

Bahnlaufsimulation in Verarbeitungsmaschinen – Ergebnisse und Optimierungsstrategien

Dipl.-Ing. André Philipp, Prof. Dr.-Ing. Ralf Mikut, Dipl.-Ing. He Li, M. Sc. Chang You

1 Einführung

Wissenschaftliche Untersuchungen von Verpackungsprozessen sind im Gegensatz zu anderen Bereichen in der akademischen Welt noch recht jung. Solide wissenschaftliche Untersuchungen sind erst ab etwa 1920 bekannt. An der Technischen Hochschule Dresden beschäftigt sich zu dieser Zeit E. Sachsenberg mit der Funktion, Gestaltung, Standardisierung und Wirtschaftlichkeit von Verpackungen [1]. Von da an werden viele wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich neuer Verpackungsmethoden und –prozesse angestoßen, welche einer Vielzahl an neu entwickelten Maschinen eine Grundlage bieten.

Heutzutage sind viele Verpackungsprozesse mit mehr oder weniger Aufwand technisch problemlos beherrschbar. Dennoch steht die Verpackungstechnik ständig unter Druck, denn „richtige und zweckmäßige Verpackung stellt stets das Optimum im Spannungsfeld zwischen Verpackungsleistung, Kosten, Umwelt und – in absehbarer Zukunft – sozialer Verträglichkeit dar.“ [2] Diese vier Kriterien haben nach [2] Einfluss auf die Verpackung und damit auf die zukünftigen Verpackungsmärkte. Die Folge ist, dass auch Hersteller von Verpackungsmaschinen einem erhöhten Druck hinsichtlich der Kosten pro Verpackung unterliegen.

Zur Kostenreduktion in Verarbeitungsmaschinen ist es zwingend erforderlich den Automatisierungsgrad zu erhöhen, sodass Formatumstellungen oder Anpassungen der Maschine an veränderte Prozessbedingungen autonom bzw. semiautonom geschehen. Entscheidende Prozessabschnitte in Verarbeitungsmaschinen sind der Transport und die genaue Positionierung des Verpackungsmaterials innerhalb des Verpackungsprozesses, da dies sowohl die Qualität (z.B. Dichtigkeit und Optik) als auch die Quantität produzierter Verpackungen erhöht.

Diese Arbeit stellt einen Modellierungsansatz des lateralen Bahnverhaltens einer Packmittelbahn innerhalb einer vertikalen Schlauchbeutel Form-, Füll- und Verschleißmaschine dar. Dieser besitzt gegenüber dem Stand der Wissenschaft eine reduzierte Komplexität und benötigt einen geringeren Rechenaufwand zur Simulation des Bahnverhaltens. Die Reduzierung des Kalkulationsaufwandes begünstigt den Einsatz des Modells in der Maschinensteue-

rung zur Optimierung und Automatisierung von Verarbeitungsprozessen/-maschinen. Es werden desweiteren Maßnahmen, die zur besseren Güte des Simulationsmodells führen, erläutert und deren Ergebnisse diskutiert.

Zum Abschluss der Arbeit werden die, das Simulationsmodell, beeinflussenden Parameter und deren Abhängigkeit von der Packmittelgeschwindigkeit dargestellt. Auf weitere Optimierungsschritte hinsichtlich Bahnlaufgüte und Automatisierung einer Verarbeitungsmaschine wird im Abschlusskapitel eingegangen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlagen der Modellbildung und Systemidentifikation

Im Ingenieurwesen und der Wissenschaft sind zwei fundamental unterschiedliche Methoden der Modellbildung und Systemidentifikation existent. Nach [3] sind es die physikalische und die empirische Modellbildung. Ein auf detailliertem Systemverständnis beruhendes Modell mit definierten physikalischen Zusammenhängen, repräsentiert durch mathematische Gleichungen, wird mittels der physikalischen Modellbildung gewonnen. Ist hingegen die Modellbildung anhand von gemessenen Prozessdaten, beobachtetem Systemverhalten und Erfahrung durchgeführt, wird von empirischen Modellen gesprochen, deren struktureller Aufbau meist nichts mit physikalischen Grundgegebenheiten des Systems gemein hat. Aufgrund der Erkennbarkeit der Systemstruktur in den Modellierungsansätzen werden empirische Modelle auch als „*black box*“ – Modelle und physikalische Modelle als „*white box*“ – Modelle bezeichnet.

Die beiden genannten Modellbildungsverfahren sind als eher theoretische Ansätze anzusehen und in der Praxis oft in einer Mischform, dem „*grey box*“ – Modell, angewendet. Diese Modellbildungsart wird ebenfalls als hybride Modellbildung bezeichnet, da sie sowohl physikalische als auch empirische Modellbildungsaspekte vereint. Die hybride Modellbildung wird eingesetzt wenn zu modellierende Systembereiche, aufgrund zu geringem Systemverständnis, mathematisch nicht hinreichend beschrieben werden können oder für eine empirische Modellierung zu wenige Messdaten vorliegen. Zum Einsatz kommen meist Systeme, die ungleich verteilte Anteile physikalischen und empirischen Wissens beinhalten [3].

In Abbildung 1 sind die genannten Paradigmen der Modellbildung bzgl. des Umfangs des physikalischen sowie des Umfangs des empirischen Wissens gegenübergestellt. Die dargestellte Startposition mit ungenügendem empirischem und physikalischem Wissen ist Aus-

gangspunkt jeglicher Modellbildung. Für die empirische Modellbildung wird mit der Messdatenerfassung begonnen. Im Endstatus liegen mehr Daten und eventuell mehr physikalisches Verständnis vor. Um der physikalischen Modellbildung nachzukommen sind mathematische Modellierungen anzufertigen. Der Endstatus ist durch hohes Systemverständnis und wahrscheinlich mehr Messdaten gekennzeichnet. Zur Minimierung der notwendigen Modellbildungszeit wird meist eine semi-empirische Modellierung durchgeführt, welche beide Tätigkeiten beinhaltet.

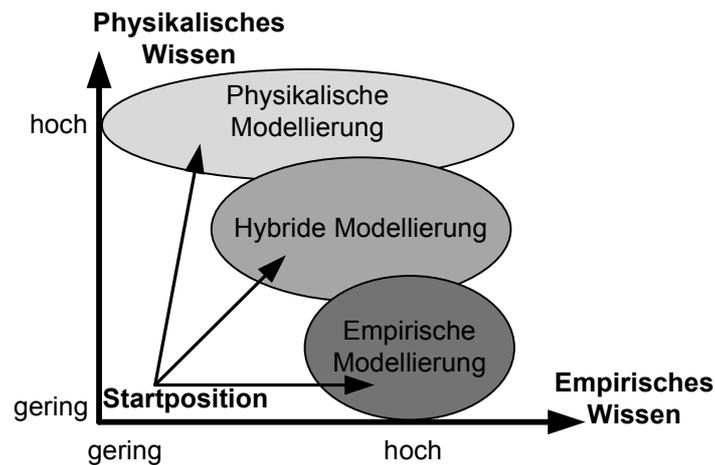


Abbildung 1: Paradigmen der Modellbildung [3]

2.2 Modellierung des lateralen Bahnverhaltens

Bahnverarbeitende Maschinen bestehen hauptsächlich aus Umlenkrollen und vereinzelt Wirkorganen, die das Bahnmaterial in deren Form, Beschaffenheit oder Optik verändern. Das kleinste beteiligte System am Bahntransport sind zwei benachbarte Umlenkrollen, welche bereits seit über 50 Jahren als „Roll-to-Roll“ System angesehen und zur Analyse des lateralen Bahnverhaltens herangezogen werden.

Die signifikanteste Arbeit zur lateralen Bahndynamik hat Dr. J. J. Shelton in seiner Dissertation [4] durchgeführt. Hierbei hat er 1968 die gespannte Bahn als Euler-Bernoulli-Balken (Gl. 2.1) aufgefasst und mit geometrischen Randbedingungen versehen. Der Parameter K beschreibt hier die Wurzel des Quotienten aus Bahnspannung T und dem Produkt aus E-Modul E und Flächenträgheitsmoment I . Der Parameter x beschreibt die Koordinate in Maschinenlaufrichtung und y die Koordinate orthogonal zur Maschinenlaufrichtung.

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - K^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (2.1)$$

$$y|_{x=L} = y_L \quad (2.6)$$

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=L} = \theta_{\omega L} \quad (2.7)$$

Mittels den angegebenen Randbedingungen (Gl. 2.4 - 2.7) lassen sich die Konstanten $C_1 - C_4$ bestimmen. Die Gleichungen 2.8 - 2.11 beschreiben diese mathematisch.

$$C_1 = \frac{K \sinh(KL) (y_0 - y_L) + [KL \sinh(KL) + 1 - \cosh(KL)] \theta_{\omega 0}}{K[KL \sinh(KL) + 2 - 2 \cosh(KL)]} + \frac{(\cosh(KL) - 1) \theta_{\omega L}}{K[KL \sinh(KL) + 2 - 2 \cosh(KL)]} \quad (2.8)$$

$$C_2 = \frac{K [\cosh(KL) - 1] (y_0 - y_L) + [\sinh(KL) - KL \cosh(KL)] \theta_{\omega 0}}{K[KL \sinh(KL) + 2 - 2 \cosh(KL)]} + \frac{(KL - \sinh(KL)) \theta_{\omega L}}{K[KL \sinh(KL) + 2 - 2 \cosh(KL)]} \quad (2.9)$$

$$C_3 = \theta_{\omega 0} - C_1 K \quad (2.10)$$

$$C_4 = y_0 - C_2 \quad (2.11)$$

Da die Größen $\theta_{\omega 0}$ und $\theta_{\omega L}$ nicht messbar sind aber durch die laterale Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung, unter Beachtung des fundamentalen lateralen Bahnverhaltens auf einer Rolle – die einlaufende Bahn läuft immer senkrecht zur Rotationsrichtung der Umlenkerolle ein, beschreibbar sind kann das laterale Bahnverhalten durch eine einfache Differentialgleichung beschrieben werden. Die laterale Geschwindigkeit wird durch Gleichung 2.12 und die laterale Beschleunigung durch Gleichung 2.13 abgebildet. Die laterale Beschleunigung 2.13 ist nicht direkt die Ableitung der lateralen Geschwindigkeit 2.12. Eine Erläuterung hierzu ist [4] zu entnehmen.

$$\frac{d y_i}{dt} = v^2 \left(\theta_i - \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=i} \right) + \frac{d z_i}{dt} \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2 y_i}{dt^2} = v^2 \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=i} + \frac{d^2 z_i}{dt^2} \quad (2.13)$$

Die partielle Ableitung des Lösungsansatzes (Gl. 2.3) ergibt sich nach dem Ersetzen der Konstanten $C_1 - C_4$ zu

$$\left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=L} = \frac{1}{L^2} f_1(KL) (y_0 - y_L) + \frac{1}{L} f_2(KL) \theta_{\omega L} + \frac{1}{L} f_3(KL) \theta_{\omega 0} \quad (2.14)$$

mit

$$f_1(KL) = \frac{(KL)^2 [\cosh(KL) - 1]}{KL \sinh(KL) + 2[1 - \cosh(KL)]} \quad (2.15)$$

$$f_2(KL) = \frac{KL [KL \cosh(KL) - \sinh(KL)]}{KL \sinh(KL) + 2[1 - \cosh(KL)]} \quad (2.16)$$

$$f_3(KL) = \frac{KL [\sinh(KL) - KL]}{KL \sinh(KL) + 2[1 - \cosh(KL)]} \quad (2.17)$$

Durch die Kombination der Gleichungen 2.12, 2.13 und 2.14 und anschließender Laplace-Transformation entsteht die Lösung der partiellen Differentialgleichung 2.1 im Bildbereich.

$$\begin{aligned} Y_L(s) = & \frac{-\frac{1}{\tau} f_3(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} Y_0(s) \\ & + \frac{\frac{v}{\tau} f_3(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} \theta_0(s) \\ & + \frac{\frac{1}{\tau} f_3(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} z_0(s) \\ & + \frac{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} z_L(s) \\ & + \frac{\frac{v}{\tau} f_2(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} \theta_L(s) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Die in Gleichung 2.18 angegebene Lösung der partiellen Differentialgleichung 2.1 stellt ein in Kapitel 2.1 eingeführtes „white box“ – Modell dar. Eine Vereinfachung des Systems auf ein System zweier fixierter, paralleler Umlenkrollen bedeutet $z_0(s) = z_L(s) = \theta_0(s) = \theta_L(s) = 0$ und ergibt ein PDT2 - Übertragungsglied gemäß Gleichung 2.19.

$$\frac{Y_L(s)}{Y_0(s)} = \frac{-\frac{1}{\tau} f_3(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau} f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2} f_1(KL)} \quad (2.19)$$

mit

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (2.20)$$

3 Laterales Bahnverhalten in einer Verarbeitungsmaschine

3.1 Systembeschreibung

Auf dem Verpackungsmarkt gibt es eine Vielzahl verschiedener Verpackungsarten und Designs. Ein sehr großer Anteil dieser Verpackungen wird auf vertikalen Schlauchbeutelmaschinen hergestellt. Aufgrund immer höherer Anforderungen an die Längsnahtqualität eines Schlauchbeutels, welche direkt durch die laterale Positionierung der Packmittelbahn beeinflusst wird, wird eine derartige Maschine als zu analysierendes Realsystem gewählt. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht des Bahnverlaufs in einer vertikalen Schlauchbeutelmaschine.

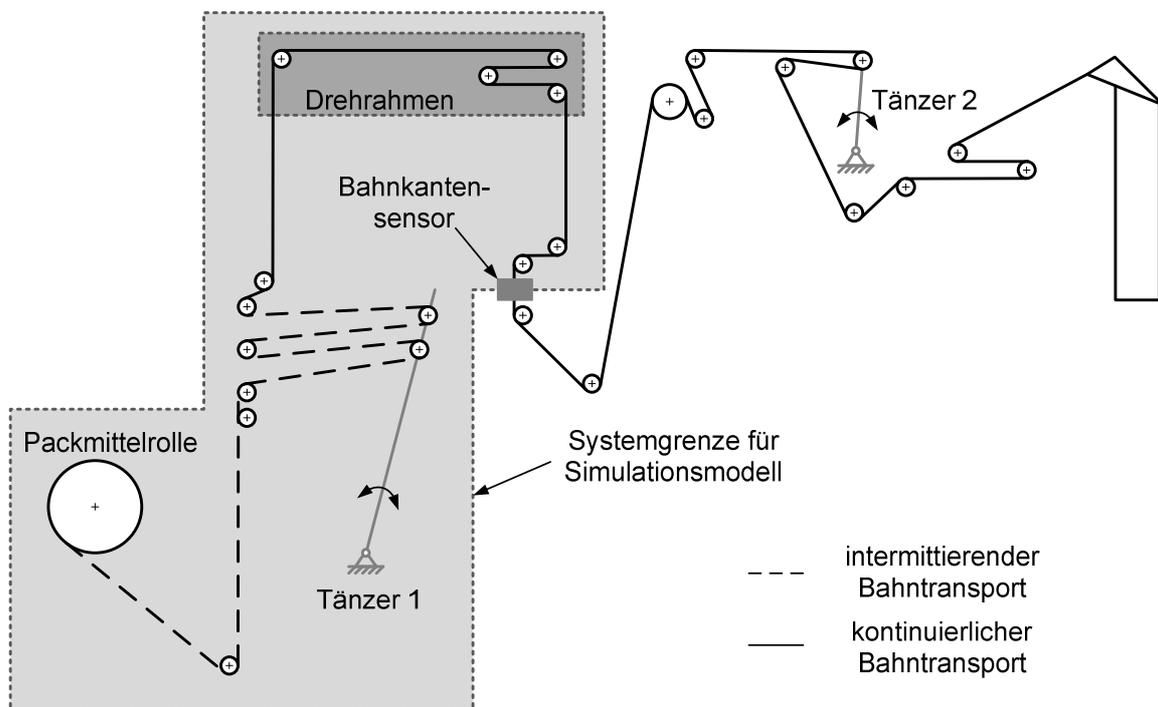


Abbildung 3: Systembeschreibung einer vertikalen Schlauchbeutelmaschine

Grundsätzlich besteht eine vertikale Schlauchbeutelmaschine aus einer Vielzahl an Umlenkrollen und im dargestellten Fall aus zwei Tänzersystemen. Tänzersysteme dienen der Kopplung von kontinuierlich und intermittierend arbeitenden Systemabschnitten. In Abbildung 3 wird diese Kopplung hauptsächlich durch Tänzer 1 realisiert, da die Packmittelrolle eine intermittierende Rotationsbewegung ausführt. Die Rotationsbewegung ist beeinflusst durch den Winkel des Tänzersystems 1. Tänzer 2 verändert im stationären Zustand der Maschine die Geschwindigkeit derart gering, dass Bahnabschnitte zwischen Tänzer 2 und Tänzer 1 als kontinuierlich transportierter Bahnabschnitt betrachtet werden können.

Eine am Bahnkantensensor (Abbildung 3) messbare laterale Veränderung der Packmittelposition kann durch eine laterale Bewegung der Packmittelrolle oder eine Rotation des Drehrahmensystems erzeugt oder kompensiert werden. Da beide Stellglieder die gleiche Ausgangsgröße, die Bahnposition, beeinflussen, ist eine Analyse der Interaktion der Stellglieder zwingend erforderlich. Reduziert kann die Betrachtung auf die Reaktion des Drehrahmensystems bzgl. der lateralen Verschiebung der Packmittelrolle werden, da eine potenzielle Reaktion der lateral verstellbaren Rollen auf das Drehrahmensystem entgegen der Bahntransportrichtung nicht zur Optimierung der Bahnpositionierungsprozesse führt.

Die zu erreichende Qualität des Regelungsmodells beträgt $\pm 0,5$ mm. Diese Abweichung wird als Differenz zwischen Systemantwort des Simulationsmodells und Systemantwort des Real-systems betrachtet.

3.2 Modellbildung

Der Fokus dieser Arbeit ist auf die „grey box“ Modellierung des lateralen Bahnverhaltens des Abschnittes zwischen Packmittelrolle und Bahnkantensensor gelegt, da dies die Grundlage für weitere Analysen und anschließend die Kombination beider Stellglieder darstellt. Bei der Modellierung des im vorherigen Kapitel beschriebenen Abschnittes wird der Drehrahmen, analog zu den anderen Bahnabschnitten, als fixiertes „Roll-to-Roll“-System betrachtet. Ein derartiges System ist in Abbildung 4 dargestellt.

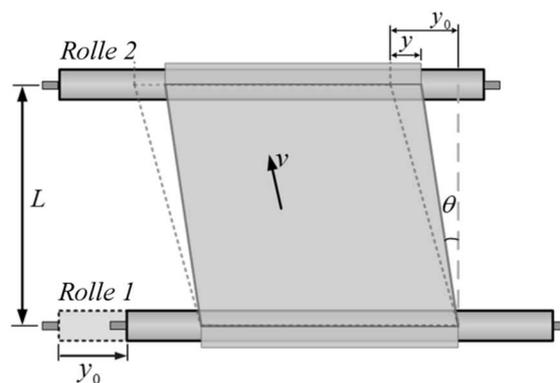


Abbildung 4: idealisiertes Modell eines „Roll-to-Roll“-Systems [17,18]

Das idealisierte Modell eines „Roll-to-Roll“-Systems kann nach [17] und [18] durch die folgenden Gleichungen 3.1-3.3 mathematisch beschrieben werden.

$$(y_0(t) - y(t))^2 + L(t)^2 = \left(\frac{L(t)}{\cos(\theta(t))} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$\tan(\theta(t)) = \frac{y_0(t) - y(t)}{L} \quad (3.2)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin(\theta(t)) \quad (3.3)$$

Unter Nutzung der Gleichungen 3.2 und 3.3 kann das System zusammenhängend mit Gleichung 3.4 beschrieben werden.

$$\left((y_0(t) - y(t))^2 + L(t)^2 \right) \dot{y}(t)^2 - v(t)^2 y(t)^2 + 2v(t)^2 y_0(t)y(t) - v(t)^2 y_0(t) = 0 \quad (3.4)$$

Deutlich wird in der beschriebenen Gleichung 3.4, dass die erstellte Differentialgleichung für ein ideales „Roll-to-Roll“ – System nichtlinear ist. Die Linearisierung der Systemgleichung wird durch eine Taylor-Entwicklung erreicht und ergibt die linearisierte Systembeschreibung im Zeitbereich (Gl. 3.5).

$$\dot{y}(t) = \frac{v(t)(y_0(t) - y(t))}{L(t)} \quad (3.5)$$

Die Überführung der linearisierten Systemgleichung in den Bildbereich erfolgt mittels Laplace-Transformation und ergibt die Übertragungsfunktion für ein ideales „Roll-to-Roll“ – System (Gl. 3.6).

$$\frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{1}{\tau * s + 1} \quad (3.6)$$

mit

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (3.7)$$

Deutlich wird, dass dieses idealisierte Modell mit dem idealisierten Modell in [6] übereinstimmt und ein proportionales Übertragungsverhalten mit Verzögerung 1. Ordnung (PT1-Verhalten) aufweist. Bei dem Vergleich zwischen dem idealisierten Modell (Gl. 3.6) und dem physikalischen Modell (Gl. 2.19) wird deutlich, dass dem PT1-Verhalten des idealisierten Modells ein proportionales differentielles Übertragungsverhalten mit Verzögerung 2. Ordnung (PDT2-Verhalten) des physikalischen Modells gegenübersteht. Untersuchungen in [17] zeigen, dass die Qualität der Übereinstimmung zwischen realer Systemantwort und Simulationsergebnis akzeptabel ist. Bei der hier notwendigen Zusammenschaltung von 13 „Roll-to-Roll“-Systemen ist die Güte des idealisierten Modells nicht ausreichend um den zulässigen Fehlerbereich zwischen realer Systemantwort und Simulation von ± 0.5 mm zu erreichen.

Aufgrund dessen wird im Folgenden von der physikalischen Modellierung abgesehen und der Bereich der empirischen Modellierung beleuchtet. In [17] werden verschiedene Ansätze zur hybriden Modellierung analysiert. Durch die Erweiterung von (Gl. 3.6) mittels einer zweiten, veränderlichen Zeitkonstante wird übergegangen zur Modellierung des Systems als Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (PT2-Verhalten). Als zweite Zeitkonstante wird die erste Zeitkonstante mit einem Fittingparameter versehen. Dargestellt ist dieses Modell in (Gl. 3.8).

$$\frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{1}{k * \tau * s^2 + \tau * s + 1} \quad (3.8)$$

Die Übertragungsfunktion (Gl. 3.8) kann durch den Fittingparameter k mit Hilfe von Messdaten angeglichen werden und die Abweichung zwischen Realsystemantwort und Simulationsantwort minimiert werden. Notwendig für die Optimierung der Übereinstimmung ist ein Qualitätskriterium (Gl. 3.9). Verwendet wird die Wurzel aus der Summe der, je Messpunkt auftretenden, quadrierten Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnis.

$$QC = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{s_i} - y_{m_i})^2} \quad (3.9)$$

3.3 Ergebnisse

Der vorherige Abschnitt beschreibt die Modellierungsstrategie des Übertragungssystems und zeigt Qualitätskriterien auf. In diesem Abschnitt werden mit einer Folienpositionsänderung von 12 mm erzielte Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Bahngeschwindigkeiten von 4 – 28 m/min werden untersucht und maximale Abweichungen, Fittingparameter und Qualitätswerte angegeben.

Abbildung 5 stellt die Ergebnisse grafisch dar und macht deutlich, dass die Anpassung mittels Fittingparameter k notwendig ist um unterschiedliche Geschwindigkeiten zu simulieren. Eine genauere Betrachtung des Parameters k in den Diagrammen zeigt die Reduktion des Parameters mit zunehmender Geschwindigkeit. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Geschwindigkeit das Systemverhalten weniger von der Biegesteifigkeit des Bahnmaterials abhängt und hin zum Verhalten des idealisierten „Roll-to-Roll“ – Modells strebt, welches als PT1-Verhalten in Kapitel 3.1 hergeleitet wurde.

Die Qualitätskennzahlen QC der einzelnen Simulationsergebnisse sind in einem ähnlichen Bereich. Dies unterstützt die Notwendigkeit des Fittingparameters k . Trotz optisch guter Simulationsergebnisse ist der zulässige Fehlerbereich von ± 0.5 mm überschritten und somit die Qualität des Simulationsmodells nicht ausreichend. Die maximalen Abweichungen zwischen Simulationsergebnis und Messwert sind ca. Faktor vier des zulässigen Bereichs.

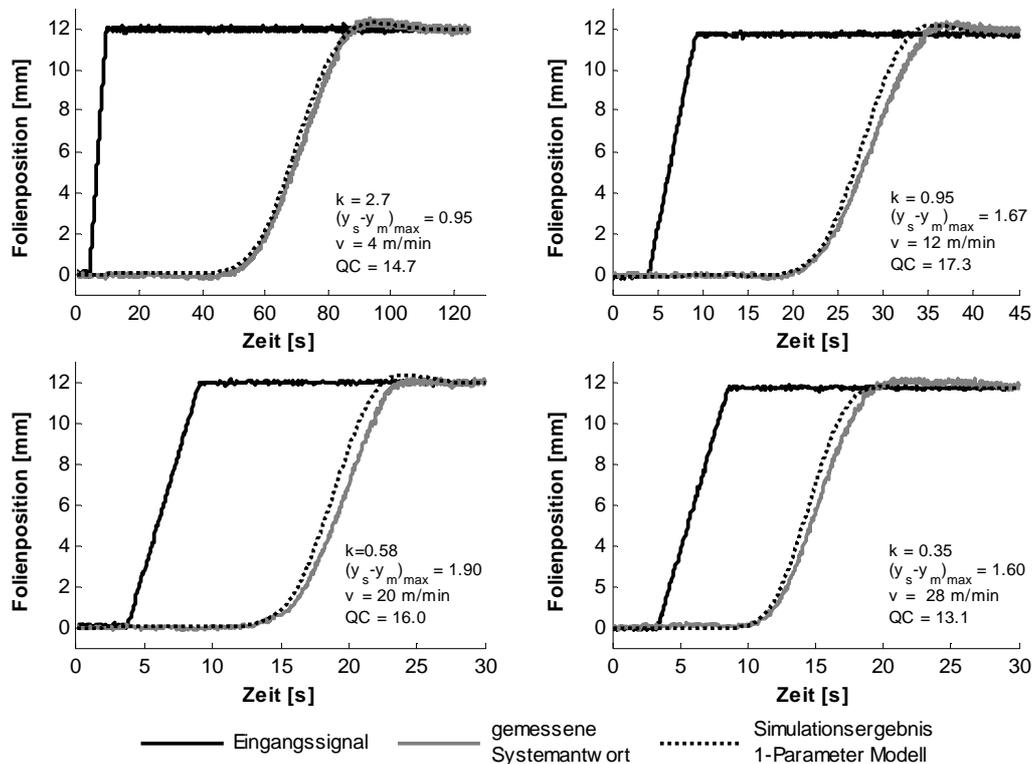


Abbildung 5: Gegenüberstellung der realen und der simulierten Systemantwort für die Zusammenschaltung von 13 „Roll-to-Roll“-Systemen (3.8.)

4 Modellanpassung

Eine Ursache für die in Kapitel 3.3 beschriebene nicht ausreichende Qualität der Simulationsergebnisse ist der Übergang der kontinuierlichen zur intermittierenden Bahnförderung im Bereich des Tänzersystems. Dies hat zur Folge, dass die Transportgeschwindigkeit und die Länge der im Tänzersystem befindlichen Bahnabschnitte stetig schwanken. Die Abschnittslängen der Sektionen vor und nach dem Tänzersystem sind konstant.

Eine in [18] erfolgte Modellierung der Geschwindigkeiten in einem Tänzersystem zeigt eine Möglichkeit, die in Abbildung 6 dargestellte inkonsistente Bewegung des Tänzerarms zu diskretisieren. Hierbei wird die Tänzerbewegung in Bewegungsabschnitte zwischen zwei Winkelmaximas eingeteilt und die Zeitkonstante für diesen Abschnitt mit bereits erfassten Daten

der vorherigen Abschnitte berechnet. Dies bedeutet bei einem Zeitpunkt t mit $T_{i+1_{\max}} \leq t \leq T_{i+2_{\max}}$ wird die mittlere im System befindliche Länge mit dem Mittelwert der zwei vorherigen Maximallängen (Gl. 4.1) berechnet und die Geschwindigkeit als Summe der konstanten Abzugsgeschwindigkeit v_0 und der halben Längenänderung zwischen vorletztem Maximum und letztem Minimum (Gl. 4.2).

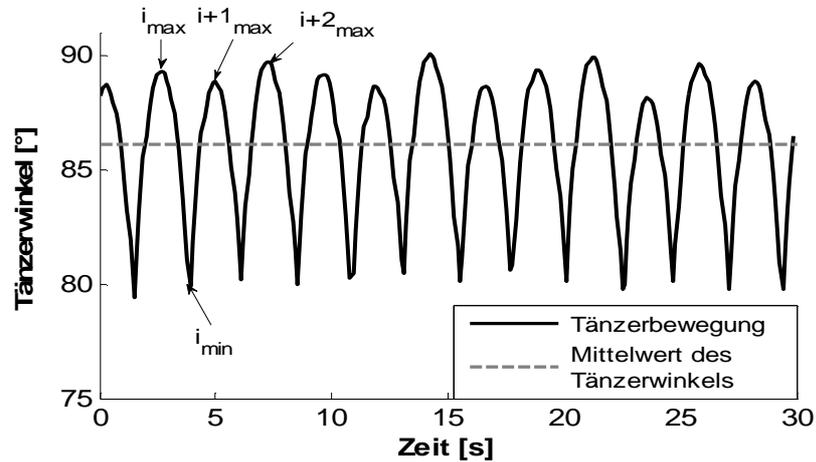


Abbildung 6: Tänzerbewegung

$$\bar{L} = \frac{L_{i_{\max}} + L_{i+1_{\max}}}{2} \quad (4.1)$$

$$\bar{v} = v_0 + \frac{L_{i_{\max}} - L_{i_{\min}}}{2(t_{i_{\min}} - t_{i_{\max}})} \quad (4.2)$$

Die Notwendigkeit verschiedene Maschinengeschwindigkeiten zu simulieren und den Einfluss der inkonsistenten Tänzerbewegung weiter zu reduzieren, bedingt die Einführung eines weiteren Fittingparameters p in (Gl. 4.2), welche sich dann zu (Gl. 4.3) ergibt.

$$\bar{v} = v_0 + \frac{L_{i_{\max}} - L_{i_{\min}}}{2(t_{i_{\min}} - t_{i_{\max}})p} \quad (4.3)$$

Die diskretisierte Zeitkonstante für die Abschnitte, welche sich im Tänzersystem befinden wird anschließend mit (Gl. 4.4) berechnet.

$$\tau^* = \frac{\bar{L}}{\bar{v}} \quad (4.4)$$

Unter Verwendung der diskretisierten Zeitkonstante (Gl. 4.4) ergibt sich aus dem 1-Parameter Modell (Gl. 3.8) das 2-Parameter Modell (4.5).

$$\frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{1}{k \cdot \tau^* \cdot s^2 + \tau^* \cdot s + 1} \quad (4.5)$$

Die Nutzung des 2-Parameter Modells zur Simulation des lateralen Bahnverhaltens im Tänzersystem (Gl. 4.5) kann ebenfalls für die Bahnabschnitte mit kontinuierlichen Bahntransport verwendet werden, da in jenen die Bahnlänge konstant ist und der 2. Term in (Gl. 4.3) zu null wird.

Das hier eingeführte System bildet das reale Systemverhalten von 13 gekoppelten „Roll-to-Roll“-Systemen sehr gut ab. Abbildung 7 stellt im linken Bereich die Güte des 1-Parameter Modells (Gl. 3.8) und des 2-Parameter Modells (Gl. 4.5) dar. Der gewählte Systemeingang ist hier nicht, wie in Abbildung 5 dargestellt, 12 mm sondern 17,5 mm um zu verdeutlichen, dass unabhängig vom Systemeingang ein ähnlicher Wert des Qualitätskriteriums erreicht wird. Der Unterschied bzgl. Abbildung 5 ist, dass die simulierte Systemantwort des 1-Parameter Modells hier verspätet eintritt.

Bei rein optischer Betrachtung der Simulationsergebnisse von 1 bzw. 2-Parameter Modell in dem linken Diagramm der Abbildung 7 wird deutlich welche Güteverbesserung die Verwendung des zweiten Fittingparameters bewirkt. Die Optimierung der Simulationsergebnisse zeigt sich zum einen in der Reduktion des Qualitätskriteriums von 16,7 auf 2,2 (Abbildung 7 links) als auch in der Minimierung der maximalen Abweichung (Abbildung 7 rechts), welche bei dem 2-Parameter Modell den zulässigen Fehlerbereich von $\pm 0,5$ mm nicht mehr verletzt und somit die Zielvorgabe erreicht.

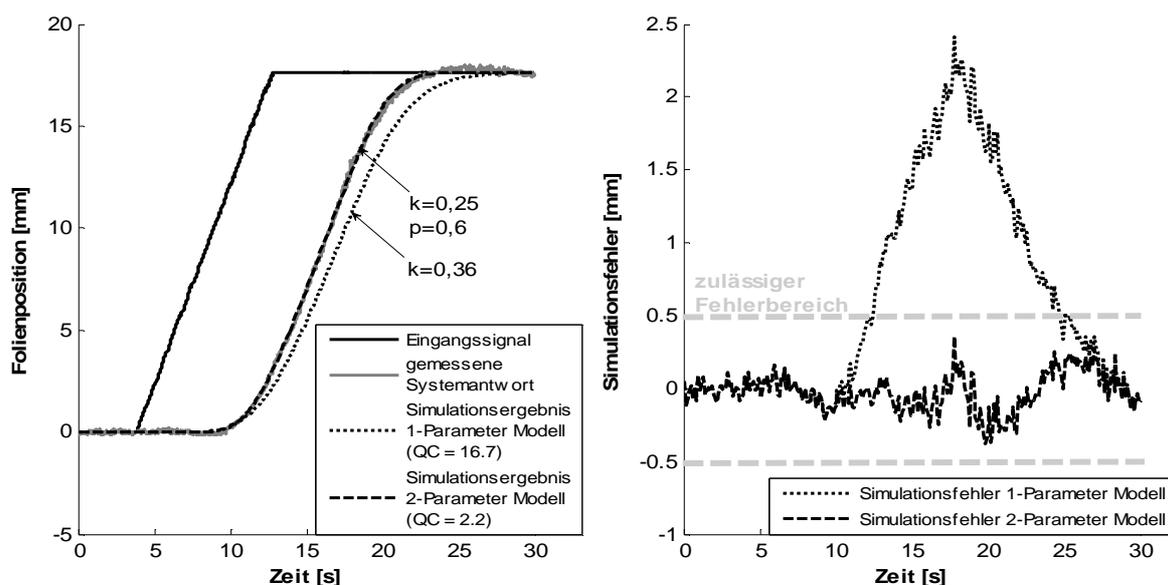


Abbildung 7: links: Gegenüberstellung 1-Parameter Modell und 2-Parameter Modell
rechts: Gegenüberstellung der Abweichung zwischen realer Systemantwort und Simulationsergebnis von 1-Parameter Modell und 2-Parameter Modell

Die dargestellten Fittingparameter der Simulationsmodelle differieren voneinander, da die Einbeziehung des Parameters p eine Beeinflussung des Parameters k bedingt. Die Ursache hierfür ist die Kopplung beider Fittingparameter in der zweiten Zeitkonstante des in Gleichung 4.5 dargestellten Systems.

5 Abhängigkeit der Fitting-Parameter von der Bahngeschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert hängt der Fittingparameter k von der Transportgeschwindigkeit der Bahn ab. Gleiches gilt für den Parameter p , welcher die diskretisierte Tänzerbewegung manipuliert, da mit veränderter Bahngeschwindigkeit die Bewegung des Tänzersystems deutlich verändert wird. Die Abhängigkeit der Fitting-Parameter von der Bahngeschwindigkeit wird in diesem Kapitel beleuchtet und in Abbildung 8 dargestellt.

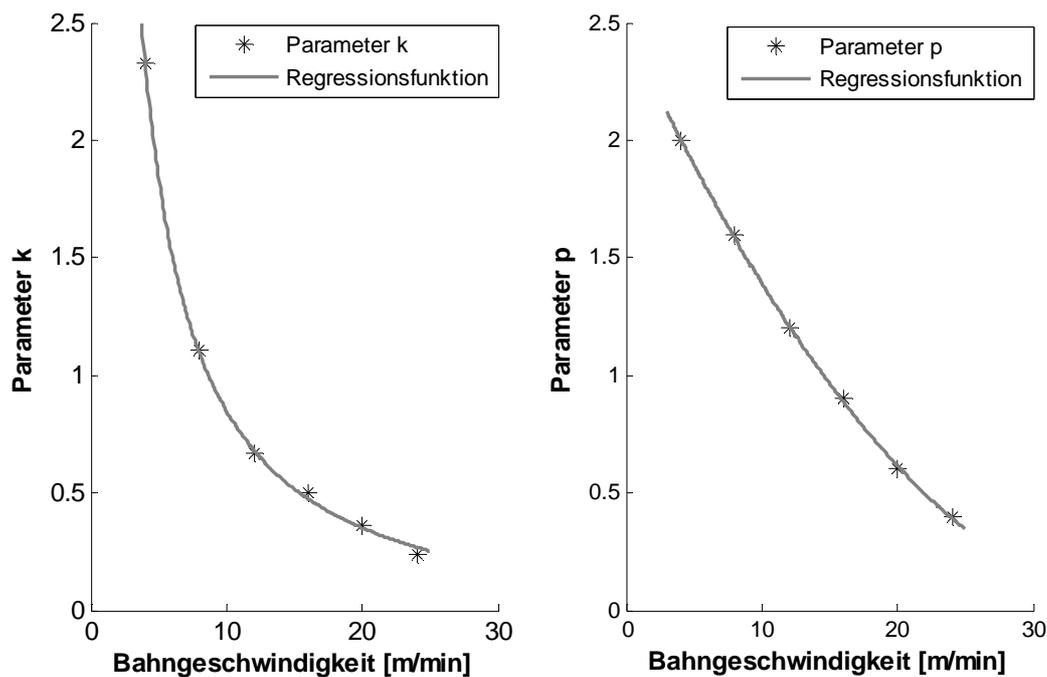


Abbildung 8: Korrelation der Fittingparameter k und p mit der Bahngeschwindigkeit

Es zeigt sich bei der Betrachtung der Fittingparameter k und p , dass beide mit steigender Bahngeschwindigkeit kleiner werden. Bei Parameter k bestätigt sich, die bereits in Kapitel 3.3 dargestellte Systemveränderung vom proportionalen Übertragungsverhalten mit Verzögerung 2. Ordnung hin zum proportionalen Übertragungsverhalten mit Verzögerung 1. Ordnung, dem idealisierten „Roll-to-Roll“-System. Die Reduktion des Parameters p mit zunehmender Geschwindigkeit zeigt, dass mit höherer Geschwindigkeit die Inkonsistenz der Tän-

zerbewegung bei gleichzeitiger Verringerung des Bewegungsbereiches zunimmt. Bei der Betrachtung von Gleichung 4.3 wird dies deutlich. Durch die Verringerung der Längendifferenz in einem Bewegungsabschnitt muss der Parameter p geringer werden um die erhöhte Inkonsistenz der Tänzerbewegung zu kompensieren und so den Geschwindigkeitswert zu optimieren.

Die Fittingparameter k und p können durch geeignete Regression als Funktionen der Bahngeschwindigkeit beschrieben werden. Die Funktion von Parameter k wird in Gleichung 5.1 und die von Parameter p in Gleichung 5.2 dargestellt.

$$k = \frac{9,922}{v} - 0,1446 \quad (5.1)$$

$$p = 1,563 * 10^{-3}v^2 - 1,245 * 10^{-1}v + 2,48 \quad (5.2)$$

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der hybriden Modellierung eines mehrsektionalen Bahntransportabschnitts innerhalb einer Schlauchbeutel Form-, Füll- und Verschleißmaschine. Das hier vorgestellte System modelliert die Maschine mit sowohl kontinuierlichen als auch intermittierenden Abschnitten der Bahnbewegung.

Grundlagen zur Modellierungstheorie und Bahnlauftheorie werden als Stand von Wissenschaft und Technik eingeführt. Das physikalische Modell der lateralen Bahnbewegung nach J.J. Shelton wird diskutiert und aufgrund sehr hohen Rechenaufwandes für ungünstig bzgl. der Nutzung in einer Maschinensteuerung eingestuft. Im Anschluss an die Systemabgrenzung und Erläuterung der Zielstellung ein hybrides Simulationsmodell zu erstellen, welches das Realsystem mit einer Maximalabweichung von $\pm 0,5$ mm nachbildet, wird die Modellierung eines idealisierten „Roll-to-Roll“-Systems dargelegt. Dessen Modellierung wird mit dem Stand der Technik verglichen. Die Übereinstimmung des Systems ist nicht ausreichend, sodass von einem rein physikalischen Idealmodell des idealisierten „Roll-to-Roll“-Systems ein hybrides Modell abgeleitet wird.

Das hybride Modell wird als ein proportionales Übertragungsverhalten mit Verzögerung 2. Ordnung angenommen und evaluiert. Die erzielten Simulationsergebnisse werden dargestellt und zeigen eine maximale Abweichung von der Realsystemantwort, welche um Faktor vier größer ist als der zulässige Fehlerbereich. Ursache hierfür ist die inkonsistente Bewegung des Tänzersystems innerhalb des modellierten Systemabschnitts. Zur Optimierung wird ein

weiterer Fittingparameter eingeführt. Mit Hilfe des zweiten Fittingparameters wird der zulässige Abweichungsbereich zwischen simulierter und realer Systemabweichung erreicht. Die Abhängigkeit der Fittingparameter vom Einflussparameter Bahngeschwindigkeit wird im Anschluss dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Bahngeschwindigkeit das Simulationsmodell die Abhängigkeit der Biegesteifigkeit der Bahn verliert und sich dem Idealsystem annähert.

Anzumerken ist bei den hier vorgestellten Ergebnissen, dass die Gültigkeit der dargestellten Abhängigkeiten und Fittingfunktionen lediglich für das dargestellte und modellierte System vorhanden ist. Das hybride Modell hingegen besitzt Allgemeingültigkeit und kann für die Simulation anderer Materialien und Maschinenabschnitte angewendet werden. Das eingeführte hybride Modell der lateralen Bahndynamik ist somit eine Alternative zur physikalischen Modellierung von J.J. Shelton, wenn Materialparameter unbekannt sind und in der Maschine nicht bestimmt werden können.

Das in dieser Arbeit modellierte System beinhaltet ein rotationsfähiges Drehrahmensystem, welches hier nicht modelliert wurde. Die Modellierung eines derartigen Systems ist ein notwendiger nächster Schritt, um eine Schlauchbeutelmaschine weiter zu automatisieren und die Regelgüte der Bahnpositionierung weiter zu erhöhen. Hierbei können im Anschluss beide Systeme gekoppelt werden und deren gegenseitige Beeinflussung analysiert werden. Zur Implementierung eines derartigen Steuerungssystems ist es notwendig, dass hier vorgestellte System als echtzeitfähiges System aufzubauen.

Die Analyse weiterer Materialien ist ebenfalls wichtig, um die in der Verpackungstechnik üblichen Bahnmaterialien abdecken zu können. Bei einer Kombination des Bahnpositionierungsmodells mit der Bestimmung des Bahnkraftprofils innerhalb einer Packmittelbahn können Optimierungen hinsichtlich der Bahnbeanspruchung durchgeführt werden. In Abbildung 9 wird ein hierfür notwendiges Messgerät dargestellt, welches in [19] ausführlich eingeführt und beschrieben wird. Der FriWFP-Scanner besitzt die Möglichkeit Bahnkraft- und Reibwertprofile zu messen und somit die Bahnbeanspruchung zu bestimmen.



Abbildung 9: FriWFP-Scanner im Bahnlaufversuchsstand des Fraunhofer IVV Dresden [19]

Referenzen

- [1] **G. Bleisch, J.-P. Majschak, U. Weiß** (2011): „*Verpackungstechnische Prozesse. Lebensmittel-, Pharma-, Chemieindustrie*“, Behr's Verlag GmbH & Co. KG, Hamburg
- [2] **Onlinequelle:**http://www.beschaffung-aktuell.de/home/-/16537505/26937472/Entwicklung-und-Tendenzen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ zuletzt geprüft: 02.05.2014
- [3] **T. A. Johansen** (1994): „*Operating regime based process modeling and identification*“, Doktorarbeit, Norwegisches Institut für Technologie – Universität Trondheim
- [4] **J. J. Shelton** (1968): „*Lateral dynamics of a moving web*“, Doktorarbeit, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma
- [5] **J. J. Shelton, K. N. Reid** (1971): „*Lateral dynamics of a real moving web*“, Journal of dynamic Systems, Measurement and Control, S. 180-186
- [6] **J. J. Shelton, K. N. Reid** (1971): „*Lateral dynamics of a idealized moving web*“, Journal of dynamic Systems, Measurement and Control: S. 187-192
- [7] **L. Sievers, M. J. Balas, A. von Flotow** (1988): „*Modelling of Web conveyance systems for multivariable control*“, Automatic Control, IEEE Transactions: S. 524-531
- [8] **Shin, Kee-Hyun, et al.** (2003): "*Feedforward control of the lateral position of a moving web using system identification.*", Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the. Vol. 1. IEEE
- [9] **H. Wang, D. Logghe, D. Miskin.** (2005): "*Physical modelling and control of lateral web position for wallpaper making processes.*", Control engineering practice: S. 401-412.
- [10] **M. R. Brake, J. A. Wickert** (2010): "*Tilted guides with friction in web conveyance systems.*", International journal of solids and structures: S. 2952-2957.
- [11] **Xu, Xia, et al.** (2011): "*Design and modeling of Roll-to-Roll manufacturing system using simulation techniques.*", Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)
- [12] **Jin, Zhao, et al.** (2011): "*Stabilization of the lateral dynamics of a roll-to-roll web system.*", Electrical and Computer Engineering (CCECE), 24th Canadian Conference on. IEEE
- [13] **S. Tsai , et al.** (2012): "*Design of lateral dynamics control for web Roll-to-Roll systems.*", Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), 19th International Conference. IEEE.
- [14] **Tan, Henry, et al.** (2013): "*Study of web guide slippage phenomena in roll-to-roll embossing system.*" Control and Automation (ICCA), 10th IEEE International Conference on. IEEE
- [15] **G. Brandenburg (2011):** „Lateralverhalten elastischer Bahnen vereinfacht modelliert, Teil 1: Fadenmodell zur Beschreibung des Seitenkantenverhaltens“, TU München, atp edition, vol. 53, no. 04, S. 50-62
- [16] **A. Seshadri, P. R. Pagilla.**(2010): "*Optimal web guiding.*", Journal of dynamic systems, measurement and control
- [17] **H. Li** (2013): „*Entwicklung eines Mehrstufigen Bahnpositionierungssystems*“, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie
- [18] **C. You** (2014): „Optimization of a Dual-Step web guiding System“, Masterthesis, TU Dortmund
- [19] **A. Philipp, B. Oberdorfer** (2014): „*Messtechnik zur Ermittlung von Bahnkraft- und Reibwertprofilen – der Stand der Technik im Vergleich zu aktuellen Entwicklungen.*“, Tagungsband 12. Bahnlaufseminar