

Simulation von Schwingsystemen für die Vibrationsfördertechnik mit SimulationX

Simulation of oscillating systems for the usage on vibration conveyors with SimulationX

Christian Kuhn
Thomas Risch
Niels Dallinger
Markus Golder

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

Vibrationsförderer zeichnen sich durch dynamische komplexe Eigenschaften aus. Insbesondere durch zahlreiche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten dieser Systeme bestehen in der Praxis große Herausforderungen. Durch den Einsatz von Simulationsrechnungen kann die ingenieurtechnische Arbeit unterstützt und erleichtert werden. Im Rahmen dieses Beitrags soll ein Ansatz zur simulativen Abbildung von vibrationstechnischen Aufbauten näher gebracht sowie die Anwendung diskutiert werden.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, dynamisches Verhalten, Bewegungskurve, MKS, Simulation]

Complex dynamic behavior is a feature of vibration conveyors. Especially because of numerous correlations between single components of these systems there are big challenges in the practical use. The application of simulations can support and facilitate the engineering work. Within this paper there shall be a presentation of a simulation approach in the field of vibration conveyors and a discussion of the practical use.

[Keywords: vibration conveyor, dynamic behavior, curve of motion, MBS, Simulation]

1 EINLEITUNG

Durch den Einsatz von Vibrationsförderern können kontinuierliche Fördergutströme erzeugt werden. Dementsprechend zählen die Vibrationsförderer zur Kategorie der Stetigförderer. Bei verschiedenen Anwendungen wird der reine Fördervorgang zusätzlich mit weiteren Funktionen kombiniert. Der Förderprozess eignet sich dabei gut zur Verknüpfung mit Aufgaben des Sortierens, Dosierens, Orientierens und Siebens.

Aufgrund vielfältiger Einsatzmöglichkeiten und Funktionskombinationen ist es in der Vibrationsfördertechnik üblich, die Förderer gezielt für den gewünschten Einsatzzweck zu gestalten. Infolge dessen werden ständig neue Vibrationsförderer konstruiert und anschließend gefertigt. Die komplexe dynamische Funktionsweise mit zahlreichen Wechselwirkungen und Synchronisationseffekten gestaltet die Entwicklungsarbeit als äußerst kompliziert. Aus dem Grund wird in der Industrie oft auf kosten- und zeitaufwändige Testläufe zurückgegriffen. An dieser Stelle soll das Simulationsmodell ansetzen, um die ingenieurtechnische Arbeit zu unterstützen.

2 ENTWICKLUNG UND AUFBAU EINES SIMULATIONSMODELLS

Zum zielgerichteten Aufbau eines Simulationsmodells steht eingangs die Aufgabe zur genauen Analyse der zu lösenden Probleme. Anhand der Problemstellung können anschließend die in der Simulation zu ermittelnden Parameter bestimmt werden. Gleichmaßen kann auf dem Weg eine geeignete Simulationsmethodik ausgewählt werden.

2.1 SPEZIFIZIERUNG DER PROBLEMSTELLUNG

Bei Vibrationsförderern gibt es verschiedene Ursachen für Probleme am Förderer. Eine auf den ersten Blick genaue Detektion der Problemquelle ist jedoch höchst schwierig, weil in der Regel alle unerwünschten Effekte anhand eines gestörten Fördergutstroms festgestellt werden. Da nahezu jedes Vibrationsfördersystem eine fördergutspezifische Konstruktion darstellt, können Problemlösungen nicht eins zu eins auf andere Förderer übertragen werden. Die zur Problemlösung notwendigen Anpassungen müssen für jede Anwendung erneut erfolgen. In der Praxis geschieht dies 100 prozentig mittels der „trial and error“-Methode, wobei letztlich allein das intuitive Know-

how einzelner kompetenter Mitarbeiter zur Funktionsfähigkeit eines Systems führen kann.

Der Fördergutstrom, das heißt hier die Fördergeschwindigkeit und die Kraftwirkungen auf das Fördergut, ist eng an die Bewegungsform des Förderorgans gekoppelt. Um einen effizienten Vibrationsförderprozess sicherzustellen, bedarf es daher einer gezielt abgestimmten Förderbewegung. Je nach gewähltem Förderprinzip sind erschwerner Weise unterschiedliche Bewegungen zum effizienten Fördern anzuwenden. [Ris11] Durch Simulation der Bewegungskurve kann daher das Arbeitsverhalten eines Vibrationsförderaufbaus bewertet werden.

2.2 SIMULATIONSPRINZIP

Zur Realisierung eines Simulationsmodells, welches sich für die Berechnung der Bewegungsform von Vibrationsförderern eignet, wurde die Methodik der Mehrkörpersimulation (MKS) gewählt. Zur Erstellung des MKS-Modells wurde die Software SimulationX genutzt. Das Simulationsprogramm SimulationX bietet über die MKS hinaus die Option zum Abbilden von multiphysikalischen Zusammenhängen. Auf diese Weise kann in der Simulation der komplette Antriebsstrang eines Vibrationsförderers von elektrischen Antriebselementen bis zur mechanischen Schwingbewegung betrachtet werden.

2.3 ABLEITUNG VON MODELLELEMENTEN

Im Bereich der Vibrationsfördertechnik existiert eine große Anzahl an verschiedenen Bauformen von Förderern. Damit beim Aufbau eines Berechnungsmodells nicht für jeden Vibrationsförderer ein komplett neuer Ansatz erstellt werden muss, wurde das Simulationsmodell modular gestaltet. Dazu wurden die Vibrationsförderer zur theoretischen Betrachtung in die wesentlichen Bestandteile zerlegt.

- Förderorgan
- Gegenschwingmassen
- Antriebseinheit
- schwingungsfähige Lagerung

2.3.1 ABBILDUNG DES FÖRDERORGANS

Ein Kernelement von Vibrationsförderern ist das Förderorgan. Je nach Anwendungsfall kann dieses äußerst vielfältige Gestaltungsvarianten aufweisen. Für die Berechnung sind jedoch die mechanischen Kennwerte der Konstruktion relevant, welche sich nur in den Zahlenwerten unterscheiden.

Zur Abbildung der Bewegungsform durch die Simulation mit der Software SimulationX wurde der Fokus auf das Systemverhalten und die Wechselwirkung zwischen einzelnen Fördererelementen gelegt. Bewegungseinflüsse,

welche aus konstruktiven Elementeigenschaften resultieren, werden nicht berücksichtigt. In der Umsetzung heißt dies, dass das Förderorgan als Starrkörper modelliert ist. Wenn für einen Anwender das Verformungsverhalten von Einzelelementen von Interesse ist, wird an dieser Stelle auf die Möglichkeiten beispielsweise einer Modalanalyse mit FE-Software verwiesen.

Indem mit einem Starrkörpermodell gearbeitet wird, kann die Anzahl der notwendigen Eingabeparameter und die Rechenzeit sehr klein gehalten werden. Konkret wird sich zur Abbildung des Förderorgans auf nachstehende Parameter begrenzt.

- Trägheitstensor im Schwerpunkt
- Schwerpunktlage
- Masse

2.3.2 ABBILDUNG VON GEGENSCHWINGMASSEN

Zur softwaretechnischen Abbildung von eventuellen Gegenschwingmassen wird im Rechenmodell vergleichbar zur Abbildung des Förderorgans vorgegangen. Eine zusätzliche Untergliederung gegenüber dem Förderorgan liegt hier dennoch vor, da sich die Anzahl bzw. das Vorhandensein von Bauform zu Bauform unterscheiden.

2.3.3 ABBILDUNG DER FÖRDERERLAGERUNG

Die elastische Abstützung von Vibrationsförderern kann auf verschiedene Weisen umgesetzt werden. Lagerungen durch Schraubenfedern und Lagerungen durch Blattfedern sind hierbei typische Bauformen. Da die zwei genannten Federtypen signifikante Abweichungen im Verhalten besitzen, sind je nach Federtyp unterschiedliche Modellaufbauten anzuwenden.

Schraubenfedern werden klassischer Weise im linearen Kraft-Weg-Bereich, der Hooke'schen Geraden der Federkennlinie eingesetzt. Passend zu dieser Verhaltensweise besitzt SimulationX ein Feder-Dämpfer-Rechenelement. Dieser Modellierungsbaustein ist in der Software zugleich 3-Dimensional ausgeführt, d.h. die elastisch federnde Wirkung kann in alle Raumrichtungen abgebildet werden. Zur Berechnung werden hierbei nachstehende Parameter benötigt.

- Position der Federenden
- Winkellage der Federn
- Steifigkeiten
- Dämpfungswerte
- Länge der unbelasteten Feder

Im Gegensatz zu Schraubenfedern führt der Einsatz des Hooke'schen Gesetzes bei Blattfedern zu ungeeigneten

Simulationsergebnissen. Aus dem Grund wird im Modellbildungsprozess eine Blattfeder als Biegebalken abgebildet. SimulationX bietet die Option elastische Körper zu berechnen. Dabei wird das Modell des Timoschenko-Balkens angewendet. Die Anwendung der Balkentheorie führt zu einer deutlich besseren Abbildung des Federwegs infolge vorhandener Schwingungskräfte. Entsprechender Weise liegt am Ende eine genauere Bewegungssimulation gegenüber der Nutzung des Hooke'schen Gesetzes bei Förderern mit Blattfedern vor. Für die Modellierung eines Biegebalkens unterscheiden sich die Eingabewerte zu denen am Modell der Schraubenfedern, welches einen direkten Berechnungsvergleich erschwert.

- Position der Federenden
- Winkellage der Federn
- Flächenträgheitsmoment (geometrische Maße)
- Masse
- E-Modul
- G-Modul

2.3.4 ABBILDUNG EINER ANTRIEBSEINHEIT

Die modelltechnische Abbildung einer Antriebseinheit an Vibrationsförderern ist eine sehr komplexe Aufgabe. Zunächst haben sich im Segment der Vibrationsförderertechnik drei wesentliche Antriebsformen etabliert, welche klare Unterschiede in ihrem Betriebsverhalten aufweisen [VDI2333].

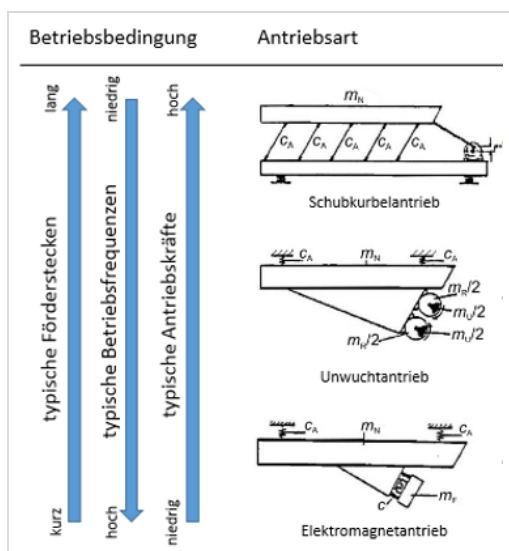


Abbildung 1. Typische Antriebsformen für Vibrationsförderer und Einordnung der Betriebsbedingungen (Antriebsskizzen nach [VDI2333])

Dementsprechend ist es auch hier, genau wie bei der Modellierung der Lagerprinzipien, augenscheinlich sinnvoll verschiedene Modellierungsweisen zu nutzen. Auch

wenn für alle Antriebsprinzipien das Modellierungsziel ein Kraftvektor mit zugehörigem Angriffspunkt ist.

Bei Verwendung von Unwuchtantrieben werden im Normalfall zwei Motoren mit Unwuchtmassen symmetrisch am Förderorgan angebracht. Die nach dem Prinzip eines Asynchronmotors arbeitenden Antriebe erzeugen aufgrund ihrer im Betrieb rotierenden Unwuchtmassen Fliehkräfte. Die Fliehkräfte wirken letztendlich auf das Förderorgan und regen es zum Schwingen an. Bei der simulationstechnischen Abbildung der Antriebe ist besonders darauf zu achten, dass Wechselwirkungen zwischen den Einzelantrieben sowie allen schwingenden Massen erfolgen. Aufgrund der Kraftwechselwirkungen stellt sich bei diesem Antriebprinzip ein Synchronisationszustand ein, gemäß dem die Förderorganschwingung vollzogen wird.

In SimulationX wurde zur Beschreibung eines Unwuchtantriebssystems damit begonnen, eine durch ein Drehgelenk gelagerte exzentrische Masse zu beschreiben. Die somit modellierte Unwucht wird weiterhin mit dem Programmmodul für einen Asynchronmotor verbunden. Die träge Unwuchtmasse erlaubt hier die Rückwirkung von Systemkräften auf den Antrieb und das verwendete Programmmodul gestattet gleichzeitig durch den simulierten Schlupf eine Veränderung der Antriebswirkung. Die hohe Komplexität resultiert hier jedoch in einer Vielzahl an Eingabeparametern.

- Position der Unwuchtantriebe am Förderer
- Betrag der Unwucht
- Nennleistung oder Nennmoment
- Stern- oder Dreiecksschaltung
- Nennspannung
- Anschlussspannung
- Frequenz der Anschlussspannung
- Nenndrehzahl
- Nennfrequenz Netzanschluss
- Relatives Kippmoment

3 AUFBAU UND VERGLEICH MIT EINEM BEISPIELFÖRDERER

Im Vorfeld einer praktischen Anwendung des Simulationsmodells ist dessen Berechnungsgenauigkeit an einem realen Vibrationsförderer zu überprüfen. Zum Zweck des Vergleichs von Rechenmodell und Realität wurde ein Einmassenvibrationsförderer mit Unwuchtantrieb aufgebaut. Der Aufbau erfolgte aus standardisierten Aluminiumstrangprofilen mit Befestigungsnuten. Die Verwendung von Profilelementen erlaubt hierbei mit relativ einfachen

Mitteln, verschiedene geometrische Aufbauten eines Vibrationsfördersystems zu untersuchen.

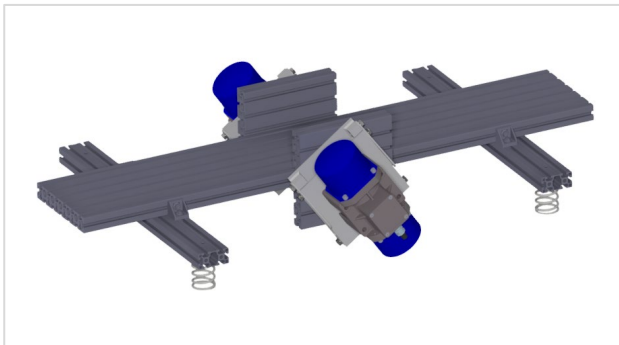


Abbildung 2. CAD-Modell des Testaufbaus zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Messwerten

Die Möglichkeit der variablen Gestaltung führt jedoch auch zu erkennbar überlagerten Störschwingungen höherer Frequenz, da die Profilverbindungen nur eine begrenzte Steifigkeit aufweisen.

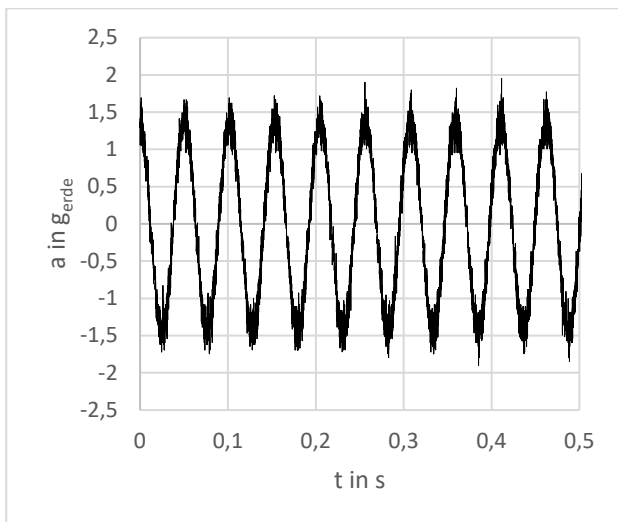


Abbildung 3. Beschleunigungsmesskurve der Vibrationsförderbewegung entlang der x-Achse

Die in der Abbildung 3 dominant vorliegende Grundschwingung entspricht der im Rahmen des Vibrationsförderprozesses zur Nutzung seiner beabsichtigten Beschleunigung. Dieser Beschleunigungsanteil wird gezielt durch die Antriebseinheit generiert.

Das Berechnungsmodell bildet keine Verbindungssteifigkeiten ab. Es werden nur die Beschleunigungsanteile basierend auf dem Antriebsverhalten und den Wechselwirkungen zwischen den durch die Federelemente schwingungsfähig gelagerten Massen betrachtet. Infolge des gewählten Aufbaus ist als Simulationsergebnis die angeregte Grundschwingung zu erwarten.

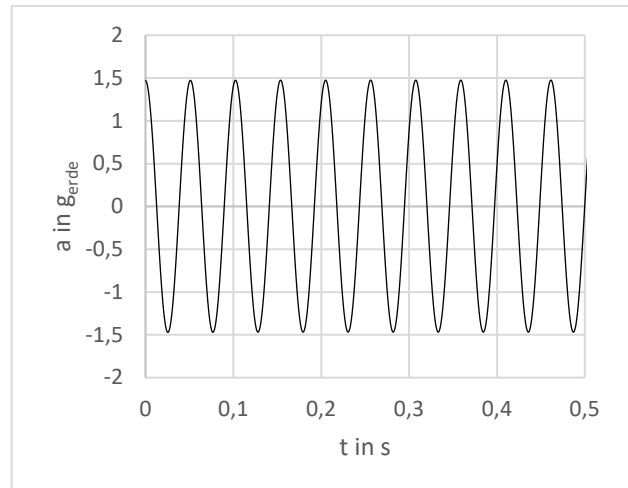


Abbildung 4. Simulationsergebnis für die zuvor gemessene Beschleunigungskurve am Förderorgan entlang der x-Achse

Im gezeigten exemplarischen Vergleich zwischen der Messkurve, Abbildung 3, und der Simulationskurve, Abbildung 4, ist eine gute Übereinstimmung der zwei Kurven feststellbar. Über den präsentierten Vergleich der Beschleunigung hinausgehend wurden weitere Vergleiche zwischen Messwerten und Simulation durchgeführt, welche ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und realem Förderer zeigen.

4 SIMULATION DES FÖRDERVERHALTENS

4.1 PRAKTISCHES FEHLERBILD UND THEORETISCHE ABBILDUNG

Ein typisches Fehlerbild an Vibrationsförderern weist ungleichmäßige Schwingungserregungen des Förderguts entlang des Förderorgans auf. In den Beschleunigungskurven lassen sich dabei deutliche Abweichungen in Betrag und Vektorrichtung erkennen.

Aus mechanischer Sicht liegt in sehr vielen Fällen von Förderproblemen eine schlechte geometrische Ausrichtung der Fördererbestandteile zueinander vor. Dieser trivial anmutende Fehler ist praktisch ein großes Problem, weil Einzelkomponenten wie Unwuchtantriebe nicht ohne weiteres neu positioniert werden können. Aufgrund der hohen dynamischen Kräfte werden die Motoren an besonders steifen Schweißkonstruktionselementen montiert.

Durch den Einsatz der Simulationsmöglichkeiten können hier bereits im Konstruktionsprozess Probleme erkannt werden.

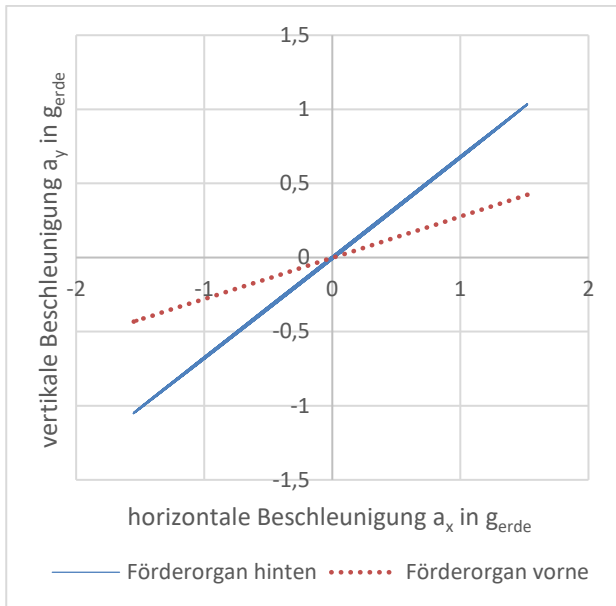


Abbildung 5. 2D-Bewegungskurven bei unterschiedlichem Förderverhalten entlang des Förderorgans infolge einer geometrischen Fehlpositionierung

Die Simulation zeigt, dass bereits ein horizontaler Versatz von 3 cm des Punktes der Antriebskrafteinleitung, berechnet für den Förderer des Testaufbaus, zu einer signifikanten Veränderung der Förderbewegung führt. Simuliert wurde die Förderbewegung an zwei Messstellen mit einem Abstand von 500 mm in positive bzw. die negative Koordinatenrichtung der x-Achse. Im Idealfall liegen die Messkurven der Bewegungsform aufeinander, damit entsprechender Weise das Fördergut auf dem gesamten Förderorgan die gleiche Anregung erfährt.

4.2 FEHLERURSACHEN UND AUSWIRKUNGEN

Das in Abbildung 5 gezeigte Schwingungsverhalten ist ein typisches Fehlerbild an Vibrationsförderern. Bereits geringe Lageabweichungen von SOLL und IST Positionen der Fördererkomponenten führen zu deutlichen Förderproblemen. Erschwerend ist hierbei zusätzlich, dass sich Schwingungsabweichungen mit zunehmenden Schwerpunktabstand und damit auch dem Abstand zu den Trägheitsachsen verstärken.

Eine Berechnung der theoretisch erreichbaren Fördergeschwindigkeiten angeregt durch die in Abbildung 5 dargestellten Bewegungen zeigt, dass sich die Fördergeschwindigkeit im hier gezeigten Beispiel auf dem Weg vom hinteren zum vorderen Messpunkt, gemäß der Berechnungsweise nach [Ris11], mehr als halbiert.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells ist es möglich, die Förderbewegung von Vibrationsförderern bereits in der Entwicklungsphase zu überprüfen. Genauso

können mit den Daten bestehender Förderer Probleme identifiziert werden, um im Anschluss den Förderprozess zu verbessern. Beide Anwendungsoptionen können im Einsatz zu kosten- und zeiteffizienteren Prozessen bei der Arbeit mit Vibrationsförderern führen.

Im Bereich der Forschung sind bereits Berechnungsansätze, wie in [Dal17] und [HRD14] beschrieben, bekannt. Hier kann das SimulationX Modell die bestehenden Berechnungsmöglichkeiten ergänzen sowie vergleichend eingesetzt werden.

Aktuell ist die Anwendung des erstellten SimulationX Simulationsmodells auf den Einsatz an unwuchtbetriebenen Vibrationsförderern begrenzt. In weiteren Entwicklungsbestrebungen soll die Funktionsfähigkeit auch auf die zwei weiteren typischen Antriebmethode, die Schubkurbelantriebe und die Elektromagnetantriebe, ausgedehnt werden.

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 ZF4018637WO7 ein.

LITERATUR

- [Dal17] Dallinger, Niels: *Die Diskrete Elemente Methode als Simulationmethode in der Vibrationsfördertechnik*. Dissertationsschrift, Professur Fördertechnik, TU Chemnitz 2017
- [HRD14] Himmelreich, Niels; Risch, Thomas; Dallinger, Niels: *Berechnungsmodell zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Vibrationsförderers*, Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2014
- [Ris11] Risch, Thomas: *Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsfördertechnik*. Dissertationsschrift, Professur Fördertechnik, TU Chemnitz 2011
- [VDI2333] VDI 2333 Schwingförderer für Schüttgut, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2017.

Dr.-Ing. Niels Dallinger, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Telefon: +49 371 531-39436, Fax: +49 371 531-839436, E-Mail: niels.dallinger@mb.tu-chemnitz.de

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 Intralogistik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Telefon: +49 371 531-23110, Fax: +49 371 531-823110, E-Mail: markus.golder@mb.tu-chemnitz.de

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 Vibrationsfördertechnik und Systemdynamik am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Telefon: +49 371 531-35166, Fax: +49 371 531-835166, E-Mail: thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de