Berg Huettenmaenn Monatsh (2021) Vol. 166 (2): 82–94
<https://doi.org/10.1007/s00501-021-01078-2>
 © Der/die Autor(en) 2021

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Berücksichtigung verformbarer Fördergurte in DEM-Simulationen

Eric Fimbinger

Lehrstuhl für Bergbaukunde – Fördertechnik und Konstruktionslehre, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 2. Dezember 2020; angenommen 10. Januar 2021; online publiziert 28. Januar 2021

Zusammenfassung: Mit konventionellen Methoden der DEM-Simulation ist es nicht möglich, dynamisches Verhalten bzw. dynamische Verformungen von Fördergurten in Simulationen digitaler Prototypen zu berücksichtigen. Daher wurde eine entsprechende DEM Gurtsimulationsmethodik entwickelt, die es erlaubt, ein Gurtmodell in DEM-Simulationen als dynamisch interagierendes Objekt zu erstellen.

Generell ist die Berücksichtigung solch dynamischen Gurtverhaltens in DEM-Simulationen dann von Relevanz, wenn signifikanter Einfluss auf das Fördersystem durch dynamische Gurteffekte zu erwarten ist oder aber auch wenn der Gurt für bestimmte Analysezwecke ein solches Verhalten erfordert.

Die entwickelte Methodik umfasst dazu zwei wesentliche Kernelemente: betreffend Gurtaufbau und Gurtinitialisierung. Der Gurtaufbau beschreibt die Struktursystematik eines DE-Gurtes, bestehend aus miteinander systematisch verbundenen Gurtpartikeln (Bonded-Particle-Modell). Die Gurtinitialisierung beschreibt jene Methode, eine gewisse Gurtgeometrie für eine bestimmte Anwendung in die Simulationsumgebung zu laden. Dies erfolgt entsprechend der Methodik durch Gurtinitialisierung in einbaustandnaher Form, wobei eine gewünschte Gurtform basierend auf CAD-Daten mithilfe eines entwickelten Konvertierungsalgorithmus (implementiert als Softwareanwendung „Belt-Converter“) initialisiert wird.

Anwendungs- und Analysebeispiele komplexer Gurtfördersystemen, wie Schlauchgurt- oder Doppelgurtförderer, verdeutlichen die generelle Eignung der Methodik und zeigen Möglichen zur Verwendung von dynamischen DE-Gurtmodellen erstellt nach der beschriebenen Simulationsmethodik.

Schlüsselwörter: DEM, Gurtsimulation, DE-Gurt, Gurtmodell, Bonded particle, Digitaler Prototyp, Virtueller Prototyp, Gurtinitialisierung, Einbaustandsnahe Form

Considering Deformable Conveyor Belts in DEM Simulations

Abstract: With conventional methods of the DEM simulation, it is not possible to consider the dynamic behaviour of conveyor belts, such as dynamic deformations, in DEM simulations of digital prototypes. Therefore, a corresponding methodology for the simulation of conveyor belts, which allows to create a belt model in DEM simulations as a dynamically interacting object, was developed.

In general, the consideration of such dynamic belt behaviour within a simulation is required when significant influence on the conveyor system from the dynamic belt is to be expected or if the belt requires such behaviour for certain analysis purposes.

The developed methodology comprises two essential parts, regarding the general belt setup and the belt initialisation. The belt setup describes the structural system of a DE belt, consisting of systematically arranged and connected belt particles (bonded particle model). Belt initialisation describes the method of getting a certain belt geometry for a certain application into the DEM simulation environment. According to the methodology, this is done by initialisation in almost-final state, where a desired belt geometry is initialised based on given CAD data by the help of a developed conversion algorithm (as a software application “BeltConverter”).

Application and analysis examples of complex belt conveyor systems, such as pipe conveyors or sandwich conveyors, demonstrate the general suitability of the methodology and reveal possibilities for the use of dynamic DE belt models set up according to the described simulation methodology.

E. Fimbinger (✉)
 Lehrstuhl für Bergbaukunde – Fördertechnik und
 Konstruktionslehre,
 Montanuniversität Leoben,
 Leoben, Österreich
eric.fimbinger@unileoben.ac.at

Keywords: DEM, Belt simulation, DE belt, Belt model, Bonded particle, Digital prototype, Virtual prototype, Belt initialisation, Almost-final state

1. Einleitung – DEM und Gurtfördertechnik

Numerische Simulationen auf Basis der DEM (Diskrete Elemente Methode) sind mittlerweile etablierte Ingenieurswerkzeuge für industrielle Anwendungen der Fördertechnik. Die Grundidee für die Anwendung solcher Simulationen besteht im Wesentlichen darin, Anlagen in virtueller Form bereits im Vorfeld als digitale Prototypen zu modellieren, deren Verhalten im Betrieb zu simulieren, bzw. schlussendlich auch zu analysieren – und gegebenenfalls anhand gewonnener Erkenntnisse entsprechende Maßnahmen zu schlussfolgern. In dieser Weise trägt die DEM-Simulation bei fachgemäßer und zielgerichteter Anwendung gerade am Beginn von Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen fördertechnischer Systeme deutlich zum Erfolg in Form von korrekt ausgelegten/gestalteten, sowie anwendungs- wie auch kostenoptimierten Anlagen bei.

Konkret ermöglicht die DEM die Abbildung von Schüttgutprozessen durch die Repräsentation physischer Schüttgüter als Vielzahl interagierender, zumeist kugelförmiger digitaler Partikel mit definierten Eigenschaften, wie Dichte- oder Reibparametern. In weiterer Folge wird so ein virtueller Einblick in Anlagen bzw. darin ablaufende Vorgänge und Effekte gewährt. Augenmerk kann dabei auf das geförderte Material (den Schüttgutstrom), auf gewisse Anlagenkomponenten (beispielsweise die Belastung oder den Verschleiß von kritischen Bauteilen) oder auch auf prozess- bzw. globale systembedingte Aspekte und Effekte (wie resultierendes Verhalten beim Materialtransport, bspw. Durchmischung, oder erforderliche Antriebsleistungen, etc.) gelegt werden.

Annähernd unverformbare Anlagenkomponenten, welche in simulationsrelevanten Bereichen mit transportiertem Schüttgut in Berührung kommen (und damit auch einen Beitrag zur Beförderung dessen leisten) werden in üblichen DEM-Softwareumgebungen prinzipiell als einfache, starr-idealisierte Volums- bzw. Flächenkörper modelliert. Solche Komponenten sind typischerweise Stahlbauteile, wie Schurren oder Wände, aber auch bewegliche Bauteile, wie Schnecken von Schneckenförderern oder Becher von Becherwerken.

Wesentlich komplexer hingegen ist die Modellierung von betriebsbedingt verformbar ausgeführten Bauteilen, wie Komponenten aus Gummi, welche unter Last ihre Form signifikant verändern – und in weiterer Folge die resultierenden Auswirkungen dieser Formveränderungen wiederum rückwirkenden Einfluss auf das Verhalten des Fördersystems haben können. Fördergurte von Gurtförderanlagen sind typische Bauteile mit solchem Verhalten.

Gurtförderer sind eine der am häufigsten im Einsatz befindlichen Fördersysteme und können in einer Vielzahl unterschiedlicher Varianten ausgeführt sein: Neben typischen Standardausführungen mit geradlinigem Streckenverlauf und üblicher gemuldeter Gurtform bestehen für erweiterte Anwendungsgebiete auch zunehmend kom-

plexe Systeme, wie beispielsweise Rohrgurtförderer („Pipe conveyor“, bspw. von Beumer vgl. [1]), Doppelgurtförderer („Sandwich conveyor“, bspw. von Dos Santos vgl. [2]) oder Taschengurtförderer („Pouch conveyor“, bspw. Sicon von ContiTech vgl. [3]). Gerade bei solch komplexen Gurtfördersystemen spielt das Verhalten der Fördergurte und speziell dynamische Gurtinteraktionen mit einerseits den transportierten Schüttgütern und andererseits auch mit den gurtführenden Systemkomponenten wie Tragrollen eine entscheidende Rolle.

Um solche komplexen Gurtfördersysteme in DEM-Simulationen erfolgreich abbilden zu können, ist eine entsprechende Methodik erforderlich, die DEM-Gurtsimulationen mit dynamisch verformbaren Gurtmodellen und in weiterer Folge damit auch dynamische Wechselwirkungen zwischen Gurt, Schüttgut und weiteren Anlagenkomponenten (Tragrollen) ermöglicht. Eine solche Methodik wurde von Fimlinger aus dem Fachbereich Fördertechnik und Konstruktionslehre am Lehrstuhl für Bergbaukunde der Montanuniversität Leoben entwickelt. Die Ansätze dieser entwickelten Simulationsmethodik, gewisse grundlegende Details, wie bspw. der Gurtaufbau mittels einer Vielzahl miteinander verbundener DEM-Partikel (Bonded-Particle-Modell) sowie auch die beispielhafte Anwendung der Methodik für fördertechnische Anlagen mit dynamisch verformbar modellierten Gurten, wird nachfolgend vorgestellt.

Nähere Details der Methodik und deren Anwendung an veranschaulichenden Beispielen wurden bereits in verwandten Publikationen (Fimlinger, 2018–2020 [4–7]) erläutert bzw. finden sich in weiterer Folge auch in der aktuell in Ausarbeitung befindlichen Dissertation zu diesem Thema der DEM-Gurtsimulation (von Fimlinger).

2. Ansätze zur Modellierung von Gurten in DEM-Simulationen

Nach einem einleitenden Exkurs in die konventionelle Fördergurtmodellierung mithilfe starrer Gurtflächen werden nachfolgend Aspekte zur dynamischen Gurtmodellierung in DEM-Simulationen angeführt. Diesbezüglich werden zwei Ansätze in einer Übersicht betrachtet, welche für die dynamische Gurtmodellierung grundsätzlich in Frage kommen können: FEM-basierte und DEM-basierte Gurtmodellierung.

2.1 Exkurs: Starre Gurtflächenmodelle mit bewegungsinduzierendem Kontaktmodell

Grundsätzlich müssen Fördergurte in DEM-Simulationen nicht zwangsläufig als verformbare Modelle aufgebaut werden: Sollte einerseits die durch Verformung entstehende Gurtform im betrachteten Betriebszustand der Anlage (bspw. unter Dauerbetrieb als Beharrungszustand) eine quasistatische Geometrie einnehmen, welche (zumindest angenähert) bekannt ist; und ist andererseits das dynamische Gurtverhalten für die gewünschte Analyse von nichtsignifikanter Relevanz, kann der Gurt als starre, unverformbare Fläche modelliert werden. Eine solche statische

Abb. 1: Einfacher Gurtförderer als starres Flächenmodell, mit Kontaktmodell zur Schüttgutbewegung (Vortrag zu [4])

Fördergurtmodellierung in DEM-Umgebungen ist für einfache und, wie einleitend beschrieben, eher gering-komplexe Gurtsysteme durchaus gebräuchlich.

Der quasistatische Gurt wird nach diesem Ansatz in ähnlicher Weise modelliert wie auch andere unverformbare Anlagenkomponenten. Jedoch wird der statischen Gurtoberfläche zusätzlich ein entsprechendes Kontaktmodell zugewiesen, welches eine Schüttgutbewegung bei Kontakt von Schüttgutpartikeln mit dem Gurt induziert. Mit einem solchen Kontaktmodell kann die Bewegung der Gurtoberfläche – oder genauer gesagt die entstehenden Effekte dieser Bewegung auf das Schüttgut – virtuell nachgebildet werden. Eine Veranschaulichung dieser Methode ist in Abb. 1 dargestellt. Die ausgegrauten Flächen des Gurtes haben im Betrieb keinen Kontakt zu dem transportierten Schüttgut, weshalb diese bei der Simulation weggelassen werden können. Die verbleibenden Gurtflächen, welche das Schüttgut im Betrieb befördern, erhalten das beschriebene Kontaktmodell zur virtuellen Bewegungsindizierung in kontaktierende Schüttgutpartikel zugewiesen, was in der Abbildung durch Pfeile symbolisiert ist.

Da nach diesem Ansatz kein dynamisches Verformungsverhalten des Gurtes abgebildet werden kann und dadurch auch die Berücksichtigung von erweiterten Wechselwirkungen zwischen Gurt, Schüttgut und anderen Anlagenkomponenten nicht möglich ist, eignet sich dieser Ansatz nur für gewisse, eher eingeschränkte bzw. einfachere Anwendungen, wo die Berücksichtigung solch dynamischen Gurtverhaltens nicht erforderlich ist (wie einleitend beschrieben). Solche Anwendungsfälle umfassen typischerweise DEM-Simulationen, bei denen komplexes Fördergurtverhalten nebensächlich ist, wie beispielsweise Schurrensimulationen an Gurtförderanlagen, bei denen der Schüttgutstrom im Bereich der Schurre im Vordergrund steht.

Diese Modellierungsmethode von Gurten als starre Flächenmodelle ist zwar relativ einfach anzuwenden und hinsichtlich des erforderlichen Berechnungsaufwands durchaus effizient, jedoch eignet sie sich nicht für DEM-Simulationen mit komplexerem Gurtverhalten. Hierfür sind spezielle, durchaus aufwändigere Gurtmodellierungsmethoden erforderlich, worauf im Folgenden eingegangen wird.

Abb. 2: Ausgeprägte Gurtverformung an einem Doppelgurtförderer von Dos Santos (Sandwich Belt) [8]

2.2 Dynamisch verformbare Gurtmodelle

Werden Gurtmodelle in DEM-Simulationen als dynamisch interagierende Objekte aufgebaut, sind diese in der Lage, auf Einwirkungen auf den Gurt entsprechend zu reagieren. Solche Einwirkungen sind typischerweise Belastungen durch Schüttgüter, Effekte aus Trommel- und Rollensystemen oder entstehen aufgrund weiterer Effekte, wie beispielsweise aufgrund der Gurteigenmasse. Resultierende Gurteffekte aus diesen Einwirkungen äußern sich typischerweise in lokalen Gurtdeformationen, wie Gurtdurchhang zwischen zwei Tragrollenstühlen. Auch die Ausbildung einer bestimmten Gurtmuldungsform ist ein solcher Effekt. Folgeeffekt dieser Deformationen sind auch lokale Gurtspannungen und damit auch der sich ausbildende Gurtspannungsverlauf entlang der gesamten Förderstrecke. Auch spezifisches Verhalten im Gurtlauf äußert sich typischerweise als resultierender Effekt, wie beispielsweise Gurtschiefelauf. In weiterer Folge kann aufgrund von Überschreiten zulässiger Belastungskriterien auch Gurtriss die Folge von kritischen Einflüssen auf den Gurt sein.

Ein veranschaulichendes Beispiel eines stark ausgeprägten Gurteffekts ist in Abb. 2 dargestellt, worin die Deformation des Deckgurtes eines Doppelgurtförderers von Dos Santos (vgl. [2]) erkennbar ist. Diese Verformung ergibt sich durch das Schüttgut, welches sich gepresst zwischen den beiden gegenläufigen Gurten befindet. Dies ermöglicht eine Steilförderung des Schüttgutes. Ein solches System erfordert in einer DEM-Simulation die Berücksichtigung dynamischen Gurtverhaltens, da sich der Gurt bedingt durch das geklemmte Schüttgut, die vorhandene Gurtführung/-spannung und auch abhängig von der gewählten Gurttype entsprechend verformt.

Um Gurte in DEM-Simulationen als dynamische Modelle zu implementieren, sind grundsätzlich zwei Ansätze denkbar: FEM-basierte und DEM-basierte Gurtmodellierung.

2.2.1 FEM-basierte Gurtmodellierung

Hierbei wird der Gurt mithilfe der FEM (Finite Elemente Methode) modelliert und simuliert. Dieser Ansatz erfordert daher neben der DEM-Berechnungsumgebung (erforderlich für die Simulation der Schüttgüter als DEM-Partikel) ebenso eine FEM-Berechnungsumgebung für den Fördergurt.

Abb. 3: Einfacher Gurtförderer als dynamisches DEM-Gurtmodell (Detail: Aufbau als Bonded-Particle-Modell) (Vortrag zu [4])

Zur Ermöglichung dieser FEM-DEM-Kopplung bestehen diverse Varianten, die entweder auf der manuellen Kopplung separater FEM- und DEM-Software-Umgebungen oder auf der Nutzung geeigneter multiphysikalischer Simulationsumgebungen (FEM und DEM in einer Softwareumgebung durch eine software-interne Schnittstelle gekoppelt) basieren. Die manuelle Kopplung von FEM und DEM zur Simulation mit Berücksichtigung von Fördergurt-Schüttgut-Interaktion wird in der Dissertation von Dratt [9] ausführlich beschrieben. Eine multiphysikalische Gurtsimulation eines Schlauchgurtes wird beispielsweise von Zheng [10] mithilfe der Simulationssoftware Abaqus [11] gezeigt.

Wie auch für allgemeine deformierbare Körper üblich, würde sich ein FEM-Modell für den Gurt als verformbares Objekt grundsätzlich eignen. Für den FEM-DEM-gekoppelten Ansatz (FEM-Gurt- und DEM-Schüttgutsimulation) gibt es jedoch gewisse Einschränkungen zu berücksichtigen, welche sich schlussendlich auch in der erreichbaren Berechnungsleistung widerspiegeln können. Diese sind zum einen auf die Kopplung bzw. auf die Schnittstelle, welche einen fortlaufenden Austausch von Berechnungsinformationen zwischen FEM und DEM durchführt, sowie auf die wechselnde Simulation zwischen DEM und FEM zurückzuführen. Zudem ist eine zweite Berechnungsumgebung (FEM), sowie bei manueller Kopplung die Eignung beider Software-Umgebungen zur Kopplung, sowie die zusätzliche Schnittstellensoftware erforderlich. Bei der Verwendung multiphysikalischer Softwareumgebungen ist auch zu berücksichtigen, dass diese (nach aktuellem Stand der Technik) typischerweise Einschränkungen in den Möglichkeiten der einen oder auch der anderen Methode (DEM/FEM) aufweisen.

2.2.2 DEM-basierte Gurtmodellierung

Nach dem Ansatz der DEM-basierten Gurtmodellierung wird der Gurt aus einer Vielzahl miteinander verbundener Partikel (Gurtpartikel) aufgebaut. Diese Struktur eines Bonded-Particle-Modells (mittels „Bondings“ verbundenen, „gebondeten“ Partikeln) kann in modernen DEM-Umgebungen direkt, also ohne einer zusätzlichen Berechnungsumgebung oder spezieller Zusatzsoftware, wie Schnittstellen, aufgebaut werden. In Abb. 3 ist der Aufbau eines Gurtes als Bonded-Particle-Modell gezeigt. Wie in der Detailansicht dargestellt, besteht dieses DEM-Gurtmodell (DE-Gurt) aus Partikeln, deren Mittelpunkte an den Kreuzungspunkten des netzförmigen Aufbaus angedeutet sind, sowie aus Bondings, welche diese Partikel zur gezeigten,

netzartigen Struktur verbinden. Die eigentliche Partikelgeometrie in Volumendarstellung ist hier ausgeblendet (diese wird in Abschnitt 3.1.1 näher beschrieben).

Das dargestellte Gurtsystem entspricht demselben System wie jenem, welches bereits im Exkurs (Abschnitt 2.1) in Abb. 1 als starr modelliert gezeigt wurde. Die Unterschiede dieser beiden Modelle bestehen neben den im DE-Gurt ermöglichten dynamischen Effekten auch im grundsätzlichen Modellaufbau: Der Gurt ist hier auch im Untertrum (also im Ganzen, auch an nicht mit Schüttgut in Kontakt befindlichen Bereichen) ausmodelliert, was den endlosen Umlauf des DE-Gurtmodells ermöglicht. Das bewegungs-induzierende Kontaktmodell starrer Gurtmodelle ist daher nicht erforderlich, da der DE-Gurt ohnehin in der Lage ist, sich zu bewegen.

Vor allem im Zuge der Entwicklung und der Erprobung der Methodik von Fimbinger, hat sich diese dabei eingesetzte DEM-basierte Gurtmodellierung als durchaus potenzial-bietende Methode zur Berücksichtigung dynamischen Gurtverhaltens in DEM-Simulationen erwiesen. Dieser DEM-basierte Ansatz bietet daher speziell zur vorhin beschriebenen FEM-Gurtmodellierung eine qualifizierte Alternative, erfordert aber jedenfalls weitere spezifische Entwicklungen, welche im Rahmen der Methodikentwicklung erarbeitet wurden und in Abschnitt 3 näher erläutert werden.

3. Gurtaufbau nach der Methodik zur DEM-Gurtsimulation

Nachfolgend wird ein Einblick in die Systematik zum Aufbau von DE-Gurten als Bonded-Particle-Modelle gegeben. Die jeweilig beschriebenen Details kennzeichnen diesen ersten wesentlichen Hauptteil der entwickelten DEM-Gurtsimulationsmethodik, den Bereich des allgemeinen Gurtaufbaus. (Der zweite Hauptteil der Methodik befasst sich mit der Initialisierung von Gurtobjekten mit definierten Dimensionen. Dies wird im Abschnitt 4 betrachtet).

Der Aufbau betrifft, wie im vorherigen Abschnitt zum Thema DEM-basierte Gurtmodellierung bereits beschrieben, die Gurtpartikel und deren verbindende Bondings. (Die Bezeichnung Partikel bezieht sich nachfolgend auf Gurtpartikel, jene Partikel aus denen der DE-Gurt aufgebaut ist).

Abb. 4: Kugelförmige Partikel im Vergleich zu einem quaderförmigen Partikel [6]

Abb. 5: Schlauchgurt-Querschnitt mit Kontaktgruppen für Gurtkontakt im Überlappungsbereich (oben) (nach [12])

3.1 Gurtpartikel

3.1.1 Geometrie

Zwar sind kugelförmige Partikelgeometrien (wie einleitend erwähnt) für konventionelle DEM-Simulationen üblich, diese würden jedoch bei der Anordnung zu Bonded-Particle-Gurtmodellen zu makroskopisch rauen Guroberflächen, ähnlich einer Noppenstruktur, führen. Quaderförmige Partikel sind aufgrund ihrer glatten Flächen diesbezüglich deutlich vorteilhafter. Auch dem zwar erhöhten Berechnungsaufwand solch komplexer quaderförmiger Partikelgeometrien im Vergleich zu einfachen kugelförmigen Partikeln steht die verringerte Anzahl erforderlicher Partikel je modellierter Gurtfläche gegenüber. Wie in Abb. 4 veranschaulicht, können durchaus mehrere Kugelpartikel (in diesem Bsp. vier) durch einen einzelnen relativ flachen Quaderpartikel ersetzt werden. Diese Reduktion der Partikelmenge resultiert in deutlich geringerem Berechnungsaufwand, da mit der Anzahl der Gurtpartikel auch die Anzahl der Bondings zur Verbindung dieser Partikel abnimmt.

Je nach konkreter Anwendung ist die Länge bzw. Breite solch quaderförmiger Partikel gewissermaßen begrenzt, wobei vor allem minimale Biegeradien entlang des Gurtes ausschlaggebend sind.

3.1.2 Anordnung

Als vorteilhaft erweist sich die, wie in Abb. 3 bereits gezeigte, systematische rechteckige Anordnung in einer einzelnen Schicht an Partikeln. Die Partikeldicke repräsentiert dabei die Gurtdicke. Vorteile aus dieser rechteckigen Anordnung sind vor allem die resultierenden Bonding-Richtungen, einmal in Längs- und einmal in Querrichtung des Gurtes, was einerseits günstig hinsichtlich der Definition von Gurteigenschaften ist sowie andererseits auch Vorteile bei der Analyse des Gurtes mit sich bringt. Auch die Verwendung von rechteckförmigen Partikeln, wie vorhin gezeigt, ist passend für eine solche Rechteckanordnung.

3.1.3 Überlappung und Kontaktbedingungen

Indem sämtliche Kontakte zwischen Partikeln innerhalb eines Gurtes deaktiviert und der Abstand zwischen Partikeln gerade so weit verringert wird, dass Spalte zwischen Partikeln nicht aufklaffen, kann eine geschlossene, glattere Gurtoberfläche erreicht werden. Zudem wirkt sich dieses Erlauben der Durchdringung von benachbarten Partikeln ohne Kontaktdetektion äußerst vorteilhaft auf die erforderliche Berechnungsleistung aus, da sämtliche Partikelkontakte innerhalb eines Gurtmodells nicht mehr überprüft oder gar berechnet werden müssen.

In gewissen Fällen ist es jedoch erforderlich, dass ein Gurt sich selbst kontaktiert. Dies ist bspw. bei Schlauchgurförderern der Fall, wobei der eingerollte Gurt an den beiden Gurtkanten überlappt und in diesem Bereich entsprechend Gurt-Gurt-Kontakt vorhanden ist. Durch die globale Deaktivierung von Gurtpartikelkontakten wäre ein solcher Kontakt nicht möglich; die Gurtseiten würden sich vollständig durchdringen. Die Festlegung von Kontaktgruppen löst dieses Problem: Dabei können Partikel in gewissen Gurtbereichen unterschiedlichen Kontaktgruppen zugewiesen werden, welche mit Partikeln aus anderen Gruppen entweder durchdringen (deaktivierter Kontakt) oder auch kontaktieren und damit nicht durchdringen (aktivierter Kontakt).

Die Verwendung solcher Kontaktgruppen zur Ermöglichung von Gurtkontakt im Überlappungsbereich eines

Abb. 6: Am linken Ende eingespannter Träger auf Zug (*oben*) und Biegung (*unten*); Effekte bedingt durch den Reduktionsfaktor 1,0 (*links*) und 0,1 (*rechts*) [4]

Schlauchgurtförderers ist in Abb. 5 veranschaulicht. In diesem Querschnitt durch den Gurt im Lasttrum ist die Einteilung der Gurtbereiche in drei Kontaktgruppen dargestellt. Dabei sind sämtliche Kontakte deaktiviert, außer zwischen den beiden in Kontakt befindlichen Bereichen (oben links und oben rechts). Der mittlere Bereich dient dazu, dass in der Gurtfläche benachbarte (mit Bondings miteinander verbundene) Partikel ohne Kontakt überlappen können.

Weitere Kontaktbedingungen zwischen Gurt und Schüttgut, sowie zwischen Gurt und anderen Anlagenkomponenten (wie Tragrollen oder Trommeln) können, wie für allgemeine DEM-Simulationen üblich, über entsprechende Kontaktmodelle (bspw. nach Hertz-Mindlin; vgl. bspw. erweitertes Modell nach [13]) zwischen Gurt und dem jeweiligen Kontaktpartner definiert werden. (Betrifft typische Verhalten wie Reibung und Dämpfung).

3.2 Bondings

Bonding-Elemente definieren die Verbindung zwischen zwei Partikeln in Form eines virtuellen Stabelements. Einfache Bondingmodelle sind dabei zumindest in der Lage, Zug/Druck zu übertragen. Für den Anwendungsfall in Gurtmodellen sind jedoch Modelle erforderlich, welche zudem auch Biegung bzw. Torsion übertragen können. Solche Modelle basieren z.B. auf der Timoshenko Balkentheorie [14, 15] und sind in modernen DEM-Softwarepaketen häufig bereits herstellenseits implementiert.

3.2.1 Biege/Zug-Verhalten

Um eine erfolgreiche DEM-basierte Gurtmodellierung speziell im Bereich der Fördertechnik zu ermöglichen, bedarf es einer Bondingmodell-Erweiterung, welche die Möglichkeit zur Definition von abweichendem Verhalten zwischen Zug- und Biegebelastungen des homogenen Bonding-Stab-Elementes erlaubt. Diese Erweiterung ist ein wesentlicher Bestandteil der entwickelten Methodik. Da Fördergurte allgemein als inhomogene Multimaterialverbunde (auf Gummibasis mit Zugträgern, bspw. Textil- oder Stahlseileinlagen) aufgebaut sind, reagieren diese auf Zug zumeist relativ steif (vgl. höherer E-Modul) und auf Biegung hingegen relativ weich (vgl. niedrigerer E-Modul). Um dieses biegeweiche und zugsteife Verhalten mit einfachen Bonding-Stabmodellen abzubilden, wird das Modell um einen Reduktionsfaktor erweitert, welcher die Verringerung des Biege widerstandes relativ zum Zugwiderstand angibt (ein niedriger Faktor entspricht folglich einem biegeweichen Bondingverhalten).

Die Effekte dieses Faktors sind in Abb. 6 anhand eines einseitig eingespannten Trägermodells, aufgebaut aus gebondeten Partikeln, gezeigt. Der Träger wird dabei beide Male (links und rechts) gleichermaßen auf Zug bzw. Biegung belastet (symbolisiert durch die Kraft-Pfeile). Das linke Modell zeigt das ursprüngliche Bondingmodell (Faktor 1,0). Rechts ist der Faktor dann auf 0,1 herabgesetzt, was sich darin äußert, dass der Träger biegeweicher reagiert (größere Absenkung), jedoch dieselbe unveränderte Zugsteifigkeit aufweist (die oberen beiden Verhalten auf Zug zeigen identes Verhalten).

Bei der Festlegung der Parameter des Bondingmodells ist neben dem abweichenden Biege/Zug-Verhalten auch darauf zu achten, dass der Gurtquerschnitt, der einer physischen Rechteckfläche entspricht, im digitalen Modell aus der Summe mehrerer nebeneinander angeordneten Bondings mit (wie DEM-üblich) kreisrunden Stab-Querschnitten abgebildet wird. So angeordnete Bondings sind auch in Abb. 3 erkennbar, wobei jede Verbindungslinie der Gurtmodell-Netzstruktur einem Bonding entspricht.

3.2.2 Anisotropie und Faseraufbau von Gurten

Aufgrund des inneren Aufbaus, wie bspw. mit Stahlseileinlagen, weisen Fördergurte typischerweise auch unterschiedliches Verhalten in Längs- und in Querrichtung auf. Um dies in einem Simulationsmodell mitzubерücksichtigen, kann ein Gurt in Faserstruktur aufgebaut werden. Die Fasern entsprechen dabei in Längsrichtung gebondeten Partikelreihen, die nebeneinander liegend den Gurt bilden. Benachbarte Fasern sind wiederum in Querrichtung miteinander gebondet. Durch diese Modellierungsweise können unterschiedliche Bondingparameter und damit Gurteigenschaften in Längs- und in Querrichtung definiert werden. Ein solcher Faseraufbau ist in Abb. 7 illustrativ dargestellt, wobei die unterschiedlichen Verbindungslinien die in Längs- und Querrichtung abweichenden Bondings repräsentieren.

Gegebenenfalls können einzelne Fasern auch individuell angepasst werden, wodurch z. B. nur gewisse Gurtabschnitte mit Stahlseileinlagen definiert werden können.

Ein Gurtaufbau aus Fasern ist zudem für Analysezwecke von Vorteil, da dies eine isolierte Betrachtung in Längs- und Querrichtung oder auch nur von gewissen einzelnen Fasern erlaubt, bspw. für die Analyse von Gurtrandbelastungen. Die Auswertung von Fasern in Gurtlängsrichtung ist bspw. in Abb. 10 dargestellt.

Abb. 7: DE-Gurt aufgebaut als Faserstruktur (Vortrag zu [4])

4. Initialisierung von Gurtmodellen

Um für DEM Simulationen konkreter Gurtförderanlagen DE-Gurte mit bestimmten Dimensionen einzubauen, bestehen grundsätzlich zwei Ansätze, die nachfolgend in einer Übersicht erklärt werden: Gurtinitialisierung in entspannter (einfacher) Gurtform und anschließendem Einbau in die Anlage sowie Gurtinitialisierung in einbauzustandsnaher (vorverformter, komplexer) Form.

Für die entwickelte DEM-Gurtsimulationsmethodik ist die Gurtinitialisierung in einbauzustandsnaher Form ein wesentliches Kernelement.

Ein signifikanter Vorteil dieser Methode ist die deutliche Reduzierung des erforderlichen Vorsimulationsaufwands, also jenem Modellierungs- und Berechnungsaufwands, der zum Erreichen des eigentlichen Anfangszustands einer gewünschten Simulation erforderlich ist (siehe Abschnitt 4.1.) Die in den komplexen Anwendungsbeispielen in Abschnitt 5 verwendeten DE-Gurte sind daher auch entsprechend nach dieser Initialisierungsmethode erstellt.

4.1 Initialisierung im entspannten Zustand

Zur Initialisierung eines DE Gurtes, mit der in Abschnitt 3 beschriebenen Struktur aus gebondeten Gurtpartikeln, besteht die einfachste Methode darin, den Gurt als in einer Ebene regelmäßig angeordneten Partikeln zu generieren. In weiterer Folge muss der somit flach vorliegende Gurt in einer Vorsimulation in die eigentlich gewünschte Einbaulage, in eine konkrete Anlage (z.B. einen bestimmten Schlauchgurtförderer), eingebaut werden. Die erfolgt, indem ein Gurtende mittels Bewegungsvorgabe durch das Tragrollensystem der Anlage gezogen wird. Zum schlussendlichen Verbinden des flachen (offenen) Gurtes zu einem geschlossenen Endlosgurt, muss nach diesem Vorgang die erste mit der letzten Gurtpartikelreihe gebondet werden.

Eine weitere einfache Form der Initialisierung eines DE Gurtes in (nahezu) entspanntem Zustand ist die Initialisierung des Gurtes als ringförmiger, endloser Gurt ohne Vorspannung. Der Einbau eines so initialisierten Gurtrings in eine konkrete Anlage erfolgt dabei durch gezieltes Bewegen sämtlicher Anlagenbauteile. Die Anlage ist dazu anfänglich in einem zerlegten Zustand, und durch Zusammenbau der einzelnen Tragrollen und Trommeln wird der Gurt in der Anlage positioniert. Ein solches ringförmiges Gurtmodell

muss durch dessen bereits vorhandener Endlosform am Ende des Einbaus nicht mehr via zusätzlicher Bondingdefinitionen endlos verbunden werden.

Diese Prozesse zum Einbau von in einfacher Form initialisierten DE Gurtmodellen sind gerade bei komplexen Anlagenformen überaus intensiv hinsichtlich des erforderlichen Aufwands, welcher vor der eigentlich gewünschten Simulation aufgabe des Betriebszustands der Anlage (mit typischerweise transportiertem Schüttgut) anfällt. Dieser übermäßig hohe Vorsimulationsaufwand kann durch die nachfolgend beschriebene Methode der Initialisierung eines bereits eingebauten Gurtes (in einbauzustandsnaher Form) fast gänzlich umgangen werden.

4.2 Initialisierung in einbauzustandsnaher Form

Dieses Initialisierungsprinzip beruht darauf, Gurte basierend auf vorhandenen CAD-Modellen in DE-Gurte umzuwandeln, wodurch es ermöglicht wird, einen Gurt in bereits deformiertem Zustand, welcher aus dem CAD-Modell entsprechend vorgegeben wird, zu erstellen. Da 3D-CAD-Konstruktion bei der Entwicklung und Konstruktion von Gurtförderern ohnehin Stand der Technik ist, sind für konkrete Fördersysteme zumeist auch zugehörige CAD-Gurtmodelle vorhanden. Diese vom Konstrukteur vorgegebene Gurtform entspricht dabei einer idealisierten Geometrie mit gewissen Vereinfachungen, wie bspw. weggelassenem Gurtdurchhang zwischen Tragrollen, einfacher Annäherung von Muldungsformen oder erstellten Ein- bzw. Ausmuldungsstrecken als einfache Übergangsflächen und mehr. Eine so idealisierte Gurtform entspricht einer Lage, die bereits nahe der tatsächlichen Endlage des Gurtes im Betrieb des Fördersystems ist, und kann als einbauzustandsnahe Gurtform beschrieben werden.

Bei der Initialisierung eines Gurtes in einbauzustandsnaher Form ist es erforderlich, die Vordeformationen, welche aufgrund der bereits im Verformungszustand vorliegenden Gurtform vorhanden sind, miteinzubeziehen. Dazu muss der Ursprungszustand des Gurtes als flacher und ungedehnter Gurt entsprechend berücksichtigt werden. Ein im Rahmen der Dissertation von Fimbinger entwickelter Konvertierungsalgorithmus, implementiert in eine Softwareanwendung unter dem Titel „BeltConverter“ [16], erlaubt diese beschriebene CAD-DEM-Gurtkonvertierung unter entsprechender Berücksichtigung der Gurtform in einbauzustandsnaher Lage. In Abb. 8 ist der Konvertie-

Abb. 8: CAD-DEM-Konvertierung unter Verwendung des entwickelten Software-Tools BeltConverter (vgl. [16])

rungsprozess eines CAD-Gurtmodells in ein DE-Gurtmodell mithilfe des BeltConverter (dargestellt in der grafischen Benutzeroberfläche der Software) gezeigt.

Die Konvertierungssoftware BeltConverter erlaubt für die Gurtkonvertierung gewisse Einstellungen, wie die Definition der im verformten CAD-Modell vorhandenen Dehnung. Aber auch eine Initialgeschwindigkeit des Gurtes kann vorgegeben werden. Dies erlaubt es, den Gurt nicht nur in einbaustandnaher Form in eine DEM-Simulation zu laden, sondern zudem eine bereits laufende Förderanlage mit bewegtem Gurt zu initialisieren. Dies verringert den (durch die Initialisierung in einbaustandnaher Form bereits deutlich verringerten) Vorsimulationsaufwand nochmals signifikant, da die Vorsimulation zum Hochfahren eines Fördersystems nicht mehr erforderlich ist.

Zu Beginn einer Simulation mit konvertiertem DE-Gurt (auf Basis eines CAD-Modells in einbaustandnaher Form) kommt es zu einer geringen Verformung des Gurtes in seine endgültige Einbaulage. Dies resultiert daraus, dass

ein einbaustandnah initialisierter Gurt in einer an die Einbaulage angenäherten Form vorliegt. Der Übergang aus dieser angenäherter in die endgültige Form äußert sich zu meist in einem Einschwingvorgang, in dem sich Effekte wie Gurtdurchhang, Muldungsformbildung oder der Ausgleich unregelmäßiger Gurtdehnungen zeigen.

5. Anwendungs-/Analysebeispiele

Im Folgenden werden einige beispielhafte Anwendungen der entwickelten Methodik zur DEM-Gurtsimulation, und diesbezüglich auch unterschiedliche Analysemöglichkeiten anhand von Abbildungen gezeigt. (Die Farbdarstellungen der Analysen entsprechen dabei den beschriebenen Effekten, wobei grün bis rot jeweils relativ geringe bis hohe Werte bzgl. der jeweiligen Effekte visualisiert. Sämtliche Beispiele sind mit der DEM- bzw. Multiphysik-Software Three-Particle/CAE [17] erstellt, simuliert und ausgewertet).

Abb. 9: Schlauchgurtförderer [18]

Abb. 11: Querspannungen am Ein-/Ausrollbereich eines Schlauchgurtförderers (Vortrag zu [4])

Abb. 13: Walkeffekte durch Schüttgut-Relativbewegungen im Schlauchgurt (Vortrag zu [4])

5.1 Schlauchgurtförderer

Bei Schlauchgurtsystemen ist der Fördergurt entlang der Strecke zu einem geschlossenen, schlauchförmigen Querschnitt eingerollt. Aufgegebenes Schüttgut wird im Inneren dieses Schlauchs transportiert. Der Übergang von eingerollter auf flache Gurtform eines solchen Schlauchgurtförderers ist in Abb. 9 dargestellt.

Erforderliche Aspekte zur Ermöglichung des Gurtkontaktes mittels Kontaktgruppendefinition im Überlappungsbereich der beiden Gurtkanten (am Ende der Einrollstrecke in Abb. 9 erkennbar) wurden bereits in Abschnitt 3.1.3 erklärt.

Abb. 10: Längsdehnungen am Ein-/Ausrollbereich eines Schlauchgurtförderers (Vortrag zu [4])

Abb. 12: Gurtdurchhang zwischen Tragrollenstühlen eines Schlauchgurtförderers (Vortrag zu [4])

Analysemöglichkeiten, die sich durch die Verwendung eines dynamisch interagierenden DE-Gurtmodells bei der Simulation von Schlauchgurtfördersystemen ergeben, sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:

Abb. 10 zeigt die Aufgabestelle mit Aus- bzw. Einrollbereich des Gurtes, wobei Dehnungen in Längsrichtung des Gurtes visualisiert werden; Querspannungen des Gurtmodells an dieser Stelle sind in Abb. 11 visualisiert.

Entstehender Gurtdurchhang zwischen Tragrollenstühlen ist in Abb. 12 erkennbar, indem Höhenkoordinaten der Gurtpartikel betrachtet werden.

Neben einer solchen Analyse des Gurtes sind zudem auch Effekte, einerseits betreffend der Systemkomponenten (bspw. entstehende Kräfte auf Tragrollen) und andererseits auch betreffend des geförderten Schüttguts möglich, wie in Abb. 13 gezeigt wird. In dieser Darstellung werden Walk-Effekte im Schüttgut als Relativgeschwindigkeiten der Schüttgutpartikel bedingt durch die an Tragrollenstühlen entstehende Verformung des Gurtes kenntlich gemacht.

Nähere Details sind in [4] zu finden.

Abb. 14: DEM-Modell eines Doppelgurtförderers [19]

Abb. 16: Einzugsstelle eines Doppelgurtförderers [20]

5.2 Doppelgurtförderer

Wie einleitend zu Abb. 2 gezeigt, basiert das Prinzip von Doppelgurtförderern darauf, Schüttgut zwischen zwei Gurten einzupressen und somit festgehalten zu transportieren. Dadurch können steile bis senkrechte Förderstrecken realisiert werden, was mit konventionellen flachen Gurtsystemen nicht möglich wäre. Der Aufbau eines solchen Doppelgurtförderers ist in Abb. 14 (als DEM-Simulation) dargestellt, wobei die beiden aneinandergesprenten Gurte ersichtlich sind (Traggurt unten, heller; Deckgurt oben, dunkler).

Das Einzugsverhalten des Schüttguts (im unteren Bereich des Förderers) zwischen die beiden dynamisch deformierbaren DE-Gurtmodelle ist in der Halbschnittansicht in Abb. 15 ersichtlich.

Abb. 16 zeigt einen solchen Einzugsbereich eines Doppelgurtförderers von Dos Santos (vgl. [2]); links der Abbil-

Abb. 15: Schnittansicht an der Einzugsstelle des Doppelgurtförderers (Vortrag zu [19])

Abb. 17: Förderquerschnitt des Doppelgurtförderers [19]

dung ist die Aufgabestelle, rechts folgt die vertikale Förderstrecke.

Der durch den Schüttgutstrom und die beiden gespannten Gurte ausgebildete Gurt- bzw. Förderquerschnitt ist in der Querschnittsansicht in Abb. 17 dargestellt.

Wie in Abb. 18 gezeigt, kann auch variable Gurtdehnung (bzw. in ähnlicher Form der Gurtspannungsverlauf), in diesem Fall am Traggurt, betrachtet werden.

Wie schon beim vorhergehenden Beispiel des Schlauchgurtförderers kann auch hier das Schüttgutverhalten analysiert werden, was in Abb. 19 als Schüttgutgeschwindigkeitsbetrachtung gezeigt ist. Bei detaillierter Betrachtung zeigen sich dabei Bereiche, in denen es zu gewissen Abweichungen der Partikelgeschwindigkeiten kommt:

Im Einzugsbereich sind Aufstauereffekte erkennbar, aber auch der Bereich vor der oberen Kurvenführung zeigt verlangsamte Partikelgeschwindigkeiten, was auf ungewollte Bewegungen innerhalb des Schüttguts (Art Rückfluss) hindeutet und damit als Optimierungsbereich der Konstruktion

Abb. 18: Dehnung des Traggurtes des Doppelgurtförderers (Vortrag zu [19])

Abb. 19: Schüttgutgeschwindigkeiten im Doppelgurtförderer [19]

hinsichtlich der Tragrollenpositionen interpretiert werden kann.

Mithilfe der DEM-Gurtsimulationsmethodik können auch Grenzen solcher Systeme, wie erreichbare Förderhöhen, sowie Einflüsse auf das Systemverhalten, wie Überfüllen im Einzugsbereich, Gurtspannungs-/Geschwindigkeitsänderungen, oder auch schüttgutbetreffende Einflüsse, wie Feuchtigkeit oder Korngrößenabweichung, analysiert werden.

Nähere Details sind in [5] zu finden.

5.3 Gurtwendung

Gurtwendestationen können im Untertrum von klassischen Gurtförderern genutzt werden, um den an den Trommeln umgelenkten Gurt wieder um 180° zu wenden. Die Wendung kann dabei ungeführt (also frei verlaufend), mit einfachen Tragrollen geführt oder auch durch spezielle Füh-

Abb. 20: Gurtwendung mit Deformationsanalyse [23]

Abb. 21: Gurtabriss im Betrieb

rungssysteme (bspw. mit Führungsrollen) gestützt erfolgen.

Eine Gurtwendung mit einem speziellen Führungssystem, angelehnt an die Gurtwendung nach Mordstein (vgl. [21, 22]), ist in Abb. 20 dargestellt, wobei die Gurtverformung im Bereich der U-förmigen Gurtführungsstation in Längsrichtung (mittig) und Querrichtung (unten) betrachtet wird.

Mehr dazu ist in [23] zu finden.

5.4 Gurtabriss

Beim Überschreiten von zulässigen Gurtbelastungen, typischerweise Spannungen, kann auch Ein- bzw. Abreißen eines DE-Gurtes sowie daraus folgende Effekte simuliert werden. In Abb. 21 ist ein solcher Gurtabriss eines flachen DE-Gurtes im Betrieb, also während der Beförderung von Schüttgut, dargestellt (Geschwindigkeitsdarstellung).

Weitere Details hierzu, an einer ähnlichen Anwendung, finden sich in [24].

5.5 Weitere Anwendungen

Auch in Bereichen außerhalb der Gurtfördertechnik finden sich weitere Anwendungsfälle: Beispielsweise können auf Basis der Methodik neben Gurten auch Seile, Netze oder auch Objekte aus Textilien, wie bspw. Säcke oder Big Bags mit dynamisch verformbarem Verhalten modelliert bzw. si-

muliert werden (als Bonded-Particle-Modell simulierter Big Bag siehe [25]).

Ein weiterer konkreter Anwendungsfall der Simulationsmethodik findet sich auch in der Landmaschinentechnik, in Systemen von Rundballenpressen mit Gurt. Diese weisen ein komplexes Gurt-Rollen-System auf, welches es erlaubt, Halmgut (z. B. Stroh) zu einem runden Ballen aufzurollen. Eine Erläuterung eines solchen Systems ist in [7] zu finden.

6. Fazit und Ausblick

Wie gezeigt, eignet sich die vorgestellte DEM-Gurtsimulationsmethodik hervorragend zur Berücksichtigung dynamischen Gurtverhaltens in DEM-Simulationen und ist daher gerade für komplexe Gurtfördersysteme, wie Schlauchgurt-, oder Doppelgurt-Systeme, welche zumeist relativ stark von dynamischen Gurteffekten gekennzeichnet sind, geeignet.

Gerade die Initialisierung eines DE-Gurtmodells, aufgebaut aus gebundenen Gurtpartikeln, in einbaustandnaher Form trägt wesentlich zur Leistungsfähigkeit der Methodik bei.

Neben Weiterentwicklungen der Methodik sind derzeit in weiterführenden Arbeiten auch Kalibriermethoden in Entwicklung, die zur Bestimmung von erforderlichen Modellparametern angewandt werden können, um benötigte Werte, bspw. betreffend Dehnungs-, Dämpfungs-, oder Reibverhalten eines bestimmten Fördergurttyps, zu ermitteln.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. BEUMER GROUP GMBH & CO. KG.: Pipe Conveyor. Transport for Linz AG, www.beumergroup.com/en/pipe-conveyor/references/power-industry/alternative-fuel-handling (31 May 2019)
2. Dos Santos, J. A.: High angle conveying the vital (missing) link to IPCC systems, Australian Bulk Handling Review – ABHR, 18 (2013), no 4, pp 44–53
3. CONTITECH TRANSPORTBANDSYSTEME GMBH (PART OF CONTINENTAL AG). *SICON®. Enclosed Belt Conveyor System*. (Brochure). Hanover, Germany, 2014.
4. Fimbinger, E.: Fördergurtsimulation – Entwicklungen und Anwendung der Methodik zur Simulation von Fördergurten mittels der DEM, in: Fottner, J.; Günthmer, W. A.; Katterfeld, A.; Krause, F. (eds.): 23. Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2018: Tagungsbericht. Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München in Garching. Garching: fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Fakultät für Maschinenwesen Technische Universität München, 2018, ISBN 978-3-941702-95-0, pp. 19–42.
5. Fimbinger, E.: Dynamic Conveyor Belt Simulation using the Discrete Element Method, in Jones, M. (ed.): 13th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation ICBMH 2019: Conference Proceedings, 9–11 July 2019. Barton, ACT, Australia: The Institution of Engineers Australia, 2019, ISBN 978-1-925627-29-9
6. Fimbinger, E.: Methodology for the Simulation of Conveyor Belts Using the Discrete Element Method, NAFEMS World Congress 2019 : Summary of Proceedings. A World of Engineering Simulation. Québec City, Canada: NAFEMS, 2019. ISBN 978-1-910643-52-5, 94–95 (enclosed pdf NWC19-235).
7. Fimbinger, E.: Methodik zur Simulation dynamischer Gurtsysteme an Rundballenpressen mittels der DEM, 1. Tagung SIMULAND 2020. Simulation landtechnischer Prozesse. Düsseldorf, Germany: Jahr, Andreas; Batos, Andrej, 2020, ISBN 978-3-941334-30-4, pp. 93–117.
8. DOS SANTOS INTERNATIONAL: What is a DSI Sandwich Belt High Angle Conveyor? YouTube Video, <https://youtu.be/COJQeEGfwZY> (1 December 2020)
9. Dratt, M.: Kopplung von FEM- und DEM-Simulationen zur Analyse der Gut-Bauteil-Interaktion in der Fördertechnik. Dissertation. 1. Auflage. Magdeburg: Logisch GmbH, 2016, ISBN 978-3-930385-97-3.
10. Zheng, Q. J.; Xu, M. H.; Chu, K. W.; Pan, R. H.; Yu, A. B.: A coupled FEM/DEM model for pipe conveyor systems: Analysis of the contact forces on belt, Powder Technology. 314 (2017), pp 480–489, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.070>
11. Abaqus FEA [software].
12. Vondaacke: Theoretische Untersuchung, Simulation und messtechnische Erfassung des Bewegungswiderstandes zur Dimensionierung von Schlauchgurtförderern. Blatt zu IGF-Vorhaben 17603 N/1
13. DI Renzo, A.; DI Maio, F. P.: An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulation, Chemical Engineering Science, 60 (2005), no 5, 1303–1312, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.004>
14. Timoshenko, S. P. LXVI: On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(1921), no 245, pp 744–746., <https://doi.org/10.1080/14786442108636264>
15. Timoshenko, S. P. X.: On the transverse vibrations of bars of uniform cross-section, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 43 (1922), no 253, pp 125–131, <https://doi.org/10.1080/14786442208633855>
16. Fimbinger, E.: BeltConverter [software]. Version v1.03 beta, 2019, <https://github.com/Fimbinger/BeltConverter>
17. BECKER 3D GMBH: ThreeParticle/CAE [software], Version 2019 R4.1.0 (RC), 2020, <http://becker3d.com/>
18. WOLFPOINT ENGINEERS & CONTRACTORS: Pipe Conveyors, 2018, <https://wolfpointengineers.com/capabilities-pipe-conveyors.html> (1 December 2020)
19. Jones, M. (ed): 13th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation ICBMH 2019 : Conference Proceedings. 9–11 July 2019, Barton, ACT, Australia: The Institution of Engineers Australia, 2019, ISBN 978-1-925627-29-9
20. DOS SANTOS INTERNATIONAL: TAIM WESER for Repsol Refinery Project, DSI Sandwich Belt High Angle Conveyors, <https://dossantosintl.com/installations/99-dsi-c-snake-sandwich-conveyor-for-taim-weser-at-repsol-refinery-cartagena-spain/> (1 December 2020)
21. Mordstein, W.: The behavior of conveyor belts with turnovers in the bottom run of conveyor systems, Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 7 (1961), no 1, pp 25–31
22. Mordstein, W.: Arrangement For Inverting The Sides Of Belts In Endless Conveyors And The Like, Inventor: Walter Mordstein, US Patent, US 3,139,970

-
23. Fimbinger, E.: Belt Turnover Simulation. Applying the developed belt simulation methodology to analyse the behaviour of conveyor belts in belt turnover stations. Chair of Mining Engineering, Mineral Economics and Conveying Technology. Research, Innovation and Education—Service for the Industry, Brochure, Leoben, 2019, p 34
24. Markut, T.: Fördergurtfangsystem. Masterthesis. Lehrstuhl für Bergbaukunde – Fördertechnik und Konstruktionslehre, Leoben: Montanuniversität, 2020
25. BECKER 3D GMBH: ThreeParticle/CAE—Showcase of multiphysics simulation applications, <http://becker3d.com/showcase> (1 December 2020)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.