

Simulative Untersuchung vibrationsbasierter Ausrichtkonzepte für Rohblechtafeln

Simulative investigation of vibration-based alignment concepts for raw sheet metal

Elisabeth Müller
Thomas Risch
Markus Golder

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

Für die effiziente Blechtafelbearbeitung mit hoher Prozesssicherheit und Teilequalität ist die positions- und winkelgenaue Ausrichtung der Rohblechtafeln vor dem Bearbeitungsprozess erforderlich. Dieser Beitrag untersucht vibrationsbasierte Ausrichtkonzepte mittels Mehrkörpersystem-Simulation. Die entwickelten Simulationsmodelle ermöglichen die Charakterisierung und den Vergleich der Konzepte hinsichtlich der Bewegungs- und Ausrichteigenschaften sowie der erforderlichen Antriebskraft.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, Blechbearbeitung, Handhabung, Mehrkörpersystem, Simulation]

Efficient, reliable, and qualitative sheet metal processing requires both positional and angular alignment of the raw metal sheets prior to the manufacturing process. This paper investigates different vibration-based alignment concepts using a multi-body system simulation. The simulation model is then used to characterize and compare, with respect to the motion and alignment properties as well as the required driving force, the diverse vibration-based alignment concepts.

[Keywords: vibratory feeder, sheet metal processing, handling, multi-body system, simulation]

1 EINLEITUNG

Bei der automatisierten Zuführung von Rohblechtafeln zu Bearbeitungsmaschinen treten infolge zahlreicher Handhabungsschritte mit geringerer Positioniergenauigkeit Lageabweichungen zur maschinenseitig geforderten Sollposition auf. Bleiben diese während des Bearbeitungsprozesses unberücksichtigt, minimiert dies u. a. die Prozesssicherheit, die Teilequalität und die erzielbare Ressourcenausnutzung. Steuerungsseitige Blechlagekorrekturen bedeuten neben dem erhöhten technischen Aufwand auch eine Maximierung unerwünschter Nebenzeiten, da die Blechtafelbelegung vor jeder Bearbeitung ent-

sprechend der aktuellen Blechlage anzupassen ist. Eine wirtschaftliche und effiziente Blechtafelbearbeitung wird durch Handlingeinrichtungen ermöglicht, die das Rohmaterial auf einer zweiten Werkstückauflagefläche außerhalb der Bearbeitungsmaschine hauptzeitparallel innerhalb definierter Positions- und Winkeltoleranzen zu den Maschinenkoordinaten ausrichten.

Dieser Beitrag untersucht zwei vibrationsbasierte Ausrichtkonzepte, welche besonders hinsichtlich der Unabhängigkeit von Rohblechformat und -ausgangsposition sowie des geringen Bauraumbedarfs im Vergleich zu bisher genutzten Ausrichteinrichtungen vorteilhaft erscheinen. Die Konzepte werden nach einer kurzen Vorstellung des Aufbaus und Wirkprinzips als MKS-Modelle aufgebaut, für ausgewählte Einsatzfälle simuliert und hinsichtlich praxisrelevanter Bewegungs- und Ausrichteigenschaften charakterisiert.

2 VIBRATIONSBASIERTE AUSRICHTKONZEPTE

Die untersuchten Ausrichtkonzepte sollen die positions- und winkelgenaue Lage einzelner Rohblechtafeln realisieren, indem diese vibrationsbasiert an mechanische Anschlageinrichtungen bewegt werden. Die vibrationsbasierte Blechtafelbewegung wird mittels bekannter Förderprinzipien der Vibrationsfördertechnik umgesetzt.

Vibrationsförderer werden bisher vorwiegend zum stetigen Transport von Schüttgütern oder schüttgutähnlichen Stückgütern kleinerer Abmessungen und Einzelmassen eingesetzt und sind meist auf ein spezifisches Fördergut abgestimmt [Ris11, DRN12, Dal17, KR^{D+}19]. Rohblechtafeln stellen hingegen mit Abmessungen bis 2 m x 4 m und Einzelmassen bis weit über einer Tonne große Stückgüter dar. Die Blechtafelformate und -stärken sind zudem je nach Fertigungsauftrag variabel, sodass auch die auszurichtenden Blechtafelmassen starken Schwankungen unterliegen.

Der Guttransport auf Vibrationsförderern erfolgt im Wesentlichen nach dem Mikrowurf- oder dem Gleitprinzip [Ris11, DR14, Dal17]. Beim Mikrowurfprinzip hebt das Gut aufgrund ausreichend hoher vertikaler Beschleunigungen vom Förderorgan ab und bewegt sich bis zum erneuten Auftreffen auf einer Mikrowurfbahn in Förderrichtung weiter. Die Förderung nach dem Gleitprinzip erfolgt hingegen mit dauerhaftem Kontakt zwischen Fördergut und Förderorgan durch betragsmäßig ungleiche Reibungskräfte oder unterschiedliche Wirkdauer der Reibungskräfte beim Hin- und Rückhub des Förderorgans. Eine Randerscheinung auf dem Gebiet der Vibrationsförderertechnik ist die Förderung mittels geneigter Faseroberflächen, sogenannter Vibrationsflächenförderer [Ris11, Dal17]. Infolge der vertikalen Schwingung des Förderorgans unter der Auflagelast des Förderguts verformen sich die Fasern und bewegen das Fördergut periodisch um einen geringfügigen Betrag in Richtung der Faserneigung.

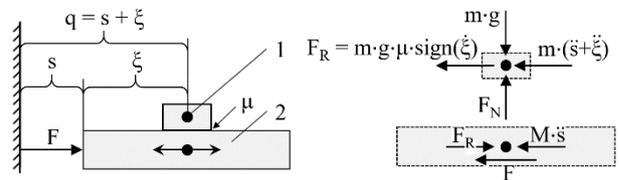
Besondere Herausforderungen bei der Nutzung der Vibrationsförderprinzipien für eine vibrationsbasierte Ausrichtung von Rohblechtafeln sind die sehr großen Einzelmassen sowie die signifikante Massenvarianz. Die vibrationsbasierte Rohblechbewegung nach dem Wurfprinzip wird aufgrund der zu erwartenden erhöhten Geräuschemission und Oberflächenabnutzung durch prinzipbedingt ständiges Aufprallen nach der Wurfphase in der Konzeptfindung ausgeschlossen.

2.1 AUSRICHTKONZEPT A

Das Ausrichtkonzept A, schematisch in Abbildung 2a skizziert, bewegt die Rohblechtafel nach dem nichtharmonischen Gleitprinzip, welches durch ein sich nichtharmonisch linear bewegendes Förderorgan mit langsamer Vorwärtsbewegung und schneller Rückwärtsbewegung gekennzeichnet ist. Während sich das Förderorgan vorwärtsbewegt, haftet die Blechtafel aufgrund der wirkenden Reibungskraft. Bei der Rückwärtsbewegung mit hoher Beschleunigung des Förderorgans wird die Haftreibungskraft überwunden, die Blechtafel beginnt zu gleiten und

bewegt sich relativ zum Förderorgan in Förderrichtung, bis die Bewegungsenergie durch die wirkende Gleitreibung vollständig abgebaut ist.

Dresig und Risch [DR14] modellieren das Fördergut zur Beschreibung der Bewegungsabläufe wie in Abbildung 1 gezeigt als einzelnen Massepunkt mit Reibkontakt zum Förderorgan.



1 - Fördergut m 2 - Förderorgan M

Abbildung 1: Kräfte und Koordinaten bei horizontaler Förderbewegung [DR14, DF20]

Das Gleichgewicht der Reibungs- und Trägheitskräfte am Fördergut führt nach Gleichung (1) zur Eliminierung des Einflusses der Gutmasse auf den Fördervorgang.

$$F_R = \mu m g \cdot \text{sign}(\dot{\xi}) = -m(\ddot{s} + \ddot{\xi}) \quad (1)$$

Die nichtharmonische Gleitförderung ist also prinzipbedingt nicht von der Blechtafelmasse abhängig. Das Reibverhalten und die Gleiteigenschaften werden allerdings über den Reibwert μ von der Oberflächenbeschaffenheit der Rohblechtafeln beeinflusst. Durch die permanent wirkende Reibungskraft zwischen Blechtafel und Förderorgan ist bei diesem Ausrichtkonzept außerdem eine verhältnismäßig lange Ausrichtdauer zu erwarten.

Die nichtharmonische Bewegungsform des Förderorgans wird durch einen wegerregenden Antrieb in Kombination mit einer zwangsläufigen Lagerung realisiert. Der Zwangslauf ermöglicht eine Unabhängigkeit der z-Höhe der Blechtafel von der variierenden Blechtafelmasse. Allerdings wird durch diesen auch die Förderorganbewegung und somit die Bewegungsrichtung der Blechtafel vorbestimmt, sodass eine nachträgliche Anpassung oder Änderung der auszurichtenden Sollposition schwieriger umzusetzen ist.

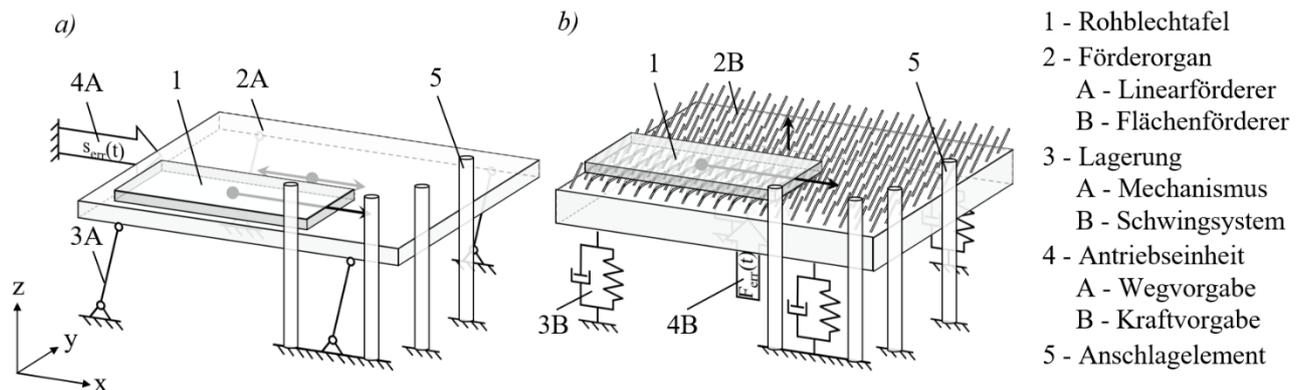


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ausrichtkonzepte; a) Ausrichtkonzept A; b) Ausrichtkonzept B

2.2 AUSRICHTKONZEPT B

Konzept B basiert, wie in Abbildung 2b dargestellt, auf einem Flächenförderer. Das mit geneigten Fasern bestückte Förderorgan wird zwangsläufig oder durch Kraft-erregung eines Schwingensystems in eine lineare, harmonische Schwingung in vertikaler Richtung versetzt.

Die Aufwärtsbewegung entgegen der Blechtafelmasse bewirkt eine geringe Durchbiegung der Fasern in Richtung ihrer Neigung und damit einhergehend eine resultierende Wegkomponente der aufliegenden Rohblechtafel. Bei der raschen Abwärtsbewegung des Förderorgans verbleibt die Blechtafel aufgrund der wirkenden Trägheitskräfte nahezu in ihrer Position, wodurch eine Relativbewegung und gleichzeitige Entspannung der Fasern auftreten. Der Kontaktpunkt Faser-Blechtafel wird folglich um den Betrag der Wegkomponente entgegen der Förderrichtung versetzt. Aus zahlreichen Auf- und Abwärts-schwingungen des Förderorgans resultiert eine kontinuierliche Blechtafelbewegung in Richtung der Faserneigung. Eine nachträgliche Anpassung der Ausrichtposition ist bei diesem Konzept allein durch Änderung der Faserorientierung möglich.

Das Bewegungsprinzip ist durch den weichen Faser-Gut-Kontakt geräuscharm und schonend. Zudem sind aufgrund der lediglich temporär wirkenden Reibungskräfte höhere Ausrichtgeschwindigkeiten zu erwarten. Die Faserdurchbiegung und die Eigenschaften des krafterregten Schwingensystems werden allerdings durch die Masse der aufgelegten Blechtafel beeinflusst.

3 MKS-MODELLAUFBAU

Die Mehrkörpersystem-Simulation (MKS-Simulation) ist eine numerische Simulationsmethode, die reale Mehrkörpersysteme aus mehreren, meist selbst unverformbaren, teilweise auch verformbaren, Einzelkörpern abbildet. Die Einzelkörper sind untereinander beweglich über Gelenke, kinematische Zwangsbedingungen oder Kraft-elemente gekoppelt. Im Bereich der Vibrationsförder-technik eignet sich die MKS-Simulation vorrangig zur Berechnung der Bewegungsform von Vibrationsförderern sowie zur Simulation der Wechselwirkungen zwischen Förderorgan und Fördergut, insbesondere einzel-nem Stückgut [KRD⁺19].

Zur Modellierung und Simulation der vibrationsbasierten Ausrichtkonzepte wird die Multisystem-Modellierungs-Software SimulationX genutzt. Beide Ausrichtkonzepte werden als dreidimensionale MKS-Modelle aufgebaut. Die wesentlichen Modellbestandteile von Vibrationsförderern sind das Förderorgan, die Lagerung und die Antriebs-einheit. Zur Modellierung der Ausrichtkonzepte werden entsprechend Abbildung 3 und Abbildung 4 zusätzlich jeweils eine Rohblechtafel als Fördergut, der Kontakt zwischen Rohblechtafel und Förderorgan sowie die mechanischen Anschlag-elemente abgebildet.

Um den Rechenaufwand bei zugleich ausreichender Er-gebnisgenauigkeit zu reduzieren, werden bei der Abbil-dung der Konzepte als MKS-Modelle zweckmäßige Ver-einfachungen getroffen. Der strukturelle Aufbau der Mod-ellbestandteile ist nachfolgend erläutert.

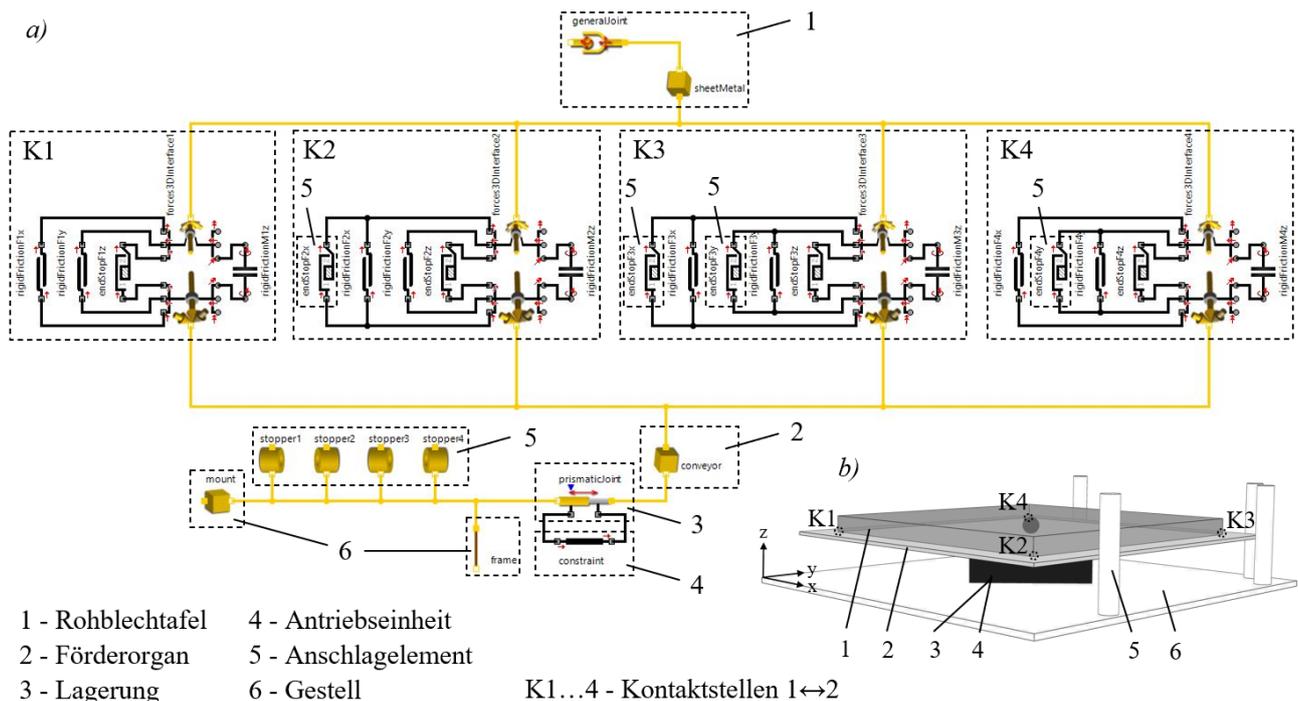


Abbildung 3: MKS-Modell des Ausrichtkonzepts A; a) Struktursicht; b) 3D-Ansicht

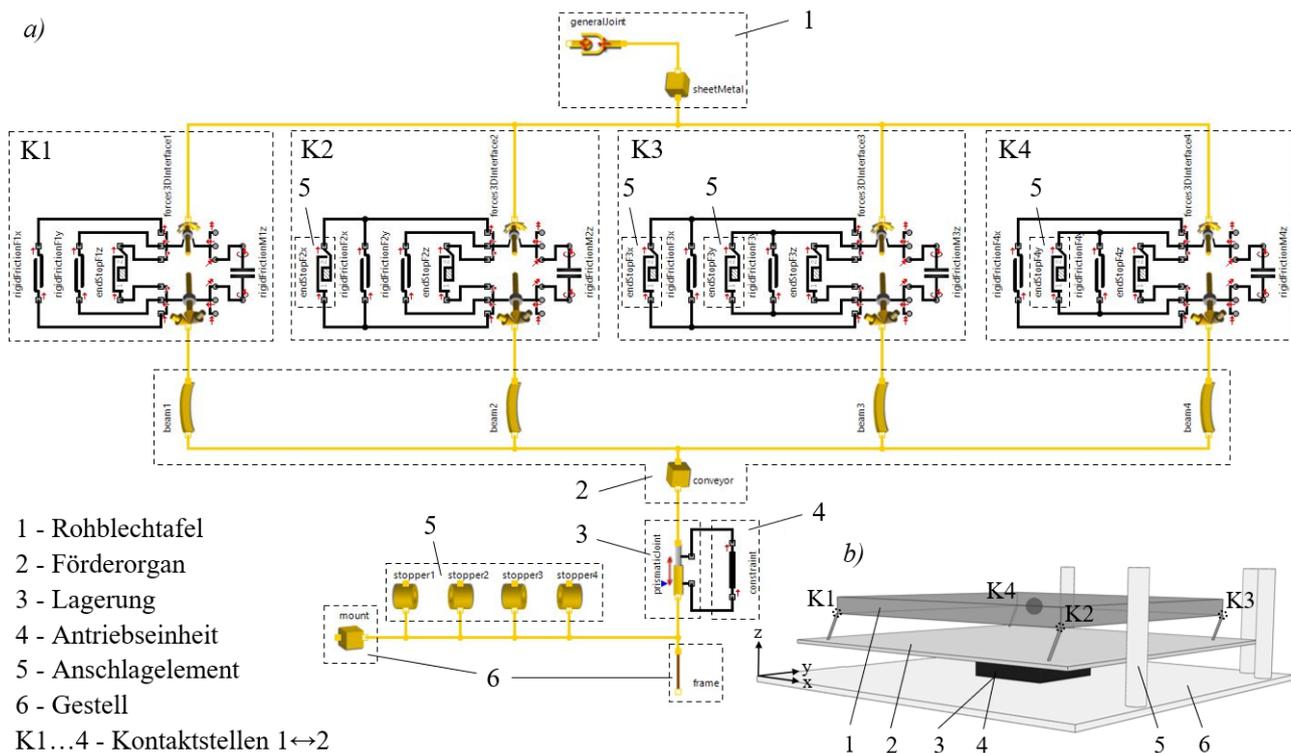


Abbildung 4: MKS-Modell des Ausrichtkonzepts B; a) Strukturansicht; b) 3D-Ansicht

3.1 ROHBLECHTAFEL

Die Rohblechtafel (1) wird vereinfacht als quaderförmiger Starrkörper modelliert. Sie ist frei beweglich an das Förderorgan angebunden, ihre Drehfreiheitsgrade um die x- und y-Achse werden allerdings durch Kopplung an ein entsprechend parametrisiertes Gelenk gesperrt. Dichte und Abmessungen des Quaderelements sowie dessen Anfangsverdrehung und -verschiebung werden zur besseren Anpassbarkeit des Modells aus separaten Funktionsblöcken eingelesen.

3.2 FÖRDERORGAN

Das Förderorgan (2) ist als einzelner Starrkörper abstrahiert. Zur Modellierung wird ein MKS-Quaderelement genutzt, dessen Abmessungen über separate Funktionsblöcke frei parametrierbar sind. Der Faserbelag des Flächenförderers wird im Modell vereinfacht durch vier elastisch verformbare Balkenelemente kreisförmigen Querschnitts abgebildet, die an einem Ende fest an das Förderorgan gekoppelt sind. Die Approximation des Faserbelags mit lediglich vier Fasern wird als praktikabel angenommen, da die Blechtafel als Starrkörper modelliert ist und ihre Drehfreiheitsgrade um die x- und y-Achse gesperrt sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die Fasern durch angepasste Material- oder Gestaltungseigenschaften entsprechend tragfähig zu dimensionieren sind. Variabel stellbare Faserparameter sind im Modell Länge, Durchmesser, Neigungswinkel und Orientierungsrichtung.

3.3 KONTAKT ROHBLECHTAFEL-FÖRDERORGAN

Der Kontakt zwischen Rohblechtafel und Förderorganoberfläche ist mittels vier räumlicher Kraft- und Momentenschnittstellen (K1...4) modelliert. Translatorische und rotatorische Reibstellen an den entsprechenden Schnittstellen der 3D-Kraftelemente dienen zur Einbindung der Reibung in die Modelle. Haftreibbeiwert, Gleitreibbeiwert und Reibmoment sind zur einfacheren Modifizierbarkeit in separaten Funktionsblöcken hinterlegt. Über elastische Anschläge an den translatorischen z-Schnittstellen der Kraftelemente wird die Auflage der Blechtafel auf dem Förderorgan derart abgebildet, dass ein Abheben von der Förderorganoberfläche prinzipiell möglich ist.

3.4 LAGERUNG, ANTRIEBSEINHEIT UND GESTELL

Das Förderorgan führt in beiden Ausrichtkonzepten eine lineare, translatorische Bewegung aus. Diese wird im Modell durch Anbindung an ein zwangsläufiges Schubgelenk (3) umgesetzt, welches bei Konzept A eine Translation in horizontaler und bei Konzept B in vertikaler Richtung erlaubt. Alle weiteren Freiheitsgrade des Förderorgans sind gesperrt.

Die Lagerung stützt sich am festen Gestell (6) ab, welches funktional mittels einer starren Bindung modelliert ist. Zur optischen Abbildung in der dreidimensionalen Ansicht wird außerdem ein MKS-Quaderelement genutzt.

Die Modellierung der Antriebe (4) erfolgt vereinfacht, aber für den gewünschten Simulationszweck ausreichend, durch Implementierung der zeitabhängigen Antriebsfunktionen in Funktionsblöcken. Die Antriebsfunktionen sind als Zwangsbedingungen innerhalb der Schubgelenke in die Modelle eingebunden. Bei Ausrichtkonzept A ist die Zwangsbedingung eine Wegdifferenz, die aus separaten Kennlinienelementen zur Verfügung gestellt wird. Verschiedene Kennlinien für eine vibrationsbasierte Bewegung der Blechtafel nach dem nichtharmonischen Gleitprinzip wurden anhand der Erläuterungen von Dresig und Risch [DR14] bzw. Fidlín [DF20] ermittelt. Für die Simulationsrechnungen sind die vier Antriebsfunktionen nach Tabelle 1 nutzbar.

Tabelle 1: Antriebsfunktionen des Ausrichtkonzepts A

Antriebsfunktion	A1	A2	A3	A4
Maximale Förderorganamplitude [mm]	25	10	5	2

Im Modell des Ausrichtkonzepts B wird eine zeitabhängige Wegdifferenz als Zwangsbedingung genutzt. Aufgrund des harmonischen Charakters werden die Kennlinien unter Angabe von Antriebsfrequenz und -amplitude mittels eines Signalgenerator-Elements erzeugt.

3.5 ANSCHLAGELEMENTE

Die mechanischen Anschlageinrichtungen (5), an denen die Rohblechtafel ausgerichtet werden soll, sind innerhalb der Simulationsmodelle funktional mittels eindimensionaler, translatorischer Anschlagelemente an den entsprechenden x- bzw. y-Anschlüssen der Kraftelemente K2, K3 und K4 integriert. Die optische Abbildung der Anschlagpositionen erfolgt zusätzlich durch vier starre Zylinderelemente.

4 PARAMETRIERUNG UND SIMULATIONSPLAN

Für einen angemessenen Rechen- und Zeitaufwand der Simulation ist zunächst die Eingrenzung eines Großteils der in den Simulationsmodellen frei wählbaren Parameter erforderlich. Hinsichtlich der Rohblechtafeln erfolgt die Einschränkung auf lediglich zwei verschiedene Parameterkombinationen aus Abmessungen und Material, sodass die maximal und minimal auszurichtende Blechtafelmasse entsprechend der Modelldimensionierung in den Simulationsrechnungen berücksichtigt wird. Beide Blechtafeln sind zu Beginn der Simulation in definiertem Abstand in x- und y-Richtung von der ausgerichteten Endlage entfernt positioniert, um für den separaten Vergleich von Bewegungs- und Ausrichteigenschaften vor dem Ausrichtvorgang zunächst einen reinen Förderprozess berechnen zu können.

Der Verdrehwinkel der Rohblechtafeln vor der Ausrichtung beträgt in allen Simulationsfällen rund 2° . Die Parametrierung des Fördererorgans, der Anschlagelemente, der Reibwerte und der Faseroberfläche ist in allen Simulationsfällen konstant. Die nicht direkt aus den Rahmenbedingungen resultierenden Parameter wurden zur Abbildung des erwartungsgemäßen Verhaltens im Simulationsmodell basierend auf dem bisherigen Kenntnisstand ermittelt.

Variable Eingangsgrößen sind im Modell des Ausrichtkonzeptes A nach Eingrenzung der Simulationsfälle lediglich die Antriebsfunktion und die Rohblechtafelmasse. Die vier vorab ermittelten Antriebsfunktionen werden jeweils mit der maximal und minimal auszurichtenden Blechtafelmasse simuliert. Bei Ausrichtkonzept B sind neben der Blechtafelmasse sowohl die Antriebsfrequenz und -amplitude als auch der Faserneigungswinkel modifizierbare Eingangsgrößen. Eine erste Simulationsrechnung mit charakteristischen Frequenz- und Amplitudenwerten dient als Referenz. In weiteren Simulationsrechnungen wird jeweils einer der Parameter variiert.

5 AUSWERTUNG DER SIMULATION

Die Ausgangsgrößen der Simulationsrechnungen sind die translatorischen und rotatorischen Bewegungsverläufe des Blechtafelschwerpunktes in x-, y- und z-Richtung und um die z-Achse sowie der Verlauf der erforderlichen Antriebskraft des Schubgelenks. Die Simulationsergebnisse beider Modelle werden hinsichtlich der Bewegungsauflösung, der erforderlichen Ausrichtzeit, der erreichbaren Positionier- und Ausrichtgenauigkeit, der Antriebskraft und der Toleranz bei Blechmassenvarianz vergleichend ausgewertet.

5.1 BEWEGUNGS-AUFLÖSUNG

Die Charakterisierung der Bewegungsauflösung erfolgt ausgehend von den berechneten Bewegungsverläufen des Blechtafelschwerpunktes. Konzept A weist in allen simulierten Fällen eine grobe Blechtafelbewegung auf. Abbildung 5 zeigt die horizontale Gutbewegung dieses Konzepts beispielhaft für die minimal auszurichtende Blechtafelmasse bei Nutzung der Antriebsfunktion A3 als violetten Kurvenzug. Die resultierende Wegkomponente der Blechtafel beträgt in diesem Simulationsfall durchschnittlich etwa 4 mm je Förderorganhub. Mit zunehmender Förderorganamplitude ist eine Verminderung der Bewegungsauflösung, mit abnehmender Förderorganamplitude eine Erhöhung ersichtlich. Bei Berechnung der Antriebsfunktion A4 mit kleinster maximaler Förderorganamplitude ergeben sich jedoch sowohl für die maximale als auch die minimale Blechtafelmasse weiterhin resultierende Wegkomponenten von knapp über 2 mm je Förderorganhub.

Für Ausrichtkonzept B ist anhand der Bewegungsverläufe des Blechtafelschwerpunktes in allen Simulationenfälle eine hochaufgelöste Gutbewegung erkennbar. In Abbildung 6 ist beispielhaft die Horizontalbewegung der maximal auszurichtenden Blechtafelmasse bei Nutzung eines Faserwinkels von 70° zur Horizontalen als violetter Kurvenzug dargestellt.

5.2 AUSRICHTZEIT

Die Ausrichtzeit bezeichnet die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Blechdrehung um die z-Achse bei Erreichen des ersten Anschlaglements und dem Ende der Blechdrehung bei in guter Näherung konstant bleibendem Endverdrehwinkel.

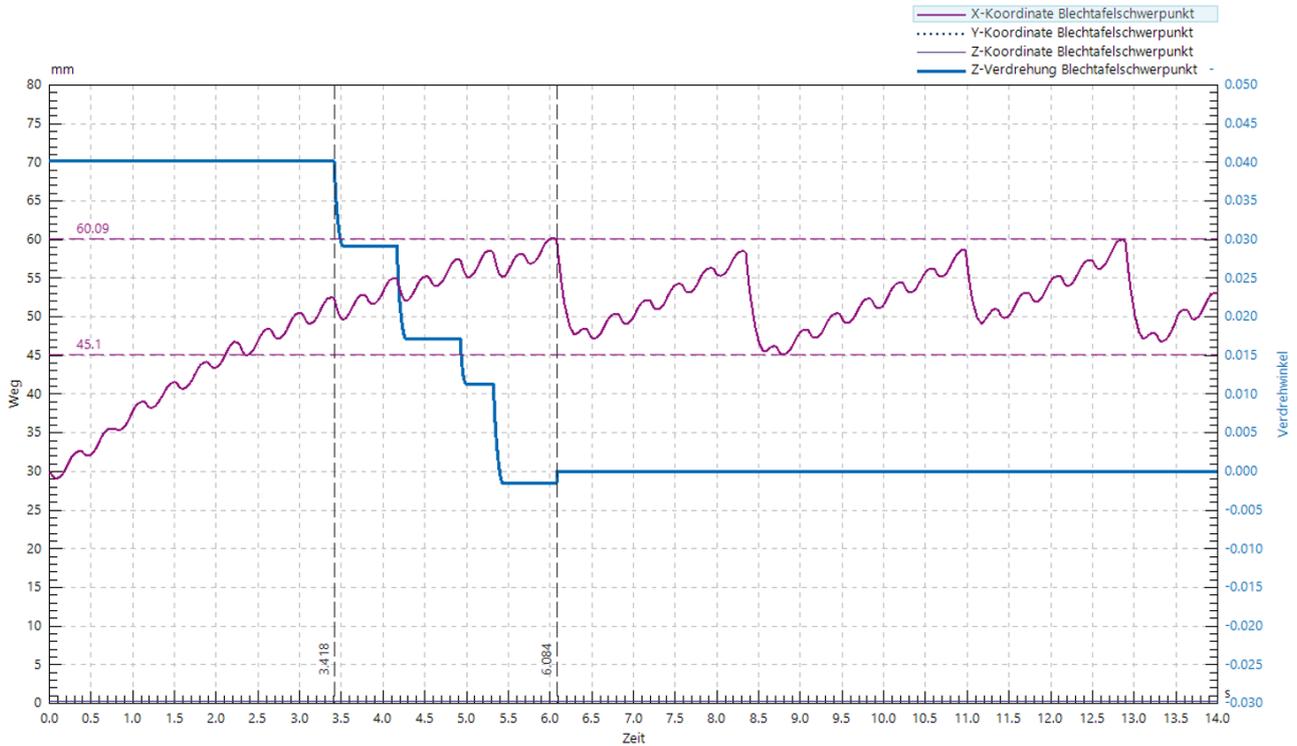


Abbildung 5: Ausrichtkonzept A – Bewegungsverlauf der minimal auszurichtenden Blechtafelmasse bei Antriebsfunktion A3

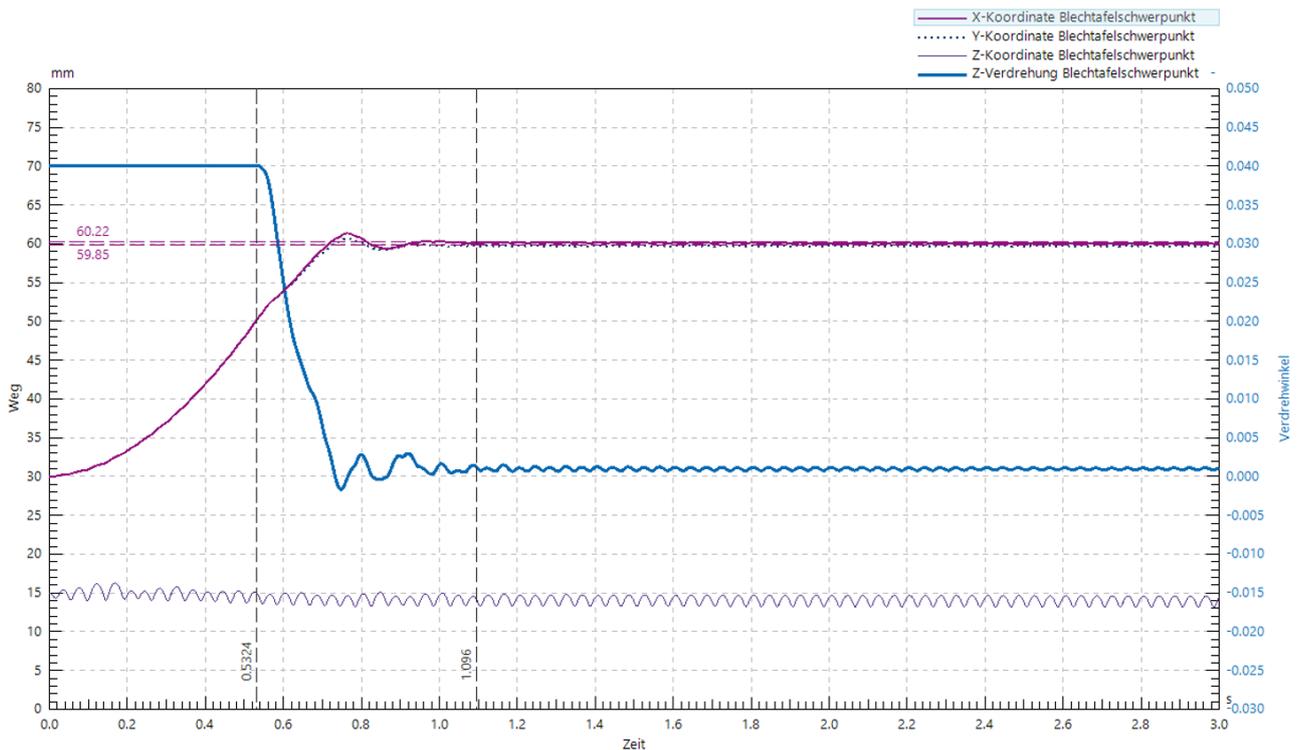


Abbildung 6: Ausrichtkonzept B – Bewegungsverlauf der maximal auszurichtenden Blechtafelmasse bei Faserwinkel 70°

Bei Ausrichtkonzept A tritt unter Nutzung der Antriebsfunktionen A1 und A2 mit größeren maximalen Förderorganamplituden ein starker Rückprall der Blechtafeln von den Anschlagelementen auf, sodass keine dauerhafte Endlage erreicht wird. Bei den Simulationsrechnungen mit den Antriebsfunktionen A3 und A4 beträgt die Ausrichtzeit durchschnittlich vier Sekunden. Konzept B weist Ausrichtzeiten von durchschnittlich knapp unter einer Sekunde auf.

5.3 POSITIONIERGENAUIGKEIT

Die Positioniergenauigkeit ist durch die Schwankungen der Endlage des Blechtafelschwerpunktes nach dem Ausrichtvorgang charakterisiert. Die Simulationsergebnisse des Ausrichtkonzepts A ermöglichen bei größeren Förderorganamplituden aufgrund des erwähnten Rückpralls keine sinnvolle Bestimmung der Positioniergenauigkeit. Bei Berechnung der Antriebsfunktionen A3 und A4 ergibt sich eine durchschnittliche Schwankung der Endlage von 13 mm bzw. 7 mm. Ausrichtkonzept B ermöglicht im Durchschnitt eine Positioniergenauigkeit von 0,8 mm.

5.4 AUSRICHTGENAUIGKEIT

Die Schwankung des Verdrehwinkels der Blechtafel nach dem Ausrichten und dessen maximale Abweichung vom Sollwinkel werden durch die Ausrichtgenauigkeit berücksichtigt. Die Auswertung der Bewegungsverläufe des Ausrichtkonzepts A ergibt bei den Antriebsfunktion A3 und A4 einen Endverdrehwinkel von nahezu 0° , welcher keinen weiteren Schwankungen unterliegt. Der bleibende Verdrehwinkel der Blechtafeln bei Ausrichtkonzept B beträgt durchschnittlich etwa $0,2^\circ$ mit einer Schwankung von $\pm 0,1^\circ$.

5.5 MAXIMAL ERFORDERLICHE ANTRIEBSKRAFT

Die Maximalwerte der Antriebskraft bestimmen sich aus den mit maximal auszurichtender Blechtafelmasse berechneten Antriebskraftverläufen. Je nach Antriebsfunktion A1 bis A4 liegt die maximal erforderliche Antriebskraft bei Ausrichtkonzept A im Bereich von rund 700 N bis knapp 2000 N.

Ausrichtkonzept B weist eine durchschnittliche, maximale Antriebskraft von 2500 N auf, wobei eine deutliche Abhängigkeit sowohl von der Schwingungsamplitude als auch dem Faserneigungswinkel auftritt. Bei größerer Schwingungsamplitude oder größerem Faserwinkel zur Horizontalen steigt die erforderliche Antriebskraft, bei Reduzierung der Schwingungsamplitude oder des Faserwinkels sinkt sie.

5.6 TOLERANZ BEI BLECHMASSENVARIANZ

Die Simulationsergebnisse des Ausrichtkonzepts A zeigen, dass mit allen eingesetzten Antriebsfunktionen sowohl die Bewegung der maximal als auch der minimal auszurichtenden Blechtafelmasse umsetzbar ist. Die Nutzung kleinerer maximaler Förderorganamplituden ermöglicht prinzipiell auch das Ausrichten beider Tafelmassen. Im Hinblick auf die erforderliche Antriebskraft ist keine eindeutige Massenabhängigkeit erkennbar.

Ausrichtkonzept B realisiert mit allen berechneten Kombinationen aus Schwingungsfrequenzen, -amplituden und Faserneigungswinkeln eine Bewegung und Ausrichtung der maximalen Belademasse. Der Transport der minimalen Belademasse erfordert allerdings eine modellseitige Anpassung der Faserparameter, sodass diesbezüglich eine signifikante Massenabhängigkeit erkennbar ist. Die erforderliche Antriebskraft nimmt bei maximaler Blechtafelmasse deutlich höhere Werte an als bei minimaler Blechtafelmasse. Demnach tritt auch hinsichtlich der erforderlichen Antriebskraft eine Abhängigkeit von der auszurichtenden Tafelmasse auf.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag befasst sich mit der simulativen Untersuchung zweier vibrationsbasierter Ausrichtkonzepte für die positions- und winkelgenauen Lageausrichtung von Rohblechtafeln. Im Anschluss an eine kurze Erläuterung des grundlegenden Aufbaus und Wirkprinzips der Konzepte erfolgt deren Abbildung als MKS-Simulationsmodelle. Die vorgestellten Modelle ermöglichen die Berechnung sowohl des Förder- als auch des Ausrichtprozesses in Abhängigkeit der Förderorganbewegung und Blechtafelmasse und liefern für ausgewählte Simulationsfälle die Bewegungsverläufe der Rohblechtafel sowie die erforderliche Antriebskraft.

Basierend auf den Simulationsergebnissen erfolgt die Charakterisierung beider Ausrichtkonzepte und deren Vergleich hinsichtlich ihrer Bewegungs- und Ausrichteigenschaften. Konzept A weist in Bezug auf die Ausrichtgenauigkeit, die erforderliche Antriebskraft und die Toleranz bei variabler Blechtafelmasse wesentlich bessere Eigenschaften zur Blechtafelenausrichtung auf als Konzept B. Eine grobe Bewegungsauflösung, lange Ausrichtdauer sowie geringe Positioniergenauigkeit sind jedoch nachteilig. Ausrichtkonzept B erzielt im Vergleich zu Konzept A hinsichtlich dieser Eigenschaften bessere Ergebnisse. In Bezug auf die Ausrichtgenauigkeit ist Konzept B mit einem durchschnittlich verbleibenden Endverdrehwinkel von $0,2^\circ \pm 0,1^\circ$ zwar zufriedenstellend, jedoch insgesamt schwächer als Konzept A.

Bedeutende Nachteile für den praktischen Einsatz des Konzepts B zeigen sich in der signifikanten Massenabhängigkeit des Faserbelags und der Antriebskraft.

Für erste vergleichende Untersuchungen bei angemessener Rechenzeit wird beim Aufbau der MKS-Simulationsmodelle eine Anzahl von vereinfachenden Annahmen getroffen. Ein Großteil der Modellbestandteile ist als Starrkörper abgebildet, wodurch deren Eigenverformungen und Strukturschwingungen in den Berechnungen nicht berücksichtigt sind. Durch die Approximation der Kontaktfläche zwischen Rohblechtafel und Förderorgan an lediglich vier Kontaktstellen werden zudem Einflüsse von Oberflächenrauigkeiten vernachlässigt. Für die Einbindung der Antriebseinheiten in die Simulationsmodelle wird vereinfacht auf vorab berechnete Antriebsfunktion zurückgegriffen. Beide Modelle beschränken sich bisher auf die Abbildung linearer Förderorganbewegungen. Außerdem erfolgt eine Eingrenzung der berechneten Simulationsfälle u. a. hinsichtlich Materialparametern, Abmessungen und Lageabweichungen.

Eine Erweiterung der Simulationsmodelle zur Berücksichtigung von dynamischen Einflüssen der Struktur und der Antriebseinheiten, von Oberflächenbeschaffenheiten und nichtlinearen Förderorganbewegungen sowie umfangreicheren Einsatzfällen ist für weitere Erkenntnisse in künftigen Untersuchungen erstrebenswert. Ebenfalls sollte eine experimentelle Validierung der Simulationsmodelle durchgeführt und gegebenenfalls anhand des Vergleichs experimenteller und simulativer Ergebnisse Modellabstimmungen vorgenommen werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Optimierungsmöglichkeiten an beiden Ausrichtkonzepten. Bei Ausrichtkonzept A ist zu untersuchen, wie eine Verbesserung der Bewegungsauflösung, der Ausrichtzeit und der Positioniergenauigkeit beispielsweise durch angepasste Antriebsfunktionen erreicht werden kann. Bei Ausrichtkonzept B gilt es insbesondere, die Grenzen und Einflussfaktoren der Massenabhängigkeit zu ermitteln und zu prüfen, inwieweit der praktische Einsatz des Konzeptes bei variabler Blechtafelmasse sinnvoll möglich ist. Zudem sind Maßnahmen zur Erhöhung der Ausrichtgenauigkeit des Konzeptes B zu identifizieren. Die Beurteilung beider Ausrichtkonzepte und letztlich die Auswahl eines Vorzugsprinzips sollten auf Basis weiterer Erkenntnisse erfolgen.

LITERATUR

[Dal17] Dallinger, N.: Die Diskrete Elemente Methode als Simulationsmethode in der Vibrationsfördertechnik. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2017.

[DF20] Dresig, H.; Fidlin, A.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. 4., korrigierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2020. ISBN 978-3-662-59136-9.

[DR14] Dresig, H.; Risch, T.: Vibrationsfördertechnik. Gleitförderung auf nicht harmonisch beschleunigten Förderorganen. Technische Universität Chemnitz, 2014.

[DRN12] Dallinger, N.; Risch, T.; Nendel, K.: Simulation von Förderprozessen bei Vibrationsförderanlagen. Simulation of Conveying Processes in Vibratory Conveyors. Logistics Journal 2012(01), 2012.

[KRD*19] Kuhn, C. et al.: Simulation von Schwingensystemen für die Vibrationsfördertechnik mit SimulationX. Simulation of oscillating systems for the usage on vibration conveyors with SimulationX. Logistics Journal: Proceedings 2019(12), 2019.

[Ris11] Risch, T.: Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsfördertechnik. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2011.

Dipl.-Ing. Elisabeth Müller, Doktorandin an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz mit dem Forschungsschwerpunkt Vibrationsfördertechnik, erhielt 2020 Ihren Diplomabschluss in Maschinenbau an der Technischen Universität Dresden.

Telefon: +49 35951 8-1335

E-Mail: elisabeth.mueller@s2021.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Thomas Risch, Leiter der Forschungsgruppe Vibrationsfördertechnik und Systemdynamik innerhalb der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz, promovierte 2011 an der TU Chemnitz auf dem Fachgebiet der Vibrationsfördertechnik.

Telefon: +49 371 531-35166

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 sowie von 2015 bis 2018 Inhaber der Stiftungsprofessur Sichere mechatronische Systeme der Intralogistik am Karlsruher Institut für Technologie.

Telefon: +49 371 531-36902

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