

Dimensionsloses Prozessmodell der Gutbewegung auf Vibrationsförderern mit gerichteten elastischen Förderoberflächen

Thomas Risch
Elisabeth Müller
Markus Golder

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

Gerichtete elastische Förderoberflächen beeinflussen die Gutbewegung auf Vibrationsförderern durch die Orientierung und die elastischen Eigenschaften der Oberflächenstruktur. Dadurch entstehen zusätzliche Auslegungsparameter für Förderprozesse sowie neue Anforderungen an deren Beschreibung und Auslegung. Der Beitrag ordnet die wirkmechanischen Besonderheiten dieser Systeme ein und stellt ein dimensionsloses Prozessmodell der Gutbewegung auf vibrierenden gerichteten elastischen Elementen vor. Die Anwendbarkeit des Modells wird anhand experimenteller Untersuchungen und erweiterter Förderbedingungen bewertet.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, Elastische Förderoberflächen, Materialbewegung, Prozessmodell, Auslegung]

Directed elastic conveying surfaces influence particle motion in vibration conveyors through the orientation and elastic properties of the surface structure. This introduces additional design parameters for conveying processes as well as new challenges for their description and design. The paper discusses the mechanical characteristics of these systems and presents a dimensionless process model for particle motion on vibrating directed elastic elements. The applicability of the model is evaluated based on experimental investigations and extended conveying conditions.

[Keywords: vibration conveyor, elastic conveying surfaces, particle motion, process model, design methodology]

1 EINLEITUNG

Vibrationsförderer zählen zu den etablierten Stetigförderern der Fördertechnik und werden aufgrund ihrer Robustheit, Zuverlässigkeit und vielseitigen Einsetzbarkeit in zahlreichen industriellen Anwendungen zur Förderung von Schütt- und Stückgütern eingesetzt [1], [2]. Die Förderwirkung beruht auf periodischen Schwingungsbewegungen des Förderorgans, durch welche das Fördergut in

eine gerichtete Bewegung versetzt wird. Die mittlere Fördergeschwindigkeit stellt dabei eine zentrale Kenngröße für die Beschreibung und Auslegung des Förderprozesses dar. Bereits frühe Arbeiten beschrieben Vibrationsförderer mit geneigten Borsten- bzw. Faserstrukturen, bei denen die Förderbewegung nicht ausschließlich durch die Bewegungsform des Förderorgans bestimmt wird. Stattdessen tragen die elastischen Eigenschaften und die Orientierung der Oberflächenstruktur wesentlich zur Bewegungsübertragung auf das Fördergut bei. Mansour et al. modellierten die Borsten als elastische Federstrukturen und zeigten, dass bereits eine Anregung senkrecht zur Förderfläche zur Erzeugung einer gerichteten Förderbewegung genutzt werden kann [3]. Okabe und Yokoyama untersuchten Vibrationsförderer mit richtungscharakteristischen Oberflächen und zeigten theoretisch sowie experimentell den Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Förderverhalten [4]. Neben dem eigentlichen Fördervorgang eröffnet die Oberflächengestaltung zusätzliche Möglichkeiten zur Beeinflussung des Materialflusses. Mead beschrieb bereits Anfang der 1970er Jahre unterschiedliche Anordnungen geneigter Borstenstrukturen zur Förderung, Führung, Ausrichtung und Sortierung von Fördergütern [5]. Neuere Arbeiten zeigen darüber hinaus das Potenzial elastischer Bürstenoberflächen für Positionier-, Orientier- und Ausrichtaufgaben sowie die gezielte Gestaltung von Materialflüssen durch unterschiedlich orientierte Oberflächenbereiche [6].

Die zusätzlichen Einflussgrößen gerichteter elastischer Förderoberflächen führen jedoch gleichzeitig zu einer erhöhten Komplexität der zugrunde liegenden Wechselwirkungen zwischen Fördergut, Förderoberfläche und Schwingungsanregung. In bisherigen Arbeiten wurden die Wirkmechanik des Förderprozesses, die Deformation elastischer Faseroberflächen sowie erste mechanische Modelle zur Beschreibung der Gutbewegung untersucht [7]–[9]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die elastische Oberflächenreaktion einen wesentlichen Einfluss auf die Förderbewegung besitzt und somit neben den Anregungsparametern

weitere Größen, wie die Eigenschaften der Förderoberfläche, zur Bestimmung der mittleren Fördergeschwindigkeit berücksichtigt werden müssen. Die Überführung dieser Erkenntnisse in ein allgemein anwendbares Prozessmodell zur systematischen Beschreibung unterschiedlicher Förderbedingungen stellt weiterhin eine offene Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund ordnet der vorliegende Beitrag gerichtete elastische Förderoberflächen zunächst hinsichtlich ihrer wirkmechanischen Besonderheiten, der daraus resultierenden Anforderungen an die Modellbildung sowie ihrer Potenziale für die Auslegung von Vibrationsförderern ein. Aufbauend darauf wird eine dimensionslose Prozessbeschreibung der Gutbewegung auf vibrierenden gerichteten elastischen Elementen vorgestellt und hinsichtlich der Anwendbarkeit für unterschiedliche Förderbedingungen untersucht.

2 GERICHTETE ELASTISCHE FÖRDEROBERFLÄCHEN

Gerichtete elastische Förderoberflächen beeinflussen die Fördergutbewegung durch die Orientierung und die elastischen Eigenschaften der Oberflächenstruktur. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen zwischen Fördergut, Förderoberfläche und Schwingungsanregung unterscheiden sich grundlegend von den Wirkzusammenhängen konventioneller Vibrationsförderer und führen zu zusätzlichen Anforderungen an deren Beschreibung und Auslegung. Im Folgenden werden die wirkmechanischen Besonderheiten dieser Systeme sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für Modellbildung und Auslegung diskutiert.

2.1 WIRKMECHANISCHE BESONDERHEITEN

Bei klassischen Vibrationsförderern resultiert die Gutbewegung aus der periodischen Bewegung des Förderorgans. Abhängig von der Bewegungsform und den wirkenden Beschleunigungen erfolgt der Materialtransport nach

dem Wurf- oder Gleitprinzip. Die Bewegungsbahn des Förderorgans bestimmt dabei sowohl die auf das Fördergut übertragenen Beschleunigungen als auch die resultierende Förderrichtung [1], [2]. Gerichtete elastische Förderoberflächen erweitern diese Wirkmechanik wie in Abbildung 1 dargestellt um die reversible Deformation elastischer Elemente. Die geneigten Oberflächenstrukturen verformen sich unter der Belastung des Förderguts und erzeugen dabei eine Bewegungskomponente in Richtung ihrer Orientierung (Mikroschubprinzip). Eine gerichtete Förderbewegung ist so auch bei einer ausschließlich senkrecht zur Förderfläche verlaufenden Schwingungsanregung möglich [3]. Die Förderrichtung ergibt sich dann nicht aus einer horizontalen Bewegungskomponente des Förderorgans, sondern allein aus der richtungsabhängigen Reaktion der elastischen Oberfläche. Neben der Schwingungsanregung bestimmen somit auch die Orientierung und die mechanischen Eigenschaften der Oberflächenstruktur die Bewegungsübertragung auf das Fördergut [3], [4].

Die Materialbewegung umfasst Kontakt- und Wurfphasen, deren zeitliche Abfolge vom Zusammenwirken der Gutbelastung, der Oberflächensteifigkeit und der Schwingungsanregung abhängt [7]. Während des Kontakts verformt das Fördergut die elastische Oberfläche. Die daraus resultierende Oberflächenreaktion beschleunigt das Gut in Förderrichtung und erzeugt einen deformationsbedingten Vorschub. Bei ausreichender vertikaler Beschleunigung löst sich das Fördergut anschließend von der Oberfläche und setzt seine Bewegung während der Wurfphase fort. Die gerichtete Materialbewegung entsteht somit aus dem periodischen Wechsel zwischen der elastischen Bewegungsübertragung im Kontakt und der anschließenden Gutbewegung ohne Oberflächenkontakt [7], [9]. In Abhängigkeit des Zusammenspiels von Gutbelastung, Oberflächensteifigkeit und Schwingungsanregung treten dabei primär kriechende oder hüpfende Materialbewegungen auf [7].

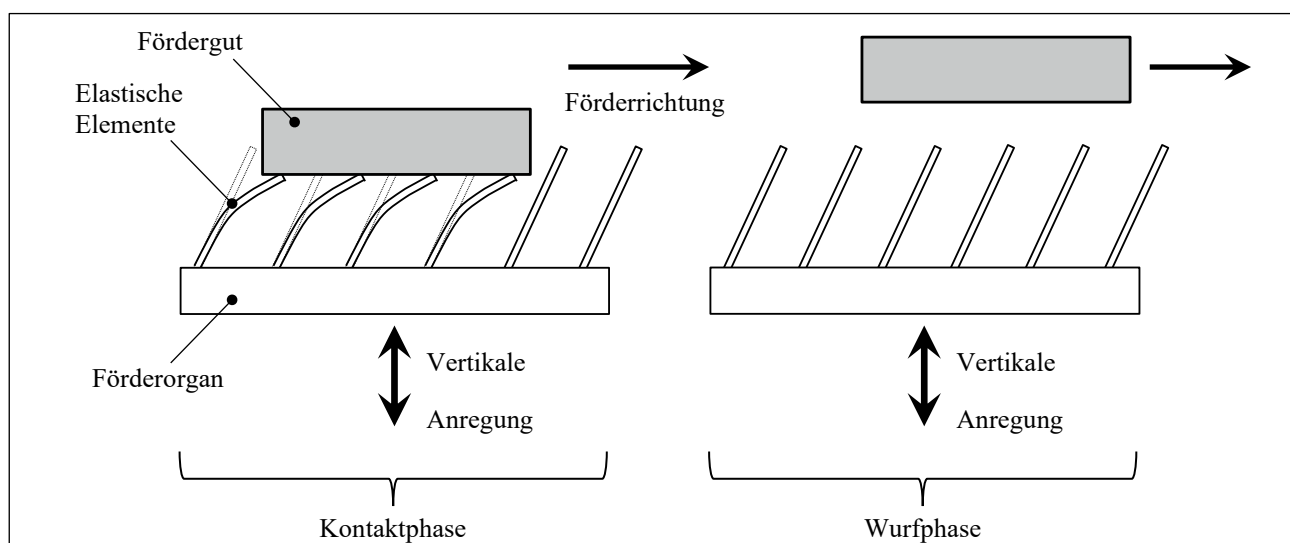


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Gutbewegung auf einer gerichteten elastischen Förderoberfläche während der Kontaktphase (Mikroschub) und Wurfphase

Die gerichtete elastische Förderoberfläche ist damit nicht ausschließlich Kontakt- und Reibfläche, sondern ein mechanisch wirksamer Bestandteil des Förderprozesses. Ihre Deformation beeinflusst sowohl die Bewegungsübertragung während des Kontakts als auch die Anfangsbedingungen der nachfolgenden Wurfphase. Eine Beschreibung der Gutbewegung muss daher die dynamische Wechselwirkung zwischen Fördergut, Förderoberfläche und Schwingungsanregung berücksichtigen.

2.2 HERAUSFORDERUNGEN DER MODELLBILDUNG

Etablierte Berechnungsansätze der Vibrationsfördertechnik beschreiben die Gutbewegung überwiegend auf Grundlage der Bewegungsform des Förderorgans sowie der zwischen Fördergut und Förderorgan wirkenden Reibungs-, Trägheits- und Kontaktkräfte. Die VDI-Richtlinie 2333 ermöglicht die Berechnung der Fördergeschwindigkeit für die Mikrowurfförderung unter definierten Annahmen zur harmonischen Schwingungsbewegung des Förderorgans [1]. Weiterführende Modelle berücksichtigen zusätzlich Gleitphasen, komplexere Bewegungsformen und unterschiedliche Neigungen des Förderorgans [2]. Die Förderoberfläche wird dabei üblicherweise als geometrisch unveränderliche Kontaktfläche betrachtet. Diese Annahme ist auf gerichtete elastische Förderoberflächen nicht unmittelbar übertragbar. Die momentane Kontaktfläche ergibt sich aus der Überlagerung der Förderorganbewegung mit der belastungsabhängigen Deformation der elastischen Elemente. Dadurch verändern sich während des Förderprozesses die Kontaktposition, die Bewegungsrichtung der Oberfläche und die auf das Fördergut übertragenen Kräfte. Zusätzlich weist die Oberfläche aufgrund ihrer Orientierung richtungsabhängige mechanische Eigenschaften auf [7], [8].

Frühe Modellansätze berücksichtigen die Deformation geneigter elastischer Elemente anhand idealisierter Einzелеlemente. Mansour et al. beschreiben die Borsten als Biegefedern und leiten daraus die Bewegung der Oberflächenstruktur sowie die auf das Fördergut wirkenden Kräfte ab [3]. Das Modell differenziert zwischen Kontakt-, Gleit- und Wurfbereichen und verdeutlicht grundsätzlich die Bedeutung der Oberflächenelastizität. Okabe und Yokoyama untersuchen dagegen vorrangig die richtungsabhängige Rückstoßwirkung einer Borstenoberfläche und leiten daraus Bedingungen für die Förderbewegung ab [4]. Beide Ansätze idealisieren die reale Förderoberfläche durch einzelne elastische Elemente und bilden die Wechselwirkungen innerhalb eines Verbunds nicht vollständig ab. Die mechanischen Eigenschaften einer realen Förderoberfläche ergeben sich jedoch nicht allein aus der Geometrie und dem Werkstoff einzelner Elemente. Kontakte und Relativbewegungen innerhalb der Oberfläche beeinflussen deren Gesamtsteifigkeit und führen zu einem von Einzellelementen abweichenden Deformationsverhalten [8].

Für die Modellbildung ist daher eine effektive Beschreibung der gesamten belasteten Oberflächenstruktur erforderlich. Die Oberfläche kann hierzu als deformationsabhängiges Feder-Dämpfer-System abstrahiert werden, dessen mechanische Eigenschaften sowohl von der aktuellen Deformation als auch von der Bewegungsrichtung des Förderguts abhängen [8], [9]. Zusätzlich muss das Modell die Übergänge zwischen Kontakt- und Wurfphase konsistent erfassen. Die Oberflächenreaktion wirkt nur während des Kontakts, bestimmt jedoch über die Ablösegeschwindigkeit zugleich die anschließende Wurfbewegung. Beim erneuten Auftreffen gehen die Geschwindigkeiten von Fördergut und Oberfläche wiederum in die Anfangsbedingungen der folgenden Kontaktpphase ein. Die Fördergutbewegung entsteht damit aus einer Folge gekoppelter Bewegungszustände, deren Übergänge unmittelbar in die Prozessbeschreibung einzubeziehen sind [7], [9]. Zur Beschreibung dieser Zusammenhänge wurde bereits ein mechanisches Minimalmodell vorgestellt, welches die Kontakt- und Wurfbereiche des Förderprozesses sowie die nichtlineare Reaktion der elastischen Förderoberfläche berücksichtigt [9]. Die dimensionsbehaftete Modellbeschreibung ist jedoch an eine Vielzahl konkreter Gut-, Oberflächen-, Förderorgan- und Betriebsparameter gebunden. Für den Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen und die systematische Untersuchung erweiterter Förderbedingungen ist daher eine übertragbare Beschreibung der maßgeblichen Parameterinteraktionen erforderlich.

2.3 POTENZIALE FÜR DIE AUSLEGUNG

Die Auslegung klassischer Vibrationsförderer konzentriert sich im Wesentlichen auf die Förderorganbewegung, die Antriebs- und Lagerungsparameter sowie die Eigenschaften des Förderguts [1], [2]. Bei gerichteten elastischen Förderoberflächen kommen die Orientierung, Geometrie und Steifigkeit der Oberflächenstruktur als weitere Auslegungsparameter hinzu [3], [4]. Diese Größen beeinflussen die Richtung und das Ausmaß der Deformation und damit unmittelbar die auf das Fördergut übertragene Bewegung. Durch eine gezielte Orientierung der Oberflächenstruktur lässt sich die Förderrichtung unabhängig von einer horizontalen Schwingungskomponente des Förderorgans festlegen. Unterschiedlich orientierte Oberflächenbereiche ermöglichen darüber hinaus die räumliche Beeinflussung der Transportbahn. In der Literatur werden unter anderem Anordnungen zur Förderung, Führung, Ausrichtung, Sortierung, Verteilung und Gruppierung von Fördergütern beschrieben [5]. Experimentelle Untersuchungen an Bürstenförderern bestätigen zudem die Eignung gerichteter elastischer Oberflächen für Positionier-, Orientier- und Ausrichtaufgaben [6]. Die Gestaltung der Förderoberfläche ermöglicht damit die Integration zusätzlicher Funktionen in den Förderprozess, ohne dass deren Wirkprinzip ausschließlich durch eine Änderung der Schwingungsanregung erzeugt werden muss.

Die Oberflächensteifigkeit bestimmt gemeinsam mit der Gutbelastung das Ausmaß der Deformation und damit die Bewegungsübertragung auf das Fördergut. Eine zu geringe Deformation begrenzt den deformationsbedingten Vorschub, während eine sehr nachgiebige Oberfläche ihre Trag- und Rückstellfunktion nur eingeschränkt erfüllen kann. Die Abstimmung von Belastung und Oberflächensteifigkeit bildet deshalb eine wesentliche Voraussetzung für eine gerichtete und kontinuierliche Materialbewegung [7], [8]. Die Schwingungsanregung stellt eine zusätzliche Stellgröße dar, mit der sich die vertikale Kraftwirkung, die Ausbildung von Kontakt- und Wurfphasen sowie die mittlere Fördergeschwindigkeit beeinflussen lassen [7]. Die Auslegung von Vibrationsförderern mit gerichteten elastischen Förderoberflächen erfordert somit keine isolierte Optimierung einzelner Parameter, sondern eine abgestimmte Betrachtung von Fördergut, Förderoberfläche, Förderorgan und Schwingungsanregung. Unterschiedliche Förderaufgaben können durch verschiedene Parameterkombinationen realisiert werden. Gleichzeitig erschwert die gegenseitige Abhängigkeit der Einflussgrößen die direkte Ableitung allgemeiner Dimensionierungsregeln.

3 DIMENSIONSLOSES PROZESSMODELL

Für die systematische Analyse und Auslegung von Vibrationsförderern mit gerichteten elastischen Förderoberflächen ist die Berücksichtigung einer Vielzahl gekoppelter Einflussgrößen erforderlich. Eine dimensionslose Prozessbeschreibung bietet die Möglichkeit, diese Wechselwirkungen unabhängig von den absoluten Größen einer einzelnen Referenzkonfiguration zu untersuchen. Sie bildet damit die Grundlage für den Vergleich unterschiedlicher System- und Betriebsbedingungen sowie die Identifikation geeigneter Parameterkombinationen. Im Folgenden wird das bestehende mechanische Minimalmodell in eine dimensionslose Form überführt und hinsichtlich seiner Anwendbarkeit auf unterschiedliche Förderbedingungen untersucht. Ziel ist es, den Prozess physikalisch rudimentär aufzulösen und die Interaktion eines Gutes mit einer periodisch bewegten Kontaktfläche unter Schwerkraft bei Anwesenheit von Reibung und in Abhängigkeit der Steifigkeit des Kontaktes zu analysieren. Dies entspricht einem digitalen Prozesszwilling.

3.1 MODELLBILDUNG UND DIMENSIONSLOSE FORMULIERUNG

Bisherige Ansätze zur Modellierung des Mikroschubprinzips erwiesen sich häufig als unzureichend oder zu stark vereinfacht, um die komplexe Wirkmechanik vollständig abzubilden. Während begrenzte experimentelle Daten zwar erste Indikationen für funktionale Zusammenhänge liefern – etwa, dass die Fördergeschwindigkeit mit zunehmender Masse, Rauheit, Frequenz und Faserneigung tendenziell ansteigt –, fehlte bislang oft die Überführbarkeit in eine systematische und allgemeingültige Theorie.

Das nachfolgende dimensionslose Prozessmodell schließt diese Lücke, indem es die Parameterinteraktionen generalisiert darstellt und die zugrunde liegende Kinematik und Kontaktmechanik physikalisch auflöst. Dem Vorgehen liegt eine bewusste methodische Setzung zugrunde. Die Kontaktmechanik zwischen Fördergut und Faserverbund ist in ihrer Gesamtheit weder geschlossen beschreibbar noch messtechnisch vollständig zugänglich: Zahl und Verformungszustand der tragenden Fasern ändern sich fortwährend, und die Kontaktzeiten liegen im Bereich weniger Millisekunden. Statt diese Komplexität vollständig abzubilden, wird sie hier auf einen Prozess abgebildet, der in einen stationären Zustand mündet. Maßgeblich ist nicht die momentane Kraftverteilung im Elementbündel, sondern die über eine Erregerperiode geschlossene Impulsbilanz, aus der sich eine konstante mittlere Fördergeschwindigkeit einstellt. Die verbleibenden Freiwerte des Modells – Reibwerte, Dämpfung und Formfaktoren – werden anschließend an realen Beobachtungen aus dem Experiment ausgerichtet. Das Modell ist damit weder eine geschlossene Herleitung aus Erstprinzipien noch eine reine Anpassung an Messdaten, sondern eine physikalisch strukturierte Beschreibung, deren Parameter experimentell verankert sind.

3.2 KINEMATIK UND ERREGUNG

Der mechanische Energieeintrag in das System erfolgt primär über eine vertikale Fußanregung der Basis (Förderorgan), die optional durch eine horizontale Komponente überlagert wird. Beide Komponenten werden in die dimensionslosen Amplitudenkennzahlen K_q und K_s überführt, die von den Beschleunigungskennzahlen Γ_v und Γ_h abhängen:

$$K_q = \frac{\Gamma_v}{\eta^2} \quad K_s = \frac{\Gamma_h}{\eta^2} \quad (1)$$

Diese entsprechen den klassischen Wurfkennzahlen und sind konsequent als Vielfaches der Erdbeschleunigung definiert. Darin liegt der didaktische Kern der dimensionslosen Formulierung: Die Gravitation dient als durchgängige Bezugsgröße des Modells. Sie normiert zum einen alle Beschleunigungen, zum anderen über die statische Einfederung $v_{stat} = g/\omega_0^2$ auch alle Längen des Systems. Massen, Längen und Zeiten werden damit an einer einzigen, stets vorhandenen physikalischen Größe ausgerichtet, wodurch Anlagen unterschiedlicher Baugröße unmittelbar vergleichbar werden. Abbildung 2 zeigt die Anordnung und den Kontaktzustand. Die periodische Erregung in vertikaler (q) und horizontaler (s) Richtung erfolgt in Abhängigkeit der dimensionslosen Zeit τ und des Phasenwinkels φ :

$$q(\tau) = K_q \cdot \sin(\tau) \quad s(\tau) = K_s \cdot \sin(\tau + \varphi) \quad (2)$$

Die momentane vertikale Verformung bzw. Eindringtiefe $v(\tau)$ des Förderguts in die elastische Oberfläche ergibt sich direkt aus der Differenz zwischen der kinematischen Bahn der unverformten Element- bzw. Faserspitzen $q(\tau)$

und der vertikalen Gutposition $y(\tau)$. Um das freie Abheben des Förderguts (Kontaktverlust) abzubilden, ist die Eindringtiefe auf nicht-negative Werte beschränkt:

$$v(\tau) = \max(0, q(\tau) - y(\tau)) \quad (3)$$

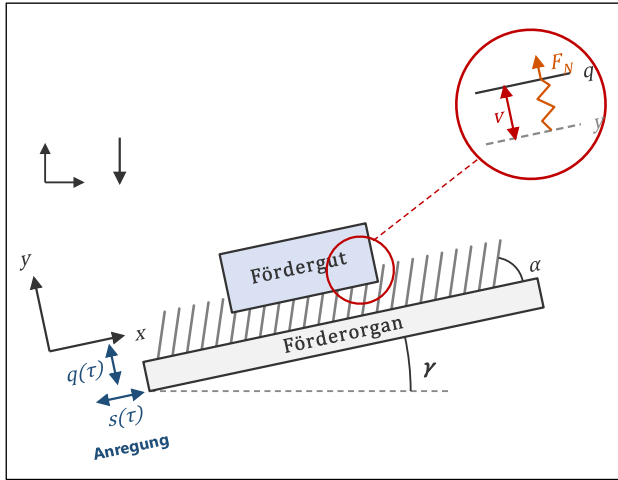


Abbildung 2. Vektorielle Darstellung der Fußanregung und des Kontaktzustands

Abbildung 3 zeigt die aus dem Modell berechnete Abhebegrenze $\Gamma_{v,krit}$ in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses. Die geeigneten elastischen Elemente bilden gemeinsam mit der Gutmasse einen Schwinger, dessen Vergrößerungsfunktion die Gutbewegung gegenüber der Fußanregung überhöht. Das Fördergut kann sich dadurch von der Oberfläche lösen, obwohl die Erregerbeschleunigung selbst die Gravitation nicht erreicht.

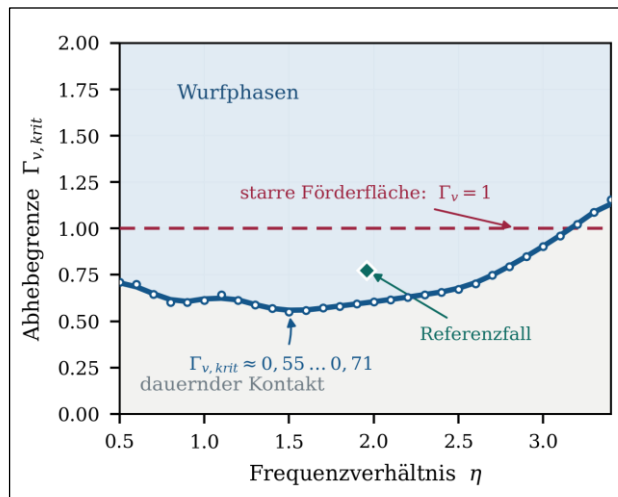


Abbildung 3. Abhebegrenze der Wurfkennzahl in Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses; die elastische Oberfläche verschiebt den Übergang gegenüber der starren Förderfläche

Im gesamten untersuchten Bereich bleibt die Grenze unterhalb des für starre Förderflächen gültigen Werts $\Gamma_v = 1$ und kehrt dieses Verhältnis erst weit im überkritischen Bereich um. Der Betriebspunkt der Versuchsanlage liegt

oberhalb der berechneten Grenze, was die im Versuch beobachteten Wurfphasen erklärt. Die Abstimmung von Fasersteifigkeit und Betriebsfrequenz über η stellt damit einen eigenständigen Auslegungsfreiheitsgrad dar, der in der klassischen Vibrationsförderstechnik nicht auftritt.

3.3 FASERKINEMATIK UND FORESHORTENING-EFFEKT

Ein zentraler Schwachpunkt früherer Modelle war die Annahme einer rein linearen Kontaktmechanik oder einer idealisierten Starrkörperdrehung der Faser. Bei der Verformung von geeigneten, elastischen Elementen wie Bürsten oder Teppichfasern muss jedoch die nichtlineare Kinematik der gebogenen Faser berücksichtigt werden. Nach der Euler-Bernoulli-Balkentheorie führt eine Querauslenkung zu einer zwangsläufigen Verkürzung der projizierten Balkenlänge (Foreshortening).

Der Winkel α bezeichnet im Folgenden durchgängig die Faserneigung gegenüber der Horizontalen; für die betrachtete Versuchsanlage beträgt er 70° . Die Querauslenkung der Faserspitze $\delta_\perp$ folgt der Balkenbiegung und steht senkrecht auf der Faserachse. Ihre vertikale Komponente ist die Eindringtiefe, sodass $\delta_\perp = v/\cos \alpha$ gilt; die zugehörige horizontale Komponente beträgt $v \cdot \tan \alpha$. Hinzu tritt der Foreshortening-Effekt: Die gebogene Faser verkürzt sich in ihrer Projektion auf die Faserachse um $\Delta = (3/5) \cdot \delta_\perp^2/l$, wodurch sich die Spitze entlang der Achse zurückzieht. Deren horizontale Komponente $\Delta \cdot \cos \alpha$ wirkt der Biegeverschiebung entgegen. Aus der Summe beider Anteile und anschließender Ableitung nach der dimensionslosen Zeit folgt Gl. (4) mit dem kinematischen Formfaktor $k_1 = 6/5 = 1,2$, der sich damit unmittelbar aus der Biegelinie des einseitig eingespannten Balkens mit Endlast ergibt und nicht gesondert angepasst werden muss. Abbildung 4 stellt beide Anteile gegenüber.

$$\delta'_x = v' \cdot \tan(\alpha) - k_1 \frac{v \cdot v'}{L \cdot \cos(\alpha)} \quad (4)$$

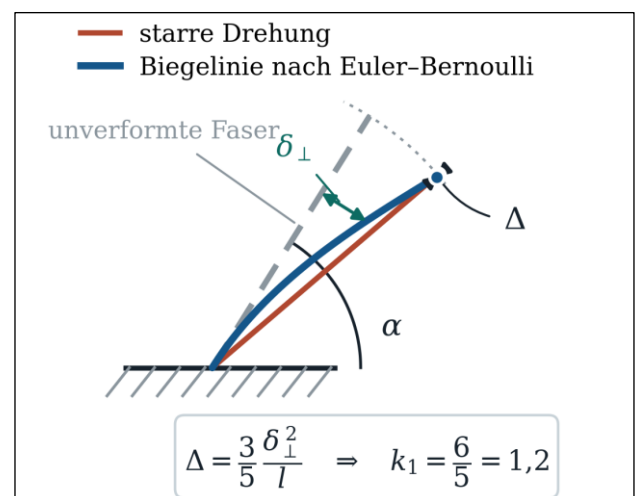


Abbildung 4. Gegenüberstellung von starrer Drehung und Biegelinie nach Euler-Bernoulli zur Veranschaulichung des Foreshortening

Die absolute Geschwindigkeit der Kontaktspitze x'_{tip} und die resultierende tribologische Relativgeschwindigkeit v_{rel} zwischen Fördergut und Faserspitze lauten folglich:

$$x'_{tip} = s' + \delta'_x \quad v_{rel} = x' - x'_{tip} \quad \xi = \text{sign}(v_{rel}) \quad (5)$$

3.4 KONTAKTMODELLIERUNG UND RICHTUNGSABHÄNGIGE STEIFIGKEIT

Die an der Faserspitze wirkende Reibkraft erzeugt ein Biegemoment, das auf den elastischen Balken zurückwirkt. Bewirkt die Relativgeschwindigkeit eine Reibkraft in Richtung der Faserneigung, wird die Faser in das Gut hineingezogen und die scheinbare Steifigkeit steigt drastisch an (Verstemm-Effekt). Bewegt sich das Gut relativ zur Spitze entgegen der Neigung, gibt die Faser leichter nach. Diese Hysterese wird analytisch über einen nichtlinearen Ansatz nach Hunt und Crossley abgebildet. Maßgeblich ist dabei die Richtung der Relativbewegung, die über den Richtungsindikator $\xi = \text{sign}(v_{rel})$ erfasst wird. Ihr sind zwei unterschiedliche Reibwerte zugeordnet: μ_+ gilt bei Relativbewegung in Neigungsrichtung, μ_- bei Relativbewegung entgegen der Faserneigung. Für $v_{rel} < 0$ ($\xi = -1$) wird die Faser in das Gut hineingezogen; mit dem größeren Reibwert μ_- verkleinert sich der Nenner in Gl. (6) und die scheinbare Steifigkeit steigt an. Für $v_{rel} > 0$ ($\xi = +1$) gibt die Faser mit dem kleineren Reibwert μ_+ nach. Die dimensionslose Steifigkeitsfunktion f_v koppelt so die geometrische Ausrichtung mit dem richtungsabhängigen Reibwert $\mu_{eff}(\xi)$ und dem geometrischen Steifigkeitsformfaktor k_2 , der für Balken konstanten Querschnitts $k_2 = 1,5$ beträgt:

$$\mu_{eff} = \mu^+ \cdot \frac{1+\xi}{2} + \mu^- \cdot \frac{1-\xi}{2} \quad (6)$$

$$f_v = \left[\cos(\alpha) \cdot \left(k_2 \cdot \frac{v}{L} \cdot (\tan(\alpha) - \mu_{eff} \cdot \xi) + (\cos(\alpha) + \mu_{eff} \cdot \xi \cdot \sin(\alpha)) \right) \right]^{-1}$$

Die Gleichungen gelten unter zwei einschränkenden Annahmen: Der Nenner in Gl. (6) muss positiv bleiben, was auf $\mu_- < \cot \alpha$ führt, und die Eindringtiefe ist geometrisch durch $v \leq L \cdot \cos \alpha$ begrenzt. Der Vorzeichenwechsel der Steifigkeitsasymmetrie liegt unabhängig von beiden Reibwerten bei $v/L = \sin \alpha / k_2$. Unterhalb dieses Werts ist der μ_- -Ast steifer, was die Voraussetzung für eine Vorwärtsförderung darstellt. Abbildung 5 zeigt beide Kurvenäste und den Betriebsbereich.

Für die Kontaktkraft selbst gibt es keine zwingende Festlegung; mehrere Ansätze sind gebräuchlich und lassen sich hier gleichrangig einsetzen. Ein additiv-viskoser Ansatz aus linearer Feder und Dämpfer ist am einfachsten, liefert beim Ablösen jedoch eine von null verschiedene Dämpfungskraft und damit eine unphysikalische Zugwirkung. Multiplikative Formulierungen, etwa nach Hunt und Crossley oder nach Lankarani und Nikravesh, vermeiden dies, da die Dämpfung mit der Eindringtiefe verschwindet; sie unterscheiden sich in der Ordnung, mit der Dämpfung

und Eindringtiefe gekoppelt sind. Da keiner der Ansätze für Faserverbünde als gesichert gelten kann, werden sie im Folgenden als Varianten behandelt und gegeneinander gestellt. Unter Einbezug der dimensionslosen Dämpfung χ ergeben sich die dimensionslose Normalkraft F_N sowie die durch die Relativbewegung induzierte Reibkraft F_R :

$$F_N = f_v \cdot v \cdot (1 + \chi \cdot v') \quad F_R = -\xi \cdot \mu_{eff} \cdot F_N \quad (7)$$

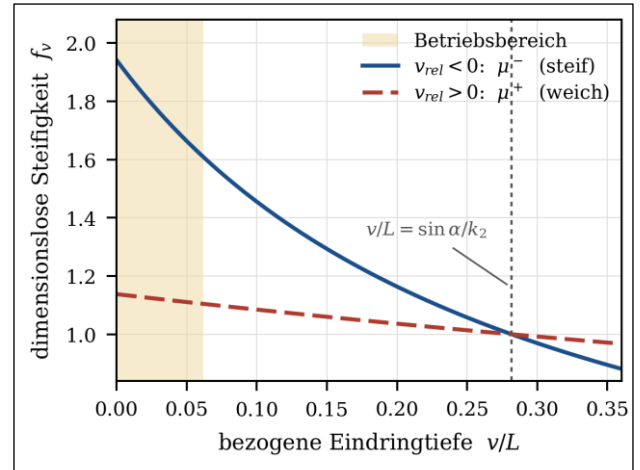


Abbildung 5. Steifigkeitskennfeld der gerichteten elastischen Förderoberfläche nach Gl. (6) mit richtungsabhängigen Kurvenästen

3.5 BEWEGUNGSGLEICHUNGEN UND FÖRDEREFFIZIENZ

Die resultierende Gutbewegung wird fallweise für die Kontakt- und die Wurfphase unter Berücksichtigung der Streckenneigung γ und der zugehörigen Schwerkraftkomponenten berechnet. Befindet sich das Fördergut im kraftschlüssigen Kontakt ($v \leq q$ und $F_N > 0$), wird es durch die asymmetrische Faserreaktion beschleunigt. Die dimensionslosen Beschleunigungen lauten:

$$y'' = \frac{1}{\eta^2} \cdot (F_N - \cos(\gamma)) \quad x'' = \frac{1}{\eta^2} \cdot (F_R - \sin(\gamma)) \quad (8)$$

Löst sich das Fördergut durch eine ausreichend hohe vertikale Erregerbeschleunigung von der Oberfläche, geht das System in die Wurfphase über. Es wirkt ausschließlich die Schwerebeschleunigung entlang der Wurfparabel:

$$y'' = -\frac{\cos(\gamma)}{\eta^2} \quad x'' = -\frac{\sin(\gamma)}{\eta^2} \quad (9)$$

Aus dem Wechsel von Kontakt- und Wurfbedingung ergeben sich die in Abbildung 6 unterschiedenen Bewegungszustände. Innerhalb der Kontaktphase bestimmt das Vorzeichen von v_{rel} , ob das Fördergut vorwärts angetrieben oder abgebremst wird. Charakteristisch für den Mikroschub ist die zeitliche Asymmetrie beider Anteile: Ein kurzer, kraftintensiver Vorwärtsantrieb auf dem steifen μ_- -Ast steht einem deutlich längeren, schwachen Rücktrieb auf dem weichen μ_+ -Ast gegenüber, sodass sich die Reibim-

pulse über eine Periode gerade aufheben und eine konstante mittlere Fördergeschwindigkeit einstellt. Eine echte Haftphase tritt nicht auf, da das Kontaktmodell nach Gl. (7) ausschließlich Gleitreibung beschreibt; ihre Berücksichtigung würde eine Erweiterung um ein Haftreibungskriterium erfordern. Den zeitlichen Verlauf beider Phasen zeigt Abbildung 7.

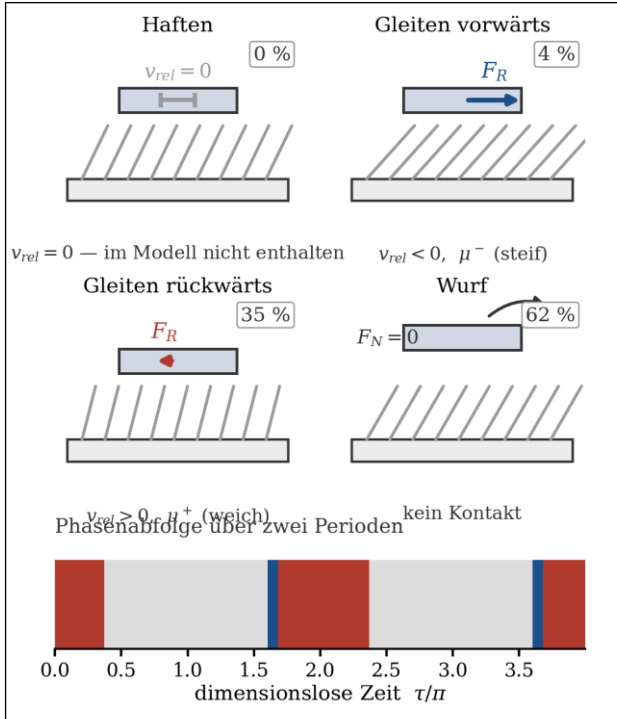


Abbildung 6. Differenzierung der Bewegungszustände des Förderguts mit Zeitanteilen je Erregerperiode und resultierender Phasenabfolge

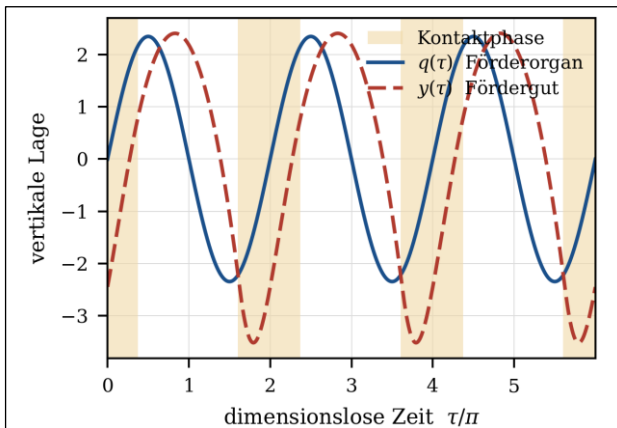


Abbildung 7. Phasendiagramm der Förderzustände mit Kontakt- und Wurfphasen über der dimensionslosen Zeit

Zur Bewertung der Transportgüte wird die integrale Bahngeschwindigkeit des Förderorgans v_{Bahn} über eine Erregerperiode gemittelt:

$$v_{Bahn} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{s'^2 + q'^2} d\tau \quad (10)$$

Die Fördereffizienz ε ist damit als Verhältnis der mittleren horizontalen Fördergeschwindigkeit $\bar{v}_x$ zur Bahngeschwindigkeit des Förderorgans definiert:

$$\varepsilon = \frac{\bar{v}_x}{v_{Bahn}} \quad (11)$$

Die Kennzahl ε beschreibt, welcher Anteil der vom Förderorgan aufgebrachtten Bahnbewegung in eine gerichtete Fördergutbewegung umgesetzt wird. Bezugsgröße ist damit ausschließlich die Erregerbahn aus Γ_v , Γ_h und φ ; bei rein vertikaler Anregung entspricht die Bahnlänge je Zyklus gerade $4 \cdot K_q$. Diese Definition ist von der Oberflächen deformation unabhängig und erlaubt den Vergleich unterschiedlicher Parameterkombinationen unabhängig von den absoluten Systemabmessungen. In früheren Arbeiten wird demgegenüber eine Effizienz verwendet, die zusätzlich den Bewegungsraum der elastischen Oberfläche einbezieht und auf die Amplituden der Faserspitze bezogen ist; beide Kennzahlen sind ineinander überführbar, beschreiben aber unterschiedliche Fragestellungen – die hier verwendete den Nutzen der eingebrachten Erregung, die andere die Ausnutzung des gesamten Bewegungsraums.

3.6 VERWENDETE FORMELZEICHEN

Tabelle 1 fasst die im Prozessmodell verwendeten dimensionslosen Kennzahlen und Parameter zusammen.

Tabelle 1. Dimensionslose Kennzahlen und Parameter des Prozessmodells

Zeichen	Bedeutung
Γ_v	Wurfkennzahl: vertikale Anregungsbeschleunigung bezogen auf die Gravitation
Γ_h	Schubkennzahl: horizontale Anregungsbeschleunigung bezogen auf die Gravitation
η	Frequenzverhältnis von Erreger- zu Referenzkreisfrequenz
φ	Phasenwinkel zwischen den Erregerkomponenten
γ	Neigung des Förderorgans
α	Faserneigung der elastischen Elemente, ab der Horizontalen
L	Faserlänge, bezogen auf die statische Einfederung
k_1	Kinematischer Formfaktor der Faserbiegeline (Foreshortening)
k_2	Geometrischer Formfaktor der Biegesteifigkeit
χ	Dämpfungsanteil des Kontaktmodells
ξ	Richtungsindikator der Relativbewegung, $\text{sign}(v_{\text{rel}})$
μ^+	Reibwert bei Relativbewegung in Neigungsrichtung
μ^-	Reibwert bei Relativbewegung gegen die Neigung
μ_{eff}	Richtungsabhängiger effektiver Reibwert nach Gl. (6)
ε	Fördereffizienz nach Gl. (11)

4 EXPERIMENTELLE VERIFIZIERUNG

Das vorgestellte Prozessmodell greift das in früheren Arbeiten experimentell erschlossene und dimensionsbehaftet modellierte Wirkprinzip [9] auf und führt es in eine dimensionslose Formulierung über. Die Verifizierung stützt sich daher auf dessen Messdaten [7], [9]. Sie verfolgt zwei Ziele: die Bestätigung der im Modell angenommenen Bewegungs- und Kontaktstruktur sowie die Einordnung der Vorhersagegüte. Nachfolgend werden Versuchsanlage und Messtechnik beschrieben, die gemessenen Bewegungsverläufe und Fördergeschwindigkeiten den Modellaussagen gegenübergestellt und abschließend Reichweite und Grenzen der dimensionslosen Erweiterung bewertet.

4.1 VERSUCHSANLAGE UND MESSTECHNIK

Die Versuchsanlage besteht aus einem über vier Schraubenfedern schwingfähig gelagerten Förderorgan, das über zwei gegensinnig umlaufende, synchronisierte Unwuchtmotoren krafteingeregelt wird. Da die Masse des Förderorgans die des Förderguts deutlich übersteigt, bilden Förderorgan, Lagerung und Antrieb ein Einmassenschwingsystem mit rein vertikaler, linearer Bewegungsform. Dies entspricht dem im Prozessmodell betrachteten Sonderfall $\Gamma_h = 0$.

Die elastische Oberfläche wird durch Bürstenplatten mit einer Arbeitslänge von 480 mm und einer Breite von 100 mm realisiert. Die Faserbündel sind in einem quadratischen Raster von 15 mm unter einem Winkel von 70° zur Horizontalen eingebracht und in einer Höhe von 25 mm parallel zur Grundplatte geschnitten; je Platte ergeben sich 198 Bündel bei einem Einspanndurchmesser von rund 4,2 mm. Vier Bürstenmodule unterschiedlicher Steifigkeit sowie drei Probekörper unterschiedlicher Flächenlast bilden das Versuchsprogramm; deren Kennwerte fasst Tabelle 2 zusammen. Die Eigenschaften der Probekörper sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2. Elastische Oberflächen und Probekörper der Versuchsanlage

Bürstenmodul	1	2	3	4
Fasermaterial	PA6	PA6	PA6	PBT
Faserdurchmesser in mm	0,4	0,3	0,5	0,35
Fasern je Bündel	82	204	61	–
Bündelsteifigkeit in N/mm	0,51	0,32	0,66	0,32

Tabelle 3. Eigenschaften der Probekörper

Probekörper	1	2	3
Werkstoff	Edelstahl	Aluminium	Baustahl
Masse in g	527	259	151
Flächenlast in Pa	615	259	385
Rauheit Ra in μm	0,69	0,42	0,63

Die Messtechnik kombiniert zwei Verfahren. Ein uniaxialer Beschleunigungssensor erfasst die Grundschnung des Förderorgans, ein triaxialer Sensor auf der Oberseite des Probekörpers dessen vertikale und horizontale Beschleunigung. Da die Beschleunigungsmessung im Bereich stetiger Förderung weder die Fördergeschwindigkeit noch die Oberflächendeformation zugänglich macht, wird der Prozess parallel mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bei 1000 Bildern je Sekunde seitlich aufgezeichnet. Der Bildausschnitt umfasst ca. 3,5 Faserbündel. Beide Datenquellen werden nachträglich zeitlich synchronisiert und skriptbasiert ausgewertet.

4.2 BEWEGUNGSVERLÄUFE UND PHASENSTRUKTUR

Über alle Versuchskonfigurationen zeigt sich eine qualitativ nahezu identische, periodische Abfolge aus sechs charakteristischen Zeitschritten, die sich den beiden im Modell unterschiedenen Bewegungsphasen zuordnen lassen [7]. Die Kontaktphase beginnt mit dem Auftreffen des Guts auf die unverformte Oberfläche und umfasst die zunehmende Deformation bis zum Maximum; die Wurfphase setzt am oberen Umkehrpunkt des Förderorgans ein. Der gemessene Verlauf bestätigt die dem Modell zugrunde liegende Wirkkette unmittelbar. Beim Aufschlag wird das Gut zunächst kurz entgegen der Förderrichtung abgebremst, bevor die Deformation der Oberfläche es in Förderrichtung mitnimmt und die Fördergeschwindigkeit stark ansteigt. Nach Überschreiten der maximalen Deformation gleiten die Faserspitzen entgegen der Förderrichtung an der Gutunterseite zurück, was zu einer negativen Horizontalbeschleunigung führt. Genau diese Umkehr des Vorzeichens von v_{rel} und der damit verbundene Wechsel zwischen den beiden Ästen der Steifigkeitsfunktion bilden den Kern von Gl. (6) und (7). Während der Wurfphase bleibt die Fördergeschwindigkeit nahezu konstant, was die Vernachlässigung von Strömungswiderständen in Gl. (9) rechtfertigt.

Die Richtungsabhängigkeit der Reibung wurde separat vermessen. Für die Paarung aus Bürstenmodul 1 und Probekörper 1 ergeben sich Haftreibungskoeffizienten von $\mu_+ = 0,19$ in Neigungsrichtung und $\mu_- = 0,23$ entgegen der Neigung; über alle Paarungen liegt μ_- durchweg über μ_+ . Die in Gl. (6) und (7) angesetzte Reibungsanisotropie ist damit messtechnisch belegt. Ihre Größenordnung fällt allerdings deutlich geringer aus als in der bisherigen Parametrierung des Prozesszwilings angenommen.

4.3 FÖRDERGESCHWINDIGKEIT UND WURFBEDINGUNG

In Abhängigkeit von Bürstenmodul, Probekörper und Antriebsfrequenz werden mittlere Fördergeschwindigkeiten zwischen 15 mm/s und 400 mm/s erreicht [7]. Eine Verdopplung der Flächenlast führt je nach Oberflächensteifigkeit auf die zwei- bis dreifache Fördergeschwindigkeit, eine Erhöhung der Vibrationsfrequenz um 1 Hz auf eine Steigerung zwischen 30 % und 60 %. Mit zunehmender Oberflächensteifigkeit sinkt die Fördergeschwindigkeit

zunächst; bei kleinen Flächenlasten steigt sie bei weiterer Versteifung jedoch wieder an, da sich die Wurfphase verlängert und die Reibungsverluste sinken. Das Modell bildet diesen Wechsel des vorherrschenden Bewegungsmodus über das Verhältnis von Kontakt- zu Wurfdauer strukturell ab.

Besonders aufschlussreich ist die Wurfbedingung. Der stetige Förderbetrieb setzt an der Versuchsanlage bei rund 17,5 Hz und einer vertikalen Amplitude von etwa 0,6 mm ein; unterhalb dieser Frequenz stellt sich keine stetige Förderbewegung ein. Aus diesen Werten folgt eine Wurfkennzahl von $\Gamma_v \approx 0,74$, aus den Beschleunigungsdaten mit einer Amplitude von 0,71 mm bei 17,92 Hz ein Wert von $\Gamma_v \approx 0,92$. In beiden Auswertungen liegt die Wurfkennzahl unterhalb von eins, während die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eindeutig ausgeprägte Wurfphasen belegen. Das Abheben des Förderguts erfolgt an der realen Anlage also unterhalb der für starre Förderflächen gültigen Grenze. Damit bestätigen die Versuche die in Abschnitt 3.2 aus dem Modell abgeleitete Absenkung der Abhebegrenze durch die Federwirkung der elastischen Oberfläche (vgl. Abbildung 3) experimentell. Auch die Effizienz der Förderbewegung bestätigt das Potential des Wirkprinzips. Die erreichten Werte liegen, bezogen auf die Bewegungsausdehnung von Förderorgan und Oberfläche, deutlich über den mit konventionellen Vibrationsförderern üblichen Größenordnungen [7], [9]. Ein unmittelbarer Vergleich mit der in Gl. (11) definierten Kennzahl ist dabei nicht zulässig, da beiden Definitionen unterschiedliche Bezugsgrößen zugrunde liegen.

4.4 BEURTEILUNG DER MODELLGÜTE

Als Referenzfall dient die Konfiguration aus Bürstenmodul 1, Probekörper 1 und einer Betriebsfrequenz von 17,9 Hz (Abbildung 8). Der Vergleich von Simulation und Versuch zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung der Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe; der stationäre Zustand wird im Modell nach etwa 22 bis 28 Erregerperioden erreicht.

Bürstenmodul	1
Faserdurchmesser:	= 0,4 mm
Fasern je Bündel:	= 85
E-Modul:	= 1700 MPa
Korrekturfaktor:	$\kappa = 1,4$
Probekörper	1
Abmessungen:	70 × 120 × 8 mm
Masse:	= 527 g
Betriebsfrequenz	$\omega_B = 17,9$ Hz
Förderorganamplituden	= 0,6 mm; $\delta = 0$ mm
Förderorganneigung	$\gamma = 0^\circ$

Abbildung 8. Parametrierung des Referenzfalls der experimentellen Verifizierung

Quantitativ liegt die berechnete Fördergeschwindigkeit des unmodifizierten Modells über dem gemessenen Wert. Die Abweichung geht auf drei Effekte zurück, die das Idealmodell nicht erfasst: die sprunghaften Zustandsübergänge der Signum-Funktion, die zeitlich veränderliche Anzahl tatsächlich tragender Fasern beim Phasenwechsel und die bislang vernachlässigte Energiedissipation. Werden die Übergänge geglättet, ein Ankopplungsfaktor für die wirksame Faseranzahl eingeführt und das Dämpfungsmaß kalibriert, lässt sich die Messung im Referenzfall sehr genau treffen; zugleich verkürzt sich die Rechenzeit deutlich [9]. Die Glättung der Zustandsübergänge entspricht unmittelbar dem in Gl. (5) eingeführten Richtungsindikator ξ . Bemerkenswert ist, dass sich für den Reibkontakt und für das Feder-Masse-System unterschiedliche Glattheitsgrade als zweckmäßig erweisen: Der Zustandswechsel im Reibkontakt verläuft sanfter als der im Kontaktmodell. Eine einheitliche Regularisierung, wie sie der bisherige Prozesszwilling verwendet, ist demnach eine Vereinfachung.

Der Vergleich der Varianten erfolgt an derjenigen Konfiguration, für die sämtliche Eingangsgrößen gemessen vorliegen. Alle Varianten rechnen aus identischen Eingaben; die Zusatzterme werden einzeln zugeschaltet, sodass sich ihr jeweiliger Beitrag isolieren lässt (Tabelle 4).

Tabelle 4. Vergleich der Modellvarianten bei stufenweise zugeschalteten Zusatztermen

Variante	v_F in mm/s	Δ zum Minimalmodell
Minimalmodell, lineare Dämpfung	144	–
mit Foreshortening nach Gl. (4)	134	–7 %
mit Kontaktdämpfung nach Hunt–Crossley	130	–10 %
alle Zusatzterme	119	–17 %
alle Zusatzterme, dimensionslos	124	–14 %
Vergleichsrechnung nach [9]	123	–15 %
Messung	97	–

Die Zusatzterme wirken als moderate, gleichsinnige Korrekturen: Foreshortening und Kontaktdämpfung senken die berechnete Geschwindigkeit jeweils um wenige Prozent, ihre Kombination um knapp ein Fünftel. Alle Varianten bleiben vorzeichenrichtig und liegen eng beieinander; die dimensionslos gerechnete Fassung bestätigt die dimensionsbehaftete, womit die Rückrechnung nach Gl. (12) bis (17) als konsistent gilt. Die Struktur des vorgeschlagenen Modells ist damit experimentell gestützt: Phasenabfolge, Richtungsabhängigkeit der Kontaktsteifigkeit, Reibungsanisotropie und die abgesenkte Abhebegrenze sind belegt, und die Rückrechnung trifft die Größenordnung der bezogenen Eindringtiefe.

Alle Varianten überschätzen die gemessene Fördergeschwindigkeit in vergleichbarem Maße. Die Ursache liegt nicht in der dimensionslosen Formulierung, sondern in einer bewusst offen gelassenen Idealisierung: Die Zahl der tragenden Fasern nimmt beim Übergang zwischen Wurf- und Kontaktzustand nicht sprunghaft, sondern allmählich zu und ab. Der Versatz des Abhebezeitpunkts gegenüber dem Maximum der Oberflächendeformation entscheidet darüber, welcher Anteil der Entlastung noch unter Normalkraft abläuft, und damit über die Bilanz aus Vorwärts- und Rücktriebimpuls. Ein Ankopplungsfaktor wäre der naheliegende nächste Schritt [9]. Eine Überprüfung des Modells über den Referenzfall hinaus steht aus. Ein belastbares Raster experimenteller Referenzpunkte, das die verschiedenen Rechenansätze über den Betriebsraum hinweg gegeneinander stellt, liegt bislang nicht vor. Gerade hier bietet die dimensionslose Betrachtung einen Weg: Da Anlagen unterschiedlicher Baugröße auf dieselben Kennzahlen abgebildet werden, lassen sich Punktmessungen aus unabhängigen Veröffentlichungen in denselben Erregerraum transformieren, sofern Masse, Betriebsfrequenz, Erregeramplituden und die Kenngrößen der Oberfläche dokumentiert sind. Aus verstreuten Einzelversuchen entstünde so schrittweise ein gemeinsames Referenzraster, an dem sich konkurrierende Modellansätze prüfen ließen, ohne dass jede Gruppe die gesamte Versuchsmatrix selbst erheben müsste.

4.5 GELTUNGSBEREICH DES KONTAKTMODELLS

Die gemessenen Fördereffizienzen legen nahe, dass das Wirkprinzip nicht in einem einheitlichen, sondern in zwei physikalisch unterschiedlichen Regimen arbeitet. Bezieht man die gemessenen Werte nach Gl. (11) auf die Erregerbahn, ergibt sich das in Tabelle 5 zusammengestellte Bild.

Tabelle 5. Aus den Messwerten bestimmte Fördereffizienz für drei Betriebspunkte

Betriebspunkt	f_B in Hz	Γ_v	v_F in mm/s	ε
Referenzfall	17,9	0,77	97	2,3
weiche Oberfläche	17,5	0,68	127	3,3
steife Oberfläche	22,5	1,43	387	6,1

Im Bereich moderater Wurfkennzahlen $\Gamma_v < 1$ bleibt das Fördergut über verhältnismäßig lange Kontaktzeiten mit der Oberfläche in Berührung und gleitet auf den sich verformenden Fasern. Der horizontale Vorschub folgt dort aus dem Wegintegral der richtungsabhängigen Festkörperreibung in Verbindung mit der Biegelinie, also aus dem in Gl. (4) bis (7) beschriebenen Mechanismus. Für diesen Kriech- und weichen Wurfbetrieb gibt das Prozessmodell die Messung in Struktur und Größenordnung wieder. Der Betriebspunkt bei deutlich höherer Wurfkennzahl fällt aus diesem Bild heraus. Die dort gemessene Effizienz liegt über dem Wert, den das Modell mit den gemessenen Reibwerten überhaupt erreichen kann, denn der Reibbeiwert be-

grenzt den übertragbaren Horizontalimpuls bei sehr kurzen Kontaktzeiten nach oben. Eine reine Coulomb-Reibung kann die beobachtete Effizienzsteigerung daher nicht erklären. Als Erklärung bietet sich die Eigendynamik der Fasern an. Fällt das Fördergut aus großer Wurfhöhe nahezu senkrecht auf die steil gestellten Fasern, so tritt neben der Querkraft eine erhebliche Stauchung in der Faserlängsachse auf. Die Faser wird dabei nicht nur gebogen, sondern knickartig belastet und gibt die gespeicherte Energie beim Entspannen gerichtet wieder ab. Da die Faserachse gegen die Vertikale geneigt ist, wird ein Teil des vertikalen Stoßimpulses kinematisch in einen horizontalen Vorwärtsimpuls umgelenkt. Dieser Katapulteffekt ist nicht reibungsbegrenzt und kann die gemessenen Effizienzsprünge größenordnungsmäßig erklären. Er ist im vorliegenden Prozessmodell nicht enthalten; seine Aufnahme würde eine Superposition beider Antriebsanteile erfordern, gesteuert über die axiale Eindringgeschwindigkeit als Kriterium für den Übergang zwischen den Regimen.

Diese Zuordnung ist eine physikalisch motivierte Deutung und keine geprüfte Modellaussage; ihre Bestätigung erforderte Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Faserdeformation im harten Wurfbetrieb. Der Geltungsbereich des vorgeschlagenen Modells ist damit auf den Kriech- und weichen Wurfbetrieb einzugrenzen; darüber hinaus liefert es eine untere Schranke. Diese Einschränkung berührt die Aussage zu den Betriebsgebieten nicht. Alle untersuchten Varianten – mit und ohne Foreshortening, mit additiv viskoser oder multiplikativer Kontaktdämpfung, mit einem oder zwei Reibwerten – führen auf dieselbe Grundaussage: Es existiert ein weiter, zusammenhängender Bereich gerichteter und effizienter Förderung. Während die Feinstruktur der Gebietsränder vom gewählten Ansatz abhängt, sind Existenz und grobe Lage des stabilen Bereichs variantenunabhängig.

5 ANWENDUNG UND AUSLEGUNG

Der Wert des dimensionslosen Prozessmodells liegt weniger in der Vorhersage eines einzelnen Betriebspunkts als in der Berechenbarkeit der Wechselwirkungen zwischen den technischen Komponenten. Da die Gutbewegung ausschließlich von dimensionslosen Kennzahlen abhängt, lässt sich der gesamte Betriebsraum systematisch abtasten. Das Modell macht damit sichtbar, wie Fasergeometrie, Oberflächensteifigkeit, Flächenlast und Schwingungsanregung zusammenwirken, und weist zusammenhängende Gebiete stabiler Förderung samt ihrer Grenzen aus. Genau in dieser Funktion ist es für die Auslegung nutzbar.

5.1 IMPLEMENTIERUNG ALS DIGITALER PROZESSZWILLING

Das Prozessmodell ist als interaktives Berechnungswerkzeug implementiert. Alle Eingaben erfolgen über dimensionslose Kennzahlen: Die Erregung wird durch Γ_v , Γ_h und φ beschrieben, deren Zusammenwirken unmittelbar als

Bewegungsbahn des Förderorgans dargestellt wird; η stimmt diese Erregung auf die Elastizität der Fasern ab; α , γ und L erfassen die Geometrie von Faser und Förderstrecke. Lediglich zwei dimensionsbehaftete Größen sind erforderlich, die Fördergutmasse und die Betriebsfrequenz. Aus ihnen folgen nach Gl. (12) bis (17) sämtliche realen Systemgrößen. Die Umsetzung erlaubt es, das Minimalmodell und dessen Erweiterung aus identischen Eingaben parallel zu rechnen und die Zusatzterme einzeln zuzuschalten. Damit wird unmittelbar erkennbar, welchen Beitrag Foreshortening, Kontaktdämpfung und die getrennten Reibwerte zum Ergebnis leisten. Die animierte Darstellung der Gutbewegung über dem Faserteppich macht zudem den Wechsel zwischen Kontakt- und Wurfphase sowie die Richtungsumkehr der Relativgeschwindigkeit an der Faserspitze sichtbar. Ergänzend wird die Impulsbilanz der Reibkraft je Periode ausgewiesen, aus der sich der Mikroschub als Differenz eines kurzen, kraftintensiven Vortriebs und eines langen, schwachen Rücktriebs erschließt. Für die Auslegung ist weniger der Einzelwert als die schnelle Parametervariation entscheidend. Da eine Rechnung im Sekundenbereich liegt, lassen sich Betriebsräume systematisch abtasten und als Kennfelder darstellen. Das Werkzeug tritt damit nicht an die Stelle einer Mehrkörpersimulation, sondern schließt die Lücke zwischen analytischer Abschätzung und aufwendiger numerischer Detailuntersuchung.

5.2 RÜCKRECHNUNG IN REALE SYSTEMGRÖßEN (PRACTICAL TRANSFER)

Für die konstruktive Auslegung müssen die dimensionslosen Ergebnisse in reale physikalische Größen zurückgeführt werden. Dies geschieht über die Referenzkreisfrequenz ω_0 und die statische Einfederung v_{stat} unter Einbezug der Betriebsfrequenz f_B :

$$\Omega = 2\pi \cdot f_B \quad (12)$$

$$\omega_0 = \frac{\Omega}{\eta} \quad (13)$$

$$v_{stat} = \frac{g}{\omega_0^2} \quad (14)$$

Aus diesen Basisgrößen lassen sich die erforderliche Oberflächensteifigkeit c_{stat} , die reale geometrische Faserlänge l_{real} sowie der tatsächliche Transportvorschub $v_{x,real}$ bestimmen:

$$c_{stat} = m \cdot \omega_0^2 \quad (15)$$

$$l_{real} = L \cdot v_{stat} \quad (16)$$

$$v_{x,real} = \bar{v}_x \cdot v_{stat} \cdot \Omega \quad (17)$$

5.3 STABILE FÖRDERBEREICHE UND EINFLUSSFAKTOREN

Die Fördereffizienz ist keine Eigenschaft eines einzelnen Betriebspunkts, sondern ein skalares Feld über dem Erregerraum. Die drei Erregerkennzahlen Γ_v , Γ_h und φ spannen diesen Raum auf; das Frequenzverhältnis η wirkt als

vierte, davon unabhängige Größe, die das Feld verformt. Die Auslegungsaufgabe besteht damit nicht darin, ein Maximum von ε zu finden, sondern zusammenhängende Gebiete ausreichender Effizienz zu identifizieren und den Arbeitspunkt in deren Innerem zu platzieren. Flächen konstanter Effizienz begrenzen in diesem Raum die Betriebsgebiete. Von besonderer Bedeutung ist die Fläche $\varepsilon = 0$: Sie trennt die Vorwärts- von der Rückförderung und bildet damit die eigentliche Prozessgrenze. Ein Arbeitspunkt in ihrer Nähe ist unabhängig von der Größe der dort erreichten Geschwindigkeit unbrauchbar, weil bereits kleine Schwankungen der Anregung die Förderrichtung umkehren. Als Maß für die Prozesssicherheit eignet sich deshalb weniger der Wert von ε selbst als der Abstand zur nächstgelegenen Nullfläche und die Dicke des umgebenden Gebiets. Stabile Parameterwahl heißt, ein voluminöses und nicht ein besonders hohes Gebiet zu treffen.

Abbildung 9 zeigt einen Schnitt durch diesen Raum für $\Gamma_h = 0$, in dem Γ_v und η aufgespannt sind. Er weist drei Gebiete aus. Im überkritischen Bereich oberhalb von $\eta \approx 1,3$ liegt ein ausgedehntes, flach verlaufendes Gebiet gerichteter Vorwärtsförderung mit Werten um $\varepsilon \approx 3$. Zu kleinen Wurfkennzahlen hin fällt die Effizienz auf nahezu null ab; dort stellt sich keine stetige Förderung ein, weil das Gut die Oberfläche nicht mehr verlässt. Im unterkritischen Bereich bei gleichzeitig hoher Wurfkennzahl schließlich kehrt sich die Förderrichtung um: Dort überwiegt der Rücktrieb während der Entlastung, sodass das Gut entgegen der Faserneigung wandert.

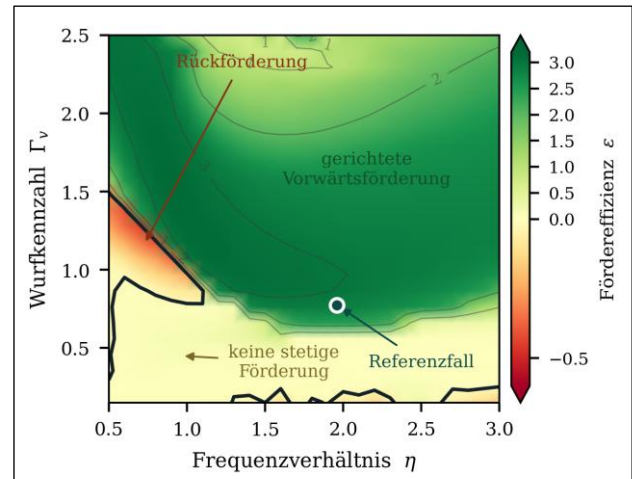


Abbildung 9. Schnitt durch den Erregerraum bei $\Gamma_h = 0$: Fördereffizienz über Frequenzverhältnis und Wurfkennzahl; die durchgezogene Linie ist die Nullfläche zwischen Vorwärts- und Rückförderung

Der Referenzfall der Versuchsanlage liegt mit $\eta \approx 1,96$ und $\Gamma_v \approx 0,77$ am unteren Rand dieses Gebiets, bei einer Effizienz von $\varepsilon \approx 2,9$. Nach oben, zu höheren Wurfkennzahlen, verläuft das Gebiet flach und weit; nach unten fällt die Effizienz vergleichsweise rasch ab. Die Nullfläche liegt in dieser Blickrichtung weit entfernt, weshalb die Förderrich-

tung bei kleinen Änderungen der Anregung gesichert bleibt – was die im Versuch beobachtete Robustheit erklärt. Wer höhere Effizienz anstrebt, wird die Wurfkennzahl anheben und damit tiefer in das Gebiet hineinrücken; das größte ε wird bei $\Gamma_v \approx 1,3$ erreicht und deckt sich mit dem in Abschnitt 5.3 bestimmten Kernpunkt.

Da η das Feld nicht nur verschiebt, sondern seine Gestalt verändert, ist die Abstimmung von Fasersteifigkeit und Betriebsfrequenz mehr als eine Skalierung: Sie entscheidet darüber, ob um den gewählten Arbeitspunkt überhaupt ein ausgedehntes Gebiet existiert. Ein Durchfahren von η bei festgehaltenen Strukturparametern macht sichtbar, wie Gebiete entstehen, wandern und wieder zerfallen; die zugehörigen Grenzen sind damit unmittelbar als Ausleerraum interpretierbar. Die vollständige Gestalt eines Betriebsgebiets wird erst in der räumlichen Darstellung erkennbar. Abbildung 10 zeigt die Isofläche $\varepsilon = 2,0$ für die Strukturparameter des Referenzfalls, also bei festem $\eta = 1,96$, $\alpha = 70^\circ$ und $L = 8,42$. Grundlage ist ein Gitter von $25 \times 25 \times 21$ Punkten über Γ_v , Γ_h und φ , dessen Werte jeweils aus einer eigenen Zeitintegration stammen. Das so umschlossene Gebiet bildet einen zusammenhängenden Körper, der rund ein Sechstel des untersuchten Erregeraums einnimmt.

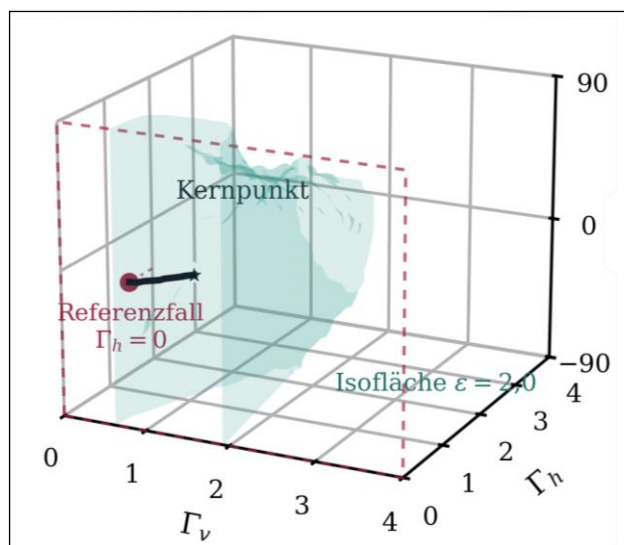


Abbildung 10. Isofläche konstanter Fördereffizienz $\varepsilon = 2,0$ im Erregeraum bei den betrachteten Strukturparametern; eingezeichnet sind der Betriebspunkt der Versuchsanlage auf der Randfläche $\Gamma_h = 0$, der Kernpunkt größten Randabstands und der Optimierungspfad zwischen beiden

Der Betriebspunkt der Versuchsanlage liegt auf der Randfläche $\Gamma_h = 0$, da das Förderorgan ausschließlich vertikal angeregt wird. Der Phasenwinkel bleibt dort ohne Wirkung, weil die horizontale Erregerkomponente verschwindet; die Effizienz ist auf dieser Fläche exakt von φ unabhängig. Der Betriebspunkt befindet sich damit zwar innerhalb des Gebiets, jedoch unmittelbar an dessen

Berandung. Dabei werden $\Gamma_v = 0$ und $\Gamma_h = 0$ als physikalische Bereichsgrenzen gewertet, der Phasenwinkel als zyklische Größe dagegen nicht. Als günstigster Betriebspunkt im Sinne der Prozesssicherheit ist derjenige anzusehen, der in allen Richtungen den größten Abstand zur Gebietsgrenze aufweist – anschaulich die Mitte der Effizienzblase. Für die untersuchte Konfiguration wird dieser größte Abstand nicht in einem einzelnen Punkt erreicht, sondern entlang eines Rückens, der sich über einen weiten Bereich der horizontalen Wurfkennzahl erstreckt; der Phasenwinkel ist darin nur schwach bestimmt. Der in Abbildung 10 eingezeichnete Optimierungspfad folgt dem steilsten Anstieg des Randabstands und verbindet den Betriebspunkt mit einem repräsentativen Punkt dieses Rückens. Bemerkenswert ist das Ergebnis dieses Wegs: Der Abstand zur Prozessgrenze vervielfacht sich, während die Fördereffizienz nahezu unverändert bleibt. Ein Zugewinn an Robustheit ist hier also nicht mit einer Einbuße an Leistung erkauft. Konstruktiv bedeutet der Pfad, der Erregung eine horizontale Komponente beizugeben und die vertikale Wurfkennzahl anzuheben. Dass der Phasenwinkel dabei kaum festgelegt ist, erleichtert die Umsetzung. Wählt man ihn zu null, so entspricht die Bewegungsbahn keiner Ellipse, sondern einer geradlinigen, gegen die Horizontale geneigten Schwingung – also gerade der Erregungsform, die in der klassischen Vibrationsfördertechnik üblich ist. Das Modell führt damit auf eine bekannte Lösung zurück, ohne sie vorauszusetzen.

Wie stark das Frequenzverhältnis die Gestalt des Erregeraums bestimmt, zeigt der Vergleich mit einer zweiten Rechnung. Abbildung 11 gibt dieselbe Isofläche $\varepsilon = 2,0$ für $\eta = 1,00$ wieder, also für Betrieb in Resonanznähe bei unveränderter Anlage. Da L und α aus der Bauform folgen, entspricht dieser Übergang allein einer geänderten Betriebsfrequenz.

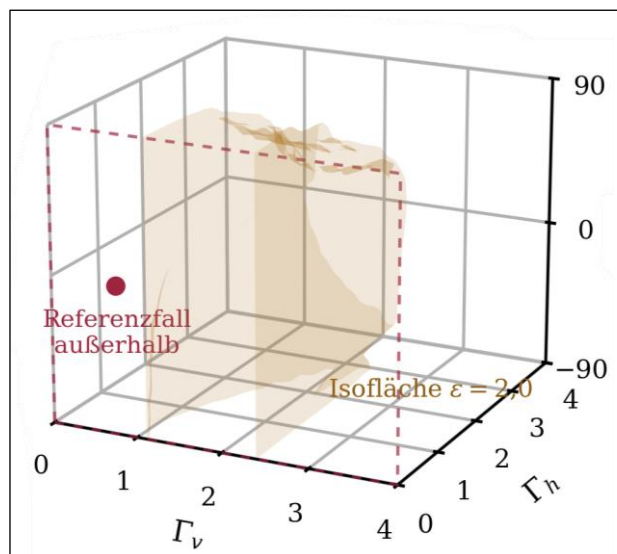


Abbildung 11. Isofläche konstanter Fördereffizienz $\varepsilon = 2,0$ bei $\eta = 1,00$; der Betriebspunkt der Versuchsanlage liegt hier außerhalb des Gebiets

Der Unterschied ist erheblich. Bei $\eta = 1,00$ zerfällt der Erregerraum nicht in zahlreiche kleine Teilgebiete wie im überkritischen Fall, sondern bildet zwei große, geschlossene Körper; zugleich sinkt der Anteil des Raums mit $\varepsilon > 2$ von 40 % auf 28 %, und der Anteil mit Rückförderung steigt von 7 % auf 15 %. Vor allem aber wandert das Gebiet zu höheren Wurfkennzahlen ab: Der Betriebspunkt der Versuchsanlage liegt mit $\Gamma_v \approx 0,77$ nun außerhalb und erreicht dort mit $\varepsilon \approx 0$ praktisch keine gerichtete Förderung mehr. Dies deckt sich mit dem Schnitt in Abbildung 9, in dem die Nullfläche bei kleiner Wurfkennzahl gerade den Bereich um $\eta \approx 1$ durchläuft. Die Abstimmung über η ist damit keine bloße Feineinstellung, sondern entscheidet darüber, ob ein gewählter Arbeitspunkt überhaupt in einem Betriebsgebiet liegt. Für die Auslegung folgt daraus, zuerst das Frequenzverhältnis festzulegen und erst danach den Arbeitspunkt innerhalb des zugehörigen Gebiets zu positionieren.

Weil die Zusammenhänge in beide Richtungen auswertbar sind, lässt sich das Modell auch invers nutzen. Aus einer gemessenen Fördergeschwindigkeit und den bekannten Anlagendaten folgen über Gl. (12) bis (17) Rückschlüsse auf die schwer zugänglichen Kenngrößen der Oberfläche, insbesondere auf die wirksame Steifigkeit und die Zahl der tragenden Elemente. Ebenso lässt sich vorab abschätzen, wie sich eine Änderung von Faserlänge, Neigung oder Betriebsfrequenz auf den Arbeitspunkt auswirkt, ohne dass dafür eine neue Versuchsreihe erforderlich wäre. Die Darstellung ist eine Modellaussage und keine Messung. Sie weist Lage, Ausdehnung und Zusammenhang der Betriebsgebiete sowie die Richtung der Einflussgrößen aus, während die Absolutwerte mit der genannten Überschätzung behaftet bleiben. Da die Lage der Nullfläche aus dem Vorzeichenwechsel der Impulsbilanz folgt und nicht aus deren Betrag, ist sie gegenüber diesem Fehler deutlich unempfindlicher als die Effizienzwerte selbst. Für die Auslegung ist genau diese Information nutzbar: Sie zeigt, in welche Richtung ein Arbeitspunkt zu verschieben ist und wo die Grenzen des gerichteten Transports verlaufen. Eine experimentelle Absicherung der Gebietsgrenzen steht aus und ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Gerichtete elastische Förderoberflächen erweitern das Wirkprinzip klassischer Vibrationsförderer um zusätzliche Einflussgrößen auf die Fördergutbewegung. Die Orientierung und die elastischen Eigenschaften der Oberflächenstruktur bestimmen die Bewegungsübertragung zwischen Förderorgan und Fördergut maßgeblich und ermöglichen zusätzliche Funktionen innerhalb des Förderprozesses. Gleichzeitig erhöhen die komplexen Wechselwirkungen zwischen Fördergut, Förderoberfläche und Schwingungsanregung die Anforderungen an die Beschreibung und Auslegung dieser Fördersysteme, was den Bedarf einer verallgemeinerten Prozessbeschreibung begründet.

Das vorgestellte dimensionslose Prozessmodell löst die Gutbewegung in eine gekoppelte Kontakt- und Wurfphase auf und erfasst dabei die wesentlichen nichtlinearen Effekte: das Foreshortening der Fasern, die richtungsabhängige Kontaktsteifigkeit und die gemessene Reibungsanisotropie. Durch die durchgängige Normierung an der Erdbeschleunigung wird eine von konkreten Bauteilabmessungen unabhängige Untersuchung der Parameterinteraktionen möglich. Der Abgleich mit den Versuchen zeigt, was ein solches Minimalmodell leisten kann. Die Struktur des Förderprozesses wird zuverlässig wiedergegeben: Phasenabfolge, Umschlagpunkt der Steifigkeitsasymmetrie und die gegenüber starren Förderflächen abgesenkte Abhebegrenze stimmen mit der Messung überein. Bemerkenswert ist, dass die Versuchsanlage unterhalb der für starre Flächen gültigen Wurfkennzahl arbeitet und dennoch ausgeprägte Wurfphasen aufweist – ein Effekt, den erst die Federwirkung der Oberfläche erklärt.

Zwischen den Modellvarianten und den experimentellen Punktmessungen verbleiben Abweichungen. Im Kriech- und weichen Wurfbetrieb wird die Fördergeschwindigkeit durchgängig überschätzt; im harten Wurfbetrieb wird die gemessene Effizienz nicht erreicht, da eine reibungsbasierte Beschreibung den übertragbaren Horizontalimpuls bei sehr kurzen Kontaktzeiten begrenzt. Entscheidend ist jedoch, dass sich das Systemverhalten über alle Varianten hinweg als stabil erwiesen hat: Richtung, Phasenstruktur und die Lage des effizienten Betriebsbereichs bleiben erhalten, unabhängig davon, welcher Kontakt- und Dämpfungsansatz gewählt wird. Das vorgeschlagene Modell trifft daher keine Punktvorhersagen, weist aber die beobachteten Abhängigkeiten und die Lage stabiler Förderbereiche belastbar aus. Genau darin liegt sein Nutzen für die Praxis: Als interaktives Berechnungswerkzeug erlaubt es, das Zusammenspiel von Fasergeometrie, Oberflächensteifigkeit, Flächenlast und Schwingungsanregung unmittelbar zu erproben, zwischen hohem Durchsatz und robustem Betrieb abzuwägen und aus einer gemessenen Fördergeschwindigkeit Rückschlüsse auf schwer zugängliche Systemgrößen zu ziehen. Für die Auslegung folgt daraus ein einfaches Kriterium: Ein Arbeitspunkt ist nicht nach dem höchsten Effizienzwert zu wählen, sondern möglichst mittig in einem zusammenhängenden Gebiet positiver Effizienz. Für die untersuchte Konfiguration ließe sich der Abstand zur Prozessgrenze auf diesem Weg deutlich vergrößern, ohne dass die Fördereffizienz abnimmt.

Als nächste Schritte ergeben sich die Erweiterung des Modells um den Ankopplungsfaktor, die Aufnahme der Stoßmechanik für den harten Wurfbetrieb sowie der Aufbau eines gemeinsamen Referenzrasters. Da die dimensionslose Formulierung Messungen unterschiedlicher Anlagen auf denselben Erregerraum abbildet, können dazu auch bereits veröffentlichte Punktmessungen herangezogen werden. Damit ließen sich die aus dem Erregerraum abgeleiteten Gebietsgrenzen absichern und konkurrierende Rechenansätze auf gemeinsamer Datenbasis vergleichen.

LITERATUR

- [1] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI 2333 – Schwingförderer für Schüttgut", VDI-Richtlinie, Düsseldorf, Deutschland, 2017.
- [2] T. Risch, Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsförderertechnik, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, Deutschland, 2011.
- [3] W. Mansour, M. Massoud, W. Morcos und C. Lauzier, "The Mechanism of Conveyance With Bristled Tracks", ASME. J. Eng. Ind., Vol. 97, Nr. 1, S. 167–174, Feb. 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. J. Mech. Des., Vol. 102, Nr. 1, S. 94–101, 1980, doi: 10.1115/1.3254726.
- [5] D. E. Mead, "Vibratory Pile Feeder", U.S. Patent 3,667,590, 1972.
- [6] G. Fantoni und M. Santochi, "Development and Testing of a Brush Feeder", CIRP Annals, Vol. 59, Nr. 1, S. 17–20, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.049.
- [7] E. Müller, T. Risch und M. Golder, "Analyse des Materialtransports auf Vibrationsflächenförderern für das vibrationsbasierte Blechhandling", Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2022, Nr. 18, 2022, doi: 10.2195/lj_proc_mueller_de_202211_01.
- [8] E. Müller, S. Strube, T. Risch und M. Golder, "Grundlagenuntersuchungen zur Faserdeformation an Vibrationsflächenförderern", 2024. [Online]. Verfügbar: urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-910234.
- [9] E. Müller, T. Risch und M. Golder, "Modellierung der Fördergutbewegung auf Vibrationsflächenförderern", Logistics Journal: Proceedings, no. 20, 2024, doi: 10.2195/lj_proc_mueller_de_202410_01.

Dipl.-Ing. Elisabeth Müller, Referentin der CEO der TRUMPF-Gruppe und Doktorandin an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz.

Adresse: TRUMPF SE + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen

E-Mail: elisabeth.mueller@trumpf.com

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

E-Mail: markus.golder@mb.tu-chemnitz.de

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

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz

E-Mail: thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de