

Potentiale einer flachheitsbasierten Antriebssteuerung am Beispiel Regalbediengerät

Possibilities of a Flatness Based Feed Forward Control in the Context of Rack Feeders

Michael Schipplick, Willibald A. Günthner, Technische Universität München, Garching

Zusammenfassung Schnelle und leistungsfähige Fördergeräte sind unabdingbar für eine effiziente und wirtschaftliche Abwicklung intralogistischer Aufgaben. In diesem Zusammenhang gilt es für die Weiterentwicklung von Regalbediengeräten den Zielkonflikt zwischen dem Wunsch nach höherer Dynamik und der gleichzeitigen Reduktion der durch die Dynamik hervorgerufenen Schwingungen der Gerätestruktur zu lösen. Der Ein-

satz eines flachheitsbasierten Steuerungsansatzes eröffnet hier neue Optimierungsmöglichkeiten. ►►► **Summary** Fast and capable handling equipment has become essential for a successful materials handling. According to further development of rack feeders it is necessary to increase dynamics by vibration damping at the same time. A flatness based feed forward control offers new ways of optimization.

Schlagwörter Regalbediengerät, mechatronische Optimierung, flachheitsbasierte Steuerung, aktive Schwingungsdämpfung, Leistungssteigerung ►►► **Keywords** Rack feeder, mechatronical optimization, flatness based feed forward control, active vibration damping, increased performance

1 Einleitung und Motivation

Vor dem Hintergrund sich dynamisch entwickelnder Märkte mit wachsenden Kundenbedürfnissen und dem zunehmenden Drang nach Individualisierung befindet sich die gesamte Lieferkette eines produzierenden Unternehmens im Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach einem wirtschaftlichen Betrieb durch eine möglichst hohe Auslastung der Produktionsmaschinen bei gleichzeitig möglichst hoher Reaktionsfähigkeit auf unvorhergesehene Ereignisse. Die gestiegenen Anforderungen an den Produktionsprozess erfordern Fördergeräte, welche die geforderten Waren schnell und effizient transportieren bzw. bereitstellen können. Im Bereich der automatisierten Kleinteilelager gilt es den Wunsch nach höherer Dynamik bei gleichzeitiger Reduktion der durch die Dynamik hervorgerufenen Strukturschwingungen zu realisieren.

Zur Reduzierung der Strukturschwingungen kann durch konstruktive Maßnahmen die Steifigkeit der Maststruktur erhöht werden. Der damit verbundene Gewichtszuwachs wirkt sich jedoch in Mehrkosten für Material sowie leistungsstärkere Antriebe aus, um die geforderte Dynamik erreichen zu können. Um möglichst geringe Strukturschwingungen während des Verfahrens zu erhalten, werden derzeit unter Verwendung von Ruckbegrenzungen s-förmige Geschwindigkeitsprofile eingesetzt. Die Ruckzeit ist dabei das Maß des linearen Aufbaus der positiven bzw. negativen Beschleunigung. Im Rahmen der Inbetriebnahme wird diese auf einen festen Wert eingestellt und ist unabhängig von Beladungszustand sowie Hubhöhe und für jedes Positioniermanöver identisch. Eine Reduzierung der Ruckzeit führt zu einer verstärkten dynamischen Anregung der



Bild 1 Automatisches Kleinteilelager in der Versuchshalle des Lehrstuhls (fml).

Gerätestruktur, was sich in größeren Schwingungsamplituden des Lastaufnahmemittels niederschlägt. Um die geforderte Positioniergenauigkeit dennoch erreichen zu können, müssen Geräteberuhigungszeiten in Kauf genommen werden, was die Gesamtspielzeit erhöht und damit den Durchsatz verringert. Der Einsatz optimierter Anfahr- und Bremszeiten [1; 2] in Abhängigkeit der Geräteparameter und der aktuellen Hubhöhe des Lastaufnahmemittels versprechen eine Verbesserung. Diese müssen jedoch mit großem Rechenaufwand im Vorfeld für jedes einzelne Positioniermanöver ermittelt werden. Die Übertragbarkeit auf veränderte Gerätestrukturen und eine Anpassung an sich verändernde Randbedingungen, wie etwa Hubhöhe, Beladungszustand und Reibungsverhältnisse, ist jedoch nicht gegeben. Mithilfe von

Regelungsstrategien auf Basis von Fuzzy- und Zustandsregelung lässt sich das Schwingungsverhalten positiv beeinflussen [3]. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Antriebseinheit an der Mastspitze, welche synchron zum Fahrtrieb an der Bodentraverse arbeitet, lässt sich eine weitere Verbesserung der Gerätedynamik erzielen. Das Zusatzgewicht sowie die höheren Kräfte, welche in die Regalstruktur eingeleitet werden, müssen jedoch bei der Auslegung der Geräte- und Lagerstruktur berücksichtigt werden. Der hierbei anfallende Mehraufwand sowie die höheren Investitionskosten müssen dem zu erwartenden Mehrwert gegenübergestellt werden. Im Hinblick auf einen allgemeingültigen adaptiven Steuerungs- und Regelungsansatz sind die dargestellten Verfahren nur suboptimale Lösungen.

2 Lösungsansatz

Vielversprechender erscheint der Einsatz eines analytischen Berechnungsverfahrens, welches unter Berücksichtigung aller System- und Betriebsparameter für das jeweilige Positioniermanöver zeitoptimale Trajektorien nahezu in Echtzeit generiert. Verbunden mit dem Leistungspotential moderner Servomotoren und deren Regelbarkeit eröffnen sich neue Möglichkeiten einer aktiven Schwingungsdämpfung. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojektes konnte in Zusammenarbeit von Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss und Logistik ((fml)) und dem Lehrstuhl für Angewandte Mechanik (AM) der Technischen Universität München ein Vorsteuergesetz auf Basis der flachheitsbasierten Steuerungstheorie [4–6] entwickelt werden, welches auf die verteilt-parametrische Systemdynamik abgestimmt ist. Voraussetzung hierfür ist ein flaches System. In einem flachen System lassen sich alle Zustandsgrößen x und Steuergrößen u in Abhängigkeit eines flachen Ausgangs y und dessen zeitlichen Ableitungen ausdrücken [4].

$$x = \Phi \left(y_f, \dot{y}_f, \dots, y_f^{(q)} \right) \quad (1)$$

$$u = \Phi \left(y_f, \dot{y}_f, \dots, y_f^{(q)} \right) \quad (2)$$

Wie in [7] gezeigt wurde, lässt sich das Regalbediengerät in zwei homogene Kontinua unterteilen, für die jeweils die partiellen Differentialgleichungen eines Euler-Bernoulli-Balken angesetzt werden können:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial z^4}(z, t) + \left(\frac{\rho A}{EI} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(z, t) = 0 \quad (3)$$

Zwischen beiden Mastsegmenten befindet sich das als Punktmasse modellierte Lastaufnahmemittel. Zur Abbildung der Einspannsteifigkeit am Mastfuß ist der untere Balken über eine Drehfeder mit der Bodentraverse verbunden. Durch Normierung und Laplace-Transformation [6] ergeben sich gewöhnliche

Differentialgleichungen, welche unter Berücksichtigung geeigneter Randbedingungen und Ansatzfunktionen folgendermaßen dargestellt werden können:

$$Q\dot{w}(z) = P(z)\hat{u} \quad (4)$$

Durch Einführung des flachen Ausgangs \hat{y}_f erhält man:

$$\hat{w}(z) = P(z)\hat{y}_f \quad (5)$$

$$\hat{u} = Q\hat{y}_f \quad (6)$$

Wie in [5] gezeigt, ergeben sich durch Reihenentwicklung der Funktionsterme P und Q sowie durch einige Umformungen sowohl die Biegelinie als auch die Antriebskraft zu:

$$w(z, t) = y(t) + \sum_{n=1}^N (p_n(z) - q_{n-1}(z)) \frac{(-1)^n}{(4n)!} y^{(2n)}(t) + q_N(z) \frac{(-1)^N}{(4N+4)!} y^{(2N+2)}(t) \quad (7)$$

$$\hat{u}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^3 p_n}{dz^3}(0) \frac{(-1)^n}{(4n)!} y^{(2n)}(t) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^3 q_n}{dz^3}(0) \frac{(-1)^n}{(4n)!} y^{(2n+2)}(t) \quad (8)$$

Der flache Ausgang kann weiter mittels einer Gevrey-Funktion 2. Klasse [5] parametrisiert werden:

$$y^*(t) = y_T^* \Theta(t) \quad (9)$$

$$\hat{w}(z) = P(z)\hat{y}_f, \quad (10)$$

wobei y_T^* eine positive reale Zahl ist und der Zielposition entspricht. $\Theta(t)$ lässt sich weiter definieren zu:

$$\Theta(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \frac{\int_0^t \Theta_{\sigma,T}(\tau) d\tau}{T} & t \in (0, T) \text{ mit} \\ \frac{\int_0^t \Theta_{\sigma,T}(\tau) d\tau}{0} & \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

$$\Theta_{\sigma,T}(t) = \begin{cases} 0 & t \notin (0, T) \\ \exp\left(\frac{-1}{\left[\left(1-\frac{t}{T}\right)\frac{t}{T}\right]^\sigma}\right) & t \in (0, T) \end{cases} \quad (11)$$

Durch Variation des Parameters σ , welcher den Grad der Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Positionierzeit beschreibt, lassen sich Trajektorien für unterschiedlich schnelle Positioniermanöver generieren.

Aufbauend auf dieses Verfahren kann eine Berechnungsroutine abgeleitet werden, mit deren Hilfe in Abhängigkeit der jeweiligen Strukturparameter, unter Berücksichtigung der aktuellen Hubhöhe und des Beladungszustandes sowie unter Ausnutzung der maximal zur Verfügung stehenden Antriebsleistung zeitoptimale Trajektorien nahezu in Echtzeit generiert werden können. Damit lassen sich linear bewegte Fördergeräte in kürzest möglicher Zeit und ohne Nachschwingungen des Lastaufnahmemittels am Zielort positionieren. Durch geeignete Definition der Randbedingungen (Start- und Zielposition) lässt sich mit Hilfe dieses Verfahrens nicht nur nachschwingungsfrei positionieren, sondern auch nachschwingungsfrei auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigen bzw. abbremesen. Eingebettet in eine Folgeregelung lassen sich Einflüsse aus Reibung und Spiel beseitigen. Hierzu konnte analog zu [8] ein beobachtergestützter Zustandsregler mit Polvorgabe nach Kalman

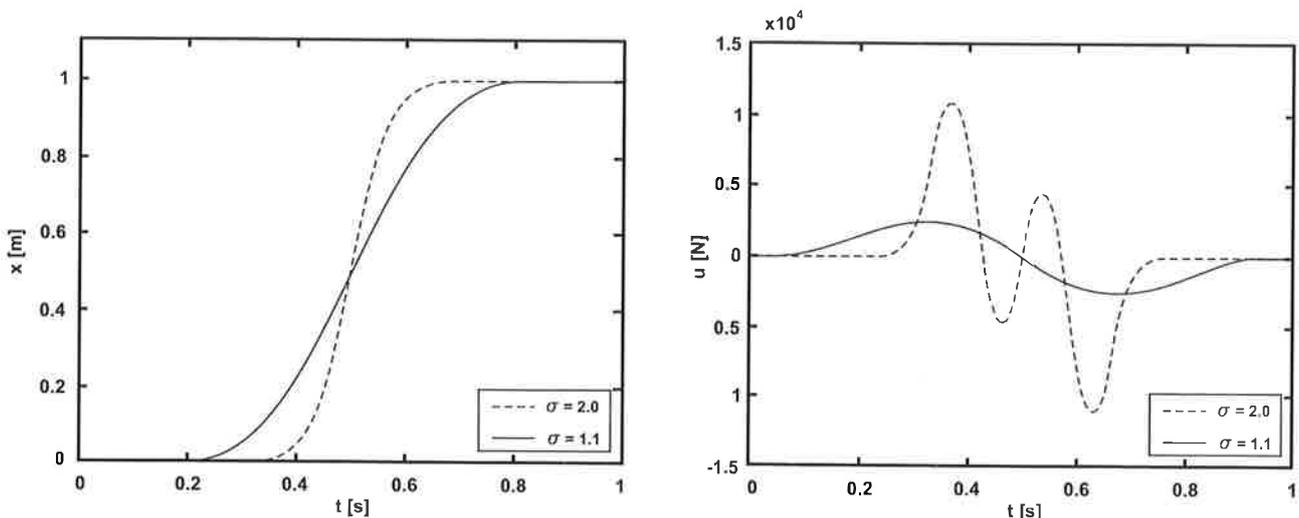


Bild 2 Positions- und Kraftverläufe der geplanten Trajektorie für zwei unterschiedliche Parametrisierungen.



aufgestellt werden. Im Falle eines spielfreien Antriebsstranges konnte damit das beste Ergebnis erzielt werden. Für Systeme mit spielbehaftetem Antrieb treten jedoch Konvergenzprobleme im Regler- und hauptsächlich im Beobachterverhalten auf [9]. Um diesen in der Praxis zu begegnen, wurde bewusst während der dynamischen Positionierphase auf eine Vorsteuerung gesetzt, was bezüglich erzielbarer Dynamik und Robustheit gegenüber einer geschlossenen Regelung die hier nötigen Vorteile bietet. Gegen Ende der Vorsteuerphase wird der Eingriff der verwendeten Regelungsstrategie kontinuierlich erhöht. Um die Regelabweichung möglichst gering zu halten, erfolgt zusätzlich eine Kompensation der vorherrschenden Reibungsverhältnisse. Die hierfür benötigte Reibungskennlinie kann in geeigneten Lernfahrten ermittelt und als Offset in einer Lookup-Table hinterlegt werden. Eine Anpassung an sich verändernder Randbedingungen, z. B. durch Verschleißerscheinungen, kann mit Hilfe der Online-Adaption durch laufende Erfassung der Regelabweichung zwischen Soll- und Ist-Position erfolgen, so dass eine größtmögliche Adaptivität hinsichtlich sich verändernder Randbedingungen gegeben ist.

3 Optimierungsergebnisse

Die im Rahmen der Modellbildung und Simulation theoretisch gewonnenen Ergebnisse galt es durch praktische Versuchsergebnisse an einer realen Versuchsanlage eines automatischen Kleinteilelagers (Lichte Ganghöhe 8,5 m, Gassenlänge 30 m) des Lehrstuhls fml zu bestätigen. Auf Maschinensteuerungsebene erfolgte die Implementierung des beschriebenen Verfahrens auf Basis von Matlab/Simulink und xPC-Target auf einem Echtzeitrechner. Dieser generiert in Abhängigkeit der durch einen übergeordneten Materialflussrechner erteilten Aufträge, dem aktuellen Beladungszustand und der Hubhöhe optimale Trajektorien, welche dem Antriebsregler als Drehmomenten-Sollwert vorgegeben werden. In umfangreichen Versuchsfahrten konnte anschließend das Potential des vorgestellten Verfahrens im Vergleich zu einer konventionellen Antriebslösung, welche s-rampenförmige Geschwindigkeitsprofile ($v_{\max} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $a_{\max} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, Ruckzeit $t_R = 1 \text{ s}$) verwendet, ermittelt werden. Als Bewertungskriterium dient hierbei die Auslenkung des Lastaufnahmemittels (TCP – Tool Center Point) im bewegten System. Mit Hilfe eines hochpräzisen Laser-Empfängers, welcher am Lastaufnahmemittel angebracht wurde, konnte über eine Laserpunktbestimmung eines auf der Bodentraverse angebrachten Lotlaser die Auslenkung mit einer Genauigkeit von 1/100 mm erfasst werden. In Bild 3 sind beispielhaft die TCP-Auslenkungen für unterschiedliche Positioniermanöver dargestellt.

Bei Erreichen der Zielposition beträgt die TCP-Auslenkung bereits weniger als 3 mm. Kleinere Abweichungen der TCP-Auslenkung der optimierten Antriebslösung lassen sich durch gerätespezifische Asymmetrien, bedingt durch Service- und Montageleiter am Mast sowie dem Schaltschrank, erklären. In Bild 4 ist die prozentuale

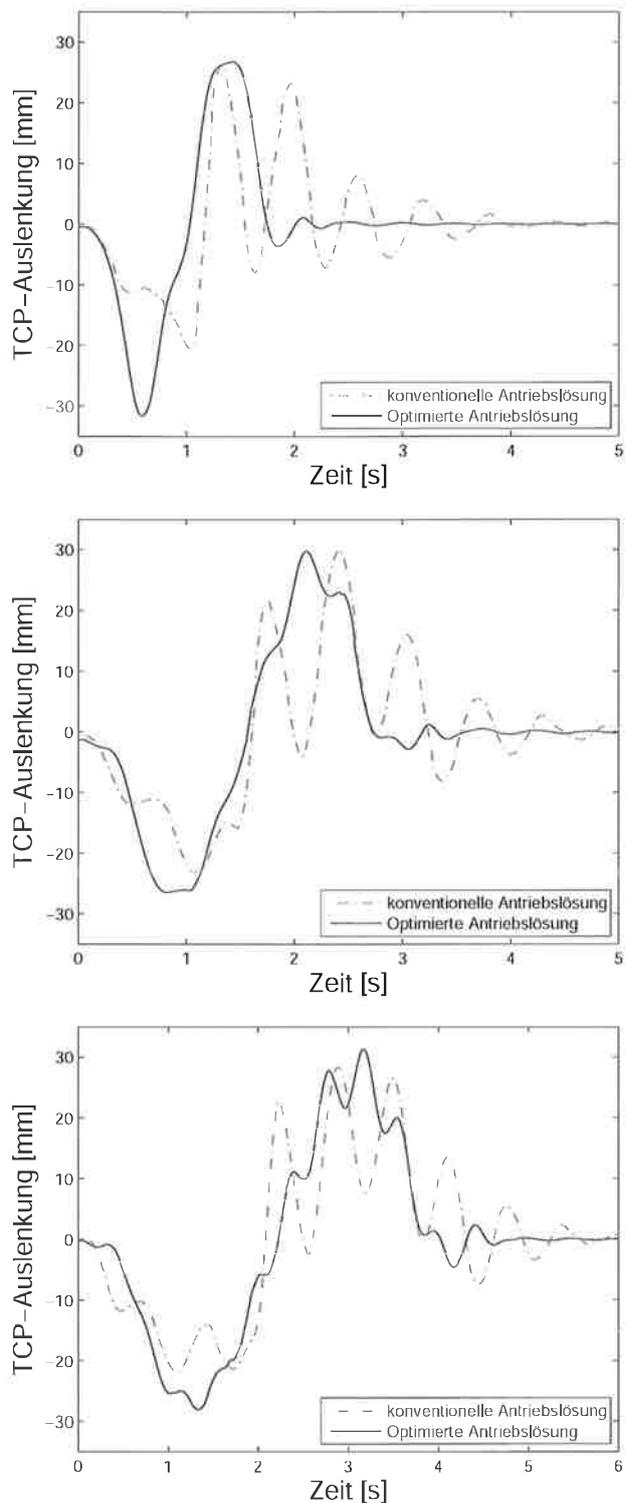


Bild 3 Verlauf der TCP-Auslenkung für unterschiedliche Positioniermanöver, (a) $\Delta x = 1,14 \text{ m}$; (b) $\Delta x = 2,85 \text{ m}$; (c) $\Delta x = 5,7 \text{ m}$.

Zeitersparnis gegenüber der konventionellen Antriebslösung bei Variation der Verfahrenweite und Hubhöhe bei einer Zuladung von 100 kg dargestellt.

Als Bezugsmaß für die Ermittlung der mittleren benötigten Verfahrenzeiten wurde eine TCP-Auslenkung von $\pm 2 \text{ mm}$ herangezogen. Trotz einer relativ hohen Biegesteifigkeit der 2-Mast-Konstruktion des Versuchsgeräts

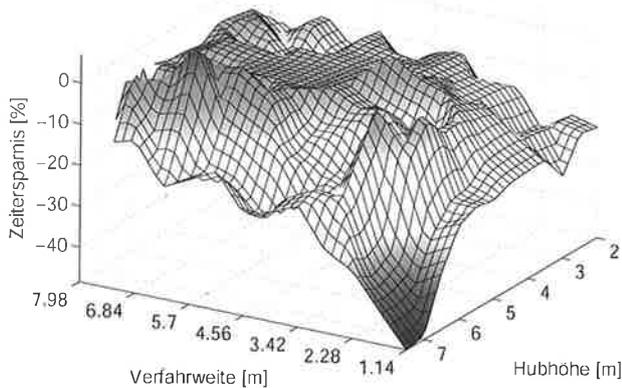


Bild 4 Prozentuale Zeitersparnis gegenüber der konventionellen Antriebslösung in Abhängigkeit von Verfahrweite und Hubhöhe.

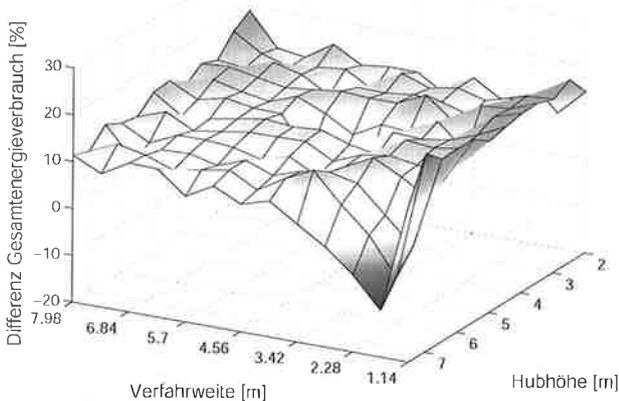


Bild 5 Prozentualer Energiemehrverbrauch der optimierten Antriebssteuerung im Vergleich zu einer konventionellen Lösung.

konnte die Verfahrzeit im Nahbereich über 40 Prozent reduziert werden. Zur Ermittlung der Auswirkungen des vorgestellten Verfahrens auf den erforderlichen Energieverbrauch wurden zusätzlich umfangreiche Energiemessungen durchgeführt (Bild 5).

Fahr- und Hubwerk sind hierbei über einen Zwischenkreis miteinander gekoppelt, überschüssige Energie wird mit Hilfe eines Rückspeisemoduls zurück ins Netz gespeist. Während sich die Verfahrzeiten im Mittel um ca. 14% reduzieren ließen, stieg der Energieverbrauch lediglich um ca. 11%. Das Potential des vorgestellten Verfahrens konnte durch theoretische Spielzeitermittlungen auf Basis der Geräte- und Betriebsparameter der Versuchsanlage weiter bestätigt werden. Ausgehend von einer freien (chaotischen) Lagerplatzordnung wurden eine freie Lagerplatzwahl und eine fahrwegoptimierte Strategie, welche den Einlagerungsplatz nahe dem Auslagerungsplatz wählt, untersucht. Wie in Bild 6 zu erkennen ist, lässt sich gegenüber der konventionellen Antriebslösung bei chaotischer Lagerung die Umschlagleistung um mehr als 11 Prozent und bei Verwendung der Strategie

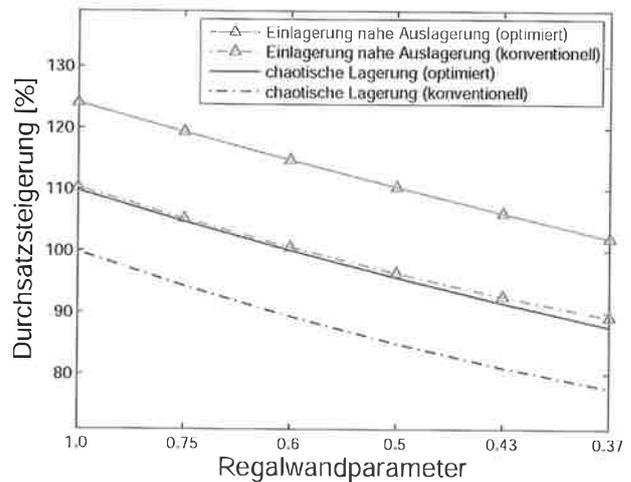


Bild 6 Ergebnisse von Spielzeitberechnungen: Prozentuale Durchsatzsteigerung in Abhängigkeit des Regalwandparameters.

gie „Einlagerung nahe Auslagerung“ um über 13 Prozent steigern.

4 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es möglich, nachschwingungsfrei am Zielort zu positionieren wie auch nachschwingungsfrei auf eine vorgegebene Endgeschwindigkeit zu beschleunigen. Bei Ausnutzung der maximal zur Verfügung stehenden Antriebsleistung erhöht sich die mittlere Beschleunigung deutlich. In Verbindung mit der Elimination der Geräteberuhigungszeiten ergeben sich deutlich reduzierte mittlere Spielzeiten, was gegenüber konventionellen Antriebslösungen zu einer enormen Leistungssteigerung führt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen können bei der Entwicklung von Regalbediengeräten der nächsten Generation durch den Einsatz von Leichtbaustrukturen und Faserverbundwerkstoffen noch leichtere und elastischere Strukturen entworfen werden, wodurch sich die Systemleistung weiter steigern und ein noch effizienterer Betrieb realisieren lässt.

Literatur

- [1] Schumacher, M.: Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Einmast-Regalbediengeräten. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Fördertechnik, 1994.
- [2] Oser, J., Reisinger, K. H., Vössner, S.: Anwendung genetischer Optimierungsverfahren. – In: *Deutsche Hebezeuge und Fördermittel*, 7–8 (1995).
- [3] Dietzel, M.: Beeinflussung des Schwingerverhaltens von Regalbediengeräten durch Regelung des Fahrtriebs. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Fördertechnik, 1999.
- [4] Rothfuß, R., Rudolph, J., Zeitz, M.: Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme. – In: *at – Automatisierungstechnik* 45, 517–525 (1997).
- [5] Rudolph, J.: Beiträge zur flachheitsbasierten Folgeregelung linearer und nichtlinearer Systeme endlicher und unendlicher Dimension. Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik, Shaker Verlag, Aachen 2003.

- [6] Aoustin, Y., Fliess, M., Mounier, H., Rouchon, P., Rudolph, J.: Theory and practice in the motion planning and control of a flexible robot arm using Mikusinski operators. Proc. 5th Symposium on Robotics and Control, Nantes, France, 287–293 (1997).
- [7] Ulbrich, H., Günthner, W. A., Bachmayer, M., Schipplick, M.: Increasing rack feeder performance. Progress in material handling research: 2008, Charlotte, NC, 21–38 (2008).
- [8] Roppenecker, G.: Vollständige modale Synthese linearer Systeme und ihre Anwendung zum Entwurf strukturbeschränkter Zustandsrückführungen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Steuerungs- und Regelungstechnik, 1983.
- [9] Günthner, W. A., Ulbrich, H., Bachmayer, M., Schipplick, M.: Elastokinetische Modellierung und mechatronische Optimierung von Antriebssystemen linear bewegter Fördergeräte. Abschlussbericht DFG-Forschungsprojekt, Technische Universität München, 2009.



Dipl.-Ing. Michael Schipplick ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Hauptarbeitsfelder sind die mechatronische Optimierung von Antriebssystemen linear bewegter Fördergeräte in der Intralogistik sowie die Weiterentwicklung von Regalbediengeräten unter dem Aspekt der Energieeffizienz.

Adresse: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching b. München, E-Mail: kontakt@fml.mw.tum.de



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner ist Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Im Mittelpunkt der Forschung stehen neben der traditionellen Auslegung und Berechnung von Fördermitteln Themen wie die Steuerung und Optimierung von Logistikprozessen, der Einsatz innovativer Ident-Technologien (RFID) sowie die Logistikplanung.

Adresse: s. o.

Manuskripteingang: 15. Juli 2010

Vorschau auf Heft 5/2011

In unserem nächsten Heft finden Sie unter anderem folgende Themen:

- *Alshut, R. et al.*: Automatische Klassifikation von Bildzeitreihen für toxikologische Hochdurchsatz-Untersuchungen
- *Gorius, T., Seifried, R. und Eberhard, P.*: Regelung des EXPO-Pendels
- *Kleinmann, S., Stetter, R., Jalal, A.*: Practice oriented modelling of pump systems for monitoring, control and diagnosis
- *Rittenschober, T. und Schlacher, K.*: Kompensation von harmonischen Störungen in piezoelastischen Strukturen
- *Ungermann, M., Schwarzmann, D. und Lunze, J.*: Testgenerierung für die Werkstattdiagnose auf der Basis struktureller Modelle

Weitere Informationen über geplante Hefte, ausführliche Informationen über die in den letzten Heften der **at** erschienenen Beiträge sowie Hinweise für Autoren finden Sie im Internet unter <http://www.at-automatisierungstechnik.de>.