

Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Modellierung und Regelung des Schusseintragssystems beim Luftdüsenweben

Modeling and Control of the Weft Insertion System of Air-jet Weaving

Tong Wu, M. Sc.; Dipl.-Ing. Sebastian Stemmler; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

RWTH Aachen University, Institut für Regelungstechnik, 52074 Aachen, Deutschland, T.Wu@irt.rwth-aachen.de

Maximilian Kemper, M. Sc.; Univ.-Prof. Prof. h.c. (Moscow State Univ.) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Gries

RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik, 52074 Aachen, Deutschland, Maximilian.Kemper@ita.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Beim Luftdüsenweben wird ein Schussfaden mithilfe von Druckluft beschleunigt und im Rietkanal positioniert. Eine schlecht gesteuerte Fadenbremse hat zur Folge, dass sich der gespannte Schussfaden zusammenzieht. Das Schussgarn bewegt sich am Ende des Schusseintrags rückwärts und verursacht Schussfehler. Mithilfe eines aktiv geregelten Bremssystems sollen diese Schussfehler vermieden werden. Das Schusseintragssystem wird physikalisch als ein eindimensionales Massen-Feder-Dämpfer-System modelliert. Das Modell wird um die am Schussfaden angreifenden Kräfte von Haupt- und Stafettendüsen sowie die Bremskraft erweitert. Anschließend erfolgt eine Validierung, um die Parameter des Modells zu bestimmen. Der Schusseintrag wird mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera überwacht und die Position der Fadenspitze durch echtzeitfähige Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmt. Eine Modellprädiktive Regelung (MPR) gibt unter expliziter Berücksichtigung des Modells die optimale Bremskraft aus, sodass die hochdynamische Fadenbremse den Schussfaden abbremst. Dadurch wird sichergestellt, dass Schussfehler vermieden werden.

Abstract

Air-jet weaving is a widely used process for producing fabrics. A weft thread is accelerated by compressed air and positioned in the reed channel. An improperly controlled yarn brake system causes backward movements of the weft thread and fabric defects. With the aid of an actively controlled braking system, these defects have to be avoided. The weft insertion system is physically modeled as a one-dimensional mass-spring-damper-system. The model is extended by the forces exerting on the weft threads, namely from the main nozzle and relay nozzles as well as the yarn brake. Subsequently, the physical model is validated in order to determine the model parameters. The weft insertion is monitored by means of a high speed camera and the position of the thread tip is determined by real-time image processing algorithms. A Model Predictive Control (MPC) determines the optimal braking force with explicit consideration of the model, so that a highly dynamic yarn braking system brakes the weft appropriately. This ensures that the weft thread reaches the end position. Moreover, incorrectly inserted wefts and thus fabric defects are avoided.

1 Einleitung

Das Luftdüsenweben gehört zu den in der Industrie am weitesten verbreiteten Verfahren zur Herstellung von textilen Geweben. Dabei wird ein Schussfaden mittels Druckluft durch das von den Kettfäden aufgespannte Fach geschossen. Am Ende des Schusseintrags bremst eine Fadenbremse das Schussgarn. Die Fadenbremse hat einen großen Einfluss auf die Qualität des Gewebes. Ein ruckartiges Bremsen führt zur Rückwärtsbewegung des Fadens und damit zur Schlingenbildung. Außerdem führt das Bremsen im ungünstigen Fall zu einer hohen Belastung des Schussmaterials, sodass Fadenbrüche entstehen können.

Es existieren einige regelungstechnische Ansätze für die Fadenbremse, welche den Eintragsprozess unter Berücksichtigung der Fadenbrüche optimieren. So hat in [1] ein PID-Regler die Bremskraft mittels gemessener Fadenspannung gestellt. In [2] wurde die Fadenspannung direkt am Bremskörper erfasst und diese zur Regelung der Bremse genutzt, um hohe Fadenspannungen zu vermeiden. Allerdings existieren bisher keine Regelungen, die Rückwärts-

bewegungen des Schussfadens verhindern können.

In diesem Beitrag wird ein aktiv geregeltes Schussfadenbremssystem vorgestellt. In **Bild 1** ist der schematische Aufbau des gesamten Systems dargestellt. Der Schussfaden wird zunächst von der Spule auf ein Vorspulgerät transferiert. Das Vorspulgerät stellt die für den Schusseintrag benötigte Länge an Garn bereit. Die Hauptdüse beschleunigt den Schussfaden, sodass er sich in den Rietkanal bewegt. Innerhalb des Rietkanals führen Stafettendüsen den Schussfaden hin zur Streckdüse. Diese Streckdüse saugt den Schussfaden an und verhindert ein Zusammenziehen des gespannten Fadens. Der Schusseintrag wird mittels physikalischer Zusammenhänge modelliert, um einen Regler für die Bremse zu entwerfen. Die Position sowie Geschwindigkeit der Fadenspitze sind relevante Größen des Prozesses und beschreiben damit den aktuellen Zustand des Systems. Um die Position der Fadenspitze zu detektieren, filmt eine Hochgeschwindigkeitskamera den Endbereich des Rietkanals. Mithilfe Bildverarbeitungsalgorithmen ist die Fadenspitze im Endbereich in jedem Frame erkennbar.

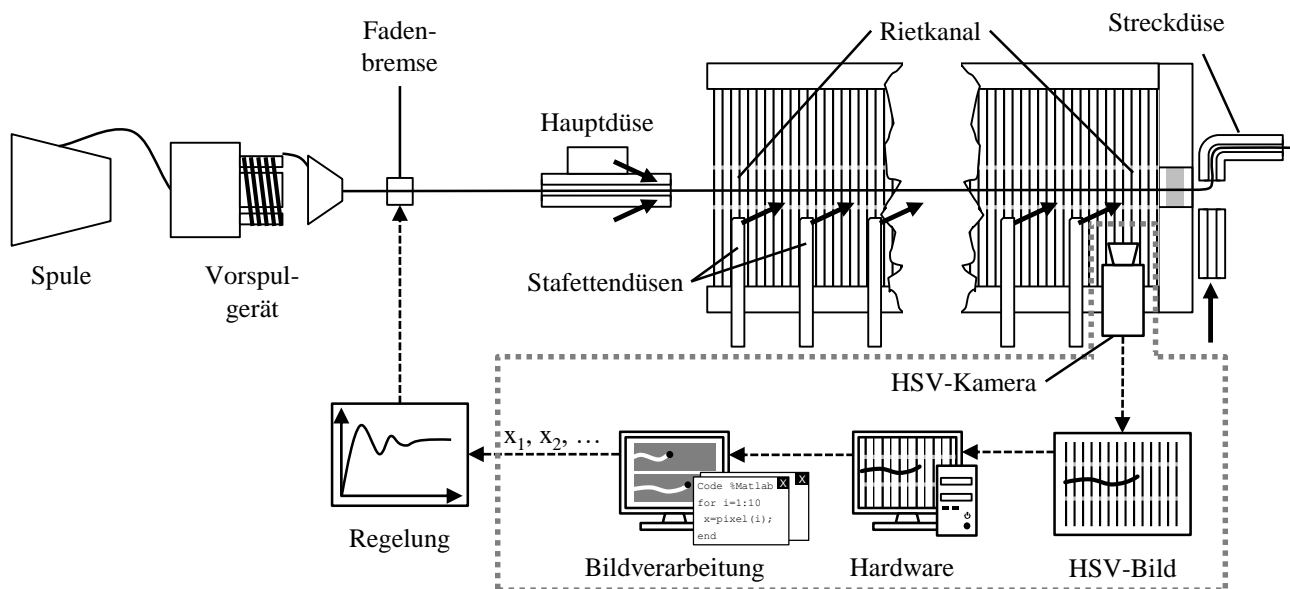


Abbildung 1 Schematischer Aufbau des aktiv geregelten Schusseintragssystems [3]

Die Verwendung des kamerabasierten Sensorsystems hat den Vorteil, dass es sowohl die Echtzeitanforderungen erfüllen kann, als auch keinen Einfluss auf den Schusseintrag nimmt.

Aus dem detektierten Positionsverlauf wird die Geschwindigkeit berechnet, die ebenfalls dem Regler zur Verfügung steht. Eine Modellprädiktive Regelung (MPR) ist in der Lage, mithilfe des Modellwissens das zukünftige Systemverhalten zu präzisieren und die optimalen Stellgrößen auszugeben. Darüber hinaus lassen sich Beschränkungen bei der MPR explizit berücksichtigen, sodass eine Rückwärtsbewegung des Schussfadens vermieden wird. Anschließend bringt die steuerbare Fadenbremse diese optimale Bremskraft auf das Garn auf. Die Dynamik der Fadenbremse muss aufgrund der Echtzeitanforderung hoch genug sein, um die Stellgröße rechtzeitig umzusetzen.

In diesem Beitrag werden die für die Regelung notwendigen Schritte wie das Messsystem, die Fadenbremse, die Modellierung des Schusseintragssystems und die MPR betrachtet.

2 Messsystem

Aufgrund der benötigten Echtzeitfähigkeit und des rückwirkungsfreien Messens wird eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer nachgeschalteten Bildverarbeitung zur Detektion verwendet. Angestrebt wird die Positionsmessung der Fadenspitze entlang des Schussfadenweges innerhalb einer Millisekunde.

Ein exemplarisch aufgenommener Frame wird oben in **Bild 2** gezeigt. Der Schussfaden wird von der Kamera als horizontale weiße Linie detektiert. Die sich periodisch wiederholenden vertikalen weißen Linien sind die Kettfäden, welche als Störungen auftreten. Aufgabe des Bildverarbeitungssystems ist die Detektion des horizontalen Schussfadens trotz dieser Störungen. Basierend auf den Eigenschaf-

ten des Beispielframes lassen sich verschiedene Ansätze mittels digitaler Bildverarbeitung erklären.

2.1 Detektion der Querelemente

Ein Hauptmerkmal des Schussfadens während der Bewegung ist die vorwiegend horizontale Ausbreitungsrichtung. Da der Schussfaden im Regelfall das einzige Objekt mit horizontaler Ausrichtung im Bild ist, lässt sich der Schussfaden durch Detektion der Querelemente erkennen.

In der digitalen Bildverarbeitung gibt es verschiedene Operatoren zur Erkennung von Formen [4]. In dieser Anwendung wird das Öffnen als geeigneter Operator verwendet. Die Öffnungsoperation wird zwischen dem originalen Frame und einem vordefinierten Element durchgeführt. Das Öffnungsverfahren kombiniert Erosions- und Dilationsoperationen. Die Erosion entfernt kleine Objekte im Bild und verkleinert die gesuchte Struktur. Durch anschließende Dilationsoperation werden die gesuchten Elemente wieder in die ursprüngliche Größe gebracht. In diesem Fall ist die Maske als Linie mit bestimmter Länge und Winkel gewählt. Die Wahl der Länge der Maske beschreibt, ab welcher Länge eines horizontalen Elements, dieses als Schussfaden erkannt wird. Ist diese kleiner wird der Schussfaden mit höherer Wahrscheinlichkeit detektiert, jedoch werden Störungen häufiger fälschlicherweise als Schussfaden interpretiert. Die Einstellung kleiner Winkel berücksichtigt den stochastische Flug des Schussfadens. Durch Parallelschaltung mehrerer Öffnungsoperationen mit verschiedenen Winkeln sowie anschließender Abstimmung lässt sich der Schussfaden im Bild detektieren.

2.2 Horizontale Tiefpassfilterung

Im originalen Frame ist zu sehen, dass die Kettfäden die Störungen mit vertikaler Ausdehnung sind. In horizonta-

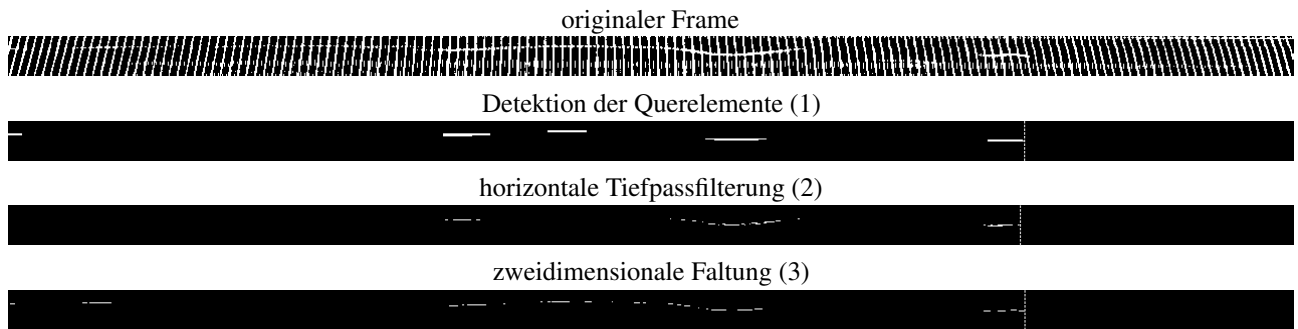


Abbildung 2 Originaler Frame und Ergebnisse der Bildverarbeitung für drei Verfahren

ler Richtung tauchen die Kettfäden als Wechsel zwischen schwarzen und weißen Pixeln periodisch auf. Im Gegensatz dazu weist der Schussfaden in horizontaler Richtung viele benachbarte weiße Pixel auf. Unterschiedlich sind entsprechend die örtlichen Frequenzen. In diesem Sinne ist ein Tiefpassfilter in horizontaler Richtung verwendbar, um höherfrequente Kettfäden zu entfernen und den niederfrequenten Schussfaden zu extrahieren.

Das hier verwendete Filter ist ein Filter mit endlicher Impulsantwort, das eine endliche Anzahl an Koeffizienten, beziehungsweise Länge besitzt. Die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters ist entscheidend, um den Schussfaden von Kettfäden unterscheiden zu können. Folglich sind Länge und Grenzfrequenz des digitalen Tiefpassfilters die einzustellenden Parameter. Das Tiefpassfilter wird im Ortsraum mit dem Frame gefaltet, was einer Multiplikation der entsprechenden Repräsentationen im Fourierraum entspricht. Analysen im Fourierraum helfen, die Grenzfrequenz zu ermitteln. Durch iterative Tests wird eine geeignete Kombination aus Grenzfrequenz und Anzahl der Filterkoeffizienten gefunden.

2.3 Zweidimensionale Faltung

Neben den Merkmalen in horizontaler Richtung können die Besonderheiten in der vertikalen Richtung ausgenutzt werden, um Informationen über die Position der Fadenspitze zu gewinnen. Abrupte Grauwertänderungen entlang einer bestimmten Richtung werden in der digitalen Bildverarbeitung Kanten genannt. Die Kanten im Bild können durch Kantenfilter hervorgehoben werden. Zu diesem Zweck wird ein einfaches Ableitungsfilter erster Ordnung verwendet. Im diskreten Fall ist eine Ableitung nicht durchführbar und lässt sich nur approximieren. Nach [4] hat ein vertikales Ableitungsfilter die Form

$$V = (1, 0, -1)^T. \quad (1)$$

In horizontaler Richtung ist weiterhin eine Tiefpassfilterung gewünscht. Da eine Gaußverteilung im Ortsraum auch einer gaußförmigen Funktion im Fourierraum entspricht, ist das Filter H in horizontaler Richtung als Gaußfunktion gewählt. Die Länge des Filters H ist wie bei der örtlichen Tiefpassfilterung iterativ zu bestimmen.

Das zweidimensionale Filter F lässt sich durch die Faltung

der Filter V und H bestimmen:

$$F = V * H. \quad (2)$$

2.4 Vergleich der Ergebnisse

Die drei zuvor beschriebenen Filter reagieren auf unterschiedliche Merkmale des Frames. Außerdem ergeben sich aufgrund der verschiedenen Verfahren Unterschiede hinsichtlich Qualität und Echtzeitfähigkeit. Der ursprüngliche Frame, zu sehen oben in **Bild 2**, wird mit den drei Verfahren analysiert, die Ergebnisse sind unten in **Bild 2** gezeigt. Dabei sind die Parameter der Algorithmen empirisch so gewählt, dass der Schussfaden möglichst klar erkennbar ist. Die Algorithmen entfernen die Kettfäden, sodass der Schussfaden als horizontale weiße Linie bestehen bleibt. Die Position der Fadenspitze wird als der sich am weitesten rechts befindliche weiße Pixel bestimmt und wird in **Bild 2** jeweils durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Anschließend werden die drei Algorithmen auf ein exemplarisches Video der Schusseinträge angewandt, um sie hinsichtlich Echtzeitfähigkeit zu bewerten. Dabei ist in vertikaler Richtung zusätzlich ein Binning Verfahren implementiert, mit welchem zwei benachbarte Zeilen zu einer Zeile zusammengefasst werden, um die Datenmenge zu reduzieren. In horizontaler Richtung ist ein bewegliches Fenster eingesetzt, welches aufgrund der letzten Ergebnisse den möglichen aktuellen Bereich abdeckt. **Tabelle 1** zeigt die Taskausführungszeiten der drei Verfahren, jeweils angewandt auf ein Video mit einer Auflösung von 500 Pixeln \times 20 Pixeln. Die Bildverarbeitungen mit Detektion der Querelemente und zweidimensionaler Faltung erfüllen die Echtzeitanforderung von einer Millisekunde. Dagegen überschreitet die Bildverarbeitung mit horizontaler Tiefpassfilterung die Ausführungszeit einer Millisekunde aufgrund der hohen Anzahl benötigter Koeffizienten. Durch Variation der Grenzfrequenz und Filterlänge besteht das Potential, diese Ausführungszeit zu verkürzen.

Tabelle 1 Testausführungszeit der drei Verfahren

	Min. [ms]	Max. [ms]	Durchschnitt [ms]
(1)	0,565	0,726	0,654
(2)	1,200	1,322	1,281
(3)	0,529	0,635	0,594

3 Hochdynamische Fadenbremse

Die Anforderungen an eine geregelte Fadenbremse ergeben sich zum einen aus dem physischen Prozess des Luftdüsenwebens und zum anderen aus der Regelungstechnik. Mithilfe einer Fadenbremse soll es möglich sein, dass das von dem Regelungssystem ausgegebene Stellsignal echtzeitfähig in die entsprechende Bremskraft umgesetzt wird. Außerdem muss die Fadenbremse in ein Regelsystem integrierbar sein.

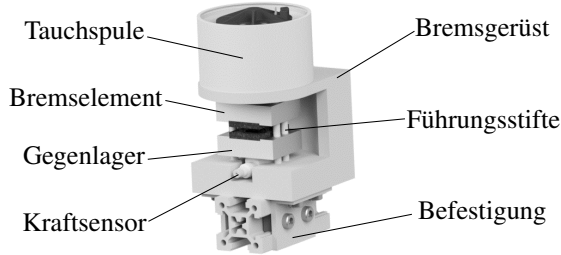


Abbildung 3 Konstruierte hochdynamische Fadenbremse

In Bild 3 ist die unter Berücksichtigung der oben genannten Anforderungen konstruierte Fadenbremse dargestellt. Mithilfe einer Tauchspule wird das Bremsselement entlang von Führungsstiften auf ein Gegenlager gepresst. Dadurch wird eine Normalkraft auf den Schussfaden ausgeübt. Die zur Normalkraft proportionale Reibungskraft wirkt als Bremskraft auf den Schussfaden.

Die Tauchspule wird durch einen elektrischen Strom i angesteuert. Typischerweise weisen Aktoren ein verzögertes und totzeitbehaftetes Übertragungsverhalten auf. Deswegen wird das Übertragungsverhalten des Stroms i auf die Normalkraft mit s als Laplace-Operator gemäß

$$G_{b1} = \frac{F_N}{I} = \frac{K_b}{1 + sT_b} e^{-T_i s} \quad (3)$$

als Verzögerungsglied erster Ordnung mit der Totzeit T_i angenommen. Der Verstärkungsfaktor K_b übersetzt den Strom in die Bremskraft. Die Zeitkonstante T_b beschreibt die Verzögerung dieser Übersetzung. Die Übertragung G_{b2} der Normalkraft F_N auf die Bremskraft F_b wird mit einem Proportionalglied gemäß

$$G_{b2} = \frac{F_b}{F_N} = -\mu \quad (4)$$

angenommen, in der der Reibungskoeffizient durch μ repräsentiert wird. Die gesamte Übertragungsfunktion der Fadenbremse ergibt sich als Produkt der beiden Teile,

$$G_b = \frac{F_b}{I} = \frac{F_b}{F_N} \frac{F_N}{I} = -\mu \frac{K_b}{1 + sT_b} e^{-T_i s}. \quad (5)$$

4 Modellierung und Validierung des Schusseintragssystems

Das in [5] entwickelte eindimensionale Modell wird in diesem Beitrag durch Dämpfer zwischen den Massenpunkten erweitert, welche die Dissipation der Energie während des Schusseintrags darstellen. Wie in Bild 4 dargestellt ist,

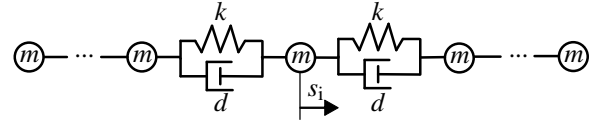


Abbildung 4 Das eindimensionale Modell des Schussfadens

wird der Schussfaden als eine eindimensionale Kette aus n Massenpunkten, die durch Feder- und Dämpferelementen verbunden sind, modelliert. Die Masse m , die Position s_i , die Federkonstante k und die Dämpfung d charakterisieren die Dynamik des Schussfadens. Bei der eindimensionalen Betrachtung werden nur die Kräfte entlang der Bewegungsrichtung des Garns betrachtet. Darunter zählen die aerodynamische Kraft F_{Aero} , die Bremskraft F_{Br} und die interne Federkraft F_k sowie Dämpferkraft F_d . Im Vergleich sind die senkrecht zur Eintragsrichtung wirkenden Kräfte, wie die Auftriebskraft oder Strömungsmomente vernachlässigbar klein. Mittels der Newtonschen Axiome ergibt sich die Bewegung des i -ten Massepunktes zu

$$m\ddot{s}_i = F_{Aero} + F_{Br} + F_k + F_d. \quad (6)$$

Die aerodynamische Kraft F_{Aero} ist proportional zum Quadrat der Relativgeschwindigkeit zwischen Luft v_{Luft} und Faden v_{Faden} und wird gemäß

$$F_{Aero} = \frac{1}{2} \pi \rho_{Luft} c_W L_u D_{Faden} (v_{Luft} - v_{Faden})^2 \quad (7)$$

berechnet. Hierbei bezeichnet c_W den Strömungswiderstand der Garnoberfläche, L_u die Länge des umgestömten Garns und D_{Faden} den Durchmesser des Garns. Diese drei Parameter sind in der Modellierung als konstant angenommen. Die Dichte der Luft ρ_{Luft} im Rietkanal wird durch die ideale Gasgleichung

$$\rho_{Luft} = \frac{M_{Luft}}{R_{Gas} T_{Luft}} p_{Luft} \quad (8)$$

berechnet. Hierbei sind die molare Masse der Luft M_{Luft} sowie die ideale Gaskonstante R_{Gas} konstant. Die Temperatur der Luft im Rietkanal T_{Luft} verändert sich kaum beim Schusseintrag, weshalb diese als konstant angenommen wird. Damit bestimmt der Druck p_{Luft} der Luft im Rietkanal die Luftdichte im Prozess.

Basierend auf Gleichung (7) und (8) ist die aerodynamische Kraft F_{Aero} überwiegend von der Luftgeschwindigkeit v_{Luft} und dem Druck p_{Luft} im Rietkanal abhängig. Da die Hauptdüse einen anderen Wirkeinfluss auf das Schussgarn hat als die Stafettendüsen, besitzt die Luftkraft eine räumliche Abhängigkeit. Aufgrund der Steuerung der Komponenten sind die beiden Größen zeitlich veränderlich. Diese räumliche und zeitliche Abhängigkeiten sollen in der Modellierung berücksichtigt werden.

Die Hauptdüse ist hauptsächlich für die initiale Beschleunigung des Schussfadens zuständig und wird typischerweise zur Reduzierung des Druckluftverbrauchs nach einem bestimmten Zeitpunkt abgeschaltet. Die Hauptaufgabe der Stafettendüsen ist die Stabilisierung der Fadenbewegung im Rietkanal. Aus diesem Grund nehmen die Haupt- und Stafettendüsen unterschiedlichen Einfluss auf den Be-

schleunigungsvorgang und weisen unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten und -drücke im Rietkanal auf. Unter Vernachlässigung der Luftdynamik bei der Abschaltung der Hauptdüse kann der Prozess in zwei Abschnitte, die durch die Abschaltzeit t_{Ab} getrennt sind, aufgeteilt werden. Der qualitative Verlauf der Luftgeschwindigkeit und des Luftdrucks ist im Prozess identisch modelliert. Der Verlauf ist in **Bild 5** über der Position dargestellt. Der Wirkbereich der Hauptdüse befindet sich zwischen der Position s_H und s_{HS} , der Wirkbereich der Stafettendüsen zwischen s_{HS} und s_S . Mit \bar{p}_H und \bar{p}_S werden die jeweiligen Maximaldrücke repräsentiert, während \bar{v}_H und \bar{v}_S die Maximalgeschwindigkeiten bezeichnen. Die Übergänge zwischen den konstanten Werten sind durch Arkustangens-Funktionen modelliert.

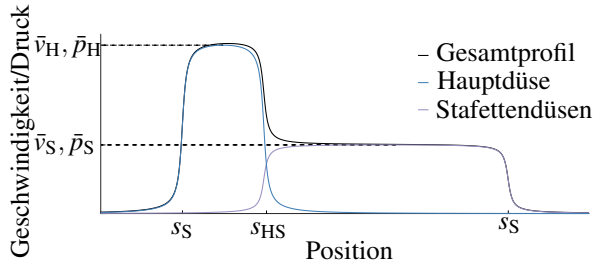


Abbildung 5 Schematische Verläufe von Luftdruck und Luftgeschwindigkeit entlang der Bewegungsrichtung

Dem entsprechend wird der Druckverlauf der Hauptdüse sowie der Stafettendüsen jeweils durch

$$p_H = \bar{p}_H \left[\frac{1}{2} + \frac{\arctan(\eta(s_i - s_H)) - \arctan(\eta(s_i - s_{HS}))}{\pi} \right] \quad (9)$$

$$p_S = \bar{p}_S \left[\frac{1}{2} + \frac{\arctan(\eta(s_i - s_{HS})) - \arctan(\eta(s_i - s_S))}{\pi} \right] \quad (10)$$

beschrieben, in denen der Parameter η den Anstieg der Übergänge einstellt. Das Gesamtprofil

$$p_{\text{Gesamt}} = p_H + p_S. \quad (11)$$

resultiert sich aus der Summe der beiden Verläufen. Auf die gleiche Weise lässt sich der Geschwindigkeitsverlauf der Hauptdüse v_H , der Stafettendüsen v_S sowie das Gesamtprofil der Luftgeschwindigkeit v_{Gesamt} berechnen.

Nach der Abschaltung der Hauptdüse werden v_H sowie p_H auf Null gesetzt. Der Gesamtverlauf ist nach t_{Ab} äquivalent zum Verlauf von Stafettendüsen.

Mithilfe von experimentellen Identifikationsversuchen sind die Parameter für die Modellierung der Verläufe zu bestimmen. Die Bewegung des Schussfadens vom Garntyp Polyester 167f36/2 wird mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Bewegung der anfänglichen 60 cm wird gemessen und mit dem Modell verglichen. Die Parameter werden so festgelegt, dass die Standardabweichung zwischen dem Positionsverlauf im Modell und im Versuch möglichst klein ist. Mit den Werten wie in **Tabelle 2** wird eine Standardabweichung von 0,00347 m erreicht.

reicht.

Tabelle 2 Identifizierte Parameter für die Modellierung der Verläufe von Luftgeschwindigkeit und -druck im Rietkanal

s_H	s_{HS}	s_S	η	t_{Ab}
-0,5 m	0 m	1,8 m	50	0,0036 s
\bar{p}_H	\bar{p}_S	\bar{v}_H	\bar{v}_S	
1,8 bar	1,5 bar	$187 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$76 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	

5 Modellprädiktive Regelung

Aufgrund der nicht vorhandenen Beobachtbarkeit des physikalischen Modells wird ein vereinfachtes Ersatzmodell abgeleitet. Unter der Annahme kleiner Düsenkräfte während des Bremsvorgangs lässt sich das mechanische Schussfadenmodell durch ein elektrisches Widerstand-Spule-Kondensator-System ersetzen (**Bild 6**). Die Analogiebetachtung ermöglicht eine vereinfachte Analyse des mechanischen Systems.

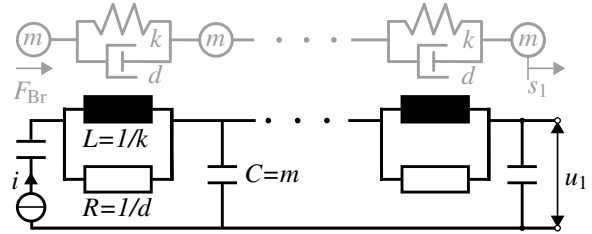


Abbildung 6 Mechanisches Systemmodell und elektrisches Ersatzmodell

Die Übertragungsfunktion der Bremskraft F_{Br} auf die Position der Fadenspitze s_1 ist äquivalent zur Übertragungsfunktion des Stroms i der Stromquelle auf die Spannung u_1 des letzten Kondensators. Da in der Modellierung 20 Massenpunkte benötigt werden, ist diese Übertragungsfunktion aufgrund der hohen Ordnung schwierig darzustellen. Beispielweise ergibt sich die Übertragungsfunktion für drei Massenpunkte

$$G_3 = \frac{(ds + k)^2}{s^2(a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0)}, \quad (12)$$

in denen

$$a_4 = m^3, a_3 = 4dm^2, a_2 = 3d^2m + 4km^2, \quad (13)$$

$$a_1 = 6kdm, a_0 = 3k^2m. \quad (14)$$

gilt. Aufgrund des Zusammenhangs $k \gg d \gg m$ sind die Koeffizienten hoher Ordnung deutlich kleiner als die Koeffizienten niedriger Ordnung. Dieser Trend ist auch bei Systemen mit 20 Elementen gültig. Durch die Vernachlässigung kleiner Koeffizienten hoher Ordnung kann das System mittels eines doppelten Integrators mit dem Verstärkungsfaktor K approximiert werden:

$$G_{\text{sys}} = \frac{K}{s^2}. \quad (15)$$

Durch Identifikation lässt sich K bestimmen. Dazu werden die Sprungantworten des Modells mit 20 Massenpunkten und des reduzierten Modells, sodass der Verstärkungsfaktor im reduzierten Modell eine Minimalstandardabweichung ermöglicht. Der Verstärkungsfaktor ist als $K = 11447 \frac{s^2}{kg}$ identifiziert. Die Standardabweichung zwischen den beiden Sprungantworten innerhalb der Simulationszeit von 50 ms beträgt 0,0055 m, was einer guten Übereinstimmung entspricht.

Durch die Reduzierung des Modells sind die Systemzustände \mathbf{x} , der Systemeingang u und -ausgang y jeweils

$$\mathbf{x} = (s_1 \quad \dot{s}_1 \quad F_b \quad L_e)^T, \quad y = \dot{s}_1, \quad u = F_{Br}, \quad (16)$$

in denen L_e die Längenänderung während des Prozesses bezeichnet. Das System lässt sich im diskreten Zustandsraum mit einer Abtastzeit von $T_{Abtast} = 1 \text{ ms}$ darstellen.

Die modellprädiktive Regelung optimiert die Stellgröße u durch die Minimierung der Kostenfunktion

$$J = \|\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{r}\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{u}\|_{\mathbf{R}}^2, \quad (17)$$

in der die Abweichung zwischen prädierten Systemausgängen $\hat{\mathbf{y}}$ und einer Referenz \mathbf{r} im Prädiktionshorizont $N_1 - N_2$ sowie Stellgrößenänderung im Stellhorizont N_u jeweils mit den Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} gewichtet sind. Diese Matrizen sind positiv definit und werden hier als

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I}, \mathbf{R} = \lambda \cdot \mathbf{I}, \quad (18)$$

definiert, mit dem Einstellparameter λ . [6]

Darüber hinaus ist die Beschränkung des Systemausgangs

$$y \geq -\tau \quad (19)$$

mit einem Toleranzwert τ in der Optimierung berücksichtigt.

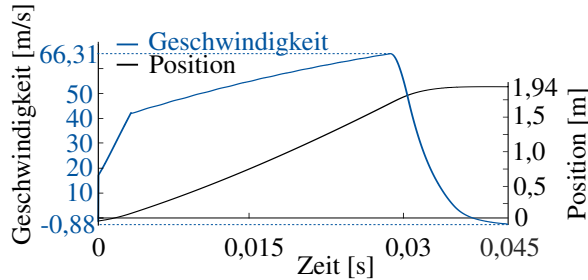


Abbildung 7 Positions- und Geschwindigkeitsverlauf des geregelten Schussfadens

Die Geschwindigkeit des Schussfadens wird zunächst durch den modellprädiktiven Regler simulativ geregelt. In **Bild 7** wird der Positions- und Geschwindigkeitsverlauf des Schussfadens gezeigt. Die Drehzahl der Webmaschine ist 500 rpm, und der Schusseintrag dauert ungefähr Ein Drittel einer Maschinenumdrehung. Das entspricht einer Schusseintragszeit von ungefähr 40 ms. Mit den Einstellparametern $N_1 = 5$, $N_2 = 25$, $N_u = 2$, $\lambda = 0,1$ und $\tau = 1$ wird die Geschwindigkeit des Schussfadens geregelt. Im Bild ist zu sehen, dass der Schussfaden 1,94 m, sprich die Zielposition mit einer kleinen Reserve, erreicht. Die Minimalgeschwindigkeit während des Bremsvorgangs be-

trägt $-0,88 \frac{m}{s}$. Weiterhin erfüllt die Geschwindigkeit des Schussfadens die Ausgangsbeschränkung. Dadurch können Rückwärtsbewegungen des Schussfadens und dadurch auftretende Schussfehler vermieden werden.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein aktiv geregeltes Schussfadensystem zur Qualitätserhöhung von Geweben vorgestellt. Nach der Beschreibung der Systemschematik wurden die Komponenten näher betrachtet. Durch die Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und drei Bildverarbeitungsalgorithmen wurde die Position der Fadenspitze innerhalb von einer Millisekunde echtzeitfähig detektiert. Eine hochdynamische Fadenbremse wurde zur Erfüllung der Echtzeitanforderung konstruiert, und die Dynamik zur Auslegung des Reglers analysiert.

Der Schussfaden wurde als Kette von Massenelementen räumlich diskretisiert. Dabei wurden die interne Dynamik sowie extern angreifende Kräfte analysiert. Durch eine Validierung wurden die Parameter im Modell bestimmt. Da der Vergleich des Modells mit Messungen eine hohe Übereinstimmung gezeigt hat, ist die Modellierung ausreichend genau für die Prozessbeschreibung. Aufgrund der Echtzeitanforderung und fehlenden Beobachtbarkeit des Fadenmodells wurde ein reduziertes Modell basierend auf Analyse der Systemeigenschaften abgeleitet. Das Modell wurde durch einen modellprädiktiven Regler simulativ geregelt. Dabei wurde sichergestellt, dass der Schussfaden die Endposition erreicht und Rückwärtsbewegungen vermieden werden. Die Parameter in der MPR lassen sich in der Praxis anhand des Systemsverhaltens einstellen.

7 Literatur

- [1] Gotti, L. and Zenoni, P.: *Method and device for controlling electrically actuated weft brakes for the automatic adjustment of mechanical tension of a weft thread in textile machines with mechanical insertion*. European Patent 1106721B1, L.G.L. Electronics S.p.A. (IT), 2001.
- [2] Herrlein, W. and Reny, M.: *Device and method to regulate the yarn tension in textile machines*. European Patent 1357213B1, Lindauer DORNIER GmbH, Lindau. (DE), 2003.
- [3] Kemper, M.; Gries, T.; Wu, T.; Stemmler, S.; Abel, D.: *Aktiv geregeltes Schussfadenbremssystem für Luftdüsenwebmaschinen*. Melliand-Textilberichte. (2018) 1, ISSN 0375-9350, S. 30-30.
- [4] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [5] Holtermann, T.: *Methode zur Bewertung und Erhöhung der Energieeffizienz von Produktionsprozessen der Textilindustrie*. Aachen: Shaker-Verlag, 2014.
- [6] Maciejowski, J.: *Predictive control with constraints*. Harlow: Prentice Hall, 2002.