

Das laterale Laufverhalten von Stahlprozessbändern – Erweiterung der Betrachtungen auf Bänder mit geringer Bandspannung

The lateral movement of steel-processing-belts – extended consideration on belts with low belt tension

Franz Paulischin
Georg Kartnig

Forschungsbereich Fördertechnik und Konstruktionslehre
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Technische Universität Wien

Die Spurführung bei Stahlprozessbändern erfolgt systembedingt durch geregelte Trommelverstellung. Für stark gespannte Bänder existieren verschiedene Modelle, die das laterale Laufverhalten beschreiben. Nach einer Vorstellung dieser Modelle für das seitliche Verlaufen eines Bandes werden Ansätze für schwach gespannte Bänder beschrieben. Messungen an einem Prüfstand für Stahlprozessbänder zeigen die Einsatzgrenzen der Modelle auf. Abschließend wird gezeigt, wie mittels der Diskreten Elemente Methode das seitliche Verlaufen eines Bandes simuliert werden kann.

[Schlüsselwörter: Stahlbandförderer, Gurtförderer, Bandförderer, Spurführung, Schiefelauf, Laufverhalten, DEM]

For steel-processing-belts, the tracking is typically performed by the feedback controlled drum adjustment. If the belt tension is high, there are several models that can describe the lateral movement behavior. After a presentation of these models for lateral running, approaches for the description of steel belts with lower tension are given. Measurements on a test stand for steel process belts show the application limits of the models. Finally, it will be shown how the discrete element method can be used to simulate the sideways running of a belt.

[Keywords: steel processing belt, belt conveyor, belt misalignment, tracking, DEM]

1 EINLEITUNG

Stahlprozessbänder sind spezielle Förderbänder bei denen ein Stahlband mit der Dicke von einem bis wenigen Millimetern umläuft. Diese Anlagen kommen beispielsweise in der Chemischen Industrie oder bei der Produktion von Backwaren zum Einsatz. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Stahlbandes sind viele, von Gummigurten be-

kannte, Spurführungssysteme hier nicht einsetzbar. Folglich werden Stahlbänder auf zylindrischen, lagegeregelten Trommeln geführt. Dem Regler liegt ein Bandmodell zugrunde, das nur für hohe Bandspannung zufriedenstellend funktioniert. Folgende Anwendungen erfordern jedoch schwach gespannte Bänder:

- beim Anlauf der Anlage ausgehend vom total entspannten Band wie z.B. bei der Bandfertigung oder der ersten Inbetriebnahme einer Bandmaschine
- beim Betrieb von revitalisierten Anlagen, wenn ein neues Band mit größeren Abmessungen (Breite b , Dicke h) auf alten Trommelstationen läuft. Die maximal zulässige Zugkraft im Band wird durch die bestehende Konstruktion begrenzt. Die Anlage muss mit reduzierter Bandspannung betrieben werden.

Für diese schwach gespannten Bänder werden geeignete Modelle gesucht.

Dieser Artikel beschäftigt sich zu Beginn mit der Modellbildung des Stahlbandes. Es werden bekannte Modelle für das stark gespannte Stahlprozessband vorgestellt sowie die geometrische Situation im Auflaufpunkt genauer betrachtet. Darauf aufbauend wird ein neuer Ansatz für schwach gespannte Bänder vorgestellt. Dieses soll durch Messungen am Prüfstand sowie durch Simulation (FEM und DEM) validiert werden.

2 BANDPRÜFSTAND

Die bei den Messungen eingesetzte Bandmaschine (Abbildung 1) besteht im Wesentlichen aus zwei zylindrischen Trommeln, die auf einem steifen Rahmen montiert sind. Die Umlenktrommel UT ist frei drehbar und an ihren beiden Achsenden auf Linearführungen gelenkig montiert.

Sie wird zum Spannen des Bandes sowie zur Beeinflussung des Bandverlaufs verwendet. Die Antriebstrommel AT ist mit einem Trommelmotor ausgestattet und treibt das Band an. Zusätzlich können die beiden Achsenden der AT mittels Gewindespindeln manuell in der Höhe verstellt werden.

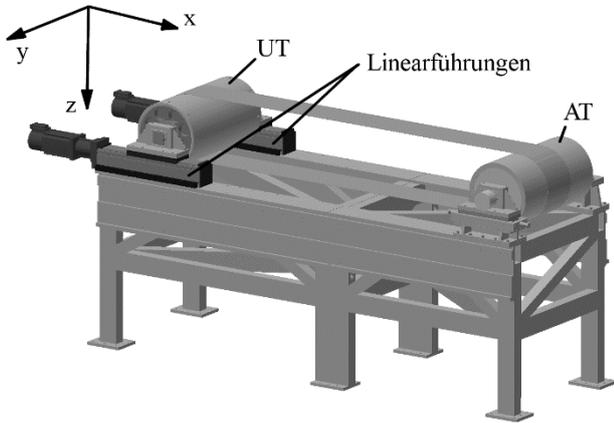


Abbildung 1: Prüfstand mit stark gespanntem Band, Achsabstand 2m, Trommeldurchmesser/-breite 340/600 mm,

2.1 TROMMELVERSTELLUNG/BANDBEEINFLUSSUNG

Die Regelung der Bandposition in y-Richtung erfolgt typischerweise durch die Schrägstellung der Umlenkstrommel UT um eine der nachfolgend beschriebenen Achse. Die dabei auftretenden Verstellwinkel bewegen sich im Bereich von einigen Hundertstel bis Zehntel Grad. Um diesen Winkel und die daraus resultierenden Effekte deutlich abbilden zu können, sind die nachfolgenden Skizzen in Bezug auf die Verstellwinkel stark vergrößert dargestellt.

2.1.1 DREHUNG UM DIE Z-ACHSE: VERDREHEN

Die beiden Enden der Achse der Umlenkstrommel UT (Abbildung 2) werden in x-Richtung gegengleich um den Weg Δx verschoben. Folglich verdreht sich die Trommelachse um den Winkel β .

$$\beta = \tan^{-1} \frac{2 * \Delta x}{b} \approx \frac{2 * \Delta x}{b}$$

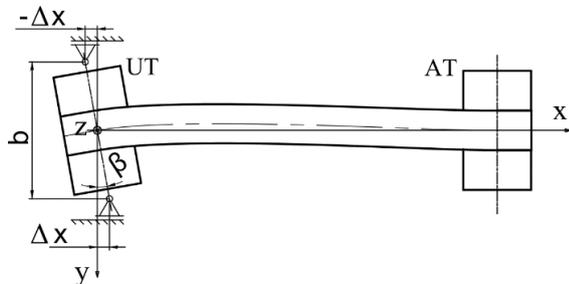


Abbildung 2: Verdrehen einer Trommel

2.1.2 DREHUNG UM DIE X-ACHSE: VERSCHRÄNKEN

Die Trommelachse der UT (Abbildung 3) wird an ihren Enden gegengleich in z-Richtung gehoben bzw. abgesenkt. Die Trommelachsen verschränken sich um den Winkel θ .

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 * \Delta z}{b} \approx \frac{2 * \Delta z}{b}$$

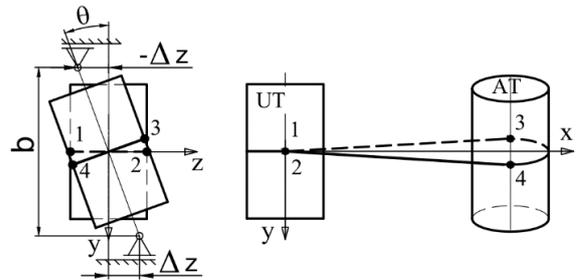


Abbildung 3: Verschränken der Trommeln

Bei manchen Prozessen ist das Verschränken der Trommeln unzulässig, da waagrechte Trommelachsen für die Übergabe des Fördergutes oder ein waagrechttes Band, für beispielsweise das Gießen von Folien, gefordert werden.

2.2 VERLAUFSDIAGRAMME

Abbildung 4 zeigt ein für Trommelverdrehung charakteristisches Verlaufsdiagramm für das Obertrum eines stark gespannten Bandes. Die Dauer der Einschwingphase sowie die auftretenden Amplituden sind abhängig von den Bandabmessungen sowie von der Bandspannung.

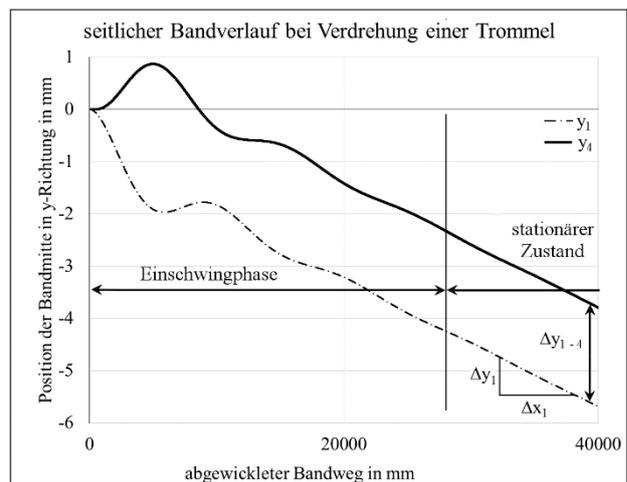


Abbildung 4: typisches Verlaufsdiagramm – seitlicher Bandverlauf bei Verdrehung einer Trommel

Aus dem stationären Bereich lassen sich folgende Kennwerte ablesen:

- stationäre Verlaufsgeschwindigkeit: Steigung der Kurve im stationären Zustand

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_4 = \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} = \frac{\Delta y_4}{\Delta x_4}$$

- stationärer Versatz: Differenz der y-Koordinaten von Ablauf- und Auflaufpunkt eines Bandtrums

$$\Delta y_{1-4} = |y_1 - y_4|$$

3 MODELLBILDUNG

In diesem Kapitel werden die geometrischen Verhältnisse im Auflaufpunkt eines biegeschlaffen Seils sowie eines Bandes auf einer zylindrischen Trommel genauer betrachtet. Aus ihnen lässt sich das laterale Laufverhalten des Seils/Bandes bei Verdrehung (β) oder Verschränkung (θ) einer Trommel ableiten. Anschließend wird ein geschlossenes Seil auf einer Bandmaschine mit zwei zylindrischen Trommeln betrachtet. Mit Hilfe des Seilmodells - einem biegeschlaffen, stark gespannten Seil auf zwei Trommeln - werden die Vorgänge an den Auflauf- und Ablaufpunkten (Abbildung 5, Punkte 1, 3 und 2, 4) sowie die gegenseitige Beeinflussung dieser Punkte untereinander beschrieben. Abschließend wird das Balkenmodell [Egg00] [Gab11], ein mathematisches Ersatzmodell für stark gespannte Stahlprozessbänder, vorgestellt.

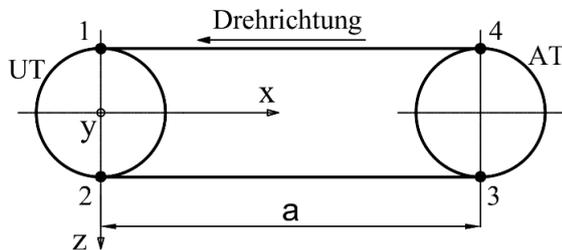


Abbildung 5: Benennung der Auflauf- und Ablaufpunkte

3.1 STARK GESPANNTES BAND - SEILMODELL

Aufgrund der fehlenden Biegesteifigkeit und unter der Annahme von reinem Haften, sind die Auf- und Ablaufpunkte jedes Seiltrums geradlinig miteinander verbunden. Solange die Trommeln parallel ausgerichtet sind läuft das Seil auf den Trommeln an gleichbleibender y-Position um. Wird jedoch die Umlenkrolle UT um den Winkel β verdreht oder um den Winkel θ verschränkt, beginnt das Seil seitlich zu wandern. Bei genauer Betrachtung eines Auflaufpunktes (Abbildung 6) wird die Richtung der Wanderbewegung erkennbar. Daraus lassen sich in weitere Folge die zeitliche Abfolge der Wanderbewegungen (siehe Abbildung 7, I – VI) und die gegenseitige Beeinflussung der Auf- und Ablaufpunkte einer Bandmaschine skizzieren. Das zugehörige Verlaufsdiagramm ist in Abbildung 8 dargestellt.

3.1.1 SEILMODELL: VERDREHEN DER TROMMEL

Nach einer Trommelverdrehung (Abbildung 7, I) um den Winkel β , weicht die Seilrichtung von der Trommelnormale ab (Abbildung 6). Der Auflaufwinkel β_0 entspricht dem Verdrehwinkel β . Wird die Trommel nun angetrieben und das Band um den Weg Δx bewegt, verläuft dieses seitlich um den Weg Δy_1 .

$$\Delta y_1 = \Delta x * \beta_0$$

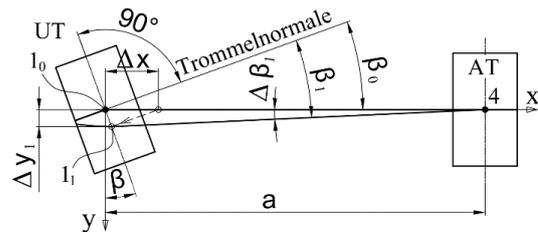


Abbildung 6: Seilmodell nach Verdrehung einer Trommel: geometrische Situation im Auflaufpunkt

Durch geradliniges Verbinden des neuen Auflaufpunktes I_1 mit dem unveränderten Ablaufpunkt 4 ist die Richtung des Seiltrums bestimmt (II). Dadurch wird der Auflaufwinkel um $\Delta\beta_1$ vermindert. Der neue Auflaufwinkel kann errechnet werden.

$$\beta_1 = \beta_0 - \Delta\beta_1$$

$$\Delta\beta_1 = \frac{\Delta y_1}{a}$$

Nach einer halben Trommelumdrehung (III) wird die Wanderbewegung des Auflaufpunktes 1 am Ablaufpunkt 2 sichtbar. Die y-Position des Ablaufpunktes 2 entspricht jener des Auflaufpunktes 1 eine halbe Umdrehung zuvor. Das ablaufende Seiltrum beginnt sich ebenfalls schief zu stellen (IV) und die Situation am Auflaufpunkt 3 der Antriebstrommel AT ändert sich allmählich. Mit zunehmender Schiefstellung des Seiltrums wird der Auflaufwinkel im Punkt 3 größer und die seitliche Wandergeschwindigkeit dieses Punktes nimmt zu (V). Erst eine ganze Trommelumdrehung nach dem Start beginnt Ablaufpunkt 4 auf der AT zu verlaufen (VI).

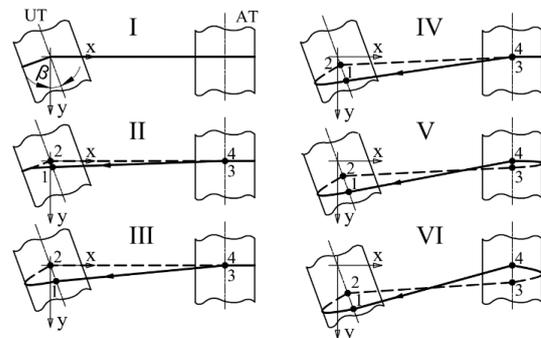


Abbildung 7: Verlaufen des Seils bei Trommelverdrehung

Folglich beginnt dieser langsam zu wandern. Ab diesem Zeitpunkt beeinflussen sich alle vier Punkte (1 – 4) gegenseitig. Es folgt ein Einschwingvorgang (Abbildung 8), dessen Dauer abhängig von der Geometrie der Bandmaschinen ist. Mit den Abmessungen $a = 2\text{ m}$, $R = 170\text{ mm}$ und $\beta = -0,042^\circ$ klingt dieser nach wenigen Trommelumdrehungen ab und alle 4 Punkte wandern mit gleicher Geschwindigkeit seitwärts.

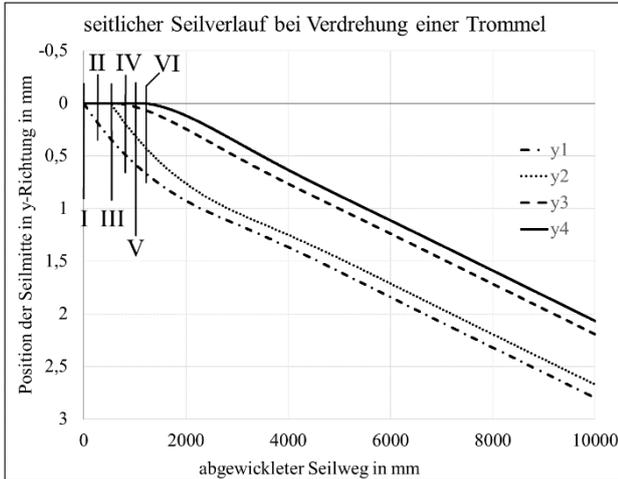


Abbildung 8: Verlaufsdiagramm eines biegeschlaffen Seils auf 2 zylindrischen Trommeln: $a=2\text{m}$, $R = 170\text{ mm}$, $\beta=0,042^\circ$

Aufgrund der Symmetrie der Bandmaschine um eine Ebene durch beide Achsen ist die Verlaufsrichtung des Seils bei einer Trommelverdrehung unabhängig von der Drehrichtung der Antriebstrommel. Das Seil verläuft seitlich immer in Richtung niedrigerer Vorspannung [Gabl1].

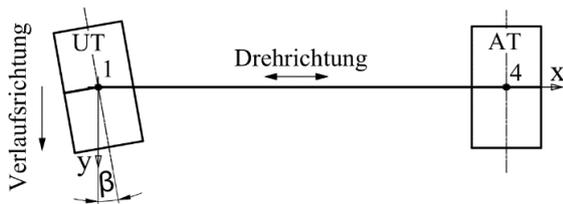


Abbildung 9: Verlaufsrichtung bei Trommelverdrehung

3.1.2 SEILMODELL: VERSCHRÄNKEN DER TROMMEL

Beim Verschränken der Trommeln um den Winkel θ , werden die darauf liegenden Auf- und Ablaufpunkte in y -Richtung um $\pm \Delta y_0$ verschoben. Die Steuerwirkung entsteht durch den Versatz dieser Punkte. [Gabl1]

$$\Delta y_0 = \Delta y_{1-4} = \Delta y_{2-3} = |R * \theta|$$

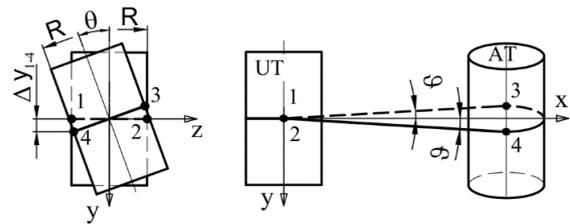


Abbildung 10: Verschränken der Trommeln

Durch die Verschränkung der Antriebstrommel AT um den Winkel θ (siehe Abbildung 11, Zeitpunkt I) liegen die Punkte 3 und 4 um $-\Delta y_0 / +\Delta y_0$ verschoben. Daraus ergibt sich der Auflaufwinkel ϑ_0 , der für das Ober- und Untertrum gilt.

$$|\vartheta_0| = \frac{\Delta y_0}{a} = \frac{|R * \theta|}{a}$$

Wird die Trommel nun angetrieben und das Band um den Weg Δx bewegt, verläuft dieses seitlich um den Weg Δy_1 .

$$\Delta y_1 = \Delta x * \vartheta_0$$

Die Trommelverschränkung wirkt sich sofort auf das Ober- und Untertrum gleichermaßen aus, sodass beide Auflaufpunkte mit derselben Geschwindigkeit verlaufen (siehe Verlaufsdiagramm in Abbildung 12). Diese hat zu Beginn ihr Maximum und nimmt in Folge der Verringerung des Auflaufwinkels durch das Verlaufen der Auflaufpunkte ab. Nach einer halben Trommelumdrehung beginnen die Ablaufpunkte 2 und 4 zu wandern (III). Die y -Positionen der Ablaufpunkte entsprechen jener der Auflaufpunkte vor einer halben Trommelumdrehung. Es folgt ein Einschwingvorgang, dessen Dauer abhängig von der Geometrie der Bandmaschinen ist. Je kleiner der Achsabstand der Bandmaschine und je größer der Durchmesser der Trommeln ausgeführt sind, desto deutlicher und länger fällt das Einschwingen aus. Mit der Geometrie des Prüfstandes ist dieser Vorgang sehr kurz und im Diagramm kaum erkennbar. Im Anschluss daran folgt die Phase des stationären Verlaufs, in der alle vier Punkte mit gleicher Geschwindigkeit seitwärts wandern (IV).

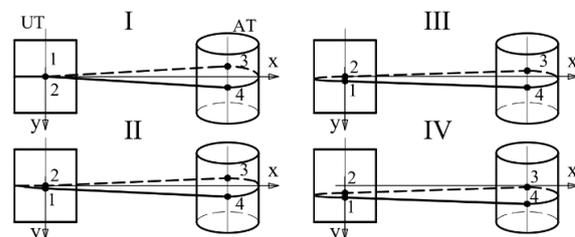


Abbildung 11: Verlaufen des Seils bei verschränkten Trommeln

Durch die Abhängigkeit des Auflaufwinkels ϑ von der Geometrie der Bandmaschine (R/a) wird die Wirkung des Verschränkens bei größer werdendem Achsabstand immer geringer.

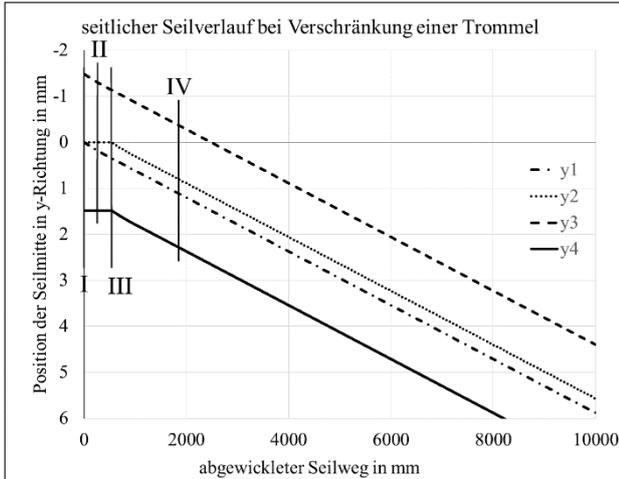


Abbildung 12: Verlaufsdiagramm eines biegeschlaffen Seils auf 2 zylindrischen Trommeln: $a = 2 \text{ m}$, $R = 170 \text{ mm}$, $\theta = 0,5^\circ$

Im Gegensatz zur Trommelverdrehung ist die Verlaufsrichtung bei verschränkten Trommeln von der Drehrichtung der Trommeln (ω) abhängig (Abbildung 13).

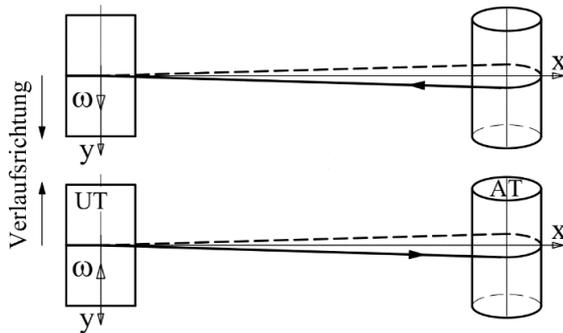


Abbildung 13: Verlaufsrichtung bei Trommelverschränkung, Draufsicht

Die Verlaufsrichtung lässt sich am besten aus der Sicht eines Betrachters am Seil mit der Blickrichtung in Förderrichtung beschreiben (Abbildung 14). Befindet sich dieser an einem Ablaufpunkt einer Trommel und wird die Achse dieser Trommel als waagrecht definiert, wird die gegenüberliegende Trommel als schräg liegend wahrgenommen. Das Verlaufen des Seils erfolgt immer in Richtung des höherliegenden Trommelendes. [Gab11]

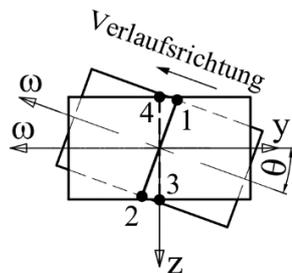


Abbildung 14: Verlaufsrichtung bei Trommelverschränkung, Blickrichtung in Förderrichtung

3.2 STARK GESPANNTES BAND - BALKENMODELL

Das laterale Laufverhalten eines stark gespannten Stahl-Prozessbandes beruht ebenfalls auf den oben genannten geometrischen Effekten. Die hinzukommende Biegesteifigkeit des Bandes verändert jedoch die geometrischen Verhältnisse im Auflaufpunkt. Eine direkte Verbindung des Ablaufpunktes mit dem Auflaufpunkt ist hier nicht mehr gegeben. Das mathematische Ersatzmodell für das freie, stark gespannte, Bandtrum besteht aus einem beidseitig gelagerten Biegeträger, dessen Biegelinie zur Berechnung des seitlichen Laufverhaltens verwendet wird. Aufgrund der hohen Vorspannung wird davon ausgegangen, dass die Verformung des Bandes nur in der Bandebene stattfindet und z.B. Ausbeulen nicht auftritt. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde für stark gespannte Bänder mittels Messungen am Prüfstand bestätigt [Egg00].

Mit folgenden Randbedingungen an den Auflauf- und Ablaufpunkten eines mittig auf den Trommeln liegend Bandes bei einer Trommelverdrehung um β :

$$y(0) = 0 \quad y(a) = 0 \quad y'(0) = \beta \quad y'(a) = 0$$

kann die Gleichung der Biegelinie für jedes Bandtrum angeschrieben werden.

$$y'' = \frac{-M}{E * I} - \frac{\chi * q}{G * A}$$

Hierbei kann nach Theorie 1. Ordnung (Th 1. O) sowie nach Theorie 2. Ordnung (Th 2. O) vorgegangen werden [Egg00]. Das Biegemoment im Band M errechnet sich nach Th 1. O sowie nach Th 2. O zu:

$$M = M_{Th\ 1.0} = -M1 - Q1 * x$$

$$M = M_{Th\ 2.0} = -M1 - Q1 * x - F_v * (y(x) - y1_0)$$

Während bei der Modellbildung nach Th 1. O die Gleichgewichtsbedingungen am unverformten Balken angesetzt werden, wird bei Anwendung der Theorie 2. Ordnung der verformte Balken (Abbildung 15) betrachtet. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Spannkraft F_v in der Gleichung für die Biegelinie.

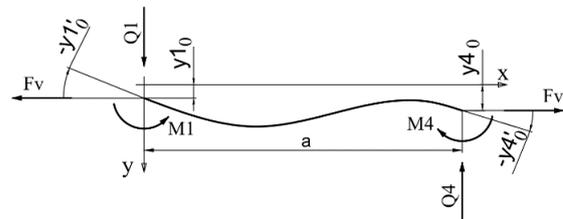


Abbildung 15: Biegebalken, Theorie 2. Ordnung

Die Bestimmung der seitlichen Bandposition erfolgt grundsätzlich auf die gleiche Weise wie beim Seilmodell. Hinzu kommt allerdings die Berücksichtigung der

Bandform entsprechend der Biegelinie. Die Differenz zwischen Bandsteigung und Trommelnormalen entspricht dem Verlaufswinkel in diesem Punkt. Die zeitliche Änderung der Bandsteigung im Auflaufpunkt lässt sich über die Bandkrümmung errechnen. Die nachfolgende Betrachtung der Abläufe verdeutlicht diese Aussage.

Ausgehend von der mittigen Ausrichtung des betrachteten Bandtrums auf der Bandmaschine

$$y1_0 = 0 \quad y4_0 = 0$$

und einer Trommelverdrehung um β ergibt sich für den Auflaufpunkt 1₀ zum Zeitpunkt 0 folgende Situation.

Da Haften des Bandes auf der Trommel vorausgesetzt wird, ist der Auflaufwinkel nach der Trommelverdrehung zum Zeitpunkt 0 gleich null. Nach einem Bandvorschub um Δx verläuft das Band in y-Richtung vorerst noch nicht.

$$y1_1 = y1_0 + y1'_0 * \Delta x$$

Die Krümmung des Bandes $y1''_0$ im Auflaufpunkt 1 zum Zeitpunkt 0 und der Bandvorschub um Δx ergibt für den Zeitpunkt 1 den von null abweichenden Auflaufwinkel $y1'_1$.

$$y1'_1 = y1'_0 + y1''_0 * \Delta x$$

Erst im zweiten Zeitschritt startet die seitliche Wanderbewegung des Auflaufpunktes nach $y1_2$.

$$y1_2 = y1_1 + y1'_1 * \Delta x$$

Auf diese Weise lässt sich der Bandverlauf für die erste halbe Trommelumdrehung errechnen. Erst danach beginnen die Ablaufpunkte zu verlaufen. Die Einspannbedingungen des Balkens am Ablaufpunkt ändern sich künftig laufend. Im nächsten Schritt nach der besagten halben Umdrehung läuft das Band am Ablaufpunkt 2 an der y-Position $y1_1$ mit dem Ablaufwinkel $-y1'_1$ ab. Mit diesen Überlegungen lässt sich das Verlaufen des Bandes analytisch berechnen.

3.3 VERGLEICH DER MODELLE FÜR STARK GESPANNTE BÄNDER

Zum Vergleich der Modelle untereinander werden nun die Verlaufskurven für ein Stahlband ($b = 200$ mm, $h = 0,3$ mm) mit des Geometriedaten $a = 11,28$ m, $R = 170$ mm, $\beta = -0,042$, errechnet und im Diagramm in Abbildung 16 aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass die Kurven des Seilmodells und des Balkenmodells nach Theorie 1. Ordnung einen Bereich abgrenzen, in dem sämtliche Verlaufskurven des Balkenmodells nach Theorie 2. Ordnung liegen. Bei niedrigen Bandspannungen verhält sich das Modell nach Th 2. O wie das Balkenmodell nach Th 1. O. Werden die Bandspannungen sehr hoch angenommen, so verhält es sich wie das Seilmodell. Folglich

schließt die Betrachtungsweise nach Th 2. O das Seilmodell sowie das Balkenmodell nach Theorie 1. Ordnung mit ein.

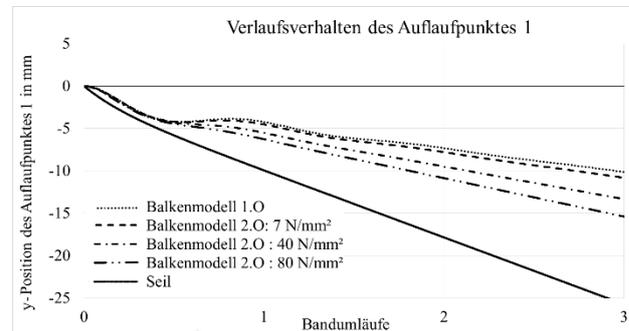


Abbildung 16: Vergleich der Verlaufskurven: $a = 11,28$ m, $R = 170$ mm, $\beta = -0,042^\circ$

3.4 SCHWACH GESPANNTES BAND:

Um die Auswirkung der abnehmenden Vorspannkraft auf das laterale Laufverhalten des Stahlprozessbandes beschreiben zu können stellte Ritzinger [Rit97] grundlegende Betrachtungen an. Dabei wird das Band gedanklich auf die beiden Bandkanten reduziert. Diese werden jeweils als eigenständige Seile betrachtet und können im Gegensatz zu einem Band keine Schubspannungen zwischen den Bandkanten übertragen. Jedes der Seile wird mit der halben Gewichtskraft des Bandtrums in Form einer Streckenlast belastet. Bei Trommelverdrehung unterscheiden sich die Abstände zwischen den Auf- und Ablaufpunkten der beiden Seile, die folglich unterschiedliche Durchhänge aufweisen. Diese Durchhänge sowie die Zugkräfte F_1, F_2 in den beiden Seilen werden über die Kettenlinie errechnet. Aus den beiden Zugkräften und der Breite des Bandes b wird ein Moment M_{vorh} errechnet, das zur Verdrehung der Trommel benötigt wird.

$$M_{vorh} = (F_1 - F_2) * \frac{b}{2}$$

Ein stark gespanntes Bandtrum mit der Breite b , der Dicke h und dem Achsabstand a wirkt einer Trommelverdrehung um β mit dem Moment M_{Band} entgegen [Rit97].

$$M_{Band} = -\frac{4 * E * I * \beta}{a} = -\frac{4 * E}{a} * \frac{b^3 * h}{12} * \beta$$

Mit Hilfe des Quotienten aus diesen beiden Momenten wird die stationäre Verlaufsgeschwindigkeit eines schwach gespannten Bandes errechnet.

$$\dot{y}_{erweitert} = \dot{y}_{Th 1.0} * \frac{M_{vorh}}{M_{Band}}$$

Die Erweiterung des Balkenmodells nach Ritzinger liefert bei mittleren Bandspannungen ähnliche Ergebnisse für die stationäre Verlaufsgeschwindigkeit wie das Balkenmodell nach Theorie 2. Ordnung. Nimmt jedoch die

Bandspannung weiter ab, stellt sich ein deutlich geringerer lateraler Verlauf ein.

Ein neuer Ansatz besteht darin, das Seilmodell zu erweitern, indem die reale Lage der Ab- und Auflaufpunkte anstelle der höchsten Trommelposition betrachtet werden (Abbildung 17).

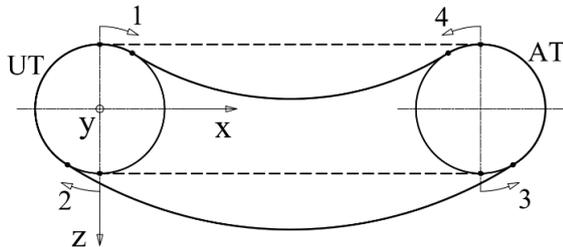


Abbildung 17: Verschiebung der Punkte 1 – 4 bei Abnahme der Bandspannung

Durch den Durchhang des Seils läuft dieses nicht mehr waagrecht auf die Trommel auf. Beim Verdrehen der Trommel um den Winkel β wirkt nur mehr ein kleinerer Winkel β_d als Verdrehwinkel, da die Verschieberichtung der Trommelachse nicht mehr mit der Tangente des Seils im Auflaufpunkt zusammenfällt. Dies reduziert einerseits die seitliche Verlaufsgeschwindigkeit. Hinzu kommt andererseits ein kleiner Anteil des Verschränkungswinkels θ_d , der das Seil wieder schneller verlaufen lässt. Bei großen Achsabständen hat eine Trommelverschränkung nur minimale Wirkung auf das Verlaufen des Seils. Da das Seilmodell als extreme Betrachtung für ein Band mit sehr hoher Vorspannung steht, scheint die Verwendung für ein schwach gespanntes Band sehr fraglich. Jedoch sind die Veränderung der Wirkung einer Trommelverstellung sowie die tatsächliche Lage der Auf- und Ablaufpunkte von großer Bedeutung, wenn ein Balkenmodell mit Banddurchhang gefunden werden kann.

4 BANDLAUFMESSUNGEN VS. BALKENMODELL

Bevor mit der Entwicklung weiterer mathematischer Ersatzmodelle für das schwach gespannte Band begonnen wird, muss das Verhalten eines schwach gespannten Bandes studiert werden. Dazu wurde der Achsabstand des Prüfstandes aus Abbildung 1 auf 12 m vergrößert, um eine typische Bandmaschine aus der Bandfertigung maßstabsgerecht abbilden zu können. (Abbildung 18)



Abbildung 18: Prüfstand mit Achsabstand $a = 12$ m

Im ersten Schritt gilt es herauszufinden, wie sich das Stahlband ($b = 200$ mm, $h = 0,3$ mm, $\beta = -0,042^\circ$) bei Abnahme der Vorspannung tatsächlich verhält. Aus dem Balkenmodell nach Th 2. O (siehe Abbildung 16) ergibt sich, dass die Verlaufsgeschwindigkeit mit abnehmender Bandspannung geringer wird. Dieses Verhalten konnte durch die Messungen am Prüfstand nur teilweise bestätigt werden. Bei einer Bandspannung von 40 N/mm² weicht zwar die gemessene Verlaufskurve deutlich von der errechneten ab, jedoch zeigen beide das gleiche Verhalten (Abbildung 19). Nimmt nun die Bandspannung weiter ab, treten zwei unerwartete Veränderungen auf. Das Band reagiert mit niedriger werdender Vorspannung immer langsamer auf eine Trommelverdrehung. Die Verlaufskurven starten flacher (Abbildung 19, Kurve 7 und 10 N/mm²). Hat es jedoch begonnen seitlich zu verlaufen, steigt die Verlaufsgeschwindigkeit unerwartet stark und lange an. Im Vergleich zum schwach gespannten Band liegen die stationären Verlaufsgeschwindigkeiten beim schwach gespannten Band um ein Vielfaches höher.

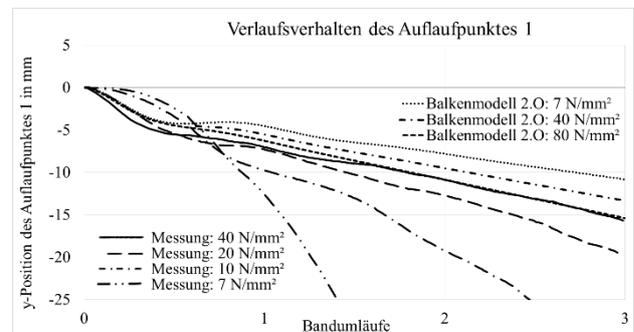


Abbildung 19: Lage des Auflaufpunktes 1 – Messung und Balkenmodell nach Theorie 2. Ordnung

In Abbildung 20 sind die gemessenen Werte der stationären Verlaufsgeschwindigkeiten sowie die mittels Modelle nach Th 1. O und Th 2. O errechnete Größen in Abhängigkeit von der Bandspannung für das oben genannte Band bei einer Verdrehung der Umlenktrommel von $\beta = -0,042^\circ$ für den Auflaufpunkt 1 aufgetragen.

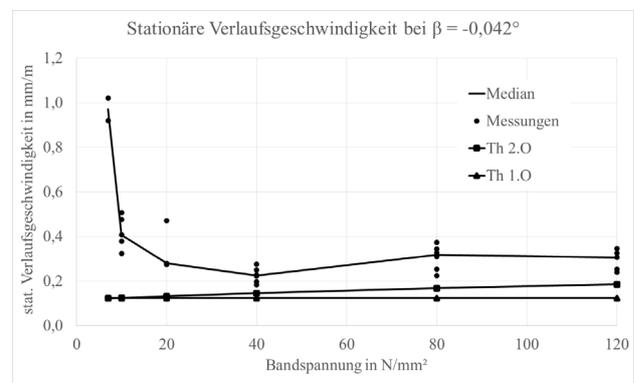


Abbildung 20: Stationäre Verlaufsgeschwindigkeiten – Vergleich von Modellen und Messungen

Bei einer Zugspannung im Bereich von 20 bis 40 N/mm² liefert das Modell nach Th 2. O realitätsnahe Ergebnisse für die stationäre Verlaufsgeschwindigkeit. Sinkt die Bandspannung weiter ab, verändern sich die Eigenschaften des Bandes derart stark, dass die bei der Aufstellung des Balkenmodells getroffene Vereinfachung der Bandverformung in einer Ebene ihre Gültigkeit verliert. Bei Bandspannungen unterhalb von 20 N/mm² wird der Durchhang deutlich sichtbar. Weiters äußert sich eine Trommelverdrehung neben dem bekannten seitlichen Ausbiegen des Bandes auch in einer Verdrehung des Bandquerschnittes (Abbildung 21).

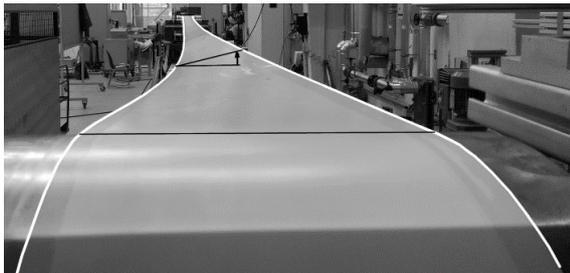


Abbildung 21: Prüfstand mit schwach gespanntem Stahlband: 10 N/mm², starke Verformung nach Trommelverdrehung

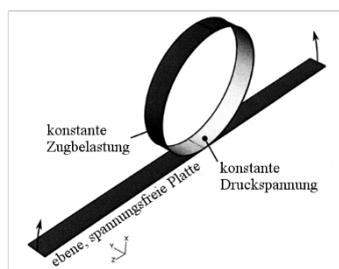
5 SIMULATION

Neben der analytischen Modellbildung und den Messungen am Prüfstand ist die Simulation des Bandlaufs eine weitere Methode, um das laterale Laufverhalten eines Stahlprozessbandes zu ermitteln. Dabei können im Gegensatz zu den Messungen nicht nur die bereits erwähnten Parameter wie Vorspannkraft, Trommelverdrehung β und Verschränkung θ variiert werden, sondern auch die Geometrie der Bandmaschine sowie des Bandes verändert werden.

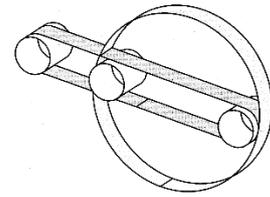
5.1 FINITE ELEMENTE METHODE

Die Möglichkeit mittels FEM wurde von Koller [Kol09] in Abaqus für stark gespannte Bänder vorgestellt. Das Band wird hier als Schalenelement S4R folgendermaßen modelliert:

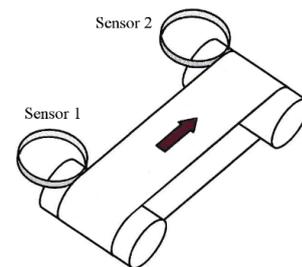
- Ein ebener Bandstreifen wird zu einem Ring gerollt und die Bandenden werden miteinander verbunden.



- Die Trommeln werden in den Bandring eingefügt, angetrieben und auseinander bewegt.



- Zur Bestimmung der Position des Auflaufpunktes werden die beiden Scheiben (Sensor 1, Sensor 2) hinzugefügt und an die Bandkante angelegt.



Da dieses FEM Modell die Realität korrekt abbildet, werden die Überlegungen weitergeführt. Ziel ist es, auch schwach gespannte Bänder mit dessen Hilfe beschreiben zu können.

Zur Simulation von Gurtschieflauf bei Gurtbandförderern bediente sich Otto [Ott14] ebenso der Finiten Elemente Methode. Er untersuchte primär die Auswirkungen von geometrischen Fehlern bei der Anordnung der Tragrollen auf das seitliche Verlaufen des Gurtes.

5.2 DISKRETE ELEMENTE METHODE

Eine neue Art der Simulation ergibt sich durch die untypische Verwendung der Diskreten Element Methode mit der Software LIGGGHTS. Während DEM typischerweise zur Beschreibung des Verhaltens von Schüttgütern verwendet wird, wird hier das Band aus Partikel modelliert und über die Trommeln der Bandmaschine gelegt. Da die Verbindungen zwischen den Partikeln auch Zugkräfte übertragen können, wird diese Betrachtungsweise ermöglicht. Eines der Ziele bei der Erstellung der DEM-Simulation ist es, ein im Vergleich zum FEM deutlich schneller berechenbares Modell zu schaffen, um das laterale Laufverhalten eines schwach gespannten Bandes vorhersagen zu können.

5.2.1 SEILE:

Grundlegende Versuche mit stark sowie schwach gespannten Partikelketten auf zwei zylindrischen Trommeln liefern das bekannte Verhalten für das Seil. Abbildung 22 zeigt das Verlaufen eines stark gespannten Seils nach einer Trommelverdrehung um β zu drei verschiedenen Zeitpunkten.

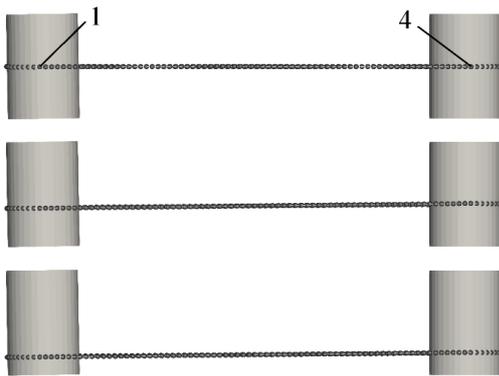


Abbildung 22: Verlauf einer stark gespannten Partikelkette

Das zugehörige Verlaufsdiagramm für das Obertrum mit dem Auflaufpunkt 1 und dem Ablaufpunkt 4 ist in Abbildung 23 dargestellt. Ein Vergleich mit dem Verlaufsdiagramm eines stark gespannten Seils (Abbildung 8) zeigt, dass die Simulation die bekannten Effekte wie Einschwingen, stationäres Verlaufen und den stationären Versatz abbilden kann. Da die Seile noch nicht kalibriert wurden, ist ein direkter Vergleich mit den analytischen Modellen oder der Messung an dieser Stelle noch nicht zielführend.

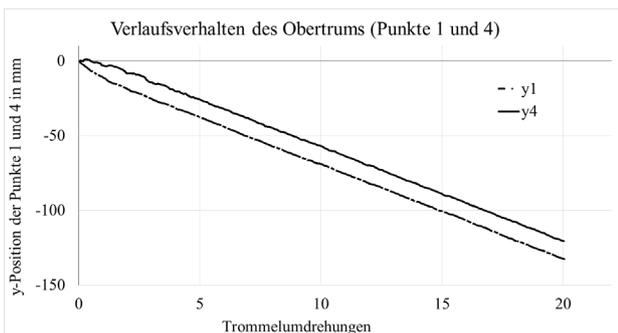


Abbildung 23: Verlaufsdiagramm einer stark gespannten Partikelkette, $a = 1,3 \text{ m}$, $\beta = 1^\circ$

Durch die Vergrößerung der Seillänge werden schwach gespannte Partikelketten erzeugt. Abbildung 24 zeigt zwei solcher Ketten, die jeweils für 20 Trommelumdrehungen gerechnet wurden. Zum Vergleich der Lage zueinander sind diese gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich, dass die Position nach dem Verlaufen annähernd die gleiche ist.



Abbildung 24: stark und schwach gespannte Partikelkette auf zwei Trommeln, gleichzeitig dargestellt

5.2.2 BÄNDER

Werden mehrere Partikelketten nebeneinander angeordnet und durch Bindungen miteinander verknüpft, so entsteht ein Partikelband. Es kann unter hoher Vorspannung (Abbildung 25) oder auch mit niedriger Vorspannung (Abbildung 27, oben) auf die Trommeln aufgespannt werden.



Abbildung 25: Partikelband, stark gespannt

Bedingt durch die Vorgehensweise bei der Erstellung des Bandes, sind die Partikel nur in Form von Vierecken miteinander verbunden. Dadurch ist die Verbindung der Partikelketten sehr weich in Bezug auf Schubbelastungen (Abbildung 26).

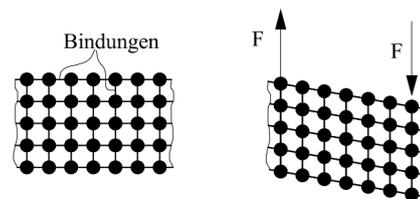


Abbildung 26: Bindung zwischen den Partikeln, Reaktion auf Schubbelastung

Trotzdem ist es möglich ein stark oder auch schwach gespanntes Partikelband auf zwei Trommeln verlaufen zu lassen (Abbildung 27).

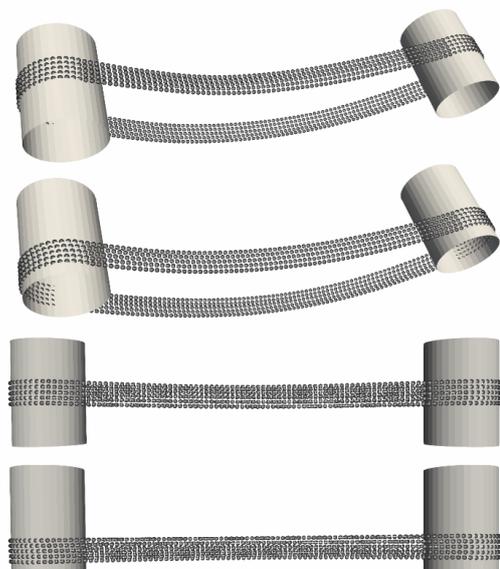


Abbildung 27: Partikelband, schwach gespannt

Da die Bandmodelle noch nicht kalibriert wurden ist ein Vergleich mit den analytischen Modellen oder der Messung an dieser Stelle noch nicht aussagekräftig. Über das Verhalten des Bandes bei Veränderung der Bandspannung kann zu Zeitpunkt der Fertigstellung des Artikels keine Aussage getroffen werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das laterale Laufverhalten eines stark gespannten Stahl-Prozessbandes lässt sich mit dem Balkenmodell nach Theorie 2. Ordnung realitätsnahe abbilden. Messungen haben gezeigt, dass dieses Modells mit sinkender Bandspannung seine Gültigkeit verliert. Um zuverlässige Aussagen für schwach gespannte Bänder tätigen zu können, müssen neue Modelle entwickelt werden. Über die Positionen der Auf- und Ablaufpunkte und die Tangentenrichtungen des Bandes in diesen Punkten sowie dessen Biegesteifigkeit kann das seitliche Laufverhalten bei geringer Bandspannung nach den bekannten geometrischen Effekten errechnet werden.

Zur Abschätzung des Gültigkeitsbereiches des bekannten Balkenmodells in Bezug auf die Bandspannung sind weitere Messungen am Prüfstand mit Bändern verschiedener Geometrien erforderlich. Darüber hinaus sollen die Messergebnisse zur Validierung eines Modells für das schwach gespannte Band verwendet werden. Parallel dazu werden die Überlegungen, die von Koller [Kol09] bei der Erstellung der FEM Simulation getätigt wurden, wieder aufgegriffen und auf Bänder mit geringerer Bandspannung angewendet. Auch die Simulation mittels DEM scheint für die Beschreibung des lateralen Laufverhaltens des Stahlbandes geeignet zu sein. Hier wird an der Kalibrierung der Seile und Bänder gearbeitet. Einer Auswerteroutine zur Erstellung der Verlaufsdiagramme für Bänder ist in Arbeit. Weiters wird das DEM-Modell des Bandes so umgestaltet, dass eine unzulässige Schubverformung vermieden wird.

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die den Stand der Entwicklung und zeigt die notwendigen Arbeiten auf:

	Seil	Band
stark gespannt	analytisch: ✓	analytisch: ✓
	Simulation: ✓	Simulation: ✓
	Messung: nicht erforderlich	Messung: ✓
schwach gespannt	analytisch: fehlt bzw. nicht zielführend	analytisch: fehlt
	Simulation: i.A.	Simulation: i.A.
	Messung: fehlt	Messung: ✓ + weitere Messungen erforderlich

LITERATUR

- [Gab11] Gabmayer, Thomas: *Untersuchung der Effektivität verschiedener Steuereinrichtungen zur Beeinflussung des seitlichen Laufverhaltens von Edelstahlprozessbändern*. TU Wien, Dissertation 2011
- [Egg00] Egger, Martin: *Seitliches Laufverhalten des Fördergurtes beim Gurtbandförderer*. TU Wien, Dissertation 2000
- [Kol09] Koller, Maximilian: *Simulation des seitlichen Verlaufs von endlosen Stahlbändern*. TU Wien, Diplomarbeit 2009
- [Rit97] Ritzinger, Peter: *Seitlichen Bandlaufverhalten von langsam laufenden Metallbändern auf zylindrischen Trommeln*. TU Wien, Dissertation 1997
- [Ott14] Otto, Hendrik; Katterfeld, Andre: *Ansätze zur numerischen Simulation von Gurtschieflauf*. In: Innovationen in der Schüttguttechnik. [19. Fachtagung Schüttguttechnik 2014, 17. und 18. September 2014], TU München

Dipl.-Ing. Franz Paulischin, Assistent am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der Technischen Universität Wien

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Georg Kartnig, Professor am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Leiter des Fachbereichs Konstruktionslehre und Fördertechnik an der Technischen Universität Wien

Adresse: Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/307, 1060 Wien, Österreich
 Telefon: +43-1-58801-30709
 E-Mail: franz.paulischin@tuwien.ac.at, georg.kartnig@tuwien.ac.at