dar, wie beispielsweise die gezielte Führung des Schüttguts in Übergabestellen.

Anpassungen zur Optimierung können durch Änderung von Anlagenparametern (z.B. Fördergeschwindigkeiten), durch entsprechende Materialwahl und durch konstruktive Eingriffe durchgeführt werden um frühzeitig kostenintensive Fehlkonstruktionen zu vermeiden.

Bei der Entwicklung neuer Förderanlagen ist der Einsatz der DEM-Simulation im Vergleich zu konventionellen Prototypentests besonders vorteilhaft. Mithilfe der computergestützten Simulation können eine Vielzahl an Varianten und Betriebszuständen kostengünstig und in verhältnismäßig kurzer Zeit als digitale Prototypen nachgebildet werden. Voraussetzungen für aussagekräftige Simulationsergebnisse sind die Verwendung geeigneter numerischer DEM-Modelle und deren Simulationsparameter. Der Abgleich des Verhaltens eines digitalen Simulationsmodells mit einem Versuchsmodell im Labor bezeichnet sich als Parameterfindung und wird durch Anpassung von Simulationsparametern in der DEM-Umgebung durchgeführt. Übliche Abgleiche beruhen beispielsweise auf Schüttwinkelversuchen, wobei aus dem sich einstellenden Schüttwinkel von Schüttgut die Parameter betreffend Reibung für die DEM-Simulation abgeglichen werden können.

2 Problembeschreibung

Für die Dimensionierung und Gestaltung konventioneller Gurtförderanlagen können Regelwerke oder standardisierte Berechnungsmethoden herangezogen werden, wie beispielsweise von ContiTech [4] oder nach Dubbel [6]. Diese Grundlagen können jedoch auf komplexe oder neuartige Fördersysteme nur bedingt angewandt werden. Es empfiehlt sich hierbei der Einsatz numerischer Simulationsmethoden (beginnend bei der Konzeptionierung, über die Gestaltung und Auslegung bis hin zur Optimierung dieser Anlagen). Diese digitale und simulationsgestützte Entwicklung kann herangezogen werden, um beispielsweise das Muldungsverhalten, die Kurvenführung, auftretende Dehnungen und Belastungen, bis hin

zum Bruchverhalten von Gurten u.v.m. zu analysieren und die gewonnen Simulationsergebnisse in die Entwicklung einfließen zu lassen.

Das folgende Praxisbeispiel zeigt die Notwendigkeit für den Einsatz numerischer Simulationsmethoden bei der Entwicklung komplexer Gurtfördersysteme:

Für einen senkrechtfördernden Doppelgurtförderer soll in der frühen Entwicklungsphase die erreichbare Förderhöhe ausgelegt bzw. festgestellt werden.

Eine rein analytische Auslegung eines solch komplexen Fördersystems beruht meist auf Erfahrungswerten und ist nicht ausschließlich auf Grundlage diverser Berechnungsmethoden möglich.

Es empfiehlt sich die Durchführung einer numerischen Simulation. Eine solche Simulation eines senkrechten Doppelgurtförderers ist in Kap. 4.1 ersichtlich. Neben der Förderhöhe wurden dabei auch diverse auftretende Effekte, wie die Ausbildung des Förderquerschnitts, analysiert.

Als Alternative zur computerunterstützten Simulation wurden in der Vergangenheit meist praktische Versuche mittels Prototypenanlagen durchgeführt. Dies hat jedoch erhebliche Nachteile, die einerseits die hohen Kosten für den Bau und andererseits den zeitlichen Aufwand für die Errichtung und die Inbetriebnahme eines Prototypens betreffen. Zudem sind Anpassungen, wie beispielsweise eine Änderung der Förderhöhe des Prototyps wesentlich aufwändiger umzusetzen als in der Simulation. Auch der „Blick ins Innere“ ist bei der numerischen Simulation gegeben, wodurch Effekte, die „von außen“ nur schwer feststellbar sind aufgezeigt werden können und Rückschlüsse auf das Verhalten der Anlage liefern. Am Beispiel des Doppelgurtförderers wäre ein solcher Effekt beispielsweise das Abreißen der senkrechten Schüttgutsäule zwischen den beiden Gurten, der ohne der DEM-Simulation und einem digitalen Prototyp nicht analysiert werden kann.

2.1 Notwendigkeit der Fördergurtsimulation und Methodenvergleich

Üblicherweise werden Fördergurte in DEM-Simulationen als starre, nicht verformbare Flächen modelliert. Die Bewegung des Gurtes wird als virtuelle Relativbewegung in die Partikel induziert, sobald diese in Kontakt mit der Gurtoberfläche kommen. Dieses verhältnismäßig einfach anzuwendende Modell des Gurtes ist für gängige Gurtfördersysteme, beispielsweise mit üblich gemuldetem Lasttrum, durchaus ausreichend um den Schüttgutstrom zu simulieren. Vorteil dieser Methode ist vor allem der geringe Modellierungs- und Berechnungsaufwand für den Gurt, sowie der Entfall der Simulation des Leertrums. Nachteilig ist, dass die Deformation des Gurtes und sämtliche daraus resultierenden Einflüsse auf den Förderprozess mit dieser Methode nicht berücksichtigt werden können.

Es besteht daher die Notwendigkeit nach einer Methodik zur Fördergurtsimulation, mit welcher das Gurtverhalten in Gurtfördersystemen berücksichtigt werden kann. Eine solche Methodik wurde von Fimbinger am Lehrstuhl für Bergbaukunde - Fördertechnik und Konstruktionslehre an der Montanuniversität Leoben entwickelt. Als Basis hierfür diente der Ansatz aus der Methode „particle-buildup-model“, welche einen leistungsstarken Ansatz für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Fördergurten darstellt. Die darauf basierend entwickelte Methodik zur Fördergurtsimulation wird in Kap. 3 näher beschrieben.

Im Folgenden werden drei generelle mögliche Methoden beschrieben, um Fördergurte mit entsprechendem Gurtverhalten in Kombination mit Schüttgut (DEM-Simulation) zu modellieren und zu simulieren:

Methode: FEM-DEM-Kopplung (schnittstellengekoppelte Simulation)

Generell besteht eine mögliche Methode darin, den Gurt mithilfe der „Finite Elemente Methode“ (FEM) mit entsprechender Software zu simulieren. Da die DEM für Schüttgutsimulationen die Partikelstromsimulationsmethode darstellt, wird eine Kopplung zwischen DEM und FEM erforderlich. Eine Zwei-Wege-Schnittstelle (bidirektionale Kopplung) dient dabei dem Datenaustausch von Simulationsergebnissen in beide Richtungen. Diese Schnittstelle stellt eine Verbindung zwischen den beiden verschiedenen Berechnungs-Umgebungen her und führt eine fortlaufende Zwischenergebnis-Konvertierung – einerseits von DEM nach FEM und andererseits von FEM nach DEM – durch.

Generell wäre eine solche FEM-DEM-Kopplung zwar denkbar, es wird aber aufgrund ihrer Komplexität, einerseits durch die Schnittstelle und andererseits durch die Erfordernis zweier Software-Umgebungen (FEM und DEM), in dieser Arbeit nicht näher auf diese Methode eingegangen.

Methode: FEM-in-DEM (Multiphysik-Simulation)

Nach ähnlichem Prinzip wie bei der FEM-DEM-Kopplung besteht eine weitere Möglichkeit darin, innerhalb der Simulationsumgebung neben den erforderlichen DEM-Berechnungen für den Schüttgutstrom auch FEM-Berechnungen für den Gurt durchzuführen. Eine zusätzliche Schnittstelle entfällt bei dieser „FEM-in-DEM“-Methode, was einen wesentlichen Vorteil zur „FEM-DEM-Kopplung“ darstellt.

Die DEM-Simulationssoftware ThreeParticle™ von BECKER 3D GmbH bietet demnächst die Möglichkeit solche FEM-in-DEM-Simulationen durchzuführen. [1]

Für den Gurt als großes Flächenmodell mit verhältnismäßig großen Verschiebungen der einzelnen Knoten (aufgrund des ständigen Umlaufen des Gurtes um die Trommeln und Tragrollen) bietet jedoch die nachfolgende Methode des „particle-buildup-model“ eine sehr geeignete Alternative zum Aufbau des Gurtes als FEM-Modell. Zudem ist die „FEM-in-DEM“-Simulation derzeit noch keine weit verbreitete Methodik, was ebenso für die Anwendung der nachfolgenden Methode des „particle-buildup-model“ spricht.

Methode: particle-buildup-model (DE-Gurt-Simulation)

Nach dieser Methode wird der Gurt in der DEM-Umgebung aus einer Vielzahl an Partikeln (diskreten Elementen) aufgebaut. Die Partikel, die diesen DE-Gurt bilden, sind in einer regelmäßigen Anordnung im Raum positioniert und über Bondings gezielt miteinander verbunden. Das so ergebende „Partikel-Bonding-Netz“ repräsentiert den Gurt mit seinen Eigenschaften, wie:

- Masse und Massenträgheit (Dichte und Volumen der Partikel)
- Verformungen und Spannungen (E-Modul und Querschnitt der Bondings)
- Oberfläche (Anordnung und Geometrie der Partikel)

- Bruch (Festigkeit der Bondings)
- u.v.m.

Einen Gurt als particle-buildup-model zu modellieren, dient bei der entwickelten Methodik als Grundlage für die dynamische Fördergurtsimulation. Sämtliche Fördergurte in nachfolgenden Simulationsbeispielen (z.B. Kap. 4) sind nach diesem Prinzip als particle-buildup-model aufgebaut.

Ein mit der beschriebenen Methodik zur Fördergurtsimulation modellierter Gurt bietet die Möglichkeit einer realitätsnahen Fördergurtsimulation mittels der DEM. Das Gurtverhalten sowie der Einfluss des deformierbaren Gurtes auf den Schüttgutstrom werden dabei abgebildet.

Herausfordernde Teilbereiche dieser Methodik liegen zum einen in der Art des Gurtaufbaus (der Verbindung von Partikeln zu einem Fördergurt) und zum anderen in der Gurtgenerierung (der Initialisierung des Gurtes in der DEM-Umgebung, vorzugsweise aus CAD-Daten). Diese Bereiche erforderten zusätzliche Entwicklungsschritte, welche die entwickelte Methodik von Fimbinger entscheidend kennzeichnen. Im nachfolgenden Kapitel werden diese Methodik und einige maßgebliche Entwicklungen, welche die Funktionalität der Methodik gewährleisten, näher beschrieben.

3. Methodik zur Fördergurtsimulation

Einige der nachfolgenden Ansätze wurden bereits im Tagungsbandbeitrag [7] und dem zugehörigen Vortrag von Fimbinger in Clausthal (31. Jänner 2018) [8] angeführt und erläutert. Es wird generell auf diesen Tagungsband sowie den zugehörigen Vortrag verwiesen, wobei grundlegende Methoden im Ansatz erneut bzw. aktuelle Weiterentwicklungen und Forschungsergebnisse zu beschriebenen Ansätzen ausführlicher behandelt werden.

Unterteilung der Methodik

Die entwickelte Methodik zur Fördergurtsimulation lässt sich in zwei Teilbereiche untergliedern: In die Methodik des Gurtaufbaus und in die Methodik der Gurtgenerierung.

Gurtaufbau: Dieser beschreibt, wie generell Partikel mit Bondings verbunden werden (particle-buildup-model) und welche Eigenschaften das so entstehende Partikel-Bonding-Netz erhält um einen DE-Gurt auszubilden.

Gurtgenerierung: Diese Methode beschreibt Vorgehensweisen, wie konkrete Fördergurte bei der Vorbereitung und Konfiguration von Simulationen generiert und als Partikel mit zugehörigen Bondings im Raum der DEM-Umgebung erstellt werden.

3.1 Gurtaufbau

Die nachfolgend beschriebenen Ansätze basieren auf dem in Kap 2 beschriebenen Modell des particle-buildup-model und dienen als wesentliche Grundlagen für den Aufbau eines DE-Gurtes nach der von Fimbinger entwickelten Methodik zur Fördergurtsimulation.

Die Bezeichnungen „Längs-, Quer- und Dickenrichtung“ beziehen sich jeweils auf den Gurt und beschreiben dabei dessen Kett-, Schuss- bzw. Dickenrichtung. Der Ausdruck „Partikel“ bezieht sich zudem auf Gurtpartikel, also jene Partikel, aus denen der DE-Gurt gebildet wird. Bondings beschreiben ein Modell zur Verbindung dieser Partikel miteinander.

Anordnung der Partikel

Um einen DE-Gurt aufzubauen zeigte sich eine regelmäßige Anordnung der Partikel als vorteilhaft. Eine rechteckige Anordnung der Partikel zu einer typischen Netzstruktur erwies sich im Vergleich zu einer dreieckigen Anordnung mit dichter Kugelpackung als besser geeignete Alternative (s.Abb. 1). Aufgrund des ungünstigen Verhaltens dichter Kugelpackungen bezüglich der Gurteigenschaften in dessen Hauptrichtungen (längs bzw. quer) wurde dieser Ansatz einer dreieckigen Anordnung nicht weiter betrachtet.

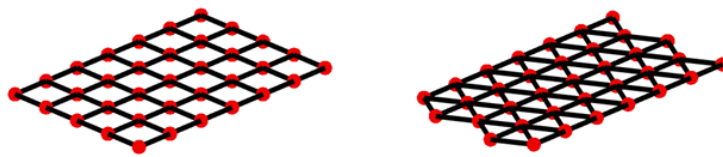


Abb. 1: Rechteckige (li.) und dreieckige (r.) Anordnung der Partikel [7]

Überlappen der Partikel

Wie von Fimbinger im Tagungsband [7] bereits näher erläutert, ist das Überlappen von Gurtpartikeln erforderlich, um die Modellierung einer möglichst durchgehenden Gurtoberfläche zu erreichen (s.Abb. 2). Hierfür wurde zunächst ein Selbstkontakt-Parameter eingeführt, welcher den Kontakt gleichartiger Partikel deaktivierte [2]. Damit wurden Partikeldurchdringungen desselben Partikeltyps ermöglicht, ohne abstoßende Kräfte zu generieren.

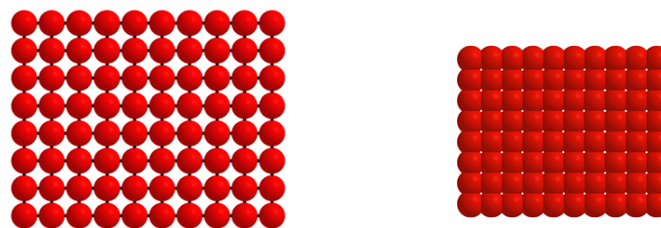


Abb. 2: Partikel nicht überlappend (li.) und überlappend (r.) angeordnet in der Ebene [7]

Diese Methode wurde aktualisiert – und ersetzt durch die Definition von „Kollisionsgruppen“ (in der DEM-Software ThreeParticle™ [2]). Damit wird eine umfangreichere Definition der Selbstkontaktbedingung ermöglicht. Durch die Zuweisung von Objekten (Partikeln und Bauteilen) zu Kollisionsgruppen kann gezielt der Kontakt unterschiedlicher Objekte deaktiviert werden. Dies ermöglicht beispielsweise, dass ein Gurtpartikel zu seinen unmittelbaren Nachbarn zwar keine Kontaktbedingung besitzt, jedoch zu weiter entfernten Gurtpartikeln (desselben Typs) sehr wohl. Dies ist beispielsweise für Schlauchgurtförderer (siehe Kap. 4.2) unbedingt erforderlich, da die beiden Gurtkanten desselben Gurtes miteinander in Kontakt sind. Ohne entsprechende Definition von Kollisionsgruppen wäre ein solcher Kontakt der Gurtkanten desselben Gurtes nicht möglich und die Gurtkanten würden einander kontaktlos durchdringen. Abb. 3 zeigt den Kontakt der beiden Gurtkanten bei einem

Schlauchgurtförderer (Kap 4.2), beginnend am Ende der Einmuldung, im Bereich des ersten Tragrollenstuhls.

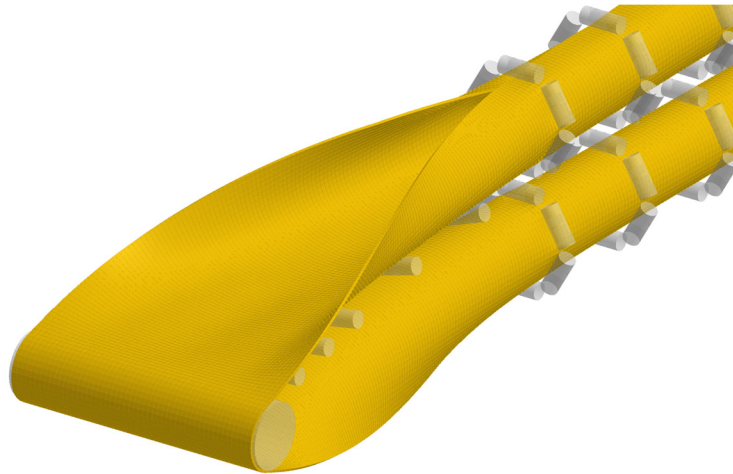


Abb. 3: Gurtkantenkontakt bei der Einmuldung eines Schlauchgurtförderers (Kap. 4.2)

Form der Partikel

Kugel-Partikel

Kugeln bilden die einfachste Partikelform für den Aufbau von DE-Gurten. Sie sind bezüglich ihrer Rechenleistung im Vergleich zu sämtlichen komplexeren Partikelformen von Vorteil, da ihre Berechnung in der numerischen Simulation grundsätzlich am wenigsten Aufwand erfordert. Kugeln haben rein durch ihre Geometrie auch keine räumliche Orientierung, wodurch das Ausrichten von Kugeln im Raum nicht erforderlich ist. In Abb. 4 ist ein Kugel-Partikel dargestellt.

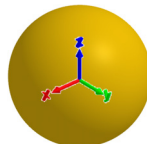


Abb. 4: Kugel-Partikel

Für den Aufbau von DE-Gurten aus einfachen Kugel-Partikeln wird der Kugeldurchmesser mit der Gurtdicke angesetzt (beim Aufbau aus einem Layer; siehe weiter unten).

Der erhebliche Nachteil von Kugeln für den Aufbau eines DE-Gurtes ist die verhältnismäßig große Anzahl an erforderlichen Partikeln. Bedingt durch die geringe Ausdehnung der Kugel in Quer- und Längsrichtung (entspricht dem Kugeldurchmesser) ist eine sehr enge Anordnung von Kugel-Partikeln erforderlich um einen möglichst glatten und durchgehenden Gurt zu modellieren. Selbst bei einer engen Anordnung behält der Gurt eine gewisse „raue“ Oberfläche aufgrund der Kugeln bei. Nachteil dieser Oberfläche ist wiederum die Bestimmung der Rauigkeitsparameter zwischen Schüttgut und Gurt durch die makroskopischen Kontakte von Schüttgutpartikeln mit der Gurtoberfläche (Abb. 5). Hinzu kommt, dass sich durch Dehnung und Verschiebung des Gurtes die Abstände der Kugeln zueinander ändern können und demnach auch die Oberflächenrauigkeit des Gurtes sich entsprechend ändert. Diese Effekte müssen beim Abgleich der Parameter unbedingt berücksichtigt werden – ein aus Kugeln modellierter Gurt muss demnach im gedehnten Zustand auf Rauigkeit bemessen werden.

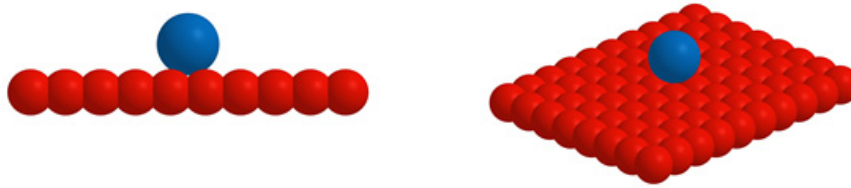


Abb. 5: Makroskopisch raue Oberfläche eines aus Kugeln aufgebauten DE-Gurtes mit darauf befindlichem Schüttgutpartikel; Seitenansicht (li.) und isometrische Ansicht (r.) [7]

Ellipsoid-Partikel

Ein grundsätzlicher Ansatz besteht darin, die Kugel in die beiden flächigen Richtungen des Gurtes (längs und quer) zu verlängern. Das entstehende Ellipsoid (Abb 6) wäre grundsätzlich eine mögliche Partikelform, wird aber aufgrund der nachfolgend besser geeigneten Partikelformen, wie beispielsweise Würfel, nicht näher behandelt. Außer Würfeln und benutzerdefinierte Formen zeigten zudem auch keine anderen, standardmäßig zur Verfügung stehenden Partikelformen (der DEM-Software ThreeParticle™), wie beispielsweise Zylinder oder Kapseln, eine gute Eignung als Gurtpartikel auf.

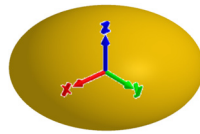


Abb. 6: Ellipsoid-Partikel

Würfel-Partikel

Würfelförmige Partikel eignen sich prinzipiell sehr gut für die Modellierung von DE-Gurten.

Sie weisen in die drei Richtungen des Gurtes (Längs-, Quer- und Dickenrichtung) entsprechende Abmessungen auf und können Seitenfläche an Seitenfläche, mit sehr geringer Überlappung (gegen Aufklaffen beim Umlenken des Gurtes) angeordnet werden. Länge und Breite des Würfels bestimmen dabei den Abstand zwischen den Partikeln und in weiterer Folge die Partikelanzahl. Diese kann – im Vergleich zur erforderlichen Partikelanzahl bei der Verwendung von Kugel-Partikeln – durch günstige Wahl der Würfelabmessungen auf einen Bruchteil reduziert werden. Eine zu große Abmessung von Würfeln führt jedoch zu einem groben Gurtmodell, und Polygon-Effekten beim Umlenken und Verformen des Gurtes.

Die Möglichkeit den Gurt mit einer glatten Oberfläche zu modellieren ist neben der geringen Partikelanzahl dieser Form ein wesentlicher Vorteil. Zusätzlich erwies sich die standardisierte Verfügbarkeit von Würfeln als Partikelform (Abb 7) und die demnach unkomplizierte Modellierung, ohne erforderliche Anpassungen des Partikelform-Modells, als vorteilhaft für die Entwicklung und die Anwendung der Methodik. (Abhängig von der verwendeten DEM-Software).

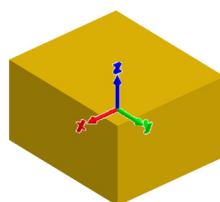


Abb. 7: Würfel-Partikel

Nachteil bei der Verwendung von würfelförmigen Partikeln ist die verhältnismäßig intensive Berechnung bei der Simulation der Würfel- im Vergleich zu Kugel-Partikeln. Dieser Effekt kann jedoch durch die geringere erforderliche Partikelanzahl kompensiert werden.

Hier sei erwähnt, dass Würfel als Volumenkörper mit jeweils sechs Flächen für die Gurtsimulation zunächst ein verhältnismäßig komplexes Partikelform-Modell darstellen, welches weiter vereinfacht werden kann: Da lediglich die Ober- und die Unterseite des Gurtes in Kontakt mit Schüttgut bzw. Anlagenkomponenten kommt, sind die weiteren vier Seitenflächen des Würfels überflüssig. Einen Ansatz zur Reduktion des standardisierten Würfels auf ein Modell, bestehend aus nur den beiden erforderlichen Flächen, stellt das anschließend beschriebene „Surface“-Partikel-Modell dar.

„Surface“-Partikel

Wie im vorigen Absatz eingeleitet, besteht dieses Partikelform-Modell aus lediglich zwei parallelen Flächen, welche die Ober- und Unterseite des Gurtes darstellen (Abb. 8).

Dieses Modell ist günstiger hinsichtlich des erforderlichen Berechnungsaufwands, ist jedoch ein nicht-standardisiertes Modell und daher als benutzerdefiniertes Modell herzustellen.

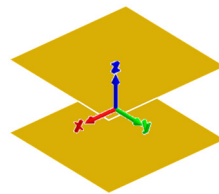


Abb. 8: Surface-Partikel

Das Surface-Partikel-Modell weist bei genauer Betrachtung jedoch anstatt der erforderlichen zwei Flächen vier Flächen auf, die bei Kontakt berücksichtigt werden, da jede der beiden Flächen (Ober- und Unterseite) wiederum für sich eine Ober- und eine Unterseite besitzt. Mit dem nachfolgenden „Shell“-Partikel wird eine Lösung für diesen Umstand geboten.

„Shell“-Partikel

Das Shell-Partikelform-Modell ist eine Ableitung des Surface-Partikelform-Modells, wobei dessen beiden Flächen (Ober- und Unterseite des Gurtes) hierbei auf eine einzelne Mittelfläche (in der Mitte des Gurtes) reduziert werden. Durch Definition eines Versatzes wird eine „Aufdickung“ („Shell“) in Dickenrichtung des Gurtes bewirkt und somit Ober- und Unterseite im Abstand zueinander geschaffen (Abb. 9). Die Summe der beiden Versatz-Abstände entsprechen dabei der Gurtdicke. Der Vorteil dieser Shell-Partikelform liegt in seiner Leistungsfähigkeit aufgrund der Reduktion des Partikels auf eine einzelne Fläche.

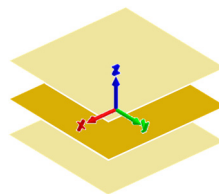


Abb. 9: Shell-Partikel

Surface- wie auch Shell-Partikel erfordern eine gesonderte Eingabe ihrer Volumina, Schwerpunktslagen und Trägheitsmomente, da diese Partikelformen reine Oberflächenmodelle sind und an sich keine Volumina aufweisen.

Die benutzerdefinierten Sonderpartikelformen Surface und Shell sind zur Modellierung von ersten beispielhaften Fördergurtsystemen bereits im Einsatz. Diese haben sich als günstige Partikelformen erwiesen, wobei der Shell-Partikel bevorzugt wird.

Nachfolgende Inhalte (Beschreibungen und Simulationsbeispiele etc.) beinhalten zwar hauptsächlich die beiden gängigeren Partikelformen Kugeln und Würfeln, aufgrund deren einfacheren Beschreibbarkeit. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das Modell der Würfel-Partikelform im Prinzip eine Surface-Partikelform (durch Entfall der vier Würfelaußenseiten) und auch eine Shell-Partikelform (als Querschnittsfläche des Würfels mit entsprechendem Versatz in Dickenrichtung) repräsentiert.

Anzahl der Partikel in Dickenrichtung (Layer)

Als Layer wird eine einzelne durchgehende Partikelschicht in der Gurtfläche bezeichnet, wobei ein Gurt aus zumindest einem Layer aufgebaut ist. Aus mehreren Layern aufgebaute Gurte (mit in Dickenrichtung übereinanderliegenden Partikeln) haben sich nicht bewährt. Wie von Fimlinger [7, 8] bereits beschrieben, zeigen sich dabei ungünstige Effekte aufgrund der Fachwerksstruktur der Bondingelemente. Zudem erhöht sich der erforderliche Berechnungsaufwand stark mit zunehmender Anzahl an Layern, da einerseits die Partikelanzahl und andererseits auch die Bondinganzahl vervielfacht wird.

Überprüfende Versuchssimulationen zeigten hervorragende Simulationsergebnisse bei geringem Rechenleistungsaufwand unter Verwendung eines einzelnen Layers mit Ersatzzeigenschaften zur Repräsentation komplexer Werkstoffverbunde.

Zudem ist eine Analyse der Simulationsergebnisse bei Gurten, aufgebaut aus einem einzelnen Layer einfacher durchzuführen. Dabei ist beispielsweise die Auswertung der Bonding-Spannungen bzw. -Dehnungen in Quer- und Längsrichtung auf einfache Weise möglich, da nur ein einzelner Layer analysiert werden muss.

Aufgrund der genannten Aspekte wird bei der entwickelten Methodik der Aufbau von Gurten aus einem einzelnen Layer bevorzugt.

Anzahl der Partikel in der Gurtfläche (Auflösung)

Die Auflösung bzw. Approximation des Partikel-Bonding-Netzes beschreibt im Allgemeinen die Anzahl der Partikel eines Layers und demnach wie detailliert der Gurt abgebildet wird. Sie beschreibt somit auch den Abstand der Partikel zueinander, welche mit Bondingelementen in einer Partikelschicht miteinander verbunden sind.

Vor allem bei Kugel-Partikeln beeinflusst die Auflösung die Oberfläche des Gurtes. Bei alternativen Partikelformen, wie Würfel-, Surface- oder Shell-Partikeln, kann der Abstand erhöht und dadurch die Partikelanzahl reduziert werden. Ähnlich wie bei FEM-Modellen wird dabei die Auflösung des Netzes gröber.

Eine hohe Auflösung (ein feines, engmaschiges Netz) bewirkt eine sehr detaillierte Simulation, steigert aber den dafür erforderlichen Berechnungsaufwand. Zu geringe Auflösungen führen hingegen zu größeren Approximationsfehlern und somit zu ungenaueren Simulationsergebnissen. Es gilt ein günstiges Verhältnis zu wählen, um realitätsnahe Simulationsergebnisse mit möglichst geringem Berechnungsaufwand zu erhalten.

Untersuchungen und überprüfende Versuche haben gezeigt, dass die zu wählende Auflösung im Wesentlichen mit der maximal zu erwartenden Gurtverformung bzw. Gurtbiegung zusammenhängt. Diese maximale Gurtbiegung zeigt sich häufig an den Umlenktrommeln von Gurtförderanlagen. Ist die Auflösung zu groß gewählt, zeigen sich an diesen Bereichen des Gurts ähnliche Polygoneffekte wie bei Kettentrieben. (Der Effekt wird jedoch durch die dämpfenden Material-Kontakt-Eigenschaften zwischen Gurt und Trommel abgeschwächt.)

Zur Auflösung des DE-Gurtes mit würfelförmigen Partikeln sei abschließend erwähnt, dass bei einem Partikelabstand von ca. zweifacher Gurtstärke repräsentative Simulationsergebnisse erzielt wurden. Für erste Vorab-Simulationen kann dieser Ausgangswert angesetzt und anschließend adaptiert werden.

Bei der Verwendung von Kugelpartikeln ist die Auflösung wesentlich höher zu wählen, um eine möglichst glatte Gurtoberfläche zu erhalten. Der Partikelabstand hängt dabei maßgeblich von der Partikelgröße der beaufschlagten Schüttgutpartikel ab ([7, 8]) und ist jedenfalls geringer anzusetzen, als der Durchmesser der Gurtpartikel (entspricht der Gurtstärke).

Ausrichtung der Partikel

Nicht-kugelförmige Partikel müssen im 3D-Raum nach gewissen Raumrichtungen orientiert werden um einen Fördergurt abzubilden. (Wie bereits beschrieben weisen Kugeln keine Achsabhängigkeit auf und verhalten sich demnach in alle Raumrichtungen gleich. Sie sind daher bezüglich ihrer Orientierung die am einfachsten zu definierende Partikelform.)

Gurtpartikel werden im Bezug zur Längs-, Quer- und Dickenrichtung des Gurtes orientiert. Eine hierfür getroffene Konvention beschreibt die Partikel-Orientierung im Bezug zum Gurt wie folgt: (siehe auch Abb. 10)

- x-Achse ... Längsrichtung
- y-Achse ... Querrichtung
- z-Achse ... Dickenrichtung

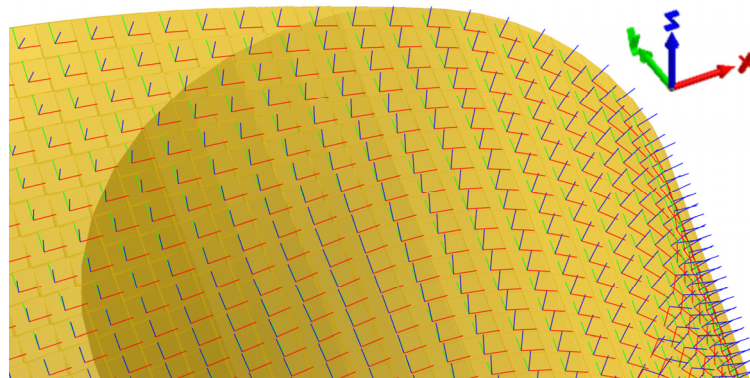


Abb. 10: Orientierung von Gurtpartikeln entlang des Gurtes (im Bereich der Trommel)

Biege/Zug-Verhalten der Bondings (Reduktionsfaktor)

Grundsätzlich basiert das Bonding-Element, das zwei Partikel miteinander verbindet, auf ähnlichen Theorien und Modellen, wie jene für Stab-Modelle in FEM-Anwendungen.

Zu berücksichtigen ist, dass der Gurt in der Realität aus mehreren miteinander verbundenen Einzelkomponenten aufgebaut ist (Stahlseil/Textil-Einlagen, Füllmaterialien, Deck- und Laufsichten) und daher inhomogenes Materialverhalten aufweist. Die resultierenden Effekte des inhomogenen Materialverhaltens zeigen sich im realen Gurt durch biegeweiches und zugsteifes Gurtverhalten.

Um dieses spezielle Biege-/Zug-Verhalten in Bondings nachzubilden wurde ein Reduktionsfaktor implementiert (wie in [7, 8] bereits näher erläutert). Dieser Faktor beschreibt das Biege- zu Zugverhalten eines stabförmigen Bondingelements. Der Faktor beschreibt dadurch den tatsächlichen Biegewiderstand (resultierend in der tatsächlichen Durchbiegung des Gurtes) im Vergleich zum Biegewiderstand eines homogenen Ersatzgurtes – und gibt somit an, wie „biegeweich“ der Gurt im Verhältnis zu seiner Zugsteifigkeit ist. Eine Veranschaulichung des Reduktionsfaktors anhand einer beispielhaften Simulation ist in Abb. 11 dargestellt. Darin wird gezeigt, dass ein Reduktionsfaktor geringer als Eins ein biegeweiches und zugsteifes Bondingelement beschreibt (r.).

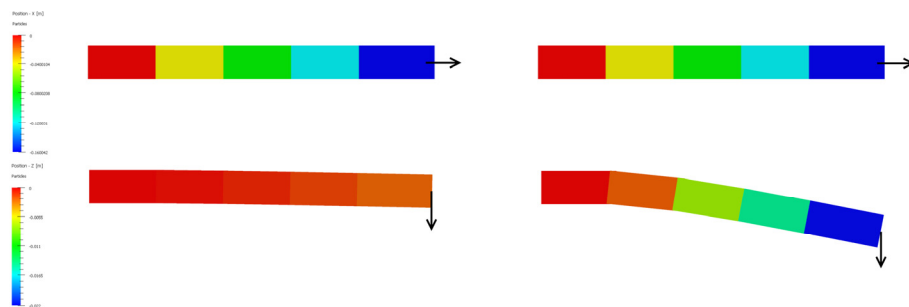


Abb. 11: Biegeverhalten eines mit Bondingelementen verbundenen Stabmodells in der Seitenansicht: auf Zug (o.) und Biegung (u.), mit Reduktionsfaktor 1,0 (li.) und 0,1 (r.)

Abb. 11 verdeutlicht, wie der Reduktionsfaktor das Biegeverhalten von Bondingelementen beeinflusst. Auf Zug verhalten sich die beiden dargestellten Modelle gleich, in ihrem Biegeverhalten unterscheiden sie sich jedoch aufgrund ihres unterschiedlichen Reduktionsfaktors.

Zum Reduktionsfaktor sei noch erwähnt, dass auch Drahtseile aufgrund ihres Aufbaus aus geflochtenen Litzen in ähnlicher Art zu behandeln sind. Auch diese weisen ein zugsteifes und biegeweiches Verhalten auf und werden mit einem entsprechenden Reduktionsfaktor modelliert.

Bei der Abstimmung der gewählten Bonding-Parameter (Querschnitt, Festigkeiten, Reduktionsfaktor etc.) muss zudem die Anzahl der Bondings berücksichtigt werden, die den Gurtquerschnitt repräsentieren. Diese Anzahl wird von der Auflösung bzw. durch den Abstand der Partikel bestimmt. Um dies konkreter zu veranschaulichen: der Gurtquerschnitt wird repräsentiert durch die Summe der Bonding-Querschnitte in Gurtlängsrichtung. Demnach ist es erforderlich, dass diese beiden Querschnitte (Gurtquerschnitt und Summe der Bonding-Querschnitte) in ihrem Verhalten einander abgestimmt sind.

Unterschiedliches Verhalten der Bondings in Quer- und Längsrichtung

Aufgrund ihrer Einlagematerialien (z.B. Stahlseile) können Fördergurte in Längs- und Querrichtung abweichende Eigenschaften aufweisen, was eine Modellierung unterschiedlicher Bondings in Quer- und Längsrichtung erfordert.

Dies wird nach der entwickelten Methodik ermöglicht, indem der Gurt in einzelne „Fasern“ in Längsrichtung unterteilt wird. Jede dieser Fasern ist eine rein in Längsrichtung mit Bondings verbundene Partikelreihe. Jede Faser ist wiederum durch Bondings in Querrichtung mit den benachbarten Fasern verbunden.

Neben der Definition unterschiedlicher Gurteigenschaften in Längs- und Querrichtung ermöglicht diese Methode auch eine günstige Auswertung der Simulationsergebnisse: Es können mithilfe dieses Aufbaus Gurtanalysen in Quer- und Längsrichtung gesondert durchgeführt werden und sogar einzelne Fasern isoliert betrachtet werden, um beispielsweise nur die Gurtkanten zu analysieren (Abb. 12).

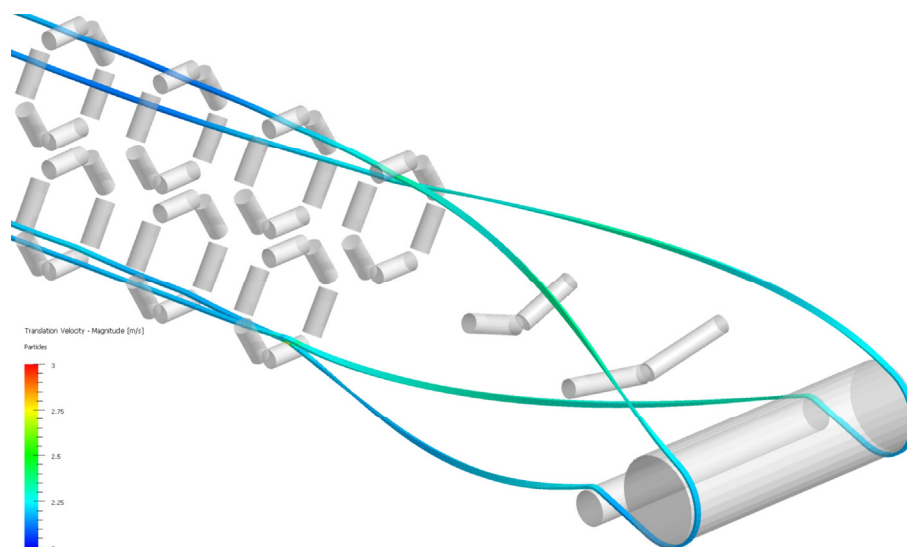


Abb. 12: Isolierte Darstellung der beiden Gurtkanten an der Antriebstrommel eines Schlauchgurtförderers (Kap. 4.2)

Visualisierung des Gurtes

Ein aus Würfel-Partikeln aufgebauter Gurt zeigt ein Erscheinungsbild, das in guter Näherung jenem des realen Gurtes entspricht. Andere Partikelformen hingegen, wie beispielsweise Kugeln, zeigen eine eher ungewünschte Visualisierung des Gurtes.

Um den Gurt auch bei Partikelformen, wie Shell-Partikeln, möglichst realitätsnah zu visualisieren werden den Partikeln rein visualisierende Formen überlagert. (In ähnlicher Art, wie visualisierenden Steinformen den Schüttgutpartikeln überlagert werden können.)

Um Fördergurte zu visualisieren sind verhältnismäßig einfache Visualisierungsformen erforderlich, wie in der nachfolgenden Abb. 13 schematisch dargestellt. Darin ist gezeigt, dass die Partikel der Gurtkanten die stirnseitige, schmale Fläche in Dickenrichtung des Gurtes visualisieren (Abb. 13 li. bzw. o.). Die restlichen Partikel stellen in der Visualisierung nur die Ober- und Unterseite des Gurtes dar. (Bei endlichen Fördergurten wird zudem auch die Visualisierung der Gurtecke erforderlich, wie in Abb. 13 r. angedeutet.)

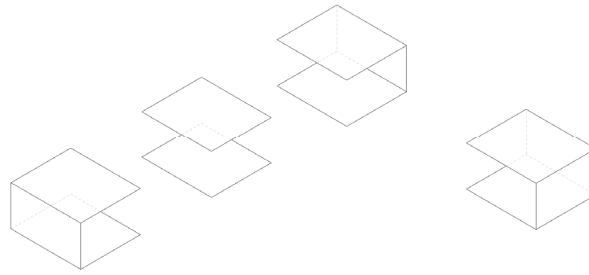


Abb. 13: Darstellungsformen für die Visualisierung von Fördergurten

3.2 Gurtgenerierung

Diese Methodik ermöglicht die Erstellung des Fördergurtes als particle-buildup-model innerhalb der DEM-Umgebung, vorzugsweise basierend auf Daten von CAD-Modellen der Gurtförderanlage.

Die Gurtgenerierung teilt sich generell in zwei mögliche Ansätze:

Generierung des Gurtes im Ruhezustand: wobei der Gurt in einfacher Form generiert und anschließend in den Einbauzustand in die Anlage verformt wird. Der DE-Gurt wird dazu als ebene Fläche oder als kreisringförmiger Endlosgurt initialisiert.

Generierung des Gurtes in einer einbauzustandsnahen Form: dabei wird der Gurt bereits nahe an seiner tatsächlichen Lage in der Anlage initialisiert. Diese von Fimbinger entwickelte Methodik zur Gurtgenerierung bildet die Basis für die Erstellung eines DE-Gurtes in Förderanlagen und stellt somit eine zentrale Komponente der ganzheitlichen Methodik zur Fördergurtsimulation dar. Die Gurtgenerierung in dieser einbauzustandsnahen Form erfordert einen erhöhten Aufwand zur Positionierung der Partikel und zur Erstellung der Bondingelemente. Dies hat jedoch den signifikanten Vorteil, dass Förderanlagen nahezu direkt aus CAD-Daten in die Simulationsumgebung importiert werden können und zusätzliche Modellierungs- und Simulationsschritte entfallen.

Die kennzeichnenden Entwicklungsansätze zur Erstellung von Gurten in dieser Form wird in diesem Artikel beschrieben.

Gurtgenerierung im Ruhezustand

Nach dieser Methode wird der Gurt in einem einfachen, unverformten und somit energieärmsten Zustand generiert. Solch ein Zustand kann für Fördergurte eine ebene Fläche oder ein kreisringförmiger Endlosgurt sein. Da im Vergleich zu diesen beiden Varianten die anschließend beschriebene Methode der Gurtgenerierung in einbauzustandsnaher Form erhebliche Vorteile aufweist, wird die Generierung im Ruhezustand nur schematisch und im Überblick beschrieben. Diese Methode zur Generierung im Ruhezustand wurde von Fimbinger in [7, 8] bereits ausführlicher gezeigt.

Der Einbau von im Ruhezustand generierten Gurten in eine Anlage erfolgt nach der Partikelinitialisierung durch gezieltes Führen des Gurtes oder auch durch Bewegen der Anlagenkomponenten, bis der Gurt schließlich als endloser Fördergurt in der Anlage eingebaut ist. In diesem Schritt unterscheidet sich die Gurtgenerierung in einbauzustandsnaher Form: mit dieser Methode wird der Gurt bereits in der Förderanlage eingebaut initialisiert und die erforderliche Vorsimulationen zum Einbau entfällt somit gänzlich.

Einziehen des Gurtes

Nach dieser Methode wird ein flacher Gurt durch die Anlage gezogen und zum abschließenden Verbinden des Gurtes zu einem Endlosgurt, die beiden Enden aneinander geführt und miteinander verbunden. Dieser Vorgang wird in Abb. 14 schematisch dargestellt:

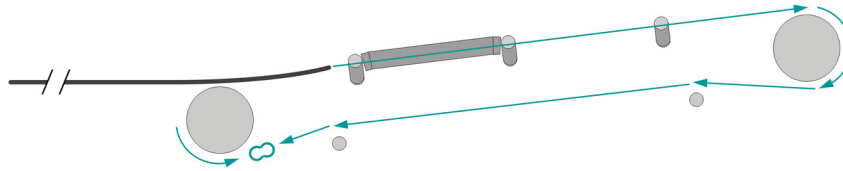


Abb. 14: Schematische Vorgehensweise zum Einziehen eines flachen Gurtes (li.) in eine Anlage (Seitenansicht) [8]

Aufspannen des Gurtes

Hierfür wird ein ringförmig initialisierter, endloser Gurt durch bewegen von „zerlegten“ Anlagenkomponenten in die Anlage eingebaut. Komponenten wie Tragrollen und Trommeln werden dabei so im Raum verschoben, dass der Gurt schlussendlich im Einbauzustand der Anlage zum Liegen kommt. Abb 15 zeigt diesen Ablauf.

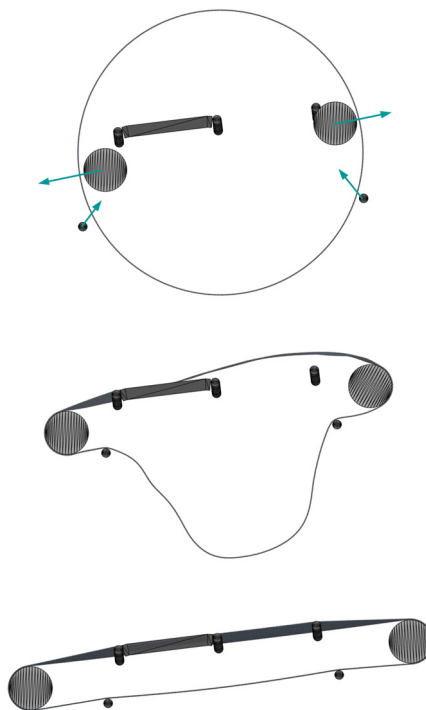


Abb. 15: Vorgang beim Aufspannen des Gurtes durch Bewegen von Anlagenkomponenten (vom Ausgangszustand o., bis zum endgültigen Zustand u.) [8]

Gurtgenerierung in einbauzustandsnaher Form

Bei der Gurtgenerierung in einbauzustandsnaher Form entfällt die Vorsimulation um den Fördergurt von seiner Ruhezustands-Lage in die teilweise belastete und deformierte Lage des Einbauzustands zu bringen. In Abhängigkeit der Anlagenkomplexität können solche Vorsimulationen teilweise sehr aufwändig werden und durchaus einen größeren Simulationsaufwand erfordern, als die eigentliche Simulation des Gurtförderers im Betriebszustand. Komplexe Anlagen, wie beispielsweise Schlauchgurtförderer, können zudem auch nur äußerst umständlich mit den oben beschriebenen Varianten des Einziehens bzw. des

Aufspannens erstellt werden. (Weitere Ergänzungen betreffend Vorsimulationen wurden von Fimbinger in [7, 8] erläutert.)

Für die Generierung des Gurtes in einbauzustandsnaher Form, ist es erforderlich, den Gurt basierend auf Daten der CAD-Konstruktion der Förderanlage zu ermitteln. Hierfür wird die Ausgangslage des Gurtes von der CAD-Geometrie des eingebauten Gurtes vorgegeben. Dieses CAD-Modell stellt jedoch eine idealisierte Einbaulage des Gurtes dar, da Fördergurte nach allgemein üblichen Konstruktionsmethoden vereinfacht konstruiert werden. So werden beispielsweise Gurtdeformationen wie Durchhänge und genaue Formausbildungen im Ein- bzw. Ausmündungsbereich nicht detailliert konstruiert.

Gurtkonvertierung

Mittels eines eigens entwickelten Konvertierungsalgorithmus wird, ausgehend von einem CAD-Modell des Gurtes, das Partikel-Bonding-Netz des DE-Gurtes in einbauzustandsnaher Form berechnet. Dieser berücksichtigt die idealisierte Lage des Gurtes im Vergleich zur ungedehnten, energieärmsten Lage und berechnet auf Basis dieser Informationen die zu erstellenden Parameter sämtlicher Partikel und Bondings des DE-Gurtes. Abb. 16 zeigt einen Ausschnitt eines in einbauzustandsnaher Form konvertierten Gurtes (li.) und das zugehörige CAD-Modell (r.).

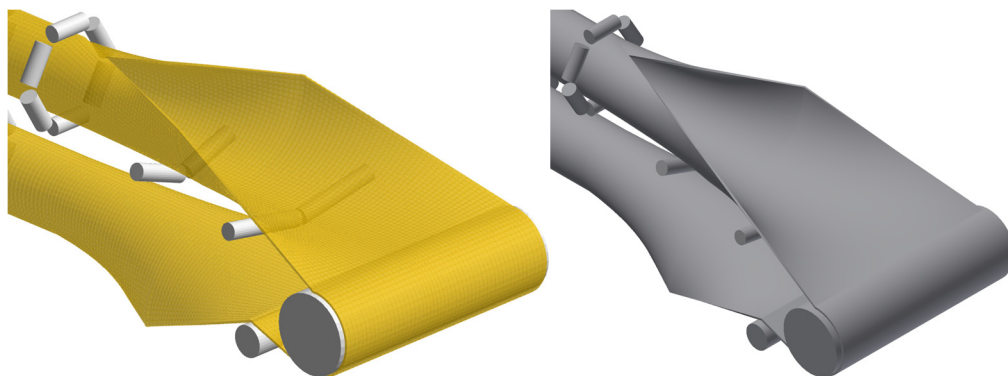


Abb. 16: In einen DE-Gurt (li.) konvertiertes CAD-Modell des Fördergurtes (r.) eines Schlauchgurtförderers (Kap. 4.2)

Eine Verifizierung des Algorithmus zeigt folgendes Verhalten: konvertierte DE-Gurte verformen sich ohne formhaltende Randbedingungen (also ohne Tragrollen, Trommeln etc.) in der DEM-Simulation in ihre energieärmste Form. Endliche Gurtabschnitte verformen sich in eine ebene Fläche, bei Endlosgurten ist die energieärmste Form ein kreisringförmiger Gurt.

Anfangsgeschwindigkeit

Eine Erweiterung der Methode berücksichtigt zudem die Initialisierung des Gurtes inklusive dessen Geschwindigkeit. Dabei werden die generierten Partikel mit entsprechender Anfangsgeschwindigkeit erstellt.

Durch die Verwendung dieser erweiterten Methodik muss das Anfahren der Anlage aus dem Stillstand nicht mehr simuliert werden, wodurch auch diese Vorsimulation entfällt.

In Abb. 17 ist die vorhandene Anfangsgeschwindigkeit des in einbauzustandsnaher Form generierten Gurtes im Bereich der Trommel dargestellt. Jeder Vektor stellt dabei ein Gurtpartikel mit vorhandener Initialgeschwindigkeit dar.

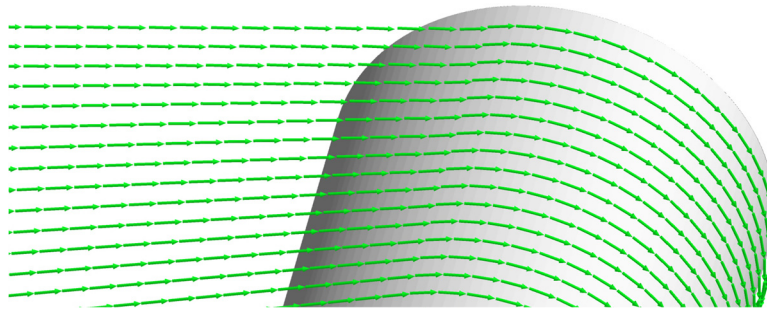


Abb. 17: Vektordarstellung der Anfangsgeschwindigkeit des generierten DE-Gurtes

Einschwingvorgänge

Für die Fördergurtsimulation mit in einbauzustandsnaher Form generiertem Gurt (mit Anfangsgeschwindigkeit) sind zwar keine aufwändigen Vorsimulationen zum Einbau des Gurtes in die Anlage mehr erforderlich, jedoch muss der idealisierte Gurt erst durch gewisse Einschwingvorgänge in seine endgültige Einbaulage gelangen. In dieser verhältnismäßig kurzen Einschwingsimulation verformt sich der Gurt in seine Lage im tatsächlichen Einbauzustand. Je näher die idealisierte, einbauzustandsnahe Form an jener der endgültigen Einbaulage liegt, umso geringer ist der hierfür erforderliche Berechnungsaufwand.

Nach dem Einschwingvorgang zeigt der Gurt realitätsnahe Deformationen, wie beispielsweise Gurtdurchhang zwischen den Tragrollen oder Rundungen beim Übergang von flachen in geneigte Gurtflächen in gemuldeten Gurtabschnitten. Ebenso werden im Einschwingvorgang die Spannungen bzw. Dehnungen entlang des Gurtes entsprechend der Anlagengeometrie ausgeglichen und erreichen ein Äquilibrium (je nach konkretem Fall und abhängig von der Position einzelner Tragrollen und Trommeln etc.).

Abb. 18 zeigt den Einschwingvorgang des in Kap. 4.2 beschriebenen Schlauchgurtförderers im Bereich der Ausmündung des Lasttrums. Das Einschwingen des anfänglich in einbauzustandsnaher Form (li.) befindlichen Gurtes, in die schlussendliche Einbaulage (r.) ist dabei ersichtlich.

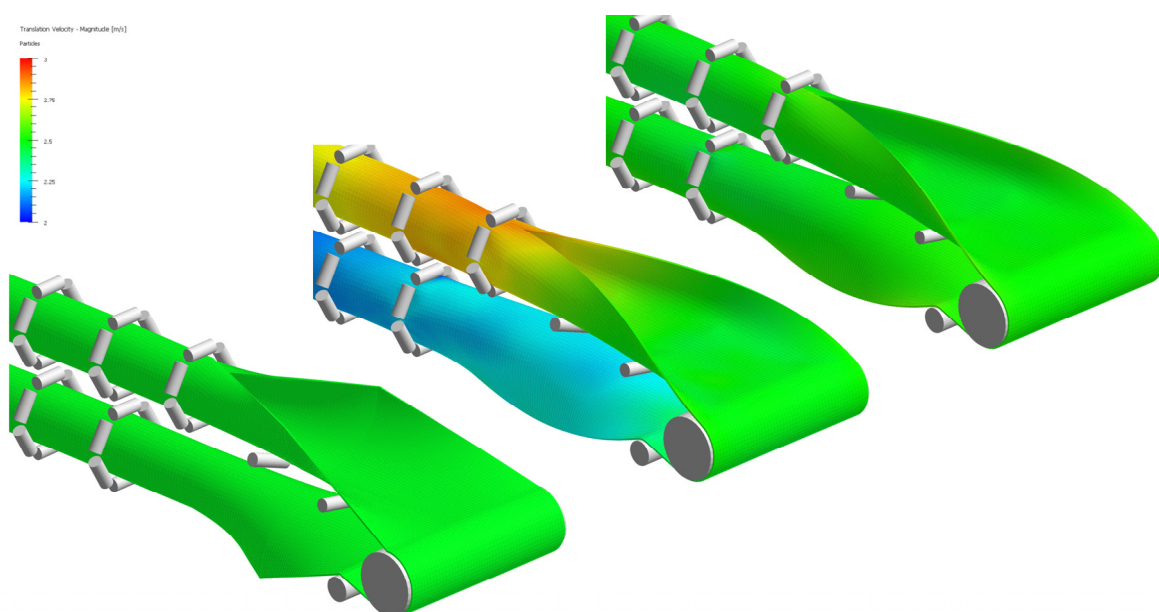


Abb. 18: Einschwingvorgang: von der einbauzustandsnahen Form (li.) bis zur eingeschwungenen Einbaulage des Gurtes (r.) (Schlauchgurtförderer, Kap. 4.2)

4. Anwendung der Methodik

Im Folgenden werden drei Praxisbeispiele für die Anwendung der entwickelten Methodik zur Fördergurtsimulation vorgestellt. Dabei wird vorrangig auf die Anwendung der Methodik und weniger auf konstruktive Anlagendetails oder ausführliche Ergebnisanalysen eingegangen. Durchgeführt wurden die Simulationen auf durchschnittlichen Workstation-PCs.

4.1 Doppelgurtförderer

Der hier gezeigte Doppelgurtförderer („Sandwich Conveyor“) ist in Anlehnung an Doppelgurtförderanlagen, beispielsweise jene von Doubrava [5], gestaltet und wurde beim Vortrag von Fimbinger in Clausthal im Jänner 2018 [8] vorgestellt. Solche, wie in Abb. 19 gezeigten Doppelgurtförderer, eignen sich als komplexes Gurtfördersystem mit zwei gegenläufigen Fördergurten hervorragend für die Anwendung der entwickelten Methodik.

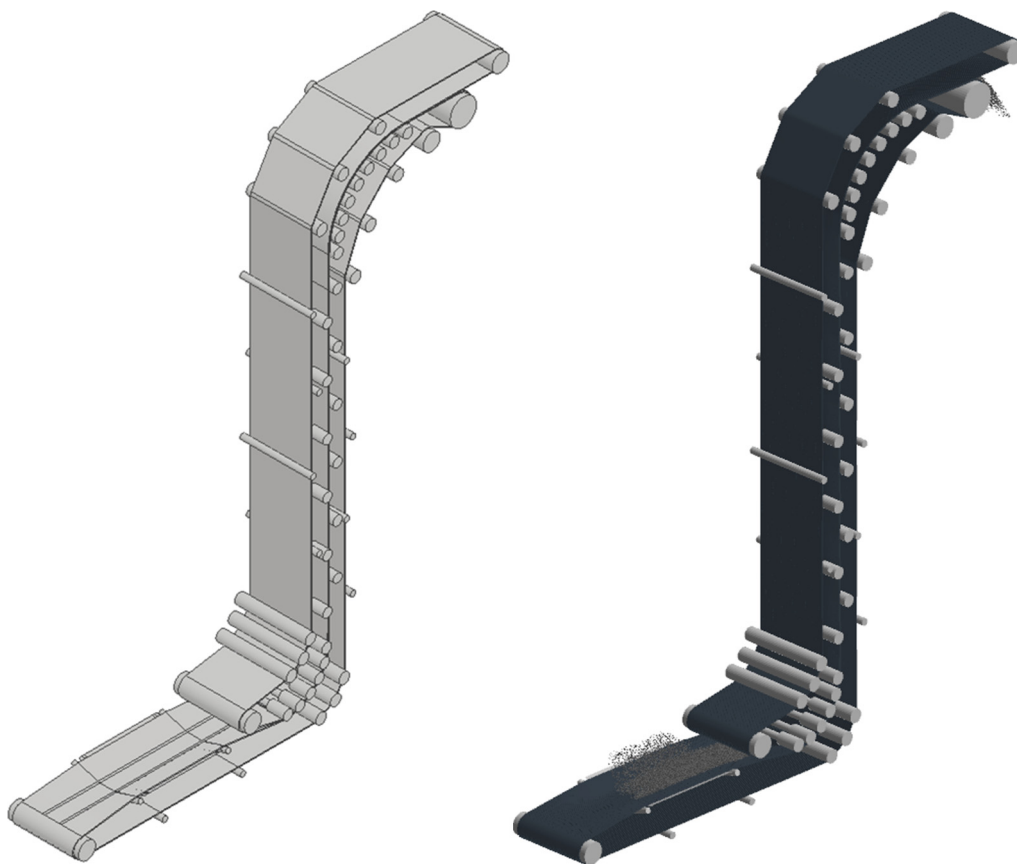


Abb. 19: Doppelgurtförderer: CAD-Modell (li.) und DEM-Simulation mit DE-Gurt (r.) [8]

Kenndaten des Fördersystems: (Traggurt / Deckgurt)

Förderhöhe	9,1 m
Gurtdicke	22 mm
Gurtbreite	1,2 m
Vorgespannte Gurtlängen	32,5 m / 26,9 m
Gewählte Gurtvorspannung	1 %
Fördergeschwindigkeit	2,1 m/s

Kenndaten der Simulation: (Traggurt / Deckgurt)

Partikelform	Kugeln (\varnothing 22 mm)
Partikelabstand	17,3 mm
Partikelanzahl in Querrichtung	70
Gurtpartikelanzahl	131.320 / 108.850
Schüttgutpartikelgröße	32 mm

Kenndaten zum Berechnungsaufwand: (Intel® Core™ i7-4770K 3,5 GHz)

Schritt	Simulationsdauer	Berechnungsdauer
Vorsimulation (Aufspannen)	7,5 s	ca. 18 h
Volllaufen	20,5 s	ca. 48 h
Betrieb	3,0 s	ca. 6 h
Gesamt	31 s	ca. 72 h

In Abb. 20 sind Schnittansichten durch den Förderer dargestellt, wobei der Ein- und Auszugsbereich des Schüttgutmaterials (li.) sowie der ausgebildete Förderquerschnitt (r.) dargestellt sind.

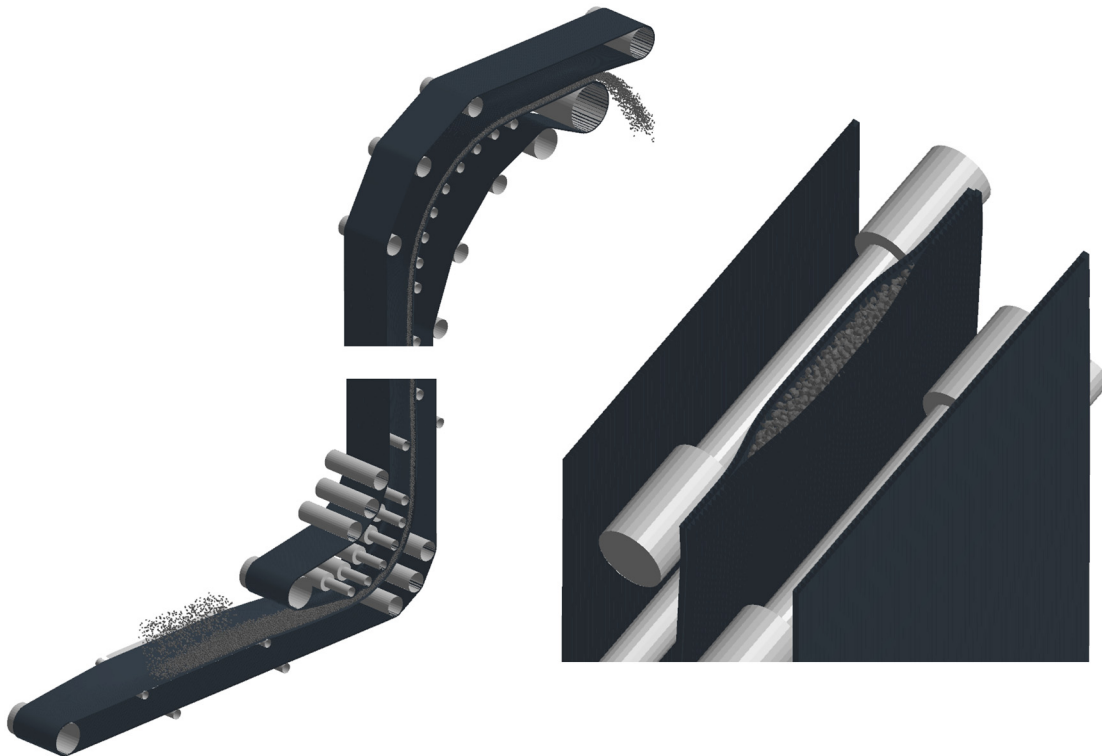


Abb. 20: Längs- (li.) und Querschnitt (r.) durch die DE-Gurte des Doppelgurtförderers [8]

Die beiden gegenläufigen DE-Gurte üben aufgrund ihrer Verformbarkeit, der Führung durch die Tragrollen und der Gurtvorspannung Druck auf das zwischen den beiden Gurten eingezogene Schüttgut aus. Das Schüttgut wird zwischen den beiden Gurtflächen senkrecht nach oben gefördert wobei die entstehende Schüttgutsäule einen Förderquerschnitt, wie in Abb. 20 r. dargestellt, ausbildet.

4.2 Schlauchgurtförderer

Der vorgestellte Schlauchgurtförderer („Pipe Conveyor“) ist mit sechsteiligen Tragrollenstationen, beispielsweise in Anlehnung an Anlagen wie jene von Takraf [9], gestaltet.

Wie die folgenden Abbildungen und Beschreibungen verdeutlichen, sind Schlauchgurtfördersysteme ausgezeichnete Anwendungsfälle für den Einsatz der entwickelten Methodik. In Abb. 21 ist der konstruierte Schlauchgurtförderer als CAD-Modell (li.) und in der durchgeführten DEM-Simulation (r.) dargestellt.

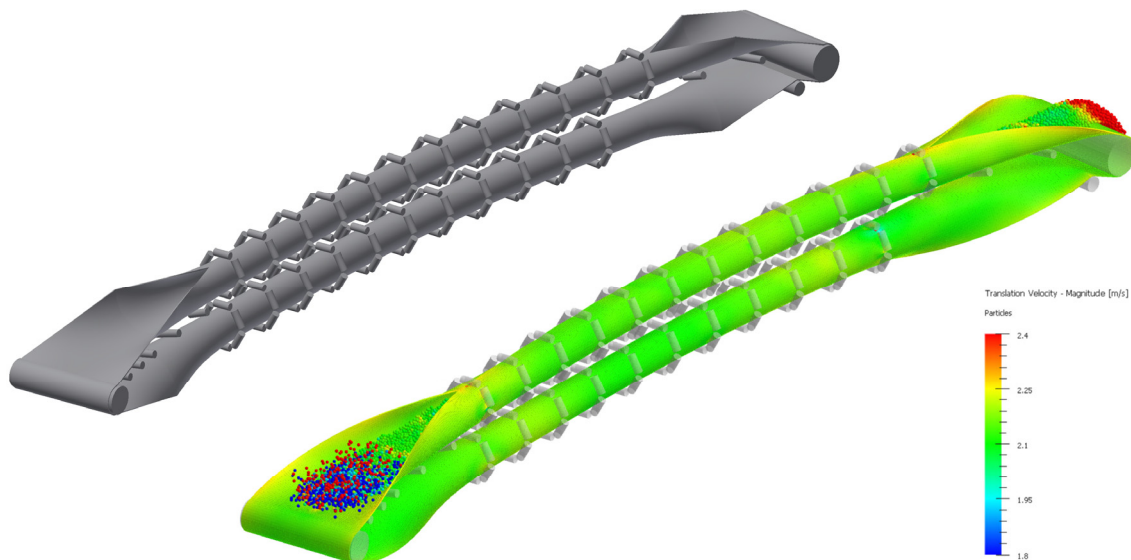


Abb. 21: Schlauchgurtförderer: CAD-Modell (li.) und DEM-Simulation mit DE-Gurt (r.)

Kenndaten des Fördersystems:

Förderlänge	19 m
Gurtdicke	22 mm
Gurtbreite	2 m
Schlauchgurtdurchmesser	Ø 0,55 m
Vorgespannte Gurtlänge	40 m
Gewählte Gurtvorspannung	2 %
Fördergeschwindigkeit	2,1 m/s
Tragrollenabstand	1 m
Weitere Anlagendetails	horizontale 10° Kurve
Füllgrad	60 %

Kenndaten der Simulation:

Partikelform	Würfel (x/y/z: 45/44/20 mm)
Partikelabstand	41 mm längs (x) / 40 mm quer (y)
Partikelanzahl in Querrichtung	51
Gurtpartikelanzahl	50.694
Schüttgutpartikelgröße	50 mm

Kenndaten zum Berechnungsaufwand: (Intel® Core™ i7-4770K 3,5 GHz)

Schritt	Simulationsdauer	Berechnungsdauer
Einschwingen	1,0 s	ca. 0,5 h
Volllaufen	8,5 s	ca. 4,5 h
Betrieb	4,0 s	ca. 2,0 h
Leerfördern	8,5 s	ca. 4,5 h
Nachlauf (Leerlauf)	1,0 s	ca. 0,5 h
Gesamt	24 s	ca. 12 h

Analysen der Simulationsergebnisse zeigen Effekte wie Gurtdurchhang zwischen den Tragrollen (Abb. 22), Walken, Gurtdehnungen oder die entstehenden Schüttgutbewegungen im Einmündungsbereich (Abb 23; im Bereich der ersten Tragrollen). Auch die auf die Tragrollen wirkenden Kräfte durch den gefüllten und bewegten Fördergurt sind mittels dieser Methodik auswertbar.

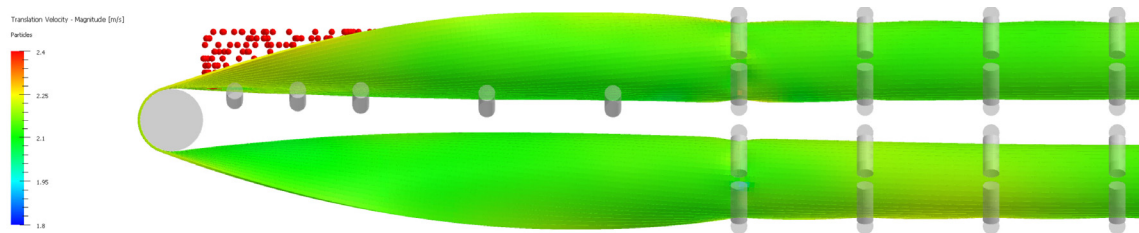


Abb. 22: Seitenansicht der Aufgabestelle: Gurtformung im Bereich zwischen Umlenktrommel und Tragrollen / Gurtdurchhang zwischen den Tragrollen

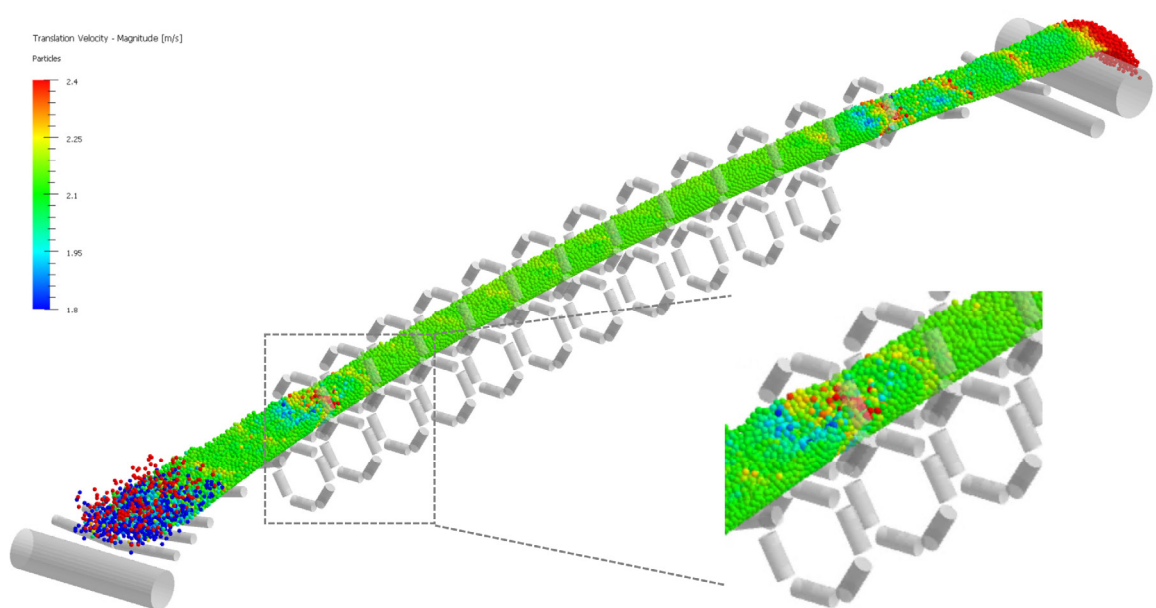


Abb. 23: Schüttgutstromanalyse mit Detailansicht im Bereich der ersten Tragrollen

4.3 Bigbags

Die entwickelte Methodik kann neben der Simulation von Fördergurten auch für weitere Anwendungsfälle verwendet werden. Als praktisches Anwendungsbeispiel hierfür wird die Simulation eines Bigbags gezeigt (durchgeführt von Becker [1]). Generell eignen sich textile, deformierbare Behälter für Schüttgut (Sack, „Bigbag“ oder allgemein auch „Flexible Intermediate Bulk Container – FIBC“) hervorragend für den Einsatz der beschriebenen Methodik.

In Abb. 24 ist der als DE-Objekt modellierte, handelsübliche und mit Schüttgut gefüllte Bigbag auf einer Europalette dargestellt (li.).

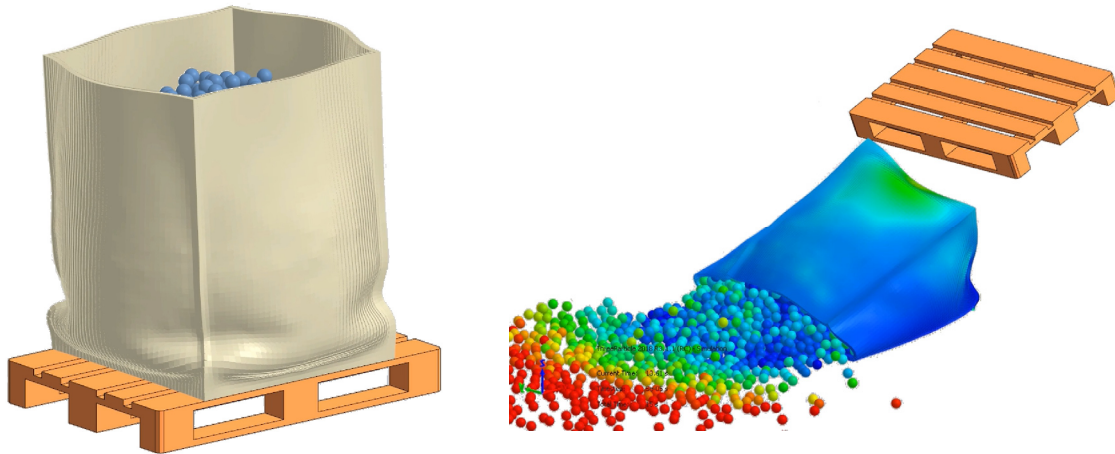


Abb. 24: Bigbag: gefüllt (li.) und nach dem Abwurf von der Palette [1]

Aus einer Abwurfhöhe wird der Bigbag von der Europalette gekippt und deformiert sich beim anschließenden Aufprall am Boden. Dabei kommt es auch zum Ausfließen des Schüttguts, wie in Abb. 24 r. dargestellt.

Kenndaten:

Grundfläche des Bigbag	ca. 0,8 x 0,8 m ²
Abwurfhöhe	ca. 0,75 m
Partikeltyp des Bigbag:	Würfel
Partikelanzahl des Bigbag	ca. 15.000
Partikelanzahl des Schüttguts	ca. 5.000

Die Nähte an den Außenkanten des Bigbags werden durch zusätzliche Bondingelemente modelliert.

Simulationsdauer für Füllen und Abwurf des Bigbag ca. 2 h

5 Laufende weiterführende Entwicklungen und Ausblick

5.1 Entwicklung unterstützender und ergänzender Software-Tools

Cylinder-Generator

Ein aktuell in Entwicklung befindliches Tool beschäftigt sich mit der Generierung von Zylinderbauteilen in der DEM-Umgebung, basierend auf CAD-Daten der Förderanlage. Die Vorteile des Aufbaus von Bauteilen wie Tragrollen und Umlenktrommeln aus „echten Zylindern“ anstelle von Mesh-Bauteilen (Vertex-Flächenkörpern) besteht zum einen in der Leistungssteigerung der Simulation und zum anderen in der Steigerung der Berechnungsgenauigkeit (da bei „echten Zylindern“ keine Polygoneffekte oder auch etwaige seitliche Verschiebungseffekte von Gurtpartikeln durch die polygene Vertex-Zylinderoberflächen auftreten können).

Belt-to-CAD

Dieses Tool dient zur einfachen Konvertierung eines aus der DEM-Software exportierten DE-Gurtes in ein allgemein lesbares CAD-Austauschformat – optional zur Erstellung des Gurtes als Flächen- oder Volumenmodell.

Nachträgliches Setzen der Anfangsgeschwindigkeit

Bei der Gurtgenerierung in einbauzustandsnaher Form ohne definierter Anfangsgeschwindigkeit kann der Gurt im Stillstand der Förderanlage eingeschungen werden. Ein geeignetes Tool würde ein anschließendes Setzen der Anfangsgeschwindigkeit dieses eingeschungenen DE-Gurtes ermöglichen, um den Anfahrvorgang des Gurtförderers zu überspringen.

5.2 Parameterfindung für den DE-Gurt

Aktuell sind Prüfverfahren in Anwendung und fortlaufender Entwicklung, mit denen die Parameter des Gurtes für die beschriebene Fördergurtsimulation bestimmt werden können. Diese Prüfverfahren dienen neben der Bestimmung genereller Gurteigenschaften wie Masse-, Dämpfungs- oder Reibungsparametern im Wesentlichen zur Bestimmung des erforderlichen Biege/Zug-Verhaltens von Fördergurten.

5.3 Weiterentwicklung an Modellen

Neben der Implementierung neuer Funktionen dienen aktuelle und geplante Weiterentwicklungen an Modellen auch der Leistungssteigerung der Berechnung. (Zum Beispiel durch vereinfachte Berechnungsansätze bezüglich der Massenträgheit der Gurtartikel etc.)

5.4 Multiphysik-Simulationen

Mehrkörpersimulation

Mittels „Mehrkörpersimulation“ (MKS; verfügbar in ThreeParticle™ [1]) besteht die Möglichkeit, bei der Fördergurtsimulation auch Komponentenbewegungen zu berücksichtigen, die aus den Kräften des Fördergurtes auf diverse Anlagenkomponenten resultieren. Somit können beispielsweise durch den Gurt bewegte, in Girlanden aufgehängte Tragrollen oder gefederte Trommeln bzw. Tragrollen simuliert werden.

FEM-in-DEM-Simulation

Mit dem Release einer funktionalen FEM-in-DEM-Möglichkeit in ThreeParticle™ sind vergleichende Simulationen zwischen der entwickelten Methode zur Fördergurtsimulation (DE-Gurt) im Vergleich zu FEM-in-DEM-Simulationen geplant. (s.Kap. 2.1)

5.5 Weitere Anwendung der Methodik zur Simulation

Geplant und in Vorbereitung sind Simulationen weiterer Gurtförderanlagen, vorzugsweise mit komplexer Gurtführung (z.B. steilfördernder Schlauchgurtförderer oder senkrechtfördernder Doppelgurt in C-Bauform etc.). Unterstützend zur Entwicklung neuer Gurtfördersysteme kommt die entwickelte Methodik bereits zum Einsatz.

Auch für weitere Anwendungsfälle abweichend von der Fördergurtsimulation bzw. gar außerhalb der Fördertechnik, ist die Anwendung der Methodik geplant, beispielsweise weitere Simulationen mit textilen Behältnissen (Säcke und Bigbags; s.Kap. 4.3) oder Drahtseilnetzen wie z.B. zum Schutz gegen Steinschlag.

Quellenverzeichnis

- [1] BECKER 3D GmbH – Discrete Element Method (DEM) Simulation Software, online unter: <https://www.becker3d.com>, abgerufen am 15.08.2018
- [2] BECKER 3D GmbH: ThreeParticle® User Guide, R3.1, 2018
- [3] ContiTech: Geschlossenes Gurtfördersystem SICON®, online unter: <https://www.contitech.de/getmedia/f28df0db-23cd-4dbb-926f-f7a35effb9da/CBG6238-De-Sicon.pdf>, abgerufen am 15.08.2018
- [4] ContiTech Transportbandsysteme GmbH: Fördergurte Berechnungen, 4.Auflage, 2008
- [5] Doubrava: Doppelgurtförderer, online unter: <https://www.christof.com/de/download/doppelgurtfoerderer/?wpdmdl=6615>, abgerufen am 15.08.2018
- [6] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 21. Auflage, ISBN 3-540-22142-5, 2005
- [7] Fimbinger, E.: Fördergurtsimulation mittels der DEM, Tagungsband 8. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, Technische Universität Clausthal, S. 121-133, ISBN 978-3-86948-621-5, 2018
- [8] Fimbinger, E.: Fördergurtsimulation mittels der DEM, Vortrag 8. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, Technische Universität Clausthal, 31.01.2018
- [9] Takraf: Pipe Conveyors, online unter: https://www.tenova.com/fileadmin/user_upload/pages/About_us/Brochure_Downloads/TA-KRAF_Pipe_Conveyors_eng.pdf, abgerufen am 15.08.2018