

Analyse des Materialtransports auf Vibrationsflächenförderern für das vibrationsbasierte Blechhandling

Analysis of material conveyance on vibratory brush conveyors for vibration-based sheet metal handling

Elisabeth Müller
Thomas Risch
Markus Golder

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

Vibrationsflächenförderer sind eine effiziente Alternative für automatisiertes Blechhandling mit geringem materiellen und technischen Aufwand. Geneigte, vertikal vibrierende Faseroberflächen ermöglichen flexible Transportwege bei gleichzeitiger Funktionsintegration. Die Wirkzusammenhänge sind für den Praxiseinsatz jedoch nicht hinreichend bekannt. In diesem Beitrag wird der Förderprozess auf einem Vibrationsflächenförderer analysiert. Die Ergebnisse erlauben die Charakterisierung der Bewegungsphasen und Abhängigkeiten der Fördergeschwindigkeit. Darüber hinaus wird die Effizienz der Förderbewegung betrachtet.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, Elastische Faser, Bewegungsanalyse, Fördergeschwindigkeit, Effizienz]

Vibratory brush conveyors are an efficient alternative for automated sheet handling with low material and technical expenditure. Inclined, vertically vibrating fibre surfaces enable flexible transport routes with integrated functionality. However, the interrelationships are not sufficiently known for practical use. In this paper, the conveying process on a vibratory brush conveyor is analysed. The results enable characterisation of motion sequences and dependencies of the conveying speed. Furthermore, the conveying efficiency is considered.

[Keywords: vibration conveyor, elastic fibre, motion analysis, conveying speed, efficiency]

1 EINLEITUNG

In der Blechbearbeitung müssen Blechtafeln bzw. -teile zwischen den Bearbeitungsmaschinen transportiert, ausgerichtet, orientiert, sortiert und übergeben werden. Im Zuge der Entwicklung hin zu vollautomatisierten Bearbeitungszentren gewinnt das automatisierte Blechhandling

zunehmend an Bedeutung. In der Regel werden hierfür überwiegend herkömmliche Fördermittel und Handhabungseinrichtungen, wie z. B. Förderbänder, Vakuumsauger und Greifelemente genutzt. Eine Alternative zum effizienten, oberflächenschonenden und flexiblen Werkstücktransport bei gleichzeitiger Reduzierung des Bauraumbedarfs und der Werkstückabhängigkeit ist das vibrationsbasierte Blechtafelhandling. Vibrationsflächenförderer, welche aufliegendes Fördergut durch die periodische Durchbiegung geneigter Fasern infolge rein vertikaler Vibration in nahezu beliebig wählbarer Förderrichtung transportieren, können auch weitere Handhabungsaufgaben wie Teileausrichtung, -orientierung oder -übergabe realisieren. Die Praxistauglichkeit dieses Konzepts für größere Stückgüter wurde bereits bestätigt [1, 2].

Vibrationsflächenförderer sind bisher nur in einigen wenigen wissenschaftlichen Untersuchungen dokumentiert. In den 1970er und 1980er Jahren wurde der Förderprozess erstmals experimentell untersucht und modelliert. Die entwickelten Modelle sind allerdings nur für entgegen der Förderrichtung geneigte Fasern [3] bzw. Förderorgane mit horizontalen Vibrationsanteilen [4] anwendbar. Die gerichtete Reibcharakteristik geneigter Faseroberflächen wurde auch zur Erzielung höherer Fördergeschwindigkeiten bei Gleitförderung [5] genutzt. Neuere experimentelle Untersuchungen [6] liefern ein besseres Verständnis für die Funktionsweise rein vertikal vibrierender, beborsteter Oberflächen. Hinsichtlich des Wirkprinzips, praxisrelevanter Stellgrößen sowie der Systemauslegung von Vibrationsflächenförderern besteht allerdings noch umfangreicher Forschungsbedarf.

Verwandte Untersuchungen im Bereich der Robotik befassen sich seit 1999, verstärkt jedoch in den letzten 15 Jahren, mit der vibrationsbasierten Fortbewegung auf geneigten elastischen Körpern an der Roboter Oberfläche. So wurden Bewegungsmodelle entwickelt [7, 8] und der Ein-

fluss der Systemparameter auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit untersucht [9–12]. Die Raumfahrtforschung erkannte das Potential dieses Bewegungsprinzips, in Abhängigkeit der Schwerkraftwirkung und Antriebsparameter verschiedene Fortbewegungsmodi zu realisieren und so gezielt die Bewegungsart und -geschwindigkeit zu beeinflussen [13–16]. Die Erkenntnisse sind allerdings nur in begrenztem Umfang auf den Förderprozess am Vibrationsflächenförderer übertragbar.

Ziel dieses Beitrags ist die Charakterisierung des Förderprozesses am Vibrationsflächenförderer als Grundlage für die spätere Entwicklung eines erweiterten Bewegungsmodells. Die Fördergutbewegung und Faserverformung sowie die Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit von Vibrationsfrequenz, Flächenlast und Fasersteifigkeit werden im Versuch analysiert. Die Ergebnisse ermöglichen die eindeutige Beschreibung der Bewegungsphasen, die Identifikation praktikabler Stellgrößen für die Transportgeschwindigkeit sowie eine Effizienzbetrachtung.

2 AUFBAU DES VIBRATIONSFLÄCHENFÖRDERERS

Der Grundaufbau und die Funktionsweise des Vibrationsflächenförderers sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Das Förderorgan (1) mit der elastischen, im Winkel δ in Förderrichtung geneigten Faseroberfläche (2) ist schwingfähig gelagert (3) und wird durch Kräfteerregung eines Vibrationsantriebs (4) in vertikale Schwingung versetzt. Die Faseroberfläche verformt sich infolge der vertikalen Aufwärtsschwingung des Förderorgans unter der Belastung des Förderguts (5). Diese Faserdurchbiegung führt zu einem Vorschub Δx des Förderguts in Transportrichtung.

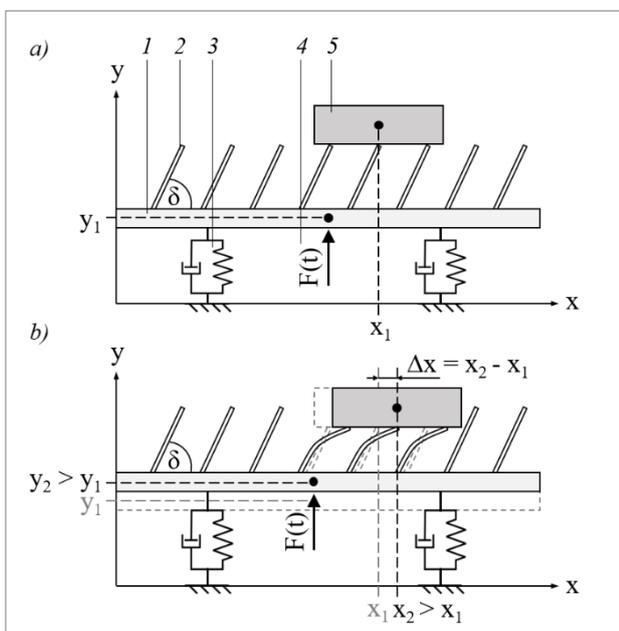


Abbildung 1. Vibrationsflächenförderer; a) Fasern unverformt; b) Fasern verformt

Bei Abwärtsschwingung des Förderorgans kehren die Fasern in ihre unverformte Ausgangslage zurück. Das Fördergut trifft in der nächsten Schwingperiode auf unverformte Fasern und der Prozess beginnt erneut. Durch die periodische Wiederholung entsprechend der Grundschwingung des Förderorgans entsteht eine makroskopisch kontinuierliche Transportbewegung. Am Prototyp besteht die Faseroberfläche aus sechsstufigen Bürstenplatten einer Breite von $B = 100$ mm und einer Gesamtförderlänge von $L = 500$ mm (vgl. Abbildung 2).

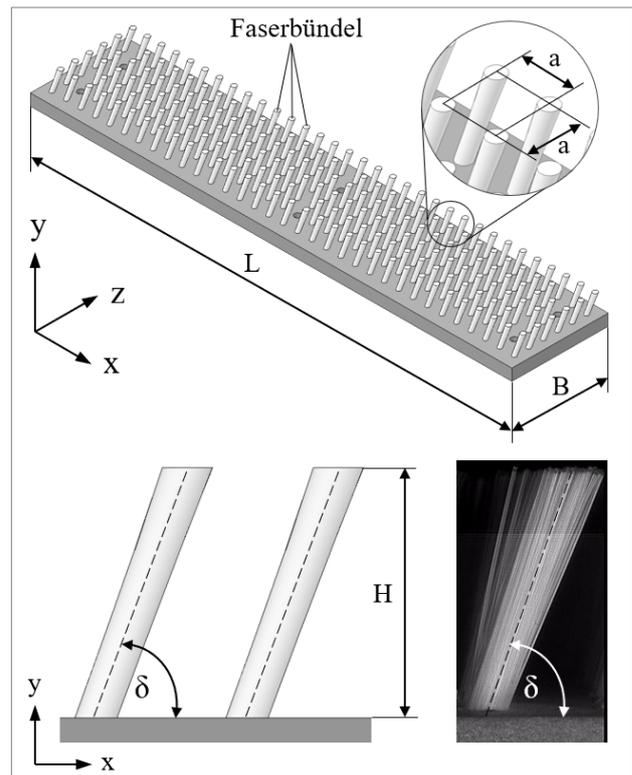


Abbildung 2. Geometrie der Faseroberfläche

Die einzelnen Faserbündel ($H = 25$ mm) sind um $\delta = 70^\circ$ zur Horizontalen geneigt und befinden sich in horizontalem Abstand von $a = 15$ mm zueinander. Die vertikale Antriebsschwingung wird durch zwei synchronisierte Unwuchtmotoren realisiert.

3 CHARAKTERISIERUNG DER FASEROBERFLÄCHE

Am Prototyp sind vier verschiedenen Bürstenmodule unterschiedlicher Fasermaterialien und -durchmesser im Einsatz: Polyamid-6-Fasern (PA6) mit Faserdurchmesser 0,3 mm, 0,4 mm und 0,5 mm sowie Polyesterfasern (PBT) mit Faserdurchmesser 0,35 mm (vgl. Tabelle 1). Mit Druckversuchen an einer Universalprüfmaschine wird die Steifigkeit der Bürstenmodule bestimmt. Hierfür verfährt ein glatter, quadratischer Prüfstempel mit Wegvorgabe in negativer vertikaler Richtung entgegen einer Matrix aus 6×8 Faserbündeln des eingespannten Bürstenmoduls.

Aus dem aufgezeichneten Kraftverlauf ist erkennbar, dass das Verhalten der vier Bürstenmodule im Bereich der im Betrieb auftretenden Faserverformung von etwa 1 mm bis 1,5 mm in vertikaler Richtung nahezu linear ist. Ab einer Faserdeformation von etwa 1,5 mm ist im Kraft-Weg-Diagramm ein deutlich geringerer Kraftanstieg, d. h. ein Steifigkeitsverlust, erkennbar. Die Fasersteifigkeit für ein einzelnes Faserbündel wird daher nur für den praxisrelevanten Bereich der Faserverformung bis 1,5 mm linear approximiert. Für die vier Bürstenmodule ergeben sich entsprechend Tabelle 1 Fasersteifigkeiten zwischen 0,3 N/mm und 0,7 N/mm je Faserbündel. Bei gleichbleibendem Fasermaterial ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Fasersteifigkeit und Faserdurchmesser erkennbar.

Tabelle 1. *Fasereigenschaften der Bürstenmodule*

| Bürstenmodul | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| Fasermaterial | PA6 | PA6 | PA6 | PBT |
| Faserdurchmesser in mm | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,35 |
| Steifigkeit je Faserbündel in N/mm* | 0,51 | 0,32 | 0,66 | 0,32 |

* bis 1,5 mm maximale Stauchung

Im Betrieb sind die Fasern und das Fördergut jedoch nicht in horizontaler Richtung zueinander fixiert. Durch die vertikale Faserverformung resultiert ebenso eine horizontale Wegkomponente, um die sich das Fördergut in Förderrichtung bewegt. Dadurch reduzieren sich die Wirkung von Knickung und Reibung im Kontakt Faser-Fördergut und die Wirkung der Biegekraft nimmt zu. Um dieses Verhalten zu untersuchen, werden die Bürstenmodule im zweiten Schritt bei in y-Richtung beweglicher Konfiguration zwischen Faseroberfläche und Prüfstempel untersucht. Die Fasersteifigkeit reduziert sich im Mittel um 30 Prozent im Vergleich zur Festlagerung der Bürstenmodule.

4 ANALYSE DES FÖRDERPROZESSES

Am Vibrationsflächenförderer gibt es zahlreiche Parameter, die die Förderbewegung und insbesondere die Fördergeschwindigkeit beeinflussen. In Voruntersuchungen wurden insbesondere die Fördergutmasse und die Antriebsfrequenz als bedeutende Einflussfaktoren identifiziert. Zur Untersuchung des Förderprozesses werden daher auf jeder der vier Faseroberflächen jeweils drei verschiedene Probekörper bei unterschiedlichen Antriebsfrequenzen transportiert und die resultierende Förderbewegung aufgezeichnet. Als Probekörper dienen flache Rechtecke aus Edelstahl (70 x 120 x 8 mm, m = 527 g, Ra = 0,7 µm) und Aluminium (70 x 140 x 10 mm, m = 265 g, Ra = 0,4 µm) sowie eine Scheibe aus Baustahl (D = 70 mm, h = 5 mm, m = 151 g, Ra = 0,6 µm). Die resultierende Flächenlast liegt im Bereich zwischen 265 Pa und 615 Pa.

Die kleinste untersuchte Antriebsfrequenz wurde so bestimmt, dass auf der Förderorganoberfläche gerade eine Beschleunigung von 1g überwunden und für alle Probekörper eine stetige Förderbewegung erzielt wird. Dies entspricht einer Vibrationsfrequenz des Förderorgans von rund 17,5 Hz bei einer vertikalen Amplitude von im Mittel 0,6 mm. Die zweite Frequenz liegt bei rund 22,5 Hz, was einer vertikalen Beschleunigung von rund 1,6 g entspricht.

Mittels Beschleunigungsmesstechnik werden die vertikale Beschleunigung von Förderorgan und Probekörper sowie die horizontale Beschleunigung des Probekörpers in Förderrichtung im Bereich stetiger Gutförderung aufgezeichnet. Bereits während der Messungen mit verschiedenen Antriebsfrequenzen, Faserparametern und Probekörpern sind über alle Versuche qualitativ nahezu gleiche Beschleunigungsverläufe auffällig. Gleichzeitig dienen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Dokumentation des Fördervorgangs, insbesondere der Faserverformung.

Um möglichst umfangreiche Erkenntnisse aus den Messdaten abzuleiten, wird eine skriptbasierte, kombinierte Auswertung der Beschleunigungsmessungen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mittels der Entwicklungssoftware MATLAB® durchgeführt. Hierfür werden zunächst die Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten von Förderorgan und Fördergut mit Hilfe von Algorithmen zur Videoauswertung extrahiert. Zur Detektion der Faserverformung kommt ein speziell entwickelter, benutzerdefinierter Algorithmus zum Einsatz. Die gewonnenen Daten werden im Anschluss mit den Daten der Beschleunigungsmessungen synchronisiert, sodass eine ganzheitliche Beschreibung des Zusammenspiels aus Förderorganschwingung, Faserverformung und Gutbewegung ermöglicht wird.

Die Auswertung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Bewegungsverläufe aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Beschleunigungsmessungen. Ein quantitativer Unterschied zwischen den Daten zeigt sich wie erwartet im Weg- und Geschwindigkeitsverlauf des Probekörpers in Förderrichtung. Die Videoauswertung gibt die tatsächliche Bewegung des Probekörpers in Förderrichtung aus, welche mit der Beschleunigungssensorik nicht messbar ist. Qualitativ ist dennoch eine gute Übereinstimmung erkennbar.

4.1 BEWEGUNGSPHASEN

Basierend auf den ermittelten Bewegungsverläufen aus der kombinierten Versuchsauswertung sowie einer optischen Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde bei stabiler Fördergutbewegung eine Abfolge von sechs charakteristischen Förderschritten und Bewegungsphasen identifiziert. Die Beschreibung erfolgt anhand Abbildung 3 am Beispiel der Bewegung der Edelstahlplatte (70 x 120 x 8 mm, m = 527 g, Ra = 0,7 µm, p = 615 Pa) auf dem ersten Bürstenmodul (vgl. Tabelle 1). Bei einer Vibrationsfrequenz von 17,9 Hz und einer Förderorganamplitude von rund 0,5 mm wird mit dieser Konfiguration eine

mittlere Fördergeschwindigkeit von 11,6 cm/s erzielt. Die Bewegungsphasen wiederholen sich periodisch entsprechend der Förderorganschwingung. Die Charakterisierung beginnt ausgehend vom unteren Umkehrpunkt des Förderorgans.

4.1.1 FÖRDERORGAN AM UNTEREN UMKEHRPUNKT

Am unteren Umkehrpunkt des Förderorgans (vgl. Abbildung 3, Nr. 1) befindet sich das Fördergut in Kontakt mit den Fasern und die Faserverformung ist zunehmend. Das Fördergut erfährt durch Umkehr der Bewegungsrichtung einen Beschleunigungspeak in y-Richtung. Im konkreten Beispiel beträgt dieser im Mittel rund 3g. Ebenso ist ein Beschleunigungsmaximum des Förderguts in x-Richtung erkennbar, welches sich mit dem starken Anstieg der Faserverformung unter der Last des Förderguts und gleichzeitig der Umkehr der Bewegungsrichtung erklären lässt.

4.1.2 AUFWÄRTSSCHWINGUNG DES FÖRDERORGANS

Während der folgenden Aufwärtsbewegung des Förderorgans liegt das Fördergut zunächst auf den Fasern auf und die Faserverformung ist weiter zunehmend. Der Förderweg steigt in dieser Phase dementsprechend proportional zur Faserverformung an.

Das Fördergut bewegt sich mit maximaler Fördergeschwindigkeit, im Beispiel rund 12 cm/s, bis das Fördergut die Haftreibung überwindet und beginnt, in Förderrichtung auf den Fasern abzugleiten (vgl. Abbildung 3, Nr. 2). Die wirkende Gleitreibung äußert sich in der sich anschließenden Bewegungsphase in einer negativen Fördergutbeschleunigung in x-Richtung und demzufolge einer abnehmenden Fördergeschwindigkeit.

Dieser Effekt ist nach Erreichen der maximalen Faserverformung (vgl. Abbildung 3, Nr. 3) noch leicht verstärkt, da die Faserdurchbiegung in der Folgephase abnimmt und sich die Faserspitzen an der Fördergutunterseite entgegen der Förderrichtung bewegen.

4.1.3 FÖRDERORGAN AM OBEREN UMKEHRPUNKT

Am oberen Umkehrpunkt des Förderorgans (vgl. Abbildung 3, Nr. 4) hat das Fördergut seine minimale Fördergeschwindigkeit, im Beispiel rund 8 cm/s, erreicht. Zu diesem Zeitpunkt hebt es von der Faseroberfläche ab, was im Beschleunigungsverlauf der vertikalen Gutbeschleunigung von $-1g$ und der horizontalen Gutbeschleunigung von Null ersichtlich wird. Die Faserverformung ist weiterhin abnehmend.

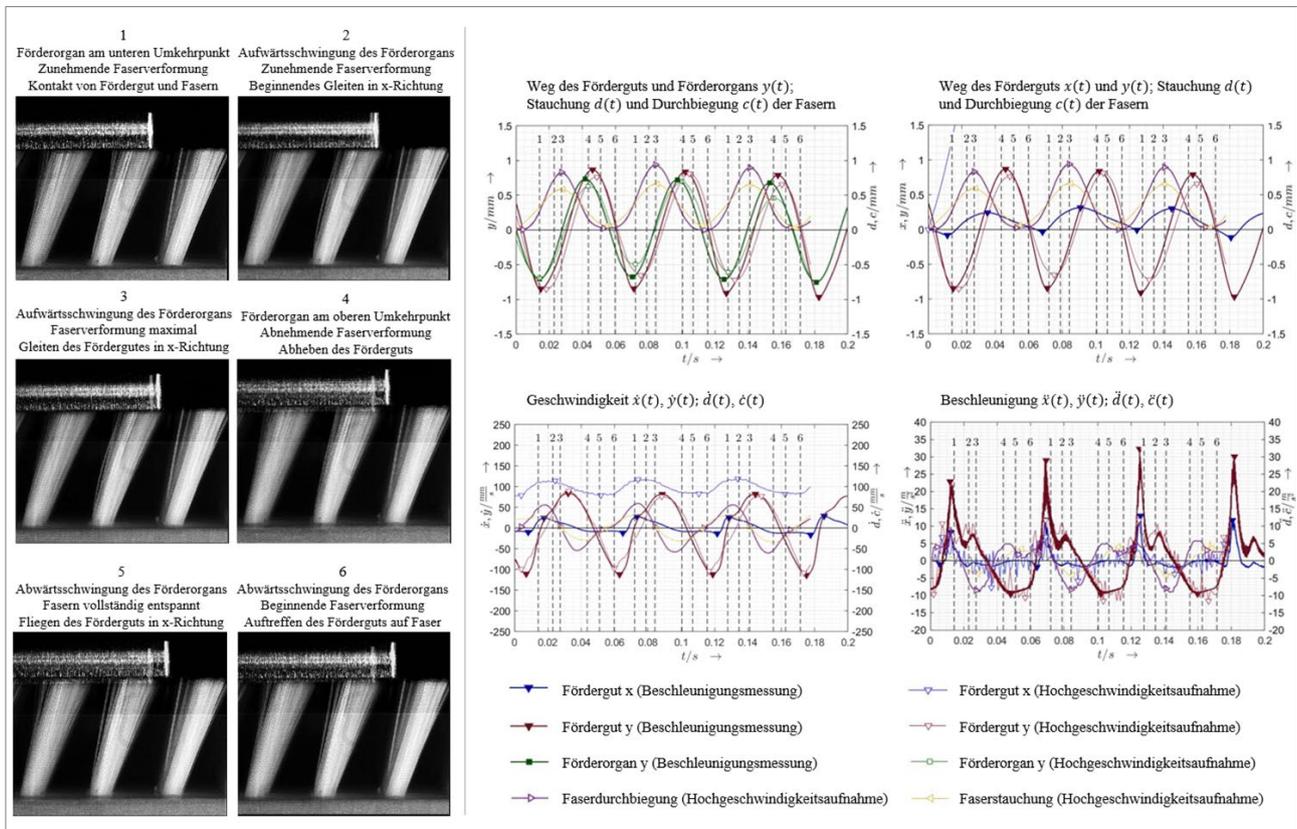


Abbildung 3. Bewegungsphasen am Vibrationsflächenförderer – Beispielkonfiguration: Edelstahlplatte auf Bürstenmodul 1 bei einer Vibrationsfrequenz von 17,9 Hz

4.1.4 ABWÄRTSSCHWINGUNG DES FÖRDERORGANS

Während der Flugphase des Förderguts bei Abwärtschwingung des Förderorgans kommt es zur vollständigen Entspannung der Faseroberfläche (vgl. Abbildung 3, Nr. 5). Die Flugphase endet, sobald das Fördergut wieder auf die unverformte Faseroberfläche auftrifft (vgl. Abbildung 3, Nr. 6). Im Beschleunigungsverlauf ist zu diesem Zeitpunkt zum einen eine beginnende Zunahme der Vertikalbeschleunigung des Förderguts zu erkennen. Zum anderen zeigt sich in x-Richtung durch die Bremswirkung beim Auftreffen zunächst eine negative Beschleunigung. In der folgenden Bewegungsphase ist die Faserverformung zunehmend. Ein Anstieg der Beschleunigung des Förderguts in Förderrichtung führt zur Zunahme der Fördergeschwindigkeit, bis das Förderorgan wieder am unteren Umkehrpunkt angelangt ist (vgl. Abbildung 3, Nr. 1) und der Prozess erneut beginnt. Die vertikale Fördergutamplitude beträgt im Mittel 0,7 mm und ist damit um 0,2 mm größer als die Förderorganamplitude, was aus dem Wurf und der Faserverformung resultiert.

Bei zunehmender Schwingungsfrequenz des Förderorgans, d. h. auch zunehmender vertikaler Beschleunigung von Förderorgan und Fördergut, verlängert sich die Flugphase des Förderguts. Dies kann bewirken, dass das Fördergut erst im unteren Umkehrpunkt des Förderorgans oder bei dessen Aufwärtsbewegung wieder auf die Faseroberfläche auftrifft und sich Förderschnitt 6 und 1 überlagern bzw. überschneiden. Dies wirkt sich auf die weiteren Phasen nur insofern aus, dass das Fördergut ggf. im unteren Umkehrpunkt noch nicht auf den Fasern aufliegt und die Fasern zu diesem Zeitpunkt noch unverformt sind.

4.2 FÖRDERGESCHWINDIGKEIT

Im Versuch wurden bei stabiler Fördergutbewegung je nach Konfiguration aus Bürstenmodul, Probekörper und Antriebsfrequenz mittlere Fördergeschwindigkeiten zwischen 1,5 cm/s und 40 cm/s erzielt. Die kombinierte Auswertung zeigt, dass zwischen der Fördergeschwindigkeit und der Flächenlast des Förderguts sowie der Vibrationsfrequenz des Förderorgans und der Fasersteifigkeit der Bürstenmodule Abhängigkeiten bestehen. Die folgende Charakterisierung der Zusammenhänge bezieht sich auf den untersuchten Parameterbereich. Außerhalb dieses Bereichs sind Grenzwerte zu vermuten.

4.2.1 EINFLUSS DER FLÄCHENLAST

Der Zusammenhang zwischen der Flächenlast des Förderguts, d. h. der Fördergutmasse bezogen auf die Grundfläche des Förderguts, und der Fördergeschwindigkeit ist in Abbildung 4 dargestellt. Für alle vier Bürstenmodule ist im untersuchten Bereich eine nahezu lineare Zunahme der Fördergeschwindigkeit mit der Flächenlast erkennbar. Bei Verdopplung der Flächenlast wird in etwa die zwei- bis dreifache Fördergeschwindigkeit erreicht.

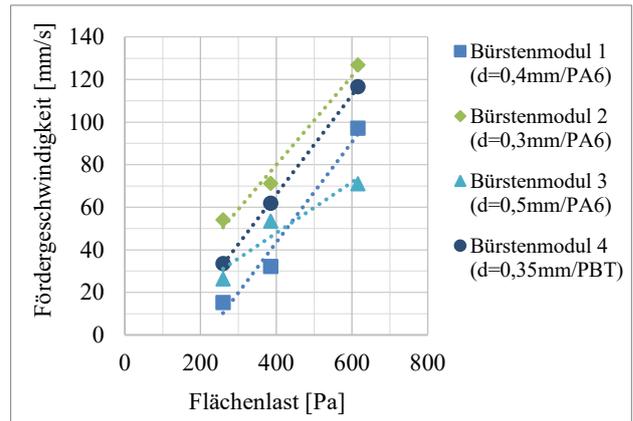


Abbildung 4. Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Flächenlast bei einer Vibrationsfrequenz von 17,5 Hz

Ursächlich für die Änderung der Fördergeschwindigkeit mit der Flächenlast ist die Faserverformung. Mit steigender Flächenlast nimmt auch die Verformung der Faseroberfläche zu. Dadurch wird zum einen der Förderweg in der Kontaktphase zwischen Fördergut und Faseroberfläche erhöht, zum anderen steigt bei gleichbleibender Grundschwingung auch die Gutbeschleunigung in Förderrichtung.

4.2.2 EINFLUSS DER VIBRATIONSFREQUENZ

Mit zunehmender Vibrationsfrequenz des Förderorgans ist über alle Versuche eine signifikante Zunahme der Fördergeschwindigkeit erkennbar (vgl. Abbildung 5). Je nach Bürstenmodul äußert sich dieser Anstieg in unterschiedlicher Ausprägung, liegt im untersuchten Bereich aber zwischen 30- und 60-prozentiger Steigerung bei Erhöhung um 1 Hz.

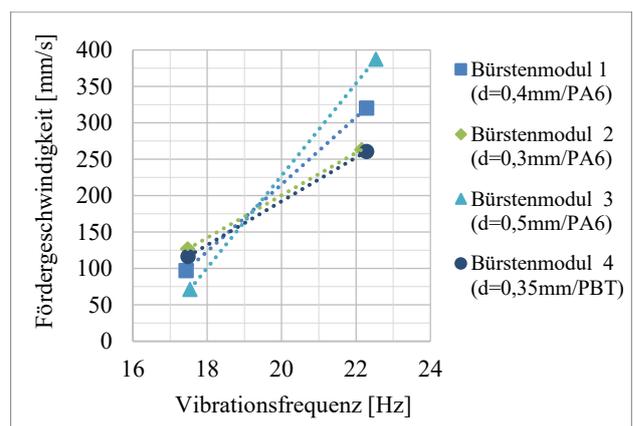


Abbildung 5. Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Vibrationsfrequenz bei einer Flächenlast von 615 Pa

Bei kontinuierlicher Erhöhung der Vibrationsfrequenz ist ein Übergang im Bewegungsmodus des Förderguts von überwiegend kriechender Fortbewegung auf den verformten Fasern bei kleineren Frequenzen zu überwiegend hüpfender Fortbewegung bei geringerer Faserverformung und größeren Frequenzen erkennbar.

Die erhöhte Fördergeschwindigkeit bei der größeren Förderorganfrequenz von 22,5 Hz resultiert hauptsächlich aus dieser überwiegend hüpfenden Transportbewegung. Die erhöhte Beschleunigung des Förderorgans in vertikaler Richtung in Kombination mit der Trägheit der Faseroberfläche führen zu einer größeren vertikalen Fördergutbeschleunigung und demzufolge einer verlängerten Flugphase und geringeren Reibungsverlusten in Förderrichtung

4.2.3 EINFLUSS DER FASERSTEIFIGKEIT

Die Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit von der Fasersteifigkeit wird anhand der drei Bürstenmodule gleichen Fasermaterials betrachtet. Mit zunehmender Fasersteifigkeit ist zunächst für alle untersuchten Flächenlasten eine deutlich abnehmende Fördergeschwindigkeit zu verzeichnen (vgl. Abbildung 6). Der vorherrschenden Bewegungsmodus des Förderguts in diesem Bereich ist das Kriechen auf der Faseroberfläche. Je steifer die Fasern sind, desto geringer verformen sie sich bei gleicher Belastung. Das Fördergut legt in der Kontaktphase zur Faseroberfläche dementsprechend einen kleineren Weg in Förderrichtung zurück und auch die Gutbeschleunigung in Förderrichtung ist geringer.

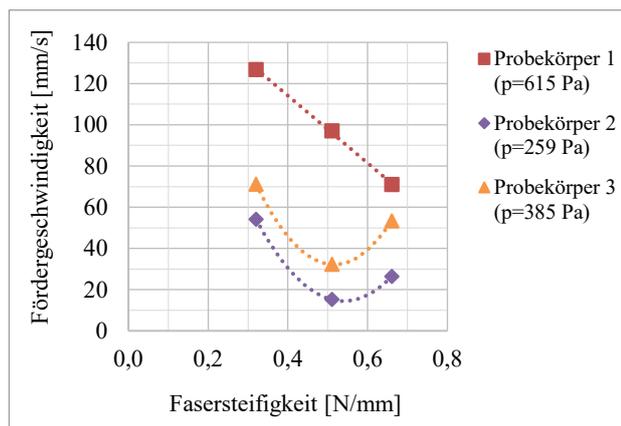


Abbildung 6. Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fasersteifigkeit bei einer Vibrationsfrequenz von 17,5 Hz auf dem Fasermaterial PA6

Ab einer Fasersteifigkeit von rund 0,5 N/mm nimmt die Fördergeschwindigkeit bei den beiden kleineren Flächenlasten wieder zu. Entscheidend für dieses Verhalten ist das Verhältnis von Flächenlast zu Fasersteifigkeit. Ab einem bestimmten Grenzwert wechselt die Fördergutbewegung von überwiegend kriechender Fortbewegung bei größerer Faserverformung zu überwiegend hüpfender Fortbewegung bei kleinerer Faserverformung. Je größer die Fasersteifigkeit im Verhältnis zu Flächenlast, desto stärker wird das Fördergut durch die Rückstellkraft der Fasern in vertikaler Richtung beschleunigt. Die Flugphase verlängert sich, was einerseits direkt den Förderweg je Schwingperiode vergrößert und andererseits durch die verkürzte Kontaktphase Reibungsverluste minimiert.

4.3 EFFIZIENZ

Um eine Förderbewegung zu erzeugen, ist bei Vibrationsförderern ein gewisser Bewegungsraum des Förderorgans in horizontaler und/ oder vertikaler Richtung erforderlich. Bei Integration von Vibrationsförderern in komplexere Fördersysteme und Produktionsanlagen ist dieser Bewegungsraum allerdings maßgeblich für den notwendigen Bauraum und damit für die Spaltbreite an den Übergabestellen zu vorangehenden bzw. nachfolgenden Fördereinrichtungen oder Bearbeitungsmaschinen. Zur Gewährleistung einer sicheren Förderbewegung mit fehlerfreier Teileübergabe muss die Breite des Übergabespalts und damit der Bewegungsraum des Förderorgans im Betriebspunkt möglichst klein sein. Gleichzeitig soll im Allgemeinen eine hohe Fördergeschwindigkeit erzielt werden.

Zum Vergleich unterschiedlicher Förderertypen hinsichtlich dieses Kriteriums wurde die Kenngröße der Effizienz E von Vibrationsförderern eingeführt [17]. Diese beschreibt die erforderliche Ausdehnung der Förderorganbewegung \hat{x} bzw. \hat{y} bei Betriebsfrequenz f_B im Vergleich zur erzielbaren Fördergutgeschwindigkeit v_F . Je nach vorgegebenen Bewegungsgrenzen des Förderorgans wird die Effizienz eindimensional in x-Richtung E_x oder y-Richtung E_y bzw. zweidimensional in x- und y-Richtung $E_{x/y}$ angegeben:

$$E_x = \frac{|v_F|}{4f_B\hat{x}} \quad (4.1)$$

$$E_y = \frac{|v_F|}{4f_B\hat{y}} \quad (4.2)$$

$$E_{x/y} = \frac{|v_F|}{4f_B\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}} \quad (4.3)$$

Bei der Förderorganschwingung mit einer Vibrationsfrequenz f_B von 17,5 Hz wird im Versuch die höchste Fördergeschwindigkeit v_F von rund 127 mm/s bei kleinster Fasersteifigkeit erreicht. Das Fördergut bewegt sich überwiegend im Kriechmodus. Die Schwingungsamplitude in vertikaler Richtung beträgt im Mittel 0,55 mm. Eine Schwingungsamplitude in horizontaler Richtung ist prinzipbedingt nicht vorhanden. Bei Vibrationsflächenförderern ist zur Bestimmung der Bewegungsausdehnung neben der Förderorganschwingung auch die Verformung der Faseroberfläche zu berücksichtigen. Die absolute Faserstauung in negativer y-Richtung beträgt im beschriebenen Fall 1 mm. Dies entspricht einer vertikalen Amplitude von 0,5 mm, welche der Förderorganamplitude entgegenwirkt. Die Bewegungsausdehnung in y-Richtung \hat{y} ergibt sich somit zu 0,05 mm. In x-Richtung tritt eine absolute Faserverformung von 1,8 mm auf, d. h. eine Verformungsamplitude von 0,9 mm. Diese entspricht der Bewegungsausdehnung in x-Richtung \hat{x} .

Entsprechend Formel 4.1 bis 4.3 ergeben sich die folgenden Effizienzen E_x , E_y und $E_{x/y}$:

$$E_x = 2,0$$

$$E_y = 36,3$$

$$E_{x/y} = 2,0$$

Analog kann diese Berechnung auch für die höhere Betriebsfrequenz f_B von 22,5 Hz durchgeführt werden. Die maximale Fördergeschwindigkeit v_F von 387 mm/s wird in diesem Fall auf dem Bürstenmodul größter Fasersteifigkeit erreicht, wenn sich das Fördergut überwiegend hüpfend in Förderrichtung bewegt. Die mittlere vertikale Schwingungsamplitude beträgt 0,7 mm, die vertikale bzw. horizontale Verformung der Fasern 0,5 mm bzw. 1,2 mm. Dementsprechend ergibt sich die vertikale Ausdehnung der Förderorganbewegung \hat{y} zu 0,45 mm, die horizontale Ausdehnung \hat{x} zu 0,6 mm. In diesem Betriebspunkt werden folgende Effizienzen E_x , E_y und $E_{x/y}$ erzielt:

$$E_x = 7,2$$

$$E_y = 9,6$$

$$E_{x/y} = 5,7$$

Sowohl bei überwiegend kriechender als auch bei überwiegend hüpfender Fortbewegung des Förderguts werden auf dem Prototyp bereits ohne Optimierung der Förderorganbewegung hohe Effizienzwerte erzielt. Im Kriechmodus ergibt sich eine besonders hohe Effizienz in vertikaler Richtung, jedoch ist auch die Effizienz in Förderrichtung im Vergleich zu klassischen Vibrationsförderern erhöht. Bei überwiegend hüpfender Fortbewegung des Förderguts ist nochmals eine deutliche Steigerung der x-Effizienz bei gleichzeitig hoher y-Effizienz zu erkennen.

4.4 FAZIT

Die Analyse des Förderprozesses am Vibrationsflächenförderer ergibt, dass die Faserverformung sich maßgeblich auf die Fördergutbewegung und damit auch die Fördergeschwindigkeit auswirkt. Zum einen hat sie direkten Einfluss auf den zurückgelegten Förderweg, während das Fördergut auf den Fasern haftet. Dies ist insbesondere im Bewegungsmodus des Kriechens bei kleinerer Vibrationsfrequenz bzw. geringerer Fasersteifigkeit entscheidend. Zum anderen beeinflusst sie über die Gutbeschleunigung in x- und y-Richtung die Dauer der Gleit- und Flugphase des Förderguts und dementsprechend auch die resultierende Transportgeschwindigkeit. Der zurückgelegte Weg in der Flugphase wirkt sich besonders im Bereich überwiegend hüpfender Fortbewegung auf die resultierende Fördergeschwindigkeit aus.

Bei konstanter Vibrationsfrequenz und Fasersteifigkeit zeigt sich außerdem eine entscheidende Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit von der Flächenlast des Förderguts. Ohne externe Anpassung werden verschiedene Fördergüter auf einem Vibrationsflächenförderer mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten transportiert. Sowohl die Vibrationsfrequenz als auch die Fasersteifigkeit sind mögliche Stellgrößen, um die Fördergeschwindigkeit zu beeinflussen. Zur Kompensation des Lasteinflusses scheint jedoch die externe Frequenzstellung am praktikabelsten. Um eine annähernd gleiche Fördergeschwindigkeit zu erzielen, müssten leichtere Teile bei höheren Vibrationsfrequenzen, schwerere Teile bei kleineren Vibrationsfrequenzen gefördert werden. Ein zuverlässiges Fördern mit konstanten Faserparametern ist durch Anpassung der Fasereigenschaften an den Lastbereich möglich. Hierfür ist das Verhältnis aus Flächenlast des Förderguts und Fasersteifigkeit der Förderorganoberfläche entscheidend. Je nach gewünschtem Bewegungsmodus und Teilespektrum ist ein Betriebsbereich festzulegen. Der Prototyp weist bereits ohne Parameteroptimierung sehr gute eindimensionale und zweidimensionale Effizienzen auf. Insbesondere die im Verhältnis zu Vibrationsförderern ohne Faseroberfläche hohe Effizienz in Förderrichtung ist ein großer Vorteil von Vibrationsflächenförderern.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag untersucht den Förderprozess am Vibrationsflächenförderer, um grundlegende Erkenntnisse zur Entwicklung eines erweiterten Bewegungsmodells zu gewinnen. Der Fokus liegt hierbei auf der Identifikation der einzelnen Bewegungsschritte und -phasen der Förderbewegung sowie auf der Charakterisierung von Einflüssen auf die Fördergeschwindigkeit. Außerdem wird die Effizienz der Förderbewegung betrachtet.

Das Förderorgan des Prototyps besitzt eine um 20° zur Vertikalen in Förderrichtung geneigte Faseroberfläche und wird mit einer vertikalen Antriebsschwingung angeregt. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Faserparameter kommen vier verschiedene Bürstenmodule zum Einsatz, deren Fasersteifigkeit mit Druckversuchen ermittelt wird. Weiterhin erfolgt eine Variation der Antriebsfrequenz. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Beschleunigungsmessungen dienen zur Aufzeichnung der resultierenden Förderbewegung von drei verschiedenen Probekörpern. Mittels kombinierter Auswertung der Versuchsergebnisse wird eine ganzheitliche Beschreibung des Wirkprinzips ermöglicht.

Im Bereich stetiger Gutförderung sind in allen Versuchsreihen sechs charakteristische Förderschritte und Bewegungsphasen erkennbar. Je nach Parametrierung des Förderprozesses können jedoch Überlagerungen bzw. Verschiebungen der Einzelschritte auftreten.

Die Faserverformung in den Kontaktphasen zwischen Fördergut und Förderorgan ist entscheidend für die Fördergutbewegung und die resultierende Fördergeschwindigkeit. Zur adäquaten Beschreibung des Förderprozesses ist dementsprechend ein Berechnungsmodell erforderlich, welches die Faserverformung berücksichtigt. Die Fördergeschwindigkeit zeigt eine starke Abhängigkeit von der Flächenlast des Förderguts. Eine praktikable Stellgröße zur Kompensation des Lasteinflusses ist die Vibrationsfrequenz des Förderorgans. Eine zuverlässige Förderbewegung mit konstanten Faserparametern wird durch Anpassung der Fasereigenschaften an den Lastbereich erreicht.

Zukünftige Forschungsaufgabe ist die Modellierung des Förderprozesses am Vibrationsflächenförderer unter Berücksichtigung der Faserverformung anhand der Ergebnisse im untersuchten Betriebsbereich. Das Modell kann beispielsweise für die ressourcenschonende Untersuchung weiterer Parametrierungen des Förderers, wie anderer Vibrationsfrequenzen, Fasersteifigkeiten und Faserneigungswinkel, genutzt werden. Weiterhin wird die Vorausberechnung der Fördergeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Faserverformung ermöglicht. Dies dient wiederum zur Festlegung der Werte für Stellgrößen. Ebenso können anhand des Modells Parameteroptimierungen durchgeführt werden.

LITERATUR

- [1] E. Müller, T. Risch und M. Golder, *Experimentelle Untersuchung vibrationsbasierter Ausrichtkonzepte für Rohblechtafeln*. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-785583>. Zugriff am: 6. April 2022.
- [2] E. Müller, T. Risch und M. Golder, *Simulative Untersuchung vibrationsbasierter Ausrichtkonzepte für Rohblechtafeln*. Chemnitz. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-762328>. Zugriff am: 26. Januar 2022.
- [3] W. Mansour, M. Massoud, W. Morcos und C. Lauzier, „The Mechanism of Conveyance With Bristled Tracks“, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Jg. 97, Nr. 1, S. 167–174, 1975, doi: 10.1115/1.3438532.
- [4] S. Okabe und Y. Yokoyama, „Study of a Vibratory Feeder with Repulsive Surface Which Has Directional Characteristic“, *ASME Journal of Mechanical Design*, Jg. 102, Nr. 1, S. 94–101, 1980, doi: 10.1115/1.3254726.
- [5] S. Okabe, Y. Yokoyama und G. Boothroyd, „Analysis of vibratory feeding where the track has directional friction characteristics“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 3, Nr. 4, S. 73–85, 1988, doi: 10.1007/BF02601835.
- [6] G. Fantoni und M. Santochi, „Development and testing of a brush feeder“, *CIRP Annals*, Jg. 59, Nr. 1, S. 17–20, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.049.
- [7] A. K. Eigoli und G. Vossoughi, „Dynamic Modeling of Stick-Slip Motion in a Legged, Piezoelectric Driven Microrobot“, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Jg. 7, Nr. 3, S. 21, 2010, doi: 10.5772/9704.
- [8] A. DeSimone und A. Tatone, „Crawling motility through the analysis of model locomotors: Two case studies“, *The European Physical Journal E*, Jg. 35, Nr. 9, S. 1–8, 2012, doi: 10.1140/epje/i2012-12085-x.
- [9] K. Ioi, „A Mobile Micro-Robot using Centrifugal Forces“, *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on*, S. 736–741, 1999. [Online]. Verfügbar unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.596.715&rep=rep1&type=pdf>
- [10] K. Isaki, A. Niitsuma, M. Konyo, F. Takemura und S. Tadokoro, „Development of an Active Flexible Cable by Ciliary Vibration Drive for Scope Camera“, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, doi: 10.1109/IROS.2006.281829.
- [11] M. Konyo, K. Isaki, K. Hatazaki, S. Tadokoro und F. Takemura, „Ciliary vibration drive mechanism for active scope cameras“, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Jg. 20, Nr. 3, S. 490–499, 2008, doi: 10.20965/jrm.2008.p0490.
- [12] Becker, Felix, Börner, Simon, Lysenko, Victor, Zeidis, Igor, Zimmermann, Klaus, „On the Mechanics of Bristle-Bots - Modeling, Simulation and Experiments“, *Proceedings of the 41st International Symposium on Robotics*, S. 1–8, 2014.
- [13] K. Nagaoka, R. Takano, T. Izumo und K. Yoshida, „Ciliary Micro-Hopping Locomotion of an Asteroid Exploration Robot“, *Proceedings of the 11th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.mech.kyutech.ac.jp/srl/papers/2012isairas_knaga.pdf
- [14] K. Nagaoka und K. Yoshida, „Modeling and analysis of ciliary micro-hopping locomotion actuated by an eccentric motor in a microgravity“, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, S. 763–768, 2013, doi: 10.1109/IROS.2013.6696437.
- [15] K. Nagaoka, K. Watanabe, T. Kaneko und K. Yoshida, „Mobility Performance of Ciliary Locomotion for an Asteroid Exploration Robot under Various Experimental Conditions“, *Proceedings of the 13th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2016/Session5a/S-5a-2-KenjiNagaoka.pdf>

- [16] K. Nagaoka, T. Kaneko und K. Yoshida, „Bimodal mobility actuated by inertial forces with surface elastic bodies in microgravity“, *Robotica*, S. 1–22, 2021, doi: 10.1017/S0263574721000539.
- [17] T. Risch, „Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsfördertechnik“. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2011.

Dipl.-Ing. Elisabeth Müller, Doktorandin an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz mit dem Forschungsschwerpunkt Vibrationsfördertechnik.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Telefon: +49 35951 8-1335, E-Mail: elisabeth.mueller@s2021.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Thomas Risch, Leiter der Forschungsgruppe Vibrationsfördertechnik und Systemdynamik der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU 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

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Inhaber der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz, promovierte an der Universität Karlsruhe im Jahr 2004 und war anschließend sowohl selbstständig als auch in leitenden Positionen in verschiedenen Unternehmen tätig.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Telefon: +49 371 531-36902, Fax: +49 371 531-836902, E-Mail: markus.golder@mb.tu-chemnitz.de