

Simulation der Vibrationsfördergeschwindigkeit an MKS Förderermodellen in SimulationX

Simulation of the vibratory conveying speed with MBS conveyor models
in SimulationX

Christian Kuhn
Thomas Risch
Markus Golder

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

Vibrationsförderer sind technische Systeme, welche durch eine Antriebskraft in eine Vibrations- oder Schwingungsbewegung versetzt werden. Das Förderorgan beschleunigt hierbei das aufliegende Fördergut und erzeugt je nach Ausprägung der Bewegungskurve einen definierten Fördergutstrom. In diesem Beitrag wird für die Software SimulationX die Simulation der kompletten Wirkungskette zur Ermittlung der zu erwartenden Fördergeschwindigkeit betrachtet. Dabei wird der Schwerpunkt speziell auf die Berechnung Fördergeschwindigkeit gesetzt.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, Fördergeschwindigkeit, Schwingbewegung, MKS, Simulation]

Vibratory conveyors are technical systems that are set into an oscillation or vibration movement by a driving force. The Conveyor organ accelerates the goods placed onto it and generates depending on the movement curve a specific good movement. Within this paper the complete chain of results to calculate the movement speed using the Software SimulationX is analyzed. In the course of this the focus is placed on the calculation of the conveying speed.

[Keywords: vibration conveyor, conveying speed, oscillation movement, MBS, simulation]

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Vibrationsförderer haben eine lange technische Tradition und gelten als robuste, verschleißarme und zuverlässige Fördersysteme. Sie werden zur Stück- und zur Schüttgutförderung eingesetzt und finden in allen denkbaren Bereichen Anwendung. Die Baugrößen dieser Fördersysteme reichen je nach deren Einsatz von wenigen Zentimetern (z.B. für Mikrobauerteile) bis hin zu Längen von 50m (z.B. im Bergbau).

Bei der Auswahl von Vibrationsförderern ist die Fördergeschwindigkeit eine der zentralen Kenngrößen, anhand welcher ein Anwender einen Förderer auswählt. Die genaue theoretische Ermittlung im Entwicklungsprozess von Vibrationsförderern ist daher von besonderer Bedeutung.

Als Simulationsumgebung wird im Rahmen dieses Beitrags mit der Software SimulationX gearbeitet. Die Software bietet umfangreiche Optionen das Verhalten von Systemen in unterschiedlichen physikalischen Ebenen zu betrachten. Durch eine Verkettung von Einzelementen können komplexe Zusammenhänge modular abgebildet werden. Damit können Anwender Modellstrukturen übersichtlich aufbauen und Schritt für Schritt erweitern.

Ziel des Simulationsmodells ist die Betrachtung der vollständigen Wirkungskette von der Antriebswirkung über die Förderorganbewegung bis zur Fördergeschwindigkeit.

2 GRUNDLAGE DES SIMULATIONSMODELLS

Ausgangspunkt für die Entstehung einer Förderbewegung mit einer dazugehörigen Fördergeschwindigkeit ist bei Vibrationsförderern die Bewegung des Förderorgans.

In [Kuh19] wurde für Vibrationsförderer bereits ein Ansatz zur Abbildung von linearen Unwuchtförderern in der Software SimulationX aufgezeigt und mit praktischen Messdaten verglichen. Der genutzte Ansatz basiert auf dem MKS (Mehrkörpersystem) Prinzip. Dabei werden die Förderer anfangs in ihre Massekomponenten zerlegt. Die Einzelmassen sind weiter mit elastischen Federelementen verbunden bzw. zwischen den Körpern sind spezielle Bewegungsfreiheitsgrade definiert. Abschließend wird am Aufbau eine Antriebskraft entsprechend der Schwingungserregung modelliert. Auf diese Weise lässt sich eine För-

dererbewegung berechnen, welche im Rahmen dieses Artikels mit einer Möglichkeit zur Fördergeschwindigkeitsberechnung ergänzt werden soll.

Durch Vermeidung einer festen Definition der Förderbewegung über eine Gleichungsvorgabe erlaubt dieses Rechenmodell verschiedene Einflüsse auf den Vibrationsförderer und deren Auswirkung auf die Fördergeschwindigkeit zu betrachten.

Zur Betrachtung der Fördergeschwindigkeit wurde in SimulationX im Rahmen des Artikels [Kuh20] eine Lösung vorgestellt, welche mit eindimensionalen Modellelementen arbeitet. Dieses Modell arbeitet nutzt genau wie andere bekannte Rechenansätze z.B. nach [Ris11], [Dre16] oder [VDI2333] vorgegebene Förderbewegungen. Jedoch eignet sich der Modellierungsansatz als Vorbild zur Gestaltung des MKS Ansatzes in diesem Artikel.

3 MODELLEAUFBAU

Das Grundmodell aus [Kuh19] stellt für die Berechnung die vorliegende Förderorganbewegung zur Verfügung. Aus dem Teilmodell zur Bewegungsberechnung wird durch die Ergänzung der Fördergutberechnung nun ein neues Gesamtmodell erstellt. In der Modellierung des beweglichen Förderguts wird mit zwei Freiheitsgraden gearbeitet. Entlang dieser Richtung kann sich das Fördergut aufgrund der Schwingungsanregung fortbewegen. Während die horizontale Bewegung eine Verschiebung ohne Grenzen zulässt, wird der vertikale Freiheitsgrad durch einen Anschlag auf der Höhe des Förderorgans eingeschränkt.

Der Anschlagzustand wird hier gleichzeitig als Bedingung für das Vorliegen von Reibung zwischen Förderorgan und Fördergut verwendet. Aufgebracht wird die Reibung entlang der x -Achse, wenn ein Körperkontakt vorliegt.

3.1 REIBMODELL

Von zentraler Bedeutung für die Funktionsweise eines Vibrationsförderprozesses ist die Reibung während sich das Fördergut in Kontakt mit dem Förderorgan befindet. Das Wirken von Reibkräften ermöglicht es, dass die Beschleunigungswirkung des Förderorgans auf das Fördergut übertragen wird.

Zur mathematischen Abbildung der Reibeigenschaften verwendet die Modellierung den Coulomb'schen Ansatz.

3.2 FÖRDERGUTAUFSCHLAG

Sobald im Förderprozess Vertikalbeschleunigungen über $1g$ vorliegen, treten wechselnde Kontaktzustände zwi-

schen Fördergut und Förderorgan auf. Unterhalb dieser Beschleunigungsgrenze findet ein gleitender Fördervorgang mit ständigen Fördergut-Förderorgan-Kontakt statt. Der Wirkungsmechanismus oberhalb der $1g$ Grenze wird als Wurfförderung bezeichnet.

Der Wurfprozess setzt sich hierbei aus dem Fördergut-abwurf, der Flugphase, dem Fördergutaufschlag und abschließend der Kontaktphase zusammen. Die Art und Weise des Fördergutaufschlagens spielt eine wichtige Rolle im Förderprozess. Je nachdem ob das Fördergut zum Springen neigt oder nicht, findet der Zustandswechsel zwischen Flug- und Kontaktphase unterschiedlich statt. Entsprechender Weise ist es fördergutabhängig in welcher Weise sich die Kontaktphase einleitet.

Physikalisch gesehen handelt es sich beim Auftreffen des Förderguts um einen Stoßprozess. Für das Rechenmodell wird speziell ein elastischer Stoß angenommen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass sich keine bleibenden Formänderungen aufgrund des Stoßes einstellen.

Durch das Parametrisieren des Fördergut-Förderorgan-Kontakts mit Steifigkeits- und Dämpfungsangaben lassen sich Aufschlageffekte besser simulieren. So ist es möglich Beschleunigungsspitzen beim Aufschlagen sowie Nachsprungeffekte abzubilden.

3.3 WIRKUNGSKETTE

Das Gesamtmodell ermöglicht es durch die Kombination aus Bewegungssimulation und Fördergutbewegung die gesamte Wirkungskette vom Antrieb bis zur resultierenden Fördergeschwindigkeit abzubilden. Das heißt in der Simulation können die Antriebseinheiten über das Grundmodell, wie zum Beispiel Unwucht- oder Schubkurbelantrieb selbst integriert werden.

So werden zunächst anhand von Antriebswirkungen die Schwingungsbilder am Förderorgan berechnet. Anschließend werden die ermittelten Schwingungsformen am Förderorgan direkt auf das Fördergut übertragen. Auf diese Weise werden auch aufgrund von Wechselwirkungen und Antriebseffekten „unsaubere“ mit Störsignalen versehene Schwingungsbilder in der Berechnung berücksichtigt.

Gleichzeitig berücksichtigt die Simulation auch eine Rückkopplung vom Fördergut auf das Förderorgan. Gerade für die Betrachtung von sehr schweren Fördergütern können somit auch ungleichmäßige Beladungszustände berechnet werden.

3.4 AUSWERTUNG DER FÖRDERGESCHWINDIGKEIT

Im Gegensatz zur üblichen Angabe der Fördergeschwindigkeit ermittelt das Simulationsmodell keinen mittleren Wert über einer Bewegungsperiode. Stattdessen wird der kontinuierliche Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf berechnet.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, muss daher in der Auswertung der Mittelwert berechnet werden.

Gleichzeitig muss aufgrund der simulierten Aufschlageffekte des Förderguts darauf geachtet werden, dass einzelne Beschleunigungsspitzen auftreten können. Beim Vergleich der Schwingungsformen mit anderen Modellen ohne die Abbildung von Aufschlageffekten sind diese Amplitudenausschläge zu filtern. Stattdessen ist die grundlegende Hauptbewegung zu vergleichen.

4 VERGLEICH MIT WEITEREN BERECHNUNGSANSÄTZEN

Zum Vergleich des Simulationsmodells mit anderen Betrachtungsansätzen wurde ein linearer Unwuchtvibrationsförderer modelliert und in verschiedene Betriebspunkten verglichen. Bei der mechanischen Aufbauumsetzung wurde ein Einmassenschwinger mit zentraler Motorlager auf höher der Trägheitsachsen modelliert.

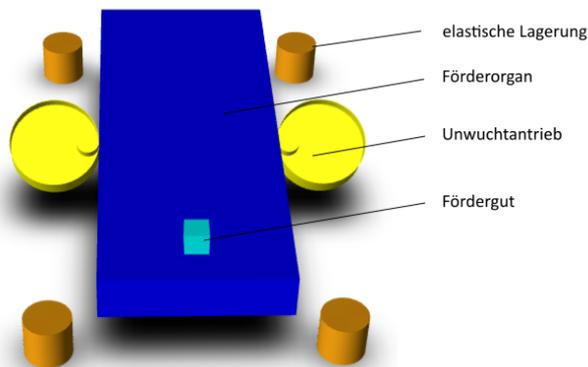


Abbildung 1: 3D-Darstellung des in der Beispielrechnung verwendeten Simulationsaufbaus

Am in Abbildung 1 gezeigten Modell sollen exemplarisch die Ergebnisse für die zwei nachstehenden Betriebszustände präsentiert werden.

Betriebszustand a):

- Frequenz = 25 Hz
- absolute Beschleunigung = 4,3 g
- Reitkoeffizient = 0,3

Als weitere Randbedingungen gingen in die Berechnung des Zustands a) folgende Werte ein:

- Förderorganmasse = 75 kg
- Unwucht = 6,66 kg cm
- Fördergutmasse = 1 kg
- Federsteifigkeit = 12,9 N/mm

- Steifigkeit des Materialanschlags = 210 Gpa

Betriebszustand b):

- Frequenz = 22,5 Hz
- absolute Beschleunigung = 4,6 g
- Reitkoeffizient = 0,3

Als weitere Randbedingungen gingen in die Berechnung des Zustands b) folgende Werte ein:

- Förderorganmasse = 75 kg
- Unwucht = 8,88 kg cm
- Fördergutmasse = 1 kg
- Federsteifigkeit = 12,9 N/mm
- Steifigkeit des Materialanschlags = 210 Gpa

Anhand der gegebenen Kenngrößen wurde eine lineare Beschleunigungsbewegung in den zwei Betriebszuständen simuliert. Die nachstehende Grafik zeigt hierzu die Bewegungsverläufe bei einem Wurfwinkel von 30°.

Durch die Auswertung von verschiedenen Antriebszuständen, welche durch unterschiedliche Antriebsanordnungen am Förderer erreicht wurden, ließen sich nachstehende Diagramme erstellen.

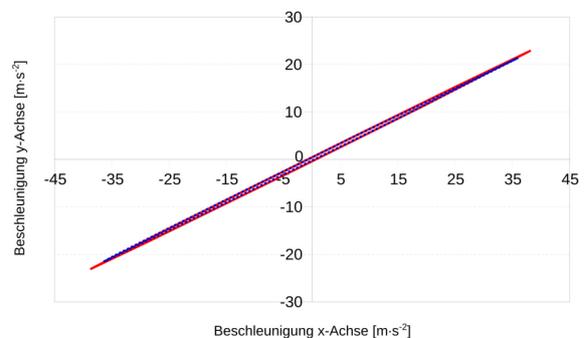


Abbildung 2: Bewegungsform der simulierten Förderzustände a) und b)

Darin werden die Fördergeschwindigkeiten aus dem SimulationX Modell mit den Berechnungsansätzen der VDI Norm [VDI2333] und nach [Ris11] verglichen.

Da in den zwei genannten Berechnungsansätzen keine Antriebseigenschaften abbildbar sind, wurden für diesen Vergleich die Beschleunigungsamplituden entlang der x-Achse und y-Achse, wie in Abbildung 1 gezeigt, als Eingangsgößen verwendet.

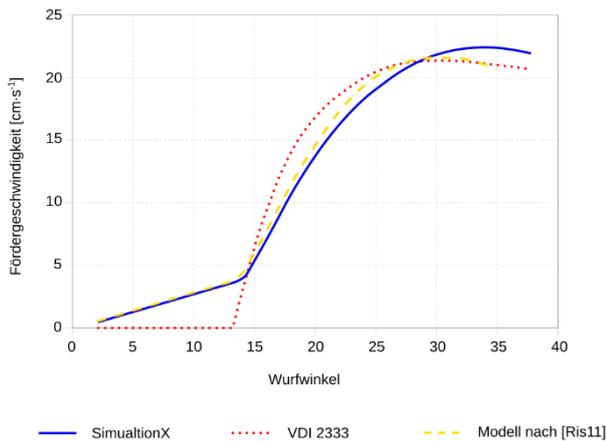


Abbildung 3: Fördergeschwindigkeit im Förderzustand a) für 3 Rechenmodelle im Vergleich

In einer ersten qualitativen Gegenüberstellung weisen alle drei berechneten Kurven einen ähnlichen Verlauf auf. Modellbedingt bewegt sich bei der Berechnung nach VDI Norm das Fördergut erst sobald ein Minimum an Vertikalbeschleunigung überschritten ist. Die Beschleunigungsgrenze befindet sich bei einer Vertikalbeschleunigung von 1 g, der einfachen Gravitationsbeschleunigung. Wird die Beschleunigung von 1 g überschritten so wechselt der Förderzustand von einem gleitenden Fördern zur Wurfförderung. Für den in Abbildung 2 gezeigten Förderzustand a) wird die Grenze bei einem Wurfwinkel von ca. 13° erreicht. Im simulierten Bereich bis 13° stimmt der neue Simulationsansatz sehr gut mit dem Modell nach Risch [Ris11] überein, welcher ebenfalls wurflose Förderzustände berücksichtigt.

Im mittleren Bereich des simulierten Geschwindigkeitsverhaltens in Abhängigkeit des Wurfwinkels liegt eine weitere gute Näherung zwischen den Kurven des SimulationX Modells und der Berechnungsmethodik nach Risch vor. Es ist aber auch zu erkennen, dass mit steigendem Wurfwinkel sich die Abweichung zwischen den Kurven erhöht. Im Vergleich zur nach VDI Norm ermittelten Geschwindigkeit liegen die 2 Kurven etwas bei leicht niedrigeren Geschwindigkeiten.

Größere Abweichungen zwischen der Geschwindigkeitskurve des SimulationX Modells und den zwei Vergleichskurven treten hingegen im Bereich der maximalen Fördergeschwindigkeit auf. Während sich in dem Kurvenabschnitt die Fördergeschwindigkeiten aus Risch und VDI annähern ermittelt das mit SimulationX erstellte Modell etwas höhere Fördergeschwindigkeiten.

Der zweite in Abbildung 3 präsentierte Zustand bestätigt die Kurvenverläufe aus dem Zustand a) und deren relative Lage zueinander. Im Vergleich der Bereiche kleiner und mittlerer Fördergeschwindigkeiten liegt die mit SimulationX errechnete Kurve erneut nur leicht unterhalb dem Verlauf nach Risch. Das Geschwindigkeitsmaximum liegt

hingegen im bei der Berechnung mittels SimulationX etwas höher und tritt bei leicht größeren Wurfwinkeln auf.

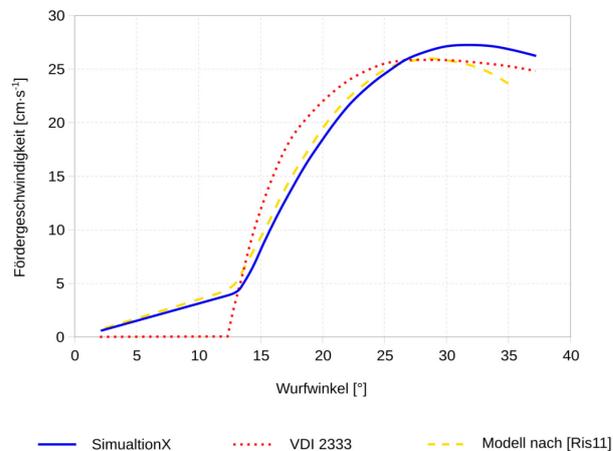


Abbildung 4: Fördergeschwindigkeit im Förderzustand b) für 3 Rechenmodelle im Vergleich

Die Ursache für die festgestellten Abweichungen wird in zwei wesentlichen Punkten gesehen. Die Modelle nach VDI 2333 und nach Risch bilden keine Aufschlageffekte des Förderguts mit dem Förderorgan ab. Je nach Fördergutaufschlag erfolgt eine Krafteinleitung in das Fördergut während der neu beginnenden Schwingungsperiode auf unterschiedliche Art und Weise. Treten zum Beispiel leicht Nachsprungeffekte auf verzögert sich die Krafteinleitung und die Beschleunigungsphase des Förderguts. Da Wurf- und Aufschlageffekte nur bei Wurfförderung ausgebildet werden, erklärt sich auf diese Weise auch die genauere Übereinstimmung der Kurve mit Risch im Gleitbereich.

Der zweite wichtige Aspekt, welche Abweichungen erklärt ist die Antriebsmodellierung. Das SimulationX Modell simuliert die Bewegung des Förderorgan infolge von Antriebswirkung und Wechselwirkungen mit dem Fördergut. Aus dem Sachverhalt resultiert, dass hier, wie in der Realität, keine vollkommen konstante Vibrationsbewegung der Berechnung vorliegt. Diese kleinen Abweichungen führen wiederum zu kleinen Veränderungen im Wurfprozess und damit zu Auswirkungen auf die Fördergeschwindigkeit.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND KRITIK

Mit dem vorgestellten Rechenmodell wurde eine Möglichkeit geschaffen Vibrationsförderer in einem Gesamtmodell von der Erzeugung der Antriebsbewegung bis zur Fördergeschwindigkeit zu analysieren. Durch den modularen Aufbau des SimulationX MKS Modells ist man hier in der Anwendung nicht an eine bestimmte Bauform, wie Einmassen- oder Zweimassenschwinger gebunden. Je nach Berechnungsziel können Fördererbestandteile ergänzt oder entfernt werden.

5.1 KRITIK AM MODELL

Die mit dem Simulationsmodell geschaffene Möglichkeit den kompletten Wirkungsstrang eines Vibrationsförderprozesses zu betrachten, ist jedoch auch mit Schwierigkeiten verbunden. Die Komplexität der Simulation erfordert eine vergleichsweise hohe Anzahl an Eingabeparametern, welche im Vorfeld der Simulation zu ermitteln sind. Auch wenn die meisten Parameter, wie zum Beispiel Positionen von Körper oder Massen relativ schnell bestimmt sind, verbleiben schlecht bestimmbar Parameter, wie zum Beispiel Kontakteigenschaften des Förderguts mit dem Förderorgan.

Die Möglichkeit zur Abbildung von Antrieben im Rechenmodell ermöglicht eine erweiterte Betrachtung von Wechselwirkungen. Gleichzeitig kann es sich im Modellierungsprozess als schwierig herausstellen eine geeignete Abbildung des verwendeten Antriebs aufzubauen.

5.2 AUSBLICK

Der aktuelle Entwicklungsstand des Simulationsaufbaus umfasst nur lineare Fördergutbewegungen. In der Praxis treten jedoch auch Querfördereffekte und Kreisbewegungen auf. In weiteren Entwicklungsbestrebungen kann das genutzte Rechenmodell durch die Möglichkeit zur Abbildung von Fördergutbewegungen im 3D-Raum weiter verbessert werden. Die Realisierung von dreidimensionalen Gutbewegungen erlaubt auch eine Erweiterung der Simulationsoptionen durch Abbildung von Vibrationswendelförderern

6 FÖRDERHINWEIS

In die Erstellung des Simulationsmodells flossen Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit der AiF als Träger geförderten Projekt ZF4018665 ein.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



LITERATUR

[Dre16] Dresig, Hans et al.: *Gleitförderung auf harmonisch beschleunigten Förderorganen*, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-211288>

[Kuh19] Kuhn, Christian et al.: *Simulation von Schwingsystemen für die Vibrationsförder-technik mit SimulationX*, Fachkolloquium der WGTL: Tagungsband Vol. 15, 2019 ISBN 978-3-86009-496-9, S. 227-232

[Kuh20] C. Kuhn, T. Risch, and M. Golder: *Simulation of the Conveying Speed on Vibration Conveyors Using 1D-Mechanical Modules in SimulationX*, innoTRAC Journal. 1, (Dec. 2020), 107-114, DOI:<https://doi.org/10.14464/innotrac.v1i0.470>

[Ris11] Risch, Thomas: *Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsförder-technik*, Dissertationsschrift, Professur Förder-technik, TU Chemnitz, 2011

[VDI2333] VDI 2333 Schwingförderer für Schüttgut, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2017

Christian Kuhn, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Christian Kuhn wurde 1990 geboren und studierte von 2009 bis 2015 Maschinenbau an der Technischen Universität Chemnitz.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland,
Telefon: +49 371 531-33833, Fax: +49 371 531-833833,
E-Mail: christian.kuhn@mb.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Thomas Risch, Leiter der Forschungsgruppe Vibrationsförder-technik und Systemdynamik am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Inhaber des Lehrstuhles für Förder- und Materialflusstechnik an der TU Chemnitz studierte von 1991 bis 1997 an der Universität Karlsruhe (TH) Maschinenbau und promovierte im Jahr 2004. Im Zeitraum von 1997 bis 2018 war Markus Golder selbstständig sowie bei verschiedenen Unternehmen auch in leitender Position tätig. Unter Anderem Stahl CraneSystems und Konecranes. Von 2015 - 2018 war er Inhaber der Stiftungsprofessur Sichere mechatronische Systeme der Intra-logistik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)