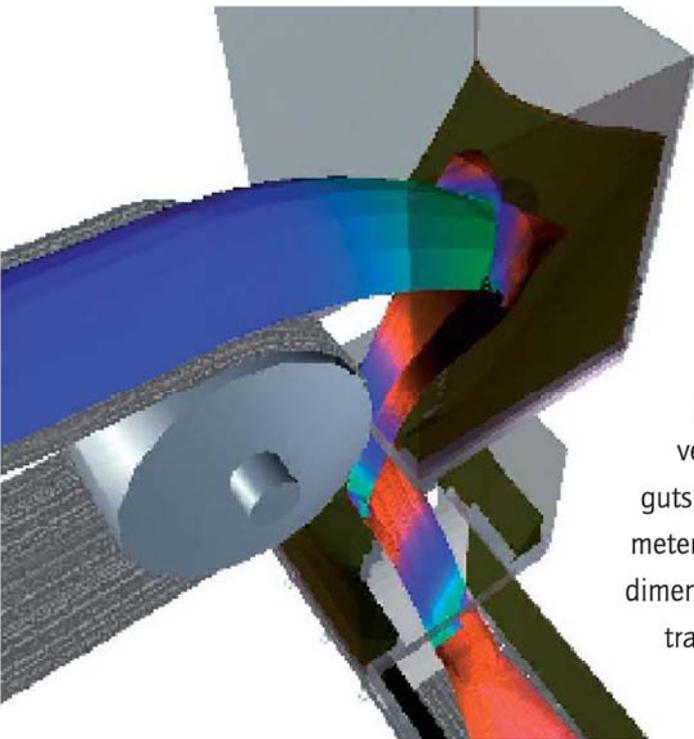


Optimierung von Gurtförderer-Anlagen

Modellierung und Simulation des Schüttgutstroms in Übergabestellen

Ch. Vorwerk und M. Dilefeld



Zur Konstruktion und Optimierung der Übergabestellen von Gurtförderern werden in steigendem Maße Simulationstools zur Gutstromberechnung eingesetzt. Unabhängig vom verwendeten Berechnungsverfahren müssen neben den schüttgutspezifischen Daten alle geometrischen und physikalischen Parameter der Übergabeeinrichtung zumeist auf Grundlage von dreidimensionalen CAD-Daten erfasst und in ein mathematisches Modell transferiert werden. In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur normierten Modellierung und Simulation auf Basis der Kontinuumsmechanik vorgestellt.

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sind die Anforderungen an die Schüttgutförderung durch steigende Massendurchsätze und größere Förderlängen ständig angewachsen. Durch verbesserte Auslegungsverfahren und optimierte Komponenten können heute Förderlängen bis zu ca. 17 km ohne Zwischenübergaben realisiert werden [1]. Stark fallende Linienführungen und Horizontalkurven mit relativ engen Radien sind technisch beherrschbar. Wegen ihrer technischen

und wirtschaftlichen Vorteile werden Gurtförderer zunehmend als Ersatz zum LKW- oder Bahntransport verwendet. Trotz der steigenden Einzellängen der Förderer wird das Material aus einer Mine oder einem Tagebau aber selten nur durch einen Förderer transportiert werden können. Deshalb werden weiterhin Gutübergabestellen zwischen verschiedenen Förderern beim Transport des Materials benötigt werden.



Insbesondere im Tagebau stellt die Übergabe von Schüttgut von einem zufördernden Gurtförderer auf einen abziehenden Förderer bereits seit vielen Jahrzehnten ein Kernproblem beim kontinuierlichen Transport hoher Massenströme dar. Hoher Verschleiß an Prallwänden, Schurren und am Fördergurt, ferner Ver-

◄ **Abb. 1:**
Probleme an Übergabestellen zwischen Gurtförderern:
a) Verschleißerscheinungen an einer Kurvenschurre;
b) Überschüttung einer Übergabestelle



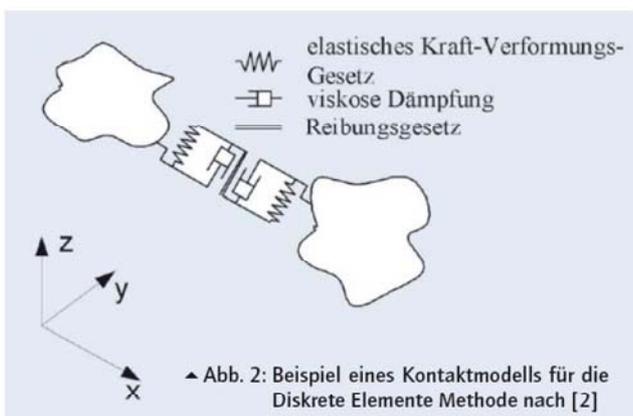
stopfungsgefahren der Übergabestellen und mangelnde Fördergutlenkung können die Förderung maßgeblich beeinflussen und stellen zudem einen großen Kostenfaktor dar (Abb. 1). Das Verhalten des Schüttgutstroms wird in entscheidendem Maße durch die Auswahl, Geometrie und Anordnung der gutstromlenkenden Elemente einer Übergabestelle (wie Prallwände, Grizzlyfinger, Rockboxen, Schurren, etc.) beeinflusst. Die optimale Gestaltung einer Übergabestelle muss weiterhin häufig unterschiedliche Betriebszustände berücksichtigen (z. B. durch variable Schüttguteigenschaften, Füllungsgrade des Fördergurtes und Fördergeschwindigkeiten) und basiert in der Vergangenheit hauptsächlich auf der Erfahrung des Konstrukteurs. Aus diesen Gründen fordern sowohl Anlagenhersteller als auch -betreiber eine Analyse des Verhaltens der Schüttgutströmung in einer Übergabe schon in der Planungsphase einer Anlage.

2 Analyse der Übergabestellen durch Simulation

Computergestützte Simulationen können die Entwicklung von verbesserten Übergabeverhältnissen stark vereinfachen und die Auswahl und Positionierung geeigneter gutstromlenkender Elemente einer Übergabestation unterstützen. Die Aufgaben eines Berechnungswerkzeuges liegen in der Optimierung des Schüttgutstroms in der Übergabeeinrichtung und in der gezielten Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils bei der Gutaufgabe, damit neben einer Reduzierung des entstehenden Verschleißes auch der Schiefelauf des abziehenden Fördergurtes verhindert wird. Zur Simulation des Gutstromverhaltens werden entweder kontinuumsmechanische Berechnungsverfahren oder eine Modellierung auf Basis von Partikelmethoden (z. B. Diskrete Elemente Methode) verwendet.

2.1 Partikelmechanische Modelle

Die Entwicklung von partikelmechanischen Modellen basiert auf dem Ansatz, dass das Bewegungs- und Verformungsverhalten eines einzelnen Partikels durch Gesetze ausreichend gut beschrieben werden kann. Die Partikel eines Schüttgutstroms werden dabei durch unterschiedliche geometrische Körper abgebildet (z. B. Kugeln, verbundene Kugeln, Polyeder). Die Wechselwirkung mit benachbarten Partikeln wird berücksichtigt, indem die Kontaktbedingungen zwischen den Teilchen durch externe Kräfte ersetzt werden (Abb. 2).



Aus der Kenntnis aller auf einen Partikel wirkenden Kräfte und Momente können die Bewegungsgleichungen für den Partikel aufgestellt und die momentane translatorische und rotatorische Bewegung des Partikels über numerische Integration berechnet werden. Zwischen den Gutteilchen sind die Kontakterkennungen innerhalb von sehr kurzen Zeitabständen zu erfassen und zu aktualisieren, um die Neubildung und das Auflösen von Partikelkontakten zu berücksichtigen. Wird die zeitliche Entwicklung der Wechselwirkungen aller Partikel durch die wiederholte Anwendung dieses Vorgehens ermittelt, kann zusätzlich zum makroskopischen auch das mikroskopische Partikelsystemverhalten beobachtet werden.

Die gesamten Wechselwirkungen zwischen den Gutteilchen werden durch Bindungskräfte und nicht wie bei der Kontinuumsmethode durch eine globale Matrix des Spannungszustandes beschrieben. Nachteilig ist der hohe numerische Aufwand bei großen Partikelsystemen, der progressiv mit dem Realitätsgrad der Modelle wächst. Es entfällt ein großer Anteil der gesamten Berechnungszeit auf die Kontakterkennung. Um die Auswertung beherrschbar werden zu lassen, sind zum einen die erforderlichen Integrationschritte zu minimieren. Zum anderen sind die Schrittweiten der Berechnung zu vergrößern, was die Genauigkeit des approximierten Kontaktmodells von der verfügbaren Rechnerleistung abhängig macht. Die korrekte Erfassung der realen Eigenschaften der Schüttgutpartikel (Korngrößenspektrum, Kornformen) und der entstehenden Bindungskräfte ist schwierig und macht für jedes Schüttgut experimentelle Messungen erforderlich. Da die mikroskopischen Kontaktparameter im Experiment üblicherweise nicht direkt ermittelt werden können, werden Spannungen und Dehnungen auf makroskopischer Ebene verglichen. In [3, 4] wird ein erfolgversprechendes Verfahren zur Kalibrierung und Verifizierung der Partikel- und Kontakteigenschaften vorgestellt.

2.2 Kontinuumsmechanischer Ansatz

Unter einem Kontinuum wird ein Körper verstanden, der nicht aus einzelnen Partikeln besteht und somit ohne Veränderung seiner Eigenschaften unendlich oft teilbar ist. Für alle Kontinua gelten unabhängig von Aggregatzustand und Stoffgesetzen die folgenden drei Grundgleichungen: Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse),

▼ Abb. 3: Beispiel einer Übergabestelle zwischen Gurtförderern



Impulssatz und Energieerhaltungssatz. Bei Anwendung der Kontinuumsmethode wird der Gutstrom als Ganzes betrachtet. Die Grundgleichungen werden auf frei gewählte Schnitte durch den Strom angesetzt. Da Schüttgutströme in der Praxis üblicherweise kontinuierlich und stetig sind (Hauptziel der Anwendung des Verfahrens ist die Identifizierung und Vermeidung von Zonen mit zu niedriger Geschwindigkeit) und sich weiterhin die Gutpolster bei gleichbleibenden Gutströmen erfahrungsgemäß stabil ausbilden, bietet die Kontinuumsmethode für die gewählte Aufgabe ein geeignetes Werkzeug zur Modellierung des Gutstroms.

Die schüttgutmechanischen Berechnungen in der Fördertechnik dienen zur Dimensionierung und Optimierung von Geräten und Anlagen. Daraus ergeben sich primär die Forderungen nach Spannungen und Geschwindigkeitsfeldern im Schüttgut, also makroskopischen Größen, die von kontinuumsmechanischen Modellen direkt geliefert werden können. Kontinuumsmechanische Modelle haben ferner den Vorteil, dass sie relativ leicht handhabbar sind, im Vergleich zu partikelmechanischen Modellen erheblich kürzere Rechenzeiten gestatten und sich experimentell gut überprüfen lassen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag der TAKRAF GmbH wurde von den Autoren zusammen mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ein Berechnungsverfahren zur kontinuumsmechanischen Simulation von Schüttgutströmen in Übergabestellen von Gurtförderern entwickelt [5]. Nach Einbindung des Verfahrens in eine Virtual-Reality-Oberfläche auf Basis des taraVRbuilder® der tarakos GmbH Magdeburg wird das Simulationstool vom Auftraggeber in praktischen Anwendungen erfolgreich eingesetzt.

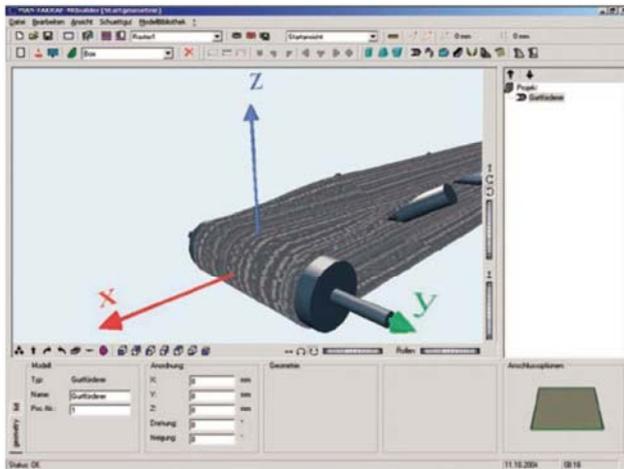
3 Aufbau und Modellierung einer Schüttgutübergabestelle

Übergabestellen zwischen Gurtförderern bestehen aus einem zufördernden und einem abziehenden Gurtförderer, zwischen denen unterschiedliche Elemente zur Gutstromlenkung zum Einsatz kommen (Abb. 3). Diese Elemente zur Gutstromlenkung müssen den zugeführten Gutstrom so umlenken, dass:

- der Gurt des abziehenden Förderers nicht beschädigt wird und nur minimal verschleißt,
- kein Gurtschieflauf am abziehenden Förderer entsteht,
- die Gurtgeschwindigkeit nie so weit reduziert wird, dass die Gefahr von Verstopfungen/Überschüttungen besteht,
- durch optimierte Anordnung die Einzelelemente auch bei ungünstigen Schüttguteigenschaften stets der freie Durchfluss des Gutstroms gewährt ist.

Weiterhin kann auch eine Teilung oder Zusammenführung von Gutstromanteilen realisiert werden. Das Verhalten des Gutstromes in Übergabestellen wurde bereits in zahlreichen theoretischen Beiträgen beschrieben und durch diverse praktische Labor- und Feldversuche analysiert [4 - 10]. Es zeigte sich, dass der resultierende Gutstrom u. a. von einer Vielzahl geometrischer und physikalischer Größen der Förderer abhängig ist.

Um die Arbeitsweise eines Förderersystems auf einem Computer simulieren zu können, müssen alle für die Berechnung relevanten Informationen der Übergabestelle und des Gutstroms in ein mathematisches Modell überführt werden. Dabei ist neben der Beschrei-



▲ Abb. 4: Das globale Koordinatensystem einer Übergabestelle

bung der geometrischen Verhältnisse auch die Berücksichtigung von physikalischen Eigenschaften (wie z. B. Schüttgutparameter, Reibwerte, Fördergeschwindigkeiten, Füllungsgrade) notwendig.

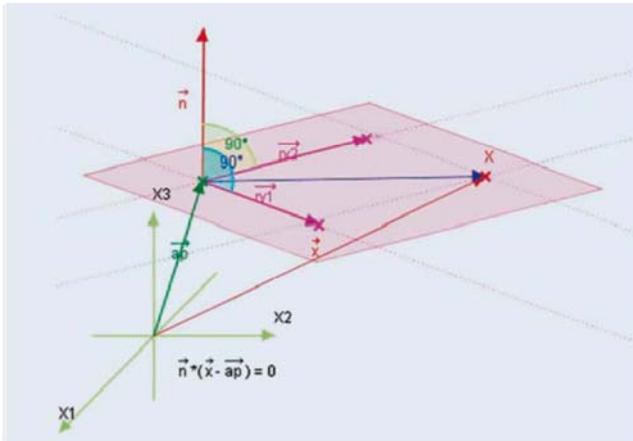
Wegen der Vielfalt sowie der geometrischen und physikalischen Komplexität der gutstromlenkenden Elemente führt eine element-spezifische mathematische Modellierung sowohl bei der Modellbildung als auch bei der Datenverarbeitung durch ein Simulationswerkzeug zu umfangreichen Berechnungsmodellen. Um ein vom Aufbau einer Übergabestelle unabhängiges Modellierungs- und Berechnungsverfahren entwickeln zu können, müssen alle häufig zum Einsatz kommenden Komponenten

- zufördernder Gurtförderer,
- Prallwand,
- Rockbox,
- Hosen- / Sammelschurre,
- Grizzlyfinger,
- Kurvenschurre und
- abziehender Gurtförderer

mit der gleichen Systematik abgebildet werden. Um dieser Forderung Rechnung zu tragen, werden alle aufgeführten (und beliebige weitere) Komponenten bei der Modellierung einer Übergabestelle im Folgenden allgemein als „Hindernisse“ bezeichnet.

3.1 Globale und lokale Koordinaten

Um die Lage und Orientierung aller Hindernisse im Raum eindeutig formulieren zu können, wurde zunächst ein globales Koordinatensystem mit dem Ursprung in der Mitte der Kopftrommel des zufördernden Gurtförderers nach Abb. 4 festgelegt. Dieses globale Koordinatensystem wird unabhängig von der Art oder Anordnung der an der Übergabe beteiligten Hindernisse verwendet und auch zur Beschreibung des sich einstellenden kontinuierlichen Gutstroms genutzt. Da die geometrischen Informationen bei CAD-basierten Eingangsdaten üblicherweise nur lokale Bezüge aufweisen, wurde diese Vorgehensweise auch für den Import von Geometriedaten aus der grafischen Simulationsoberfläche genutzt. Aus den lokalen Bezugsdaten können so die geometrischen Abmessungen und die Form eines Hindernisses mit einer Matrizenmultiplikation einfach und schnell in globale Koordinaten transformiert werden.



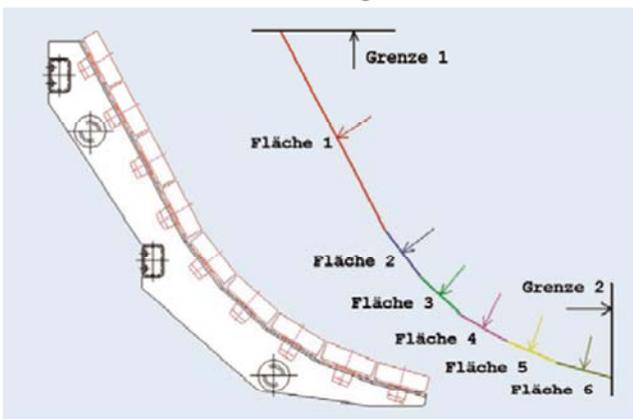
▲ Abb. 5: Hesse-Normalenform einer Ebene im Raum nach [12]

3.2 Entwicklung einer normierten mathematischen Modellierung

Da der geometrische Aufbau, die physikalischen Eigenschaften und die Aufgabe der unterschiedlichen Hindernisse innerhalb einer Übergabestelle offensichtlich stark voneinander abweichen, musste zunächst ein einheitliches Hindernismodell definiert werden. Der Kern der mathematischen Modellierung besteht in der Beschreibung der Form und Abmaße der Hindernisse. Die Vielfalt der unterschiedlichen Hindernisse erfordert eine sehr flexible, erweiterbare Modellierung und ferner die Möglichkeit, einzelnen Hindernisteilen besondere Eigenschaften zuweisen zu können (z. B. verschiedene Wandeibwerte).

Um eine normierte Berechnung aller zum Einsatz kommenden Umlenkelemente durchführen zu können, wurde eine zunächst rein flächenorientierte Beschreibung der Elemente gewählt. Dies kommt der konstruktiven Ausführung von vielen Hindernissen in praktischen Anwendungen entgegen. Bspw. wird bei der Ausführung von Prallwänden und Schurren im Allgemeinen zwar eine Kurvenform angestrebt, um das Verschleißverhalten zu optimieren. Der Aufbau erfolgt jedoch üblicherweise aus ebenen, miteinander verbundenen Verschleißelementen (vergl. Abb. 1a und Abb. 6). Eine flächenorientierte Beschreibung der Umlenkungselemente trägt dieser Tatsache Rechnung und ermöglicht bei einer entsprechend

▼ Abb. 6: Konstruktion und Modellierung einer Kurvenschurre



großen Anzahl von Einzelflächen auch die Modellierung von Hindernissen mit komplexer Geometrie.

Zur mathematischen Formulierung der an der Gutstromlenkung beteiligten Flächen eines Hindernisses wurde die Hesse-Normalenform (HNF)

$$\vec{n}^o \cdot (\vec{x} - \vec{a}_p) = 0 \quad (1)$$

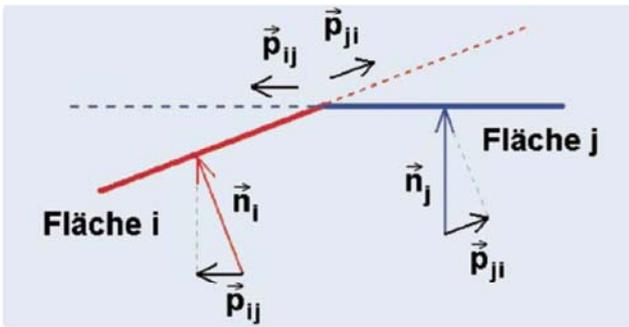
gewählt, die eine Ebene durch die Angabe eines beliebigen Punktes innerhalb der Ebene \vec{a}_p und des Einheitsnormalenvektors \vec{n}^o beschreibt (Abb. 5). Im Gegensatz zur allgemeinen Definition der HNF wird die Orientierung des Normalenvektors hier zur Beschreibung der Flächenausrichtung in einem Hindernis genutzt. Der Normalenvektor zeigt dabei auf diejenige Seite einer Fläche, auf der die Interaktion zwischen Gut und Hindernis stattfinden soll. Eine Interaktion zwischen dem Gutstrom und der „Rückseite“ einer Fläche ist nicht vorgesehen. Soll ein Hindernismodell auch diese Möglichkeit zulassen, muss die Rückseite als weitere Fläche mit invertiertem Normalenvektor eingefügt werden, wobei wegen der notwendigen Materialstärke der Hinderniswand in der Realität die Ebenen von Vorder- und Rückseite nicht identisch sein können.

Da die Flächen eines realen Hindernisses limitierte Abmessungen besitzen, müssen neben der HNF der Ebene Grenzbedingungen angegeben werden. Um die äußeren Grenzen einer Fläche im Raum definieren zu können, bieten sich diverse mathematische Möglichkeiten an. Im einfachsten Falle liegen rechteckige Flächen vor (z. B. bei den Verschleißelementen einer Kurvenschurre nach Abb. 1a), die durch die Angabe der Eckpunkte ausreichend beschrieben wären. Bei komplexeren Hindernisflächen würde dieses Vorgehen jedoch eine gegebenenfalls sehr große Anzahl von Stützpunkten erfordern und damit die spätere Berechnung des Gutstroms stark erschweren. Eine elegantere Form für die Beschreibung der Hindernisgeometrie liefert die Verwendung von weiteren Ebenen, deren Schnittgeraden mit der Fläche als Grenzbedingung genutzt werden. Durch die Formulierung mehrerer Grenzebenen (im Folgenden „Grenzen“ genannt) kann eine beliebige Form für jede Hindernisfläche nachgebildet werden.

Die maßgeblichen Vorteile dieser Hindernisbeschreibung bestehen in der deutlichen Datenreduktion bei Hindernissen mit vielen Einzelflächen und der sehr einfachen Handhabbarkeit. Zwischen verschiedenen Flächen ist keine Formulierung weiterer Grenzen erforderlich, da die jeweils benachbarten Flächenelemente gleichzeitig als Grenzen genutzt werden können. Dies wird bei der Modellierung einer Kurvenschurre deutlich (Abb. 6).

Da die oberen vier Verschleißelemente hier in einer Ebene liegen, werden sie bei der mathematischen Modellierung zu der Fläche 1 zusammengefasst. Das Hindernismodell besitzt somit im Gegensatz zur konstruktiven Ausführung mit 9 Verschleißelementen nur 6 Flächen, an denen die Interaktion zwischen Fördergut und Hindernisfläche stattfinden kann. Um die äußeren Hindernisbegrenzungen zu definieren, ist die Angabe von lediglich 4 Grenzflächen erforderlich (wobei wegen der zweidimensionalen Darstellung in Abb. 6 nur die obere Grenze 1 und die untere Grenze 2 sichtbar sind).

Jede einzelne der 6 Flächen wird somit durch 4 Schnittgeraden begrenzt und die Lage aller Verschleißelemente der Schurre im Raum ist eindeutig festgelegt. Zur weiteren Vereinfachung des Hindernismodells sollte jedoch eine Zuordnung der einzelnen Flächen und Grenzen zueinander vollständig entfallen (!), sodass bspw. die Flä-



▲ Abb. 7: Definition der Konvexität von außen

che 1 aus Abb. 6 gleichzeitig durch alle 4 Grenzen und die Flächen 2 - 6 begrenzt wird. Diese Vereinfachung kann jedoch ohne Einschränkungen nur bei Hindernissen gemacht werden, die „konvex von außen“ sind:

Ein Hindernis mit $k \in N$ Flächen gilt als „konvex von außen“, wenn die Projektion des Normalenvektors der Fläche i für alle $i \in (1, k)$ auf die Fläche $j \in (1, k)$ mit $j \neq i$:

$$\vec{p}_{ij}^o = (\vec{n}_j^o \times \vec{n}_i^o) \times \vec{n}_j^o \quad (2)$$

an der Schnittgeraden der Flächen i und j vom Bereich der durch Fläche i eingegrenzten Fläche j wegzeigt (Abb. 7). Diese Definition wurde in Anlehnung an den Begriff „konvex von unten“ eingeführt, der die Konvexität von Funktionen definiert [11]:

Eine in (a,b) differenzierbare Funktion f heißt in (a,b) „konvex von unten“, wenn für alle $x_1, x_2 \in (a, b)$ mit $x_1 \neq x_2$ gilt:

$$f(x_2) \geq f(x_1) + f'(x_1) \cdot (x_2 - x_1). \quad (3)$$

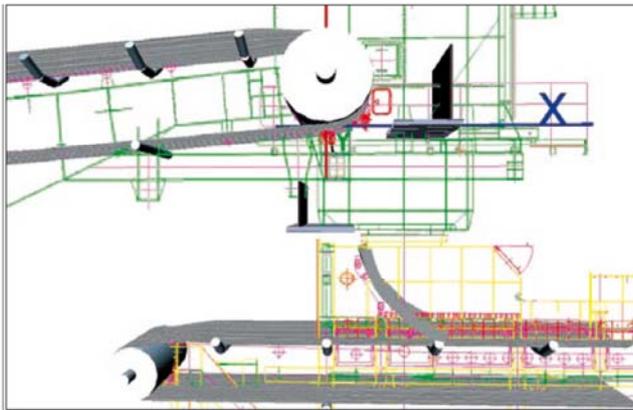
Bei Einhaltung der „Konvexität von außen“ schneidet keine (für die Begrenzung einer Hindernisfläche nicht benötigte) weitere Ebene die Begrenzung einer Hindernisfläche innerhalb des begrenzten Bereiches. Deshalb wird die Festlegung derjenigen Ebenen, die eine zu untersuchende Hindernisfläche eingrenzen, überflüssig (!) und kann durch die Menge aller Grenzen und Flächen eines Hindernisses ersetzt werden.

Erfüllt ein Hindernis die Forderung der „Konvexität von außen“ nicht, muss das Hindernis so geteilt werden, dass die Fragmente die Forderung erfüllen. In der Praxis müssen Hindernisteilungen lediglich im Bereich der Gutaufgabe auf den abziehenden Gurtförderer eingesetzt werden, da hier häufig zusätzliche Gutführungselemente (z. B. Aufgabeschurren) eingesetzt werden.

Am Beispiel der Schurre nach Abb. 6 wird in Tab. 1 das mathematische Modell eines Hindernisses (einschließlich der dynamischen Reibwerte zwischen dem Fördergut und den Verschleißelementen) dargestellt. Die in der Tabelle aufgeführten Größen enthalten alle grundsätzlichen Informationen, die das Berechnungsprogramm benötigt, um die Gutstromlenkung an der Kurvschurre zu berechnen.

Die entscheidenden Vorteile der Modellierungsmethode sind

- die Unabhängigkeit des Modells vom Hindernis,
- die geringe Datenmenge,
- die Flächenorientierung durch Normalenvektoren und
- die sehr einfache Erweiterbarkeit des Modells.



▲ Abb. 8: Import einer virtuellen Übergabestelle aus CAD-Daten

Der letztgenannte Vorteil wird am Beispiel der Erweiterung des vorgestellten Schurrenmodells um seitliche Polster aus stehendem Fördergut oder weitere Verschleißelemente zur Gutstromzentrierung deutlich. Die Unabhängigkeit von Stütz- oder Schnittpunkten gestattet die Integration weiterer Flächen (oder Grenzen) ohne einen Eingriff in das bestehende Modell vornehmen zu müssen. Weiterhin können ohne Eingriff in das Modellierungs- oder Berechnungsverfahren bisher nicht berücksichtigte Hindernistypen in eine Übergabestelle eingebunden werden.

4 Berechnung des Schüttgutstroms am Praxisbeispiel

4.1 Erfassung der geometrischen und physikalischen Parameter

Zur Eingabe der geometrischen und physikalischen Parameter der Schüttgutübergabestelle wird der TAKRAF-VRbuilder verwendet, der als Virtual-Reality-Oberfläche für die Schüttgutsimulation auf dem taraVRbuilder[®] der tarakos GmbH Magdeburg basiert. Spezi-

elle CAD- oder Programmierkenntnisse sind für die Anwendung dieses Programms nicht notwendig. Die virtuelle Übergabestelle wird durch das Einfügen von Bausteinen einer Standardbibliothek konfiguriert. Die Bausteine können beliebig im dreidimensionalen Raum platziert und parametrisiert werden. Alternativ können einzelne Elemente oder vollständige Übergabestellen auch aus CAD-Zeichnungen importiert werden (Abb. 8).

Wegen der sehr realitätsnahen Darstellung aller Elemente kann der Aufbau oder eine Änderung eines Modells einer Schüttgutübergabestelle in kürzester Zeit erfolgen. Alle für die Modellierung notwendigen Parameter werden in einer separaten Datenbank gespeichert, können jedoch zur Überprüfung auch als Parameterliste ausgegeben und wieder in ein Modell überführt werden. Um die Ergebnisse einer Gutstromberechnung programmunabhängig betrachten und in weitere CAD-Programme importieren zu können, ist eine Speicherung der Projekte auch als VRML- und DXF-Datei möglich.

4.2 Praxisbeispiel einer Übergabestelle

Im Folgenden Praxisbeispiel einer Übergabestelle zwischen Gurtförderern mit zwei Rockboxen und einer Kurvenschurre wird ein Massenstrom von 8.800 t/h transportiert (Abb. 9). Der zufördernde Gurtförderer hat eine Geschwindigkeit von 6,1 m/s bei einer Gurtbreite von 1.800 mm und einer Auslastung von 65 %. Der abziehende Gurtförderer verwendet den gleichen Fördergurt und ist bei 4,8 m/s mit 82 % ausgelastet. Da in der Übergabestelle ein Höhenunterschied von 6,80 m überwunden werden muss und der Gutstrom um 90° zur vertikalen Achse gedreht abgezogen wird, werden die beiden Rockboxen zur Verschleißminderung, Gutstromverzögerung und -umlenkung eingesetzt. Die Kurvenschurre lenkt anschließend vertikale Geschwindigkeitsanteile des Gutstroms in Förderrichtung des abziehenden Bandes um.

Der sich an der unteren Öffnung der oberen Rockbox einstellende Gutstrom wird durch die Gutstromverhältnisse beim Aufprallen auf das stehende Gutpolster in der Rockbox und weiterhin durch die Form des Gutpolsters und damit die Einstellung der Rockboxfinger beeinflusst. Eine Vorhersage der Geschwindigkeitsverhältnisse des Gutstroms am Hindernisausgang kann ohne den Einsatz einer Simulation auch mit hoher Erfahrung nicht präzise erfolgen. Damit sind wiederum auch die Gutstromverhältnisse beim Aufprallen auf die untere Rockbox nicht genau bekannt, wodurch eine praxisgerechte Einstellung der Rockboxfinger in der unteren Rockbox kaum durchführbar ist. Bei der Inbetriebnahme dieser Übergabestelle wären deshalb zeit- und kostenintensive Versuche zur Einstellung der Gutstromlenkung unumgänglich.

Durch den Einsatz einer Simulation auf Basis der Kontinuumsmechanik konnte schon während der Planungsphase sowohl die Einstellung der Rockboxfinger, als auch die Positionierung und Neigung der Kurvenschurre optimiert werden. Da die Modellierung der Übergabestelle in einer

▼ Tab. 1: Mathematisches Modell einer Kurvenschurre

Fläche	Bezeichnung	a.x	a.y	a.z	n.x	n.y	n.z	Mue
3	Schurre							
3.1	Schurre							
3.1.T1	Rutschfläche 1	1,75	0,00	-3,95	0,00	-1,00	-0,07	0,50
3.1.T2	Rutschfläche 2	1,75	0,01	-4,15	0,00	-0,98	-0,21	0,50
3.1.T3	Rutschfläche 3	1,75	0,05	-4,34	0,00	-0,94	-0,34	0,50
3.1.T4	Rutschfläche 4	1,75	0,12	-4,52	0,00	-0,88	-0,47	0,50
3.1.T5	Rutschfläche 5	1,75	0,21	-4,69	0,00	-0,81	-0,59	0,50
3.1.T6	Rutschfläche 6	1,75	0,33	-4,85	0,00	-0,72	-0,70	0,50
3.1.G1	Untere Grenze	1,75	1,16	-5,33	0,00	0,00	-1,00	
3.1.G2	Obere Grenze	1,75	0,00	-3,95	0,00	0,00	1,00	
3.1.G3	Linke Grenze	2,75	0,00	-3,95	1,00	0,00	0,00	
3.1.G4	Rechte Grenze	0,75	0,00	-3,95	-1,00	0,00	0,00	

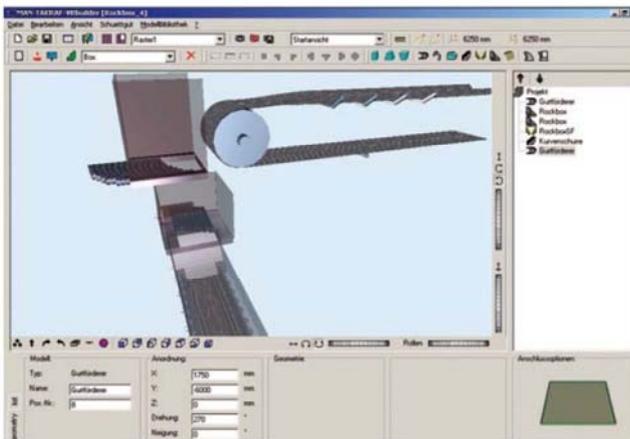


Abb. 9: Übergabestelle mit zwei Rockboxen und Kurvenschurre

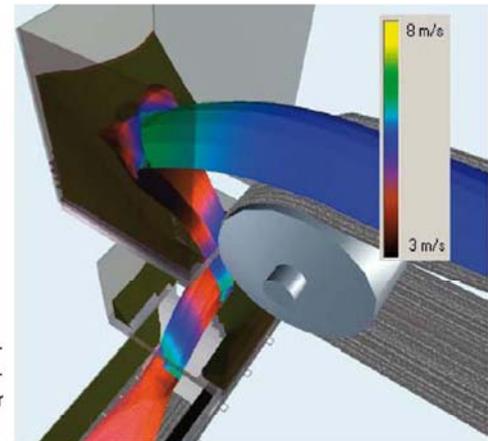


Abb. 10: Simulation des Schüttgutstroms in einer Übergabestelle

komfortablen dreidimensionalen Oberfläche durchgeführt wird und die für die Berechnung des resultierenden Gutstroms erforderliche Zeit mit einem handelsüblichen PC (in Abhängigkeit der Komplexität der Übergabestelle) weniger als 30 Sekunden beträgt [5], kann eine Optimierung der Übergabeverhältnisse durch den Vergleich des Gutstromverhaltens bei unterschiedlichen Testszenarien innerhalb kürzester Zeit erreicht werden.

4.3 Modellierung der Übergabestelle

Zusätzlich zu den in Tab. 1 aufgeführten Daten zur Modellierung der Kurvenschurre müssen mathematische Modelle für die Rockboxen und Förderer nach 3.2 erzeugt werden. Da Rockboxen die Forderung nach „Konvexität von außen“ grundsätzlich erfüllen, wird keine Hindernisteilung erforderlich. Als Reibwert zwischen Fördergut und Hindernisfläche wird für die aus Gutpolster bestehenden Flächen der Reibwert der Bewegung μ_B des Fördergutes angenommen [5]. Da eine Interaktion zwischen Gutstrom und Hindernis neben den Gutpolsterflächen jedoch auch an den seitlichen Wänden der Rockboxen stattfinden kann, müssen diese Flächen ebenfalls in das Hindernismodell berücksichtigt werden. Der Reibwert für die Seitenwände muss den Flächen zugeordnet werden (siehe Tab. 1) und ist üblicherweise niedriger als der Reibwert der Bewegung des Schüttgutes. Gurtförderer mit 3-teiligen Tragrollenstationen werden grundsätzlich als Hindernisse mit 3 Flächen und 4 Grenzen modelliert. Die beim abziehenden Förderer häufig verwendete Aufgabeschurre wird durch 2 zusätzliche Flächen abgebildet.

4.4 Gutstromberechnung und Ergebnisausgabe

Nach Abschluss der Gutstromberechnung wird die Hüllkurve des Schüttgutstroms in der Simulationsumgebung dargestellt. Die jeweils benutzten Farben repräsentieren unterschiedliche Geschwindigkeiten (Abb. 10). Aus der dreidimensionalen Darstellung kann der Konstrukteur direkt entnehmen, wie sich der Gutstrom in der Übergabestelle verhält und welche Aufgabeverhältnisse auf dem abziehenden Förderband zu erwarten sind. Für das vorliegende Beispiel war (ohne Anpassung der hauptsächlich durch die Rockboxen bestimmten) Umlenkverhältnisse mit einer ungleichmäßigen Beladung des Fördergutes zu rechnen. Als Ergebnis der Simulation konnte eine geeignete Anpassung der Rockboxenfingerringe erreicht und der sonst wahrscheinlich entstehende Gurtstiefenlauf (mit maßgeblichem Einfluss auf das Ver-

schleißverhalten des Fördergutes) vermieden werden. Zur systematischen Aus- und Bewertung werden die Ergebnisse in einer Datenbank gespeichert und tabellarisch aufbereitet [5].

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Forschungsarbeit im Auftrag der TAKRAF GmbH wurde vom Autor am Institut für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ein Verfahren entwickelt, das eine normierte mathematische Modellierung der Eigenschaften gutstromlenkender Elemente einer Übergabestelle ermöglicht. Das Modell legt alle geometrischen und physikalischen Eigenschaften, die für die Berechnung des sich einstellenden Gutstroms erforderlich sind, in einer ebenenorientierten, vektoriiellen Struktur ab. Da beliebig viele Flächen mit unterschiedlichen Eigenschaften für eine Interaktion zwischen Fördergut und Hindernis implementiert werden können und die geometrischen Abmaße des Hindernisses durch begrenzende Ebenen festgelegt werden, können auch Hindernisse abgebildet werden, die nicht in Flächenform vorliegen.

Die Berechnung des sich in einer Übergabestelle einstellenden Gutstromes wird mit Hilfe dieser genormten mathematischen Beschreibung auf Basis der Kontinuumsmechanik mit einem dreidimensionalen Simulationswerkzeug auf Basis des taraVRBuilders[®] der tarakos GmbH durchgeführt. Mit der daraus resultierenden, extrem schnellen Berechnung des resultierenden Gutstroms können bereits während der Planungsphase unterschiedliche Übergabebedingungen simuliert werden. Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte auf die Durchführung von Versuchen verzichtet werden, da neben dem praktischen Einsatz des Simulationswerkzeuges durch den Auftraggeber auch Ergebnisse von umfangreichen Laborversuchen der Technischen Universität Dresden [8] für die Verifikation genutzt werden konnten.

Der Konstrukteur einer fördertechnischen Anlage kann mit Hilfe dieses Werkzeuges in kürzester Zeit eine Analyse der sich in einer Übergabestelle ergebenden Gutstromverhältnisse durchführen und somit den Zeit- und Kostenaufwand für die Auslegung und Optimierung einer Übergabestelle deutlich reduzieren. Die TAKRAF GmbH nutzt die vorgestellte Simulationsumgebung bei der Dimensionierung von Übergabestellen an Gurtförderersystemen bei aktuellen Projekten. Untersuchungen des Gutstromverhaltens im praktischen Anlagenbetrieb zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Praxis.

Literatur

- [1] Kahrger, R.; Dilefeld, M. und Pohl, M.: Henderson 2000 – A world class conveying system. *bulk solids handling* 20 (2000) 3, p. 319 - 322.
- [2] Gröger, T.: Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Schlauchgurtförderung. Dissertation Universität Magdeburg 1999.
- [3] Gröger, T. und Katterfeld, A.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik – Grundlagen und Kalibrierung. *Schüttgut* 12 (2006) 7, S. 480 - 486.
- [4] Katterfeld, A. und Gröger, T.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik – Gutübergabestellen. *Schüttgut* 13 (2007) 3, S. 202-213.
- [5] Vorwerk, C.; Krause, F. und Dilefeld, M.: Kontinuumsmechanische Berechnung von Schüttgutströmen in Übergabestellen von Gurtförderern. In Günther, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Vortragsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik, München 2006.
- [6] Krause, F.; Hentschel, R.: Unveröffentlichter Forschungsbericht, Technische Hochschule Magdeburg (1979).
- [7] Raffaj, A.; Hajdany, V.: Zum Abwurfvorgang bei Gummigurt-Förderern, Fördern und Heben 26 (1976) 9, S. 965 - 967.
- [8] Herzog, M.: Untersuchungen zur Verbesserung der Schüttgutübergabe zwischen Gurtförderern, Dissertation Technische Universität Dresden (1999).
- [9] Korzen, Z.: Über das Spannungs- und Fließverhalten von Schüttgütern in vertikalen Verladeeinrichtungen, *Aufbereitungstechnik* 11/1983, S. 656 - 661.
- [10] Korzen, Z.: Über das Druck- und Fließverhalten von Schüttgütern an Förderband-Aufgabestellen, fördern und heben 35 (1985) 7, S. 523 - 528.
- [11] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart (1991).
- [12] <http://mathenexus.zum.de/html/geometrie>. ■

Die Autoren



Ch. Vorwerk

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk studierte von 1992 - 1996 an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg Maschinenbau mit Schwerpunkt Automatisierungstechnik. Ab 2000 beschäftigte er sich als externer Mitarbeiter des Instituts für Logistik und Materialflusstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit Übergabestellen von Gurtförderanlagen. Seit Anfang 2003 ist Herr Vorwerk Oberingenieur am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart und arbeitet in den Bereichen Schwingungsanalyse und Schüttgutfördertechnik.

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk

Universität Stuttgart
Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
Holzgartenstraße 15b
70174 Stuttgart

Tel.: 0 711/685 83 775

Fax: 0 711/685 83 769

E-Mail: vorwerk@ift.uni-stuttgart.de

Internet: www.uni-stuttgart.de/ift



M. Dilefeld

Dr.-Ing. Mario Dilefeld studierte von 1985 bis 1991 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Fördertechnik. Von 1991 bis 1993 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Magdeburger Institut für Fördertechnik, Stahlbau und Logistik, Aufgabengebiet: Entnahme- und Transporttechnik bei der Sanierung kontaminierter Böden und Schöpfverhalten von Becherförderern (Dissertation 1993). Seit 1994 ist Dr. Dilefeld bei der MAN GHH, später MAN TAKRAF und jetzt TAKRAF GmbH angestellt. Neben der Koordinierung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist Herr Dr. Dilefeld für die Auslegung von speziellen Gurtförderern unter Einbeziehung der Berechnung von Horizontalkurven, der dynamischen Bandberechnung und der Simulation des Schüttgutverhaltens in Übergabestellen verantwortlich.

Dr.-Ing. Mario Dilefeld

TAKRAF GmbH
Torgauer Straße 336
04347 Leipzig

Tel.: 0 341/24 23-695

Fax: 0 341/24 23-700

E-Mail: mario.dilefeld@takraf.com

Internet: www.takraf.com