

Simulation von linearen Vibrationsförderern mit dem MKS Prinzip

Simulation of linear vibratory conveyors with the MKS principle

Thomas Risch
Christian Kuhn
Markus Golder

*Professur für Förder- und Materialflusstechnik
Fakultät Maschinenbau, Institut für Fördertechnik- und Kunststoffe
Technische Universität Chemnitz*

Aufgrund der sensiblen und anspruchsvollen Dynamik an Vibrationsförderern stellt deren Entwicklung und Inbetriebnahme auch heutzutage immer noch eine besondere Herausforderung dar. Dieser Beitrag widmet sich als Überblick der Berechnung der Schwingungsbewegung von Vibrationsförderern mittels der MKS Software SimulationX als potentielle Entwicklungshilfe. Der modulare Aufbau der Simulationen ermöglicht die Betrachtung unterschiedlicher Schwingsysteme sowie die Modellierung der typischen drei Antriebsarten der Vibrationsfördertechnik. Abschließend werden einige Anwendungsszenarien andiskutiert.

[Schlüsselwörter: Vibrationsfördertechnik, Schwingfördertechnik, Vibrationsförderer, Berechnung, Simulation, Entwicklung, Unwucht, Schubkurbel, Elektromagnet, Antrieb]

Due to the sensitive and demanding dynamics of vibratory conveyors, their development and commissioning still represents a particular challenge today. This article provides an overview of the calculation of the vibrational movement of vibratory conveyors using the MKS software SimulationX as a potential development aid. The modular structure of the simulations enables the consideration of different vibrating systems as well as the modeling of the three typical drive types of the vibration conveyor technology. Finally, some application scenarios are discussed.

[Keywords: Vibration conveyor technology, oscillating conveyor technology, vibration conveyor, calculation, simulation, development, imbalance, slider crank, electromagnet, drive]

1 EINORDNUNG UND MOTIVATION

Schwingungen sind ein vielerorts anzutreffendes Phänomen und an zahlreichen Abläufen beteiligt. Im Fachgebiet des Maschinenbaus, genauer im Teilgebiet der Fördertechnik, gibt es Ansätze Schwingungen zielgerichtet

zum Materialtransport einzusetzen. Diese Anwendung wird als Vibrationsförderung bezeichnet. Die Idee zum Fördern mit Vibrationen ist bereits lange bekannt und konnte sich über die Zeit am Markt etablieren. Dabei haben Vibrationsförderer Eingang in unterschiedlichste Anwendungsfelder gefunden. Bedingt durch den bereitgefächerten Einsatz sind heute zahlreiche Bauformen, welche zum Teil auch weiterführende Aufgaben neben dem reinen Fördern erledigen, anzutreffen. Zu den wichtigsten Antriebs- und Bauformen wird in der Arbeit zum Einstieg ein Überblick zu Aufbau und der Funktionsweise gegeben. In dem Rahmen wird ebenso auf die üblichen Förderprinzipien und die Fördererbeschreibung gemäß VDI-Richtlinie 2333[1] für Schwingförderer eingegangen.

Aufgrund der anspruchsvollen Dynamik an Vibrationsförderern ist deren Entwicklung und Fertigung noch immer mit vielen Herausforderungen verbunden. Während zur Bestimmung der Fördergeschwindigkeit aus bekannten Bewegungsformen bereits verschiedene Ansätze nach VDI Richtlinie oder in Veröffentlichungen nach z.B. Jung[2], Dresig[3] oder Risch[4] existieren, ist die Berechnung der Bewegung selbst weiterhin mit vielen Hürden verbunden. Bekannte Berechnungen zur Fördererbewegung sind nur für spezifische Förderer oder Arbeitszustände und daher kaum allgemein anwendbar. In der Praxis kommen aus dem Grund über lange Zeiträume aufgebaute Erfahrungswerte zur Anwendung und es werden zeit- und kostenaufwendige Testläufe durchgeführt. Durch eine geeignete Methode zur Bestimmung der Fördererbewegung besteht daher ein großes Optimierungspotential in den Abläufen der Entwicklung von Vibrationsförderern.

Mit dieser Arbeit soll sich der Problemstellung zur Berechnung der Fördererbewegung angenommen und ein Beitrag für die Verbesserung der Möglichkeiten zur theoretischen Berechnung von Vibrationsförderern geleistet werden. Die aktuelle Rechentechnik erlaubt es Maschinenkomponenten sowie gesamte Anlagen digital zu beschreiben. Durch Simulationen können aus den Maschinendaten

Aussagen zur Arbeitsweise gewonnen werden. Zur Anwendung der Simulationsmöglichkeiten auf Vibrationsförderer werden in dieser Arbeit Mehrkörpersysteme (MKS) in der Software SimulationX beschrieben.

2 MODELLIERUNG DER FÖRDERER

In der gewählten Software können Einzelelemente, welche Teilkomponenten beschreiben, zu komplexen Systemen kombiniert werden. Das Zusammenführen der Teilkomponenten und definieren der Wirkzusammenhänge erfolgt dabei übersichtlich mit Strukturbildern. Auf dem Weg ist es vergleichsweise einfach Modelle nachzuvollziehen und gegebenenfalls anzupassen. Gerade durch die vielfältigen Bauweisen von Vibrationsförderern ist es kaum möglich jeden Aufbau mit einem einzigen Modell zu erfassen. Aus dem Grund verfolgt dieser Beitrag den Ansatz Grundaufbauten für die wichtigen Antriebsvarianten sowie typische Förderer zu beschreiben. Ausgehend von den geschaffenen Modellaufbauten können in der Anwendung bei Bedarf in Teilabschnitten Modifikationen erfolgen, um auch spezielle Förderer berechnen zu können.

Im Vorfeld zur Beschreibung der im Rahmen der Arbeit erstellten Simulationsaufbauten wird auf die mathematischen Zusammenhänge zur Beschreibung von Elementen in einem Mehrkörpersystem eingegangen. Ausgehend von kinematischen Zusammenhängen wird der Berechnungsansatz Schritt für Schritt auf kinetische Zusammenhänge erweitert. Hierbei wird auf die genutzte Modellannahme eines starren Körpers für die schwingenden Massen und die Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Elementen eingegangen. Da die vorgestellten Gleichungen bei entsprechenden Fördereraufbauten aneinander gekoppelte Terme besitzen, führen analytische Lösungsansätze zu Problemen, weswegen auf eine Software mit Möglichkeit zur numerischen Lösung zurückgegriffen wird.

Die im Rahmen dieses Beitrages erstellten Antriebsmodelle umfassen Unwuchtantrieb, Schubkurbelantrieb und Elektromagnet. Zur Modellierung des Unwuchtantriebs wurde anfangs ein Asynchronmotor aufgebaut. Die Motorberechnung leitet sich dabei aus dem Ersatzschaltbild ab und wird mit Datenblattangaben parametrisiert. Ergänzend wird die angelegte Spannung an den Motorklemmen ausgewertet.

Während der Simulation wird im Motormodell ein Drehmoment errechnet und auf einen drehbaren Körper im Koordinatenraum des MKS übertragen. An der Motorwelle exzentrisch zur Drehachse liegende Massekörper stellen die Unwucht dar und komplettieren die Elemente des Unwuchtantriebs. Die Trägheitskräfte der Unwuchten werden in der Anwendung des Modellabschnitts am Lagerpunkt der Motorwelle auf mit dem Antrieb verbundene Massekörper übertragen.

In Anlehnung an die Beschreibung des Unwuchtmotors ist das Modell für den Schubkurbelantrieb aufgebaut. Der als zentrale Element dienende Asynchronmotor wird auch hier über die Zusammenhänge des Ersatzschaltbildes beschrieben. Die Motorwelle ist im Gegensatz zum Unwuchtantrieb ohne Unwuchtmassen und stattdessen mit einem exzentrisch angreifenden Pleuel modelliert. Über translatorische Zwangsbedingungen lässt sich abschließend die Bewegung am Ende der Pleuelstange auf den anzutreibenden Massekörper übertragen. Die Gegenkraft der Schubkurbel wird punktuell am Angriffspunkt der Motorwelle eingeleitet.

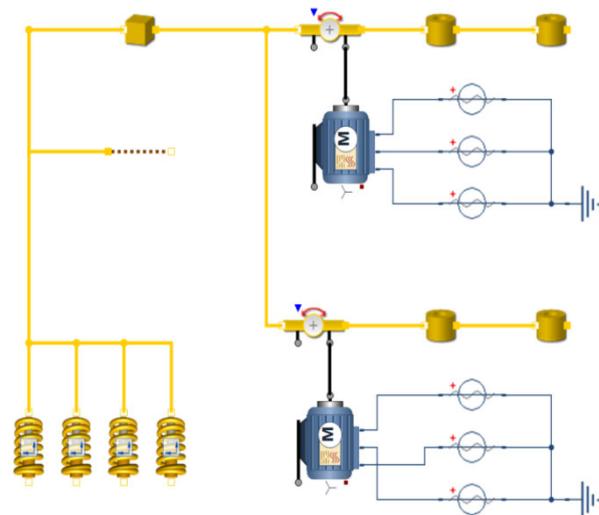
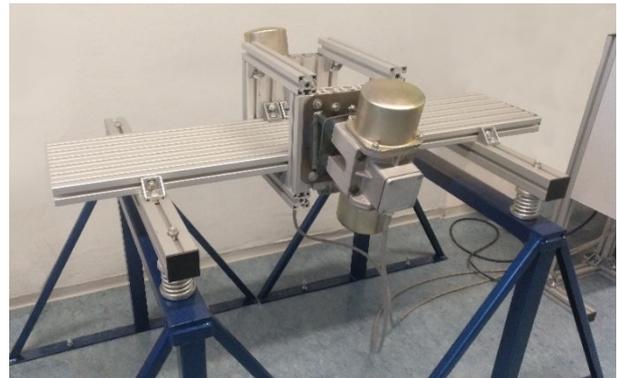


Abbildung 1. Unwuchtförderer als Einmassen-System (oben); Abstraktion SimulationX (unten)

Die Antriebsvariante mit Elektromagnet ist über eine angreifende Magnetkraft realisiert. Die Magnetkraft wird dabei an den Positionen von Magnet und Zuganker mit entgegengesetzten Vorzeichen angetragen. Die gleichen Positionen werden zur Bestimmung des Luftspalts genutzt, indem die relative Lageänderung zu einem Startluftspalt addiert wird. Ausgehend vom Luftspalt lässt sich im aufgebauten Modell entweder über eine Messkurve oder gemäß dem mathematischen Zusammenhang die Zugkraft des Magnets bestimmen.

Durch Kombination der Teilmodelle zur Antriebsbeschreibung mit einem mechanischen Schwingungsaufbau werden in der Arbeit komplette Vibrationsförderer beschrieben. Die Arbeit konzentriert sich dabei auf Schwingungssysteme mit einer Masse bzw. mit zwei Massen. Förderer dieser Bauarten sind am Markt weit verbreitet und decken somit viele Einsatzfälle für das Simulationsmodell ab. Konkret werden als fertige Modelle kompletter Förderer ein Modell eines Unwuchtförderers als Einmassenschwinger, zwei Modelle für elektromagnetisch angetriebene Förderer als Einmassenschwinger sowie als Zweimassenaufbau und ein Modell eines Förderers mit Schubkurbelantrieb als Zweimassenaufbau erstellt. Die Grundkörper der modellierten Vibrationsförderer werden als starre Körper vereinfacht. Durch elastische Federelemente wird der Aufbau im Anschluss schwingungsfähig.

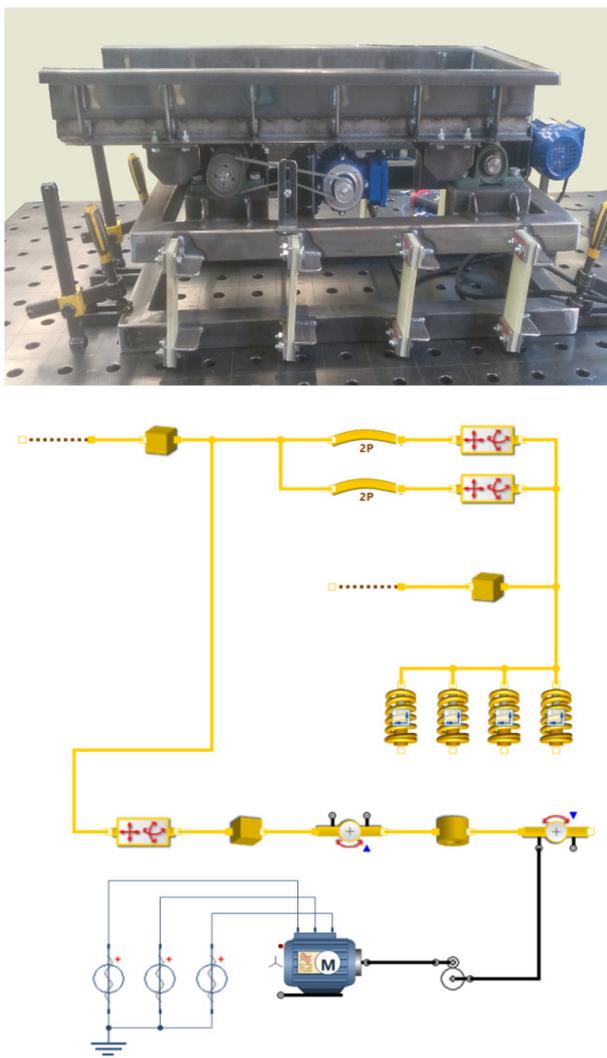


Abbildung 2. Schubkurbelförderer als Zweimassen-System (oben); Abstraktion SimulationX (unten)

Um die verschiedenen Federtypen und ihre Eigenschaften in guter Weise abzubilden, wird mit zwei Model-

len gearbeitet. Schraubenfedern und Gummielemente werden als Kombinationen von mehreren achsbezogenen Steifigkeitsangaben und Dämpfungswerten abgebildet. Blattfedern werden im Gegensatz dazu als elastischer Körper gemäß dem Modell eines Timoshenko Balkens abgebildet. Auf diese Weise wird die Angabe von meist unbekanntenen achsbezogenen Steifigkeiten an einer Blattfeder vermieden und die Ausbildung der S-förmigen Biegelinie gewährleistet. Zur Berücksichtigung der Dämpfung an den Blattfedern wird das Prinzip der Rayleigh-Dämpfung verwendet. Zur Einschätzung der Rayleigh-Dämpfung wird die Wirkung auf das Schwingungssystem in Abhängigkeit für zunehmende Dämpfungsparameter aufgezeigt.

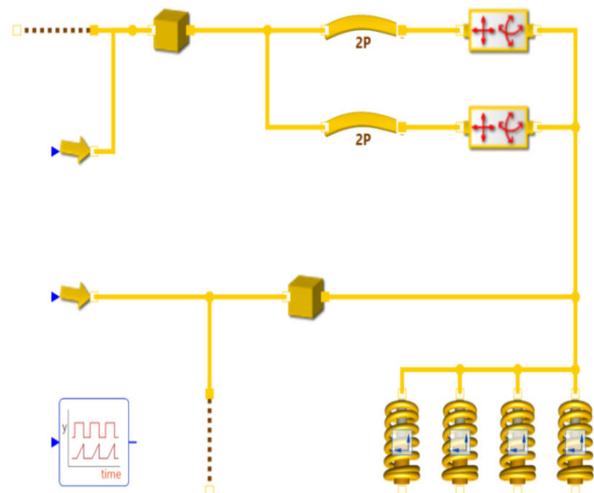
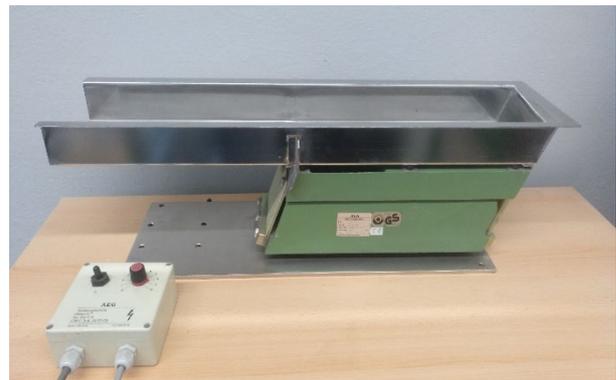


Abbildung 3. Elektromagnetförderer als Zweimassen-System (oben); Abstraktion SimulationX (unten)

Im Nachgang an die Modellbildung der Schwingungssysteme wurde die Abbildung des Förderguts in Grundzügen betrachtet. Das Modell ist in der Lage eine kleine Anzahl von Gütern und deren Rückwirkung auf das Förderorgan zu simulieren. Für die abgebildeten Gutbestandteile kann weiter die Bewegungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Wechselwirkungen zwischen Fördergutbestandteilen werden im einfachen Grundmodell nicht betrachtet.

3 VERIFIKATION DER MODELLE

Das aufgebaute Rechenmodell und die damit einhergehenden Annahmen sind eine Abstraktion echter Förderer. Zur Überprüfung der aufgebauten Modelle auf Eignung für die Abbildung von Vibrationsförderern werden in der Arbeit Vergleiche mit aufgenommenen Messdaten durchgeführt. Zu diesem Zweck werden an Testförderern mittels Beschleunigungssensoren die resultierenden Schwingungsbewegungen entlang der Koordinatenachsen aufgezeichnet. Entsprechend der erstellten Gesamtmodelle werden für die Verifikation je ein Unwuchtförderer, Schubkurbelförderer und elektromagnetisch angetriebener Förderer zum Vergleich der Rechengenauigkeit genutzt. Die Messwerte werden zu dem Zweck dreifach gemessen. Anschließend werden die mittlere Abweichung sowie die Varianz bzw. die Standardabweichung bestimmt. Die Auswertung erfolgt weiterhin jeweils über 3 Schwingungsperioden hinweg.

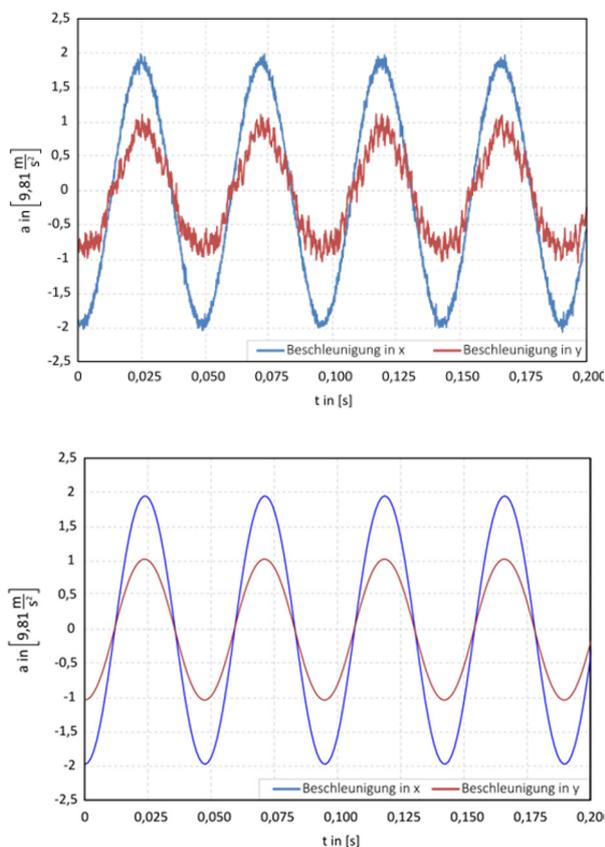


Abbildung 4. Visueller Vergleich der Messdaten (oben) und Simulationsergebnisse an einem ausgewählten Messpunkt (unten)

Die ersten Versuche erfolgen am Testaufbau mit Unwuchtantrieb. Für eine möglichst umfassende erste Betrachtung wurde ein eigener Förderer entwickelt und aufgebaut. Die Eigenentwicklung erlaubt es Positionen und

Ausrichtungen mechanischer Elemente sowie die elektrische Ansteuerung in vielfältiger Weise variieren zu können. Zur Überprüfung des Simulationsmodells konnten damit Vergleiche für verschiedene mechanische Motoranordnungen sowie elektrische Frequenzen der Motorspannung erfolgen. Aus den Versuchen geht hervor, dass mit dem Simulationsmodell gute Aussagen über das Schwingungsverhalten des Vergleichsaufbaus erreicht werden.

Die darauffolgende Untersuchung am elektromagnetisch angetriebenen Förderer wurde an einem am Markt erhältlichen Förderer durchgeführt. Aus diesem Vergleich geht hervor, dass es für die Simulation der Bewegungsform wichtig ist, die Eigenschaften der Magnetansteuerung genau zu berücksichtigen. Infolge der Phasenschnittsteuerung verkürzt sich die Arbeitszeit des Elektromagnets woraus eine geringere Kraft und eine Überlagerung von Oberwellen resultiert. Bei korrekter Berücksichtigung der Systemeigenschaften liefert das Simulationsmodell auch am Zweimassenschwinger mit Elektromagnetantrieb gute Berechnungsergebnisse.

Die abschließende Genauigkeitsbetrachtung wurde an einem Förderer mit Schubkurbelantrieb durchgeführt. Hier wurden zusätzlich zu den direkt gemessenen Beschleunigungsdaten auch die Geschwindigkeitskurven mit der Simulation verglichen. Aufstellungsbedingt waren die Beschleunigungsmesswerte am realen Förderer, speziell im vertikalen Beschleunigungssignal, mit Störschwingungen behaftet und nur schwer bewertbar. Im störungsärmeren Geschwindigkeitsverlauf zeigt sich zwischen Messung und Simulation eine gute Übereinstimmung. Die Berechnung bildet dabei die Geschwindigkeitsbeträge sowie auch die Verschiebung in der Phasenlage ab.

Nach der Betrachtung eines jeden Testaufbaus wird kurz auf Fehlerquellen und Störungsursachen eingegangen. Besonders im Vergleich zur Grundschiwingung treten vielfach hochfrequente Störeinflüsse auf. Die Ursache dieser Einflüsse wird weitestgehend im mechanischen Aufbau bzw. in Befestigungen gesehen. Für eine Messung am Unwuchtantrieb wird gezeigt, dass die Abweichung der Simulation von den Messwerten durch Vergleich der reinen Grundschiwingungen reduziert werden kann.

4 ANWENDUNGSSZENARIEN DER SIMULATION

Nachdem gezeigt werden könnte, dass der genutzte Simulationsansatz für verschiedene Schwingungssysteme und Antriebsmethoden gute Rechenergebnisse liefert, werden anschließend verschiedene Anwendungsmöglichkeit aufgezeigt. Ausgehend von der korrekten Bewegungsbeschreibung können darauf aufbauend auch weitere Eigenschaften detailliert untersucht werden.

Die Basis zur Berechnung von Fördergeschwindigkeiten von Vibrationsförderern bildet die Bewegung des Förderorgans. Nachdem im Rechenmodell die Bewegung auf allen Punkten des als starr angenommenen Förderorgans berechnet wird, ist auch die Auswertung der Fördergeschwindigkeit naheliegend. Im Anwendungsbeispiel wird zu dem Zweck ein Körper mit zwei Freiheitsgraden auf einem geeigneten Förderorgan betrachtet. Die Simulation erfolgt dabei in Anlehnung und im Vergleich zu veröffentlichten Erkenntnissen für die analytische Bestimmung von Gleitförderprozessen auf einem ansteigenden Förderorgan.

Anhand von Bewegungsdaten eines Förderers wird im zweiten Anwendungsfall gezeigt, wie Rückschlüsse auf das frequenzabhängige Schwingungsverhalten gewonnen werden können. Aus den Simulationsergebnissen können dabei die Lage und Stärke von Resonanzen abgelesen werden. Durch eine darüberhinausgehende Parametervariation kann auch die Einflussstärke von Systemeigenschaften bewertet werden. Am Beispiel des Dämpfungsparameters wird in diesem Zusammenhang exemplarisch gezeigt, dass im Frequenzband die Dämpfungsparameter abseits der Resonanz nur äußerst geringe Einflüsse auf die Schwingungsbewegung besitzen. Nahe am Resonanzpunkt können dagegen durch Änderungen der Dämpfungswerte große Auswirkungen auf die Schwingung festgestellt werden.

Neben der Betriebsfrequenz spielt der mechanische Aufbau des Schwingungssystems eine wichtige Rolle für die resultierende Bewegungsform. Im dritten Anwendungsbeispiel wird dazu gezeigt, wie sich Änderungen der Motorposition an einem Unwuchtförderer auf das Schwingungsbild auswirken. Durch horizontalen und vertikalen Versatz von der idealen Position auf einem Punkt der Trägheitsachse werden Kippmomente verschiedener Größenordnung simuliert. Wird zusätzlich eine Kraftanregung mit Phasenversatz ausgewertet, zeigen sich je nach Motorposition weitere Auswirkungen auf die Bewegungsphasen der Förderorganschwingung.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem aufgebauten Simulationsmodell sind umfangreiche Betrachtungen an verschiedensten Bauformen von linearen Vibrationsförderern möglich. Der Fokus wurde auf eine breite Ausrichtung ausgelegt, was Ansatzpunkte für detailreichere und spezifischere Betrachtungen weitere Effekte ermöglicht. Praktisch relevantes Erweiterungspotenzial wird vor allem im Bereich der Abbildung der elektromagnetischen Antriebe oder auch im Kontaktverhalten zwischen dem Fördergut und dem Förderorgan gesehen. Die aufgezeigten Möglichkeiten wurden vorerst für lineare Vibrationsförderer betrachtet, können aber prinzipiell auch auf Drehbewegungen (Wendelförderer) angewendet werden.

Zum Aufbau des MKS Modells wurde die Software SimulationX gewählt, da hier komplexe Prozesse modular und für den Laien verständlich aufgebaut werden können. Speziell bei Vibrationsförderern, wo verschiedene Grundbauweisen existieren, können so die verschiedenen Aufbauten erfasst werden. Mit dem Ziel komplette Vibrationsförderer in ihrer Bewegung und dem Fördereffekt simulieren zu können, wurden anfangs funktionelle Abschnitte modelliert. Bei diesen Abschnitten handelt es sich um eigenständige Systeme, welche in verschiedenen Gesamtmodellen eingesetzt werden. In dem Rahmen wurden Teilmodelle für die Antriebslösungen und das Fördergut in modularer Funktion und parametrisierbar erarbeitet. Damit sind die Funktionsgruppen praxistauglich und ideal zur kompakten Verwendung in größeren Simulationsmodellen geeignet.

LITERATUR

- [1] VDI. VDI-Richtlinie 2333: Schwingförderer für Schüttgut. Norm. VDI-Verlag. 2017.
- [2] Richard Jung Die Gleitbewegung auf der schwingenden Ebene. VDI Forschung. 1952.
- [3] Hans Dresig, Thomas Risch, Christian Kuhn Vibrationsfördertechnik - Gleitförderung auf harmonisch beschleunigten Förderorganen. 2016. urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-211288.
- [4] Thomas Risch Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsfördertechnik. Dissertation. TU Chemnitz, 2011. urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-65499.

Dr.-Ing. Thomas Risch, Technische Universität, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Reichenhainer Straße 70, 091126 Chemnitz,

Phone: +49 371 531-35166, Fax: +49 371 531-835166, E-Mail: thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de