

Simulation von Fördergurten mittels der DEM

E. Fimlinger, Dr. M. Prenner
Montanuniversität Leoben

1 Einleitung

Die „Diskrete Elemente Methode“ (DEM) ist ein etabliertes Werkzeug um Schüttgutbewegungen zu simulieren. Sie bietet aber auch die Möglichkeit, komplexes Werkstoffverhalten abzubilden. Der Lehrstuhl für Bergbaukunde - Fördertechnik und Konstruktionslehre an der Montanuniversität Leoben entwickelt derzeit in Zusammenarbeit mit der BECKER 3D GmbH eine Simulationsmethodik, mit deren Hilfe das Verhalten von Fördergurten während eines Schüttguttransportprozesses simuliert werden kann.

In der Fördertechnik wird die DEM hauptsächlich zur Simulation von Schüttgutbewegungen eingesetzt, wobei Fördergurte üblicherweise als ideal starre Körper betrachtet werden. Die DEM bietet aber auch die Möglichkeit, den Fördergurt selbst aus miteinander verbundenen diskreten Elementen aufzubauen. Mittels eines „bonded particle“-Kontaktmodells, einem Modell zur Verbindung von Partikeln, welches auf der „Timoshenko Beam Theory“ basiert, lässt sich das Verhalten von Fördergurten abbilden. Damit können deformierbare Fördergurte in Interaktion mit Schüttgut simuliert und deren Verhalten wie Deformationen, Bewegungen, Spannungen etc. berechnet werden. Die Analyse von beispielsweise Dehnung, Durchhang, Muldungsbildung, Bruch- oder Laufverhalten von Fördergurten wird dadurch ermöglicht. Kopplungen von DEM zu FEM („Finite Elemente Methode“) sind hierbei nicht erforderlich.

Fördergurte sind üblicherweise Multimaterialverbundbauteile, die im Wesentlichen aus einer Gummi-Stahlseil- oder Gummi-Gewebe-Struktur aufgebaut sind. Durch entsprechende Berücksichtigung der aus dem Gurtaufbau resultierenden Gurteigenschaften im Modell zur Partikelverbindung lässt sich das Verhalten eines solchen Fördergurtes, aufgebaut aus Gummischichten im Verbund mit Gurteinlagen, über diskrete Elemente realitätsnah abbilden. Das Verfahren ist grundsätzlich auch auf andere Maschinenbaukomponenten anwendbar.

2 Problemstellung

Zur Gestaltung und Dimensionierung von gängigen Gurtförderanlagen stehen bereits etablierte Regelwerke zur Verfügung. Für die Entwicklung von komplexen und neuartigen Gurtfördersystemen können diese Regelwerke aber nur bedingt eingesetzt werden. Um beispielsweise das Ein- und Ausmuldungsverhalten, die Gurtführung in Kurven, die auftretenden Gurtspannungen, das Bruchverhalten etc. zu veranschaulichen, können Simulationsmethoden eingesetzt werden.

Einen Ansatz, um das Verhalten eines Gurtes abzubilden, stellt die "Finite Elemente Methode" (FEM) dar. Mit dieser Methode können Verformungen, Spannungen, Bruchverhalten usw. eines Gurtes berechnet werden. Probleme dieses Ansatzes stellen sich allerdings dabei, das Gurtverhalten in Interaktion mit dem zu transportierenden Schüttgut abzubilden.

Für die Simulation von Schüttguttransportprozessen wird üblicherweise die "Diskrete Elemente Methode" (DEM) eingesetzt. Dabei werden Gurtförderer gebräuchlich als ideal steif implementiert und erfahren daher keine Deformationen durch das transportierte Schüttgut. Auswirkungen auf den Gurt sind mit diesem Ansatz somit nicht darstellbar.

Um das Verhalten des Gurtes aufgrund der Interaktionen mit dem Schüttgut zu simulieren, kann eine gekoppelte DEM-FEM-Simulationen durchgeführt werden. Solche gekoppelten Simulationen sind zumeist rechenintensiv und mit einem Mehraufwand zum Einrichten von Simulationen verbunden. Hierbei werden zwei grundsätzlich verschiedene und ursprünglich voneinander unabhängige mathematische Lösungsansätze miteinander gekoppelt, zumeist über eine entsprechende Schnittstelle in zwei voneinander getrennten Software-Umgebungen. Für diese Methodik sind somit drei Software-Pakete erforderlich: für die DEM-Simulation, für die FEM-Simulation und für die verbindende Schnittstelle. Damit Wechselwirkungen zwischen dem Gurt und dem Schüttgut in beiden Software-Umgebungen berücksichtigt werden können, ist für die Simulation des Fördergurtverhaltens eine bidirektionale Kopplung über die Schnittstelle essentiell. Ohne bidirektionaler Kopplung würden beispielsweise Kräfte aus dem Schüttgut der DEM in die FEM übergeben, jedoch resultierende Gurtdeformationen in der FEM nicht wieder in die DEM zurückübermittelt werden (unidirektionale Kopplung). Bidirektionale Kopplungen für den betreffenden Anwendungsfall sind noch in der Entwicklungsphase.

Ein Ansatz, der derzeit am Lehrstuhl für Bergbaukunde - Fördertechnik und Konstruktionslehre an der Montanuniversität Leoben entwickelt wird, ist die Simulation des Gurtes innerhalb der DEM-Umgebung, durch den Aufbau des Gurtes aus miteinander verbundenen diskreten Elementen. Damit verbundene Vorteile sind unter anderem:

- realitätsnahe Simulation der Gurtförderanlage durch Berücksichtigung des Gurtverhaltens beim Schüttguttransport
- nur eine Simulationsmethode bzw. Software-Umgebung erforderlich (DEM)
- keine weitere Simulationssoftware und keine Schnittstellen
- geringere Simulationskosten
- günstig hinsichtlich
- Aufbau der Simulation
- Implementierung der notwendigen Bewegungsabläufe
- Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse

Mit Fortschreiten der Computertechnologie und der dadurch steigenden, effizient berechenbaren Partikelmenge, können Fördergurte beziehungsweise Bauteile zunehmend exakter und detaillierter durch hochauflösendere Modelle aus kleineren diskreten Elementen dargestellt werden.

3 Aufbau der Gurtsimulation mittels der DEM

Im Gegensatz zur klassischen finiten Elemente Methode wird der Gurt aus diskreten Elementen aufgebaut. Durch Zusammenhängen dieser Elemente zu einem Netz aus eng miteinander verbundenen Partikeln wird ein deformierbarer Gurt in der DEM-Umgebung modelliert. Die Eigenschaften eines solchen Gurtes werden einerseits durch die Partikeleigenschaften und andererseits durch die Eigenschaften der Partikelverbindung („bonds“) bestimmt. Über die Definition des Kontaktes zwischen den Gurtpartikeln und den Schüttgutpartikeln werden Wechselwirkungen zwischen Gurt und Schüttgut ermöglicht.

3.1 Gurtaufbau aus Partikeln

Um den Gurt aus einer Schicht mehrerer verbundener Gurtpartikel aufzubauen und dabei eine möglichst durchgehende Oberfläche des Gurtes zu erhalten, ist eine enge Partikelanordnung erforderlich. Eine rechteckige Anordnung erwies sich im Vergleich zu einer dreieckigen Anordnung (in ebener dichtester Packung) als vorteilhaft, da die Definition der Gurteigenschaften und die Analyse der Simulationsergebnisse in Längs- und Querrichtung bei rechteckiger Anordnung günstiger sind. Abbildung zeigt eine rechteckige, Abbildung 2 eine dreieckige Anordnung von Gurtpartikeln, je in isometrischer Ansicht (links) und in der Ansicht von oben, normal auf die Gurtoberfläche (rechts).

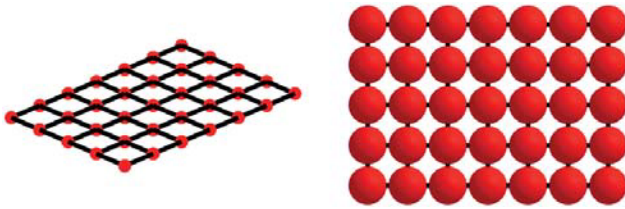


Abbildung 1: Rechteckige Anordnung von verbundenen Gurtpartikeln

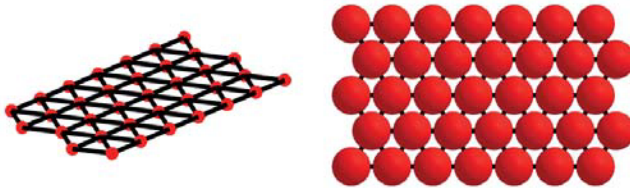


Abbildung 2: Dreieckige Anordnung von verbundenen Gurtpartikeln

Beim Aufbau des Gurtes aus einer Partikelschicht wird als Gurtpartikeldurchmesser die Gurtdicke gewählt. Durch die Kugelform der Gurtpartikel, welche aneinandergereiht die Oberfläche des Gurtes bilden, entsteht eine strukturierte Gurtoberfläche mit Vertiefungen zwischen den Partikeln, wodurch es zu einer zusätzlichen, geometriebedingten Reibung zwischen Schüttgutpartikeln und Gurt kommt. Je größer die Schüttgutpartikel im Vergleich zu den Gurtpartikeln sind und je enger die Gurtpartikel aneinander gereiht sind, desto geringer ist dieser zusätzliche Reibungseffekt. Um Gurtpartikel eng anordnen zu können wurde in der Partikelverbindungsmethodik ein Parameter implementiert, mit dem der Kontakt von Gurtpartikeln zueinander deaktiviert werden kann. Durch entsprechendes setzen dieses Selbstkontakt-Parameters können Gurtpartikel miteinander überlappen, ohne dass es zu abstoßenden Kräften oder sonstigen Kontakterscheinungen kommt. Gurtpartikel können somit überschneidend angeordnet werden, wie in Abbildung 3 dargestellt. Durch engeres Anordnen der Gurtpartikel wird die entstehende Gurtoberfläche zunehmend geglättet und auch ein mögliches Eindringen oder Verklemmen von kleinen Schüttgutpartikeln zwischen Gurtpartikeln wird verhindert. Zudem könnte durch eine entsprechende Wahl der Partikelabstände eine Volumens- oder Querschnittsflächen-Äquivalenz des Fördergurtes zum DEM-Gurt-Modell hergestellt werden, was sich vorteilhaft auf die Parameterdefinition der Partikelverbindung auswirkt.

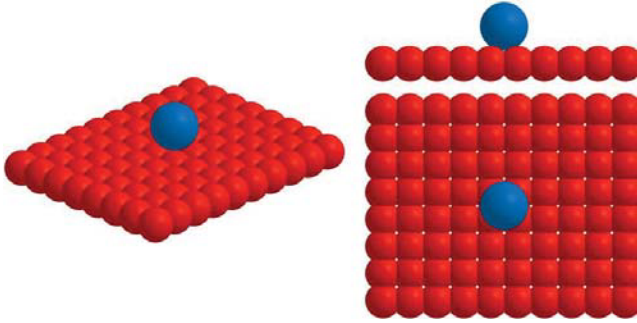


Abbildung 3: Aufbau des Gurtes aus überschneidenden Gurtpartikeln (rot) und am Gurt liegender Schüttgutpartikel (blau)

3.2 Verhalten auf Biegung und Zug

Die Methodik zum Verbinden der Gurtpartikel basiert auf der „Timoshenko Beam Theory“, wobei jeweils zwei Partikel miteinander verbunden werden. Durch seinen inneren Aufbau mit Zugträgern ist der Gurt inhomogen beschaffen, was sich dadurch äußert, dass der Gurt zwar einerseits biegeweiches, aber andererseits auch zugsteifes Verhalten aufweist. Um dieses Verhalten in der Partikelverbindung abzubilden wurde ein Parameter in Form eines Reduktionsfaktors in die Methodik implementiert. Dieser Reduktionsfaktor beschreibt das Verhältnis von Biege- zu Zugverhalten der Partikelverbindung. Die Modellierung einer zugsteifen und zugleich biegeweichen Partikelverbindung wird mittels dieser Methodik ermöglicht.

3.3 Gurtgeneration – Einbau des Gurtes in eine Anlage

Um den in der DEM-Umgebung aus Gurtpartikeln generierten Gurt in die Anlage einzubauen bestehen mehrere Möglichkeiten. Die Anlage besteht dabei aus sämtlichen mit dem Schüttgut und auch dem Gurt in Interaktion stehenden Komponenten, wie Schurren, Tragrollen, Trommeln, etc.

Eine wesentliche Problematik die sich beim Einbau des Gurtes in die Anlage stellt, ist die Handhabung von im Einbauzustand vorhandenen Gurtspannungen. Diese entstehen beispielsweise durch Vorspannen des Gurtes in Form von Zugspannungen, aber auch durch Umlenken des Gurtes an Trommeln in Form von Biegespannungen. Auch durch die Muldung des Gurtes sind im Bogenbereich der Muldung Biegespannungen im Gurt im Einbauzustand vorhanden. Im unbelasteten, spannungsfreien Zustand wäre der Gurt über die gesamte Länge flach und unverformt.

3.4 Gurtgeneration im Ruhezustand

Eine Methode den Gurt in die Anlage einzubauen, ist den abgewickelten, ungedehnten Gurt, als ebenes Gurtstück mit entsprechender Länge und Breite zu generieren und diesen endlichen Gurt entlang dem Weg des Lasttrums und des Leertrums, über die Tragrollen und um die Trommeln herum, in die Anlage einzufädeln. Nach dem Einfädeln ist eine Verbindung der beiden Gurtenden über entsprechende abschließend zu generierende Partikelverbindungen erforderlich um den Gurt endlos zu verbinden.

Eine weitere Methode den Gurt in seinen Einbauzustand zu bekommen erfolgt über Zusammenbau der Anlage um den endlos generierten Gurt. Dabei wird ein ringförmiger Gurt generiert und dieser über entsprechendes Bewegen der Anlagenkomponenten in seine Einbaulage verformt. Abbildung 4 zeigt von oben nach unten die Verformung des anfangs ringförmigen Gurtes in seinen Einbauzustand durch entsprechendes Verschieben der Trommeln und Tragrollen. Der unverformte Ausgangszustand des Gurtes ist bei dieser Methode kein ebenes Gurtstück, sondern ein endloser Gurt mit relativ großem Ringdurchmesser. Der Ringumfang des generierten Gurtes entspricht der ungedehnten Gurtlänge. Im Vergleich zum Einfädeln eines endlichen Gurtes hat diese Methode den Vorteil, dass die Endverbindung zu einem geschlossenen Gurt entfällt, da der Gurt bereits endlos generiert wird.



Abbildung 4: Verformung eines endlosen ringförmigen Gurtes in seinen Einbauzustand durch Zusammenbau der Anlage eines beispielhaften Gurtförderers

3.5 Betrachtung des Simulationsaufwands

Die Simulation des Fördersystems setzt sich jeweils aus einer Vorsimulation und einer Hauptsimulation zusammen. Die Vorsimulation ist erforderlich um den Gurt in die Anlage einzubauen und die Voraussetzungen für das anschließende

Simulationszenario, die Hauptsimulation, zu schaffen. Eine effiziente Simulation zeichnet sich durch ein Rechenaufwandsverhältnis von Haupt- zu Vorsimulation zugunsten der Hauptsimulation aus.

Die beiden beschriebenen Methoden mit Gurtgeneration im Ruhezustand haben den Nachteil, dass der erforderliche Vorsimulationsaufwand relativ hoch ist. In beiden Fällen wird der Gurt über große Verschiebungen im Raum in seine eigentliche Einbaulage gebracht.

Weitere Probleme der beiden Methoden sind, dass eine Endlosverbindung der Gurtenden aufwändig herzustellen ist und möglicherweise eine Gefahr zur Bildung von inhomogenen Gurtverbindung darstellt, sowie die Tatsache, dass vor allem bei ringförmigen Endlosgurten der Berechnungsraum aufgrund des großen anfänglich vom Gurt eingenommenen Volumens ebenfalls groß sein muss, was zu einer aufwändigen und ressourcenintensiven Berechnung führt. In beiden Fällen sind auch Änderungen am Fördersystem, beispielsweise der Gurtbreite oder der ungedehnten Länge, mit einer erneuten Durchführung der gesamten Simulation, inklusive der aufwändigen Vorsimulation verbunden.

3.6 Gurtgeneration in einbauzustandsnaher Form

Um den Vorsimulationsaufwand zu reduzieren wird der Gurt in einbauzustandsnaher Form generiert. Diese Form entspricht dem idealisierten CAD-Modell des Gurtes, wie es für Fördergurte bei der CAD-Konstruktion von Gurtförderanlagen üblich ist. Darin sind Gurtdurchhänge nicht berücksichtigt und sämtliche Verformungen vereinfacht modelliert, beispielsweise entlang der Ein- und Ausmuldungsstrecken. Abbildung 5 zeigt die CAD-Konstruktion (links) und das CAD-Modell des Gurtes (rechts) eines beispielhaften Gurtförderers wie in Abbildung 4. Wesentliche Herausforderungen zur Generation des Gurtes in der einbauzustandsnahen Form ergeben sich daraus, dass die in diesem Verformungszustand vorhandenen Deformationsverhältnisse zu berücksichtigen sind. Für jedes Gurtpartikel müssen dazu Lage und Orientierung sowie die Eigenschaften der Partikelverbindungen zu den jeweiligen Nachbarpartikeln ermittelt und in der DEM-Umgebung entsprechend initialisiert werden. In Abbildung 6 ist der auf Basis des CAD-Modells generierte Gurt in Darstellung der Partikelverbindungen (links) und in halbtransparenter Gurtpartikeldarstellung (rechts) abgebildet. Der Gurt wird nach dieser Methode in einer Form sehr nahe am Einbauzustand generiert, was durch einen Vergleich der Abbildung 4 (links unten) und der Abbildung 6 (rechts) verdeutlicht wird.



Abbildung 5: Vereinfachtes CAD-Modell eines beispielhaften Gurtförderers (li.) mit Flächenmodell des Gurtes (r.)



Abbildung 6: In der DEM-Umgebung generierter Gurt in Darstellung der Partikelverbindungen (li.) und mit halbtransparenten Gurtpartikeln (r.)

Die Vorsimulation zum Einbau des Gurtes wird durch die Gurtgeneration in einbauszustandsnaher Form gänzlich vermieden. Lediglich eine verhältnismäßig kurze Vorsimulation ist erforderlich, um die idealisierten Annahmen aus dem CAD-Modell auszugleichen, um beispielsweise den Durchhang des Gurtes zwischen den Tragrollen zu erhalten.

Wird der Gurt unbewegt initialisiert, also im Stillstand der Förderanlage, dann kann das Anfahren der Anlage simuliert werden indem der Gurt beispielsweise über entsprechende Geschwindigkeitsfelder oder gar an bewegten Antriebstrommeln angetrieben wird. Über eine Kontaktpaarung des Gurtes zu der Antriebstrommel können somit Antriebsverhältnisse abgebildet und in ähnlicher Weise auch Verluste an Tragrollen, Gleittischen oder anderen mit dem Gurt in Kontakt stehenden Bauteilen berücksichtigt werden.

Um den Anfahrvorgang der Förderanlage zu überspringen und den Gurt bereits im bewegten Zustand zu initialisieren, besteht bei der Generation in einbauszustandsnaher Form zudem die Möglichkeit dem Gurt eine Anfangsgeschwindigkeit festzulegen. Dabei wird zu den oben genannten Eigenschaften der Lage, Orientierung und Partikelverbindung zusätzlich jedem Partikel der vorgegebene Geschwindigkeitsvektor in Bewegungsrichtung zugewiesen.

4 Anwendung der Simulationsmethodik

Im Folgenden wird die Anwendung der vorgestellten Simulationemethode anhand eines konkreten Beispiels zur Simulation von Fördergurten verdeutlicht. Als Beispiel wird die Konstruktion eines Deckgurtförderers mit ungünstig gestalteter Umlenktrummel des Deckgurtes herangezogen, wobei das Schüttgut in einem durch den Deckgurt geschlossenen Förderquerschnitt befördert wird. In diesem Beispiel sollte die Einmuldungsstrecke verhältnismäßig kurz ausgeführt werden, wofür ein elastischer Deckgurt und eine konisch gestaltete Umlenktrummel des Deckgurtes geplant wurden. Die Geometrie der Umlenktrummel wurde dabei an den Muldungswinkel des Förderquerschnitts angepasst. In Abbildung 7 sind der Aufbau des Deckgurtförderers und die Ausführung der konischen Umlenktrummel dargestellt. Die entwickelte Methode zur Simulation von Fördergurten bietet die Möglichkeit, das Verhalten der Gurte im Betrieb der Anlage und auftretende Probleme aufgrund der gewählten Konstruktion zu verdeutlichen.

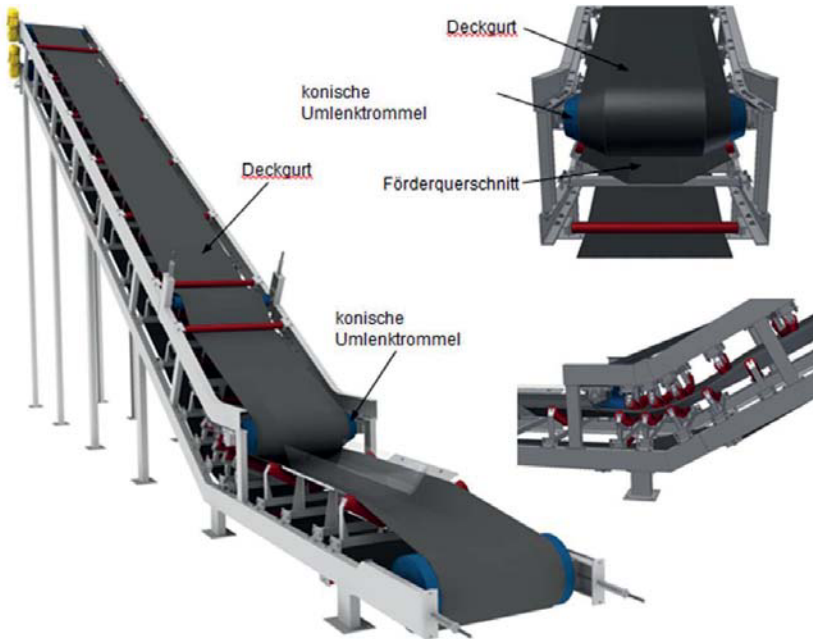


Abbildung 7: CAD-Modell des Deckgurtförderers

Wie erwartet bereitet die gewählte Trommelform Probleme, die mithilfe der Simulation aufgezeigt werden. Durch die stark konische Form der Umlenktrummel werden ungünstige Gurtspannungsverhältnisse verursacht, die in Abbildung 8 zu erkennen sind. Wie dargestellt kommt es an der Trommel zu

höheren Gurtspannungen im Bereich der Gurtmitte und zum Spannungsverlust im Randbereich des Gurtes, wodurch der Gurt an den beiden Gurtkanten den Kontakt zur Trommel verliert. Das Abheben des Gurtes von der Trommel und die sich dabei bildenden gewellten Gurtkanten sind in Abbildung 9 ersichtlich. Die kugelförmigen Gurtpartikel sind für die grafische Darstellung des Gurtes als Würfel dargestellt.

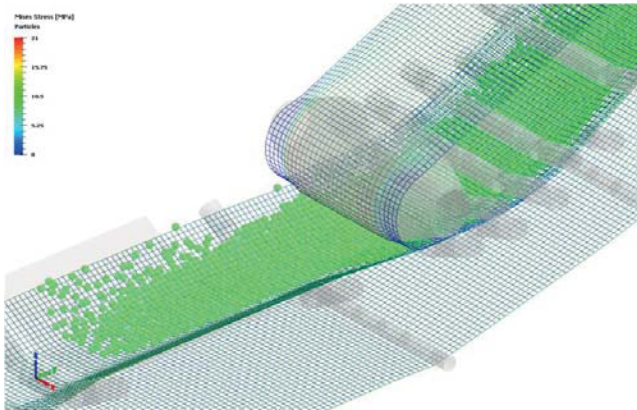


Abbildung 8: Gurtspannungen an der konischen Umlenktrummel

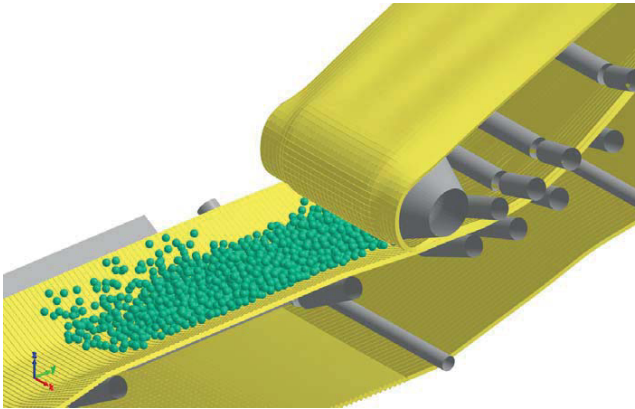


Abbildung 9: Abheben des Gurtes an den beiden Gurtkanten von der Umlenktrummel

Aufgrund der ungünstigen Gurtspannungsverhältnisse und aufgrund des Abhebens des Gurtes von der Trommel an den Gurtkanten, kann die Ausführung der Umlenktrummel in der geplanten, konischen Form nicht empfohlen werden.

Mit dieser Simulationsmethode lassen sich Verformungen und Verhalten des Gurtes durch Ein- und Ausmulden, durch Füllvorgänge, durch Gurtschiefeläufe, durch Horizontal- und Vertikalkurven, durch Gurtdurchhang zwischen Tragrollen

usw. analysieren. In Abbildung 10 wird das Einzugsverhalten von Schüttgut in den Förderquerschnitt zwischen die beiden Gurte des Deckgurtförderers dargestellt. Dabei ist die Verformung der beiden Gurte bei fortschreitendem Materialfluss deutlich erkennbar. Die Gurtpartikel sind dabei wieder als Würfel dargestellt.

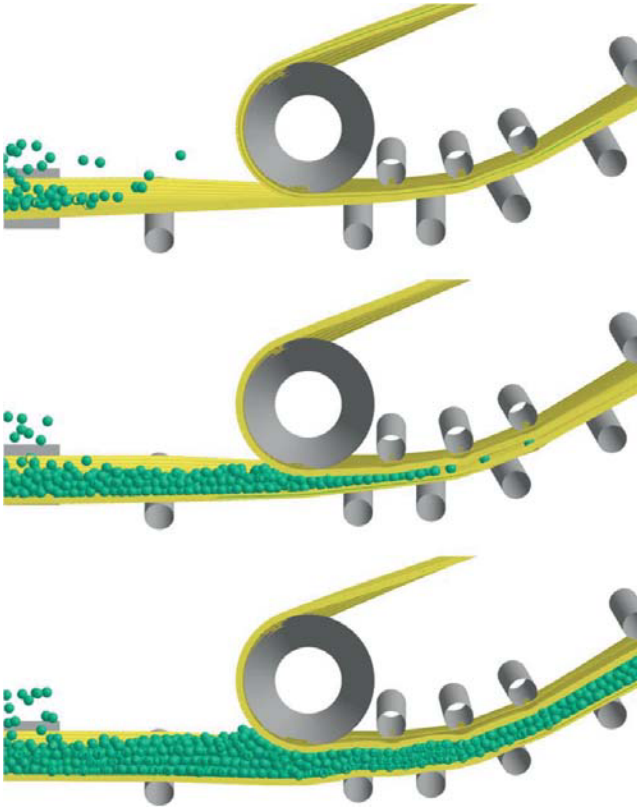


Abbildung 10: Schüttguteinzug zwischen die beiden Gurte (Schnittansicht)

Die Methode eröffnet die Möglichkeit, aus den berechneten Gurtpartikelpositionen ein CAD-Modell des verformten Gurtes zu erstellen. Der Gurt kann dann in die CAD-Konstruktion im verformten Zustand eingebaut werden.

Mit der Methode können ebenfalls Gurtspannungen beispielsweise aufgrund des Beladevorgangs, des Antriebes, der Gurtumlenkung oder der Gurtführung im Allgemeinen aufgezeigt werden. Das Verfahren kann auch zur Antriebsauslegung (zur Ermittlung von Kräften beziehungsweise Momenten), zur Bauteilauslegung oder auch zur Ermittlung von Anlagenverlusten herangezogen werden. Auch das Versagen eines Gurtes mit den entsprechenden Folgen kann abgebildet werden. In

Abbildung 11 sind das Anreißen und der Rissfortschritt bis zum Abriss eines flachen Gurtes abgebildet.

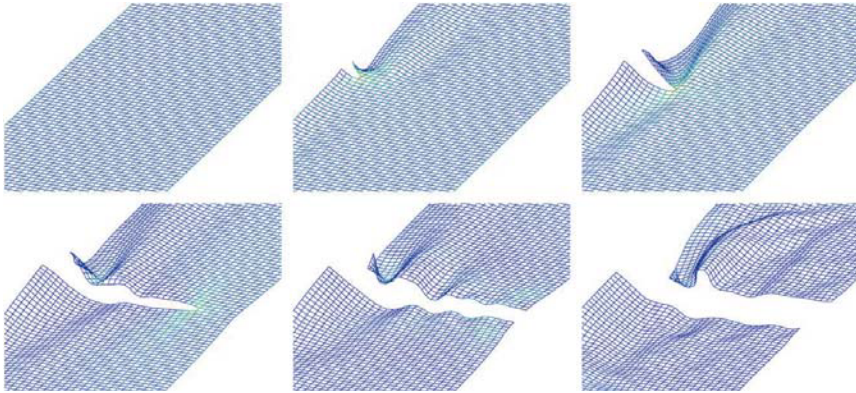


Abbildung 11: Anreißen und Rissfortschritt eines flachen Gurtes

5 Aussicht

Mit kontinuierlichem Anstieg der Rechenleistung der verfügbaren Computersysteme können zukünftig immer detailreichere Simulationen aufgesetzt werden. Die Detailstufe und auch die maximale Länge der simulierten Gurte unterliegen derzeit noch gewissen Einschränkungen. Um die Anzahl der Gurtpartikel gering zu halten, werden die Gurte aus einer einzelnen Partikelschicht aufgebaut. Die Anzahl effizient berechenbarer Partikel und damit auch die simulierbare Gurtlänge steigen mit zunehmender Rechenleistung. Durch einen detaillierteren Aufbau des Gurtes können sowohl Einlagen wie Stahlseile oder Gewebestrukturen, aber auch verschiedene Gummischichten abgebildet werden. Dafür erhalten die Partikel und Partikelverbindungen entsprechende Eigenschaften.

Am Lehrstuhl für Bergbaukunde - Fördertechnik und Konstruktionslehre an der Montanuniversität Leoben wird die vorgestellte Simulationemethode angewandt und in Zusammenarbeit mit der BECKER 3D GmbH auch weiterentwickelt, beispielsweise durch die Entwicklung neuer Modelle der Partikel und deren Verbindungen. Anstelle der kugelförmigen Partikel bietet sich für den Aufbau von Gurten die Verwendung ein alternatives Partikelmodells an. Zur Modellierung einer glatten Gurtoberfläche würde sich die nahtlose Anordnung würfelförmiger Partikel eignen. Da jedoch ausschließlich die Würfel Flächen an der Trag- und an der Laufseite in Kontakt mit Schüttgut beziehungsweise Anlagenkomponenten kommen (abgesehen an den beiden Gurtkanten), kann das würfelförmige Partikelmodell auf diese beiden Flächen reduziert werden. Die Kontaktfläche dieses Partikelmodells besteht dann nur mehr aus zwei gegenüberliegenden,

rechteckigen Flächen. Innerhalb des Forschungsprojektes wird auch an einer Methode zur Abbildung der Querdehnung eines unter Zugbelastung stehenden Gurtes gearbeitet. Hierfür wird speziell das Modell der Partikelverbindung weiterentwickelt.

Die vorgestellte Methodik wurde speziell für die Simulation von Fördergurten entwickelt, sie ist aber grundsätzlich auch auf andere Maschinenbauteile anwendbar. Beispielsweise ist die Simulation von Seilen und Netzen ein weiterer Anwendungsbereich der Methodik. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich grundsätzlich auf andere Materialien, Anlagenkomponenten aber auch auf andere Wissenschaftszweige außerhalb des Maschinenbaus anwenden.

Eric Fimbinger
eric.fimbinger@unileoben.ac.at

Dr. mont. Michael Prenner

Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Franz-Josef-Strasse 18
8700 Leoben
Österreich