



universitätsverlag
ilmenau

Döring, Michael; Majschak, Jens-Peter:

**Berechnung von Bewegungsvorgaben unter Beachtung der
Prozessdynamik am Beispiel des schnelllaufenden Transports
von kleinformatischen Stückgütern**

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-187-7

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-187-7>

Erschienen in:

10. Kolloquium Getriebetechnik : Technische Universität Ilmenau, 11. - 13.
September 2013. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - S. 187-200.
(Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 2)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-065-5 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033>

BERECHNUNG VON BEWEGUNGSVORGABEN UNTER BEACHTUNG DER PROZESSDYNAMIK

AM BEISPIEL DES SCHNELLLAUFENDEN TRANSPORTS VON
KLEINFORMATIGEN STÜCKGÜTERN

Dipl.-Ing. M. Döring; Prof.-Dr.-Ing. J.-P. Majschak

TU Dresden, Professur für Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik,
michael.doering@tu-dresden.de

Abstract

Dieser Beitrag widmet sich dem Problem der Berechnung optimierter Bewegungen unter Beachtung der Prozessdynamik. Es wird auf den Transport von kleinformatigen Stückgütern eingegangen und eine ergänzende Lösungsmöglichkeit vorgestellt, die sich im Zusammenhang mit diesem Berechnungsansatz ergibt. Um die Anwendung von Optimierungsverfahren unter Einbeziehung eines sensiblen Prozessmodelles zu ermöglichen, sind geeignete Startlösungen erforderlich. Hierzu wird das interaktive Bewegungsdesign vorgeschlagen, welches im Transportbereich durch eine auf der „Graphenmethode“ basierende Vorgehensweise unterstützt wird. Im Rahmen eines Vergleichs wird auf die Umsetzbarkeit der gewonnenen Startlösungen eingegangen.

This paper addresses the problem of calculating optimized motions with respect to process dynamics. For the transport of small-sized cargo a complementary solution is presented. In order to enable the application of optimization techniques involving a sensitive process model, suitable start solutions are required. For this purpose, the interactive motion design is proposed, which is supported in the transport section by a minimum-time approach. Experiments show the feasibility of the obtained solution.

1 Einleitung

Der Antrieb von Arbeitsorganen in Verarbeitungsmaschinen wird immer häufiger durch Motion-Control Systeme ausgeführt. Gegenüber mechanischen Lösungen sind verschiedene Faktoren, wie Erhöhung der

Formatflexibilität, Modularisierung, oder auch eine online-Bewegungsmodifikation für diesen Schritt ausschlaggebend. Letzterer Punkt kann mit dynamisch änderbaren Bewegungsprofilen umgesetzt werden, um Bewegungsparameter wie Hub oder Synchrongeschwindigkeit zu variieren bzw. an den Verarbeitungsprozess anzupassen. Hiermit entsteht eine Taktratenabhängigkeit der Bewegungsvorgaben aus dem Prozess heraus, die mit Servoantrieben umgesetzt werden kann. Trotz alledem liegen diesen taktratenabhängigen Änderungen meist einfachere statische Modellvorstellungen zugrunde.

Eine genauere Anpassung an den Prozess oder alternative Prozesslösungen können umgesetzt werden, wenn auch die Prozessdynamik bei der Bewegungserstellung berücksichtigt wird. In den überwiegenden Fällen erscheint jedoch eine kinetostatische Betrachtung ausreichend, wie sie bereits seit längerem Inhalt von diversen Arbeiten ist. Der überwiegende Teil dieser Arbeiten befasst sich demnach mit der Berechnung von optimalen Steuerungen für ein ideales Antriebssystem und eine starre Mechanik. Störende Einflüsse z.B. infolge Elastizität und Reibung (Beispiele z.B. in [1]) sowie dynamische, lineare und nichtlineare, Prozessmodelle waren bereits Untersuchungsgegenstand (z.B. [2], [3]). In diesem Beitrag wird im Gegensatz zu den beispielhaft genannten Arbeiten ein nichtlineares Prozessmodell des Stückguttransportes mit der Möglichkeit der Abbildung einer freien Produktbewegung angewendet. Genutzt wird hierfür ein verbreitetes MKS-System. Es wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie bei diesem auf Änderungen der Eingangsgrößen sensibel reagierenden System Startlösungen für eine weitergehende Nutzung von Optimierungsmethoden erzeugt werden können.

In dieser Arbeit wird im Besonderen auf das interaktive Bewegungsdesign, mit der Möglichkeit der Berücksichtigung vielfältiger Kriterien eingegangen, sowie das „Graphenverfahren“ (zeitminimale Bewegung auf geg. Bahn) eingegangen, welche beide in Kombination zur Lösung der Problemstellung geeignet sind. In Abschnitt 2 wird näher auf die Problembeschreibung eingegangen, worauf folgend die Grundlagen und erstellten Hilfsmittel vorgestellt werden. Der Beitrag schließt mit der Vorstellung des Versuchsaufbaus und einem experimentellen Vergleich zwischen der gewonnen Startlösung und einer nachfolgend optimierten Lösung.

2 Detaillierung des betrachteten Prozessbeispiels

Der Transport bzw. die Handhabung von Stückgütern ist in Verpackungsmaschinen ein häufiger Vorgang und kann z.B. mit Hilfe eines nichtlinear übersetzenden Getriebes realisiert werden. In jedem Fall wird die räumliche Anordnung eines Verarbeitungsgutes/ Produktes verändert bzw. aufrechterhalten, wobei die feste räumliche Zuordnung zwischen Werkzeug und Produkt vorausgesetzt wird. Diese Zuordnung kann durch Kraft- oder Formschluss erreicht werden. Betrachten wir den schnellen intermittierenden Transport von kleinen Stückgüter (>250 AT/min), wie er industriell eingesetzt wird, so ist beides in Verarbeitungsmaschinen anzutreffen. Dieses geht mit unterschiedlichen Beschränkungen oder Effekten einher, die gewünscht oder nicht gewünscht sein können. Wird der Formschluss eingesetzt, sind aufgrund der schwer realisierbaren senkrechten Hub- und Senkbereiche Formschrägen nötig. Diese führen dazu, dass diese Lösungen nur sinnvoll bei kleinen Produkthöhen eingesetzt werden können. Die Umsetzung als kombinierter Form- und Kraftschluss geht mit einem einseitigen Kontakt des Werkzeuges mit dem Produkt einher, wobei der Kontaktverlust durch zusätzliche Reibkräfte sichergestellt wird. Hierdurch sind größere Produkthöhen handhabbar, wobei aber Reibkräfte in ausreichender Höhe aufzubringen sind (dieses kann störend sein oder als Nebenfunktion gewünscht). Wie auch immer gestaltet, so erscheint die Vielfalt an Lösungsmöglichkeiten beschränkt.

Alternative Lösungen sind möglich, wenn beispielsweise nicht zwingend von einer stets geführten Bewegung des Produktes ausgegangen werden muss, sondern eine freie Bewegung zulässig, berechenbar und realisierbar wird. So wäre es z.B. denkbar, die Bewegung eines Getriebes/ Handhabungsgerätes so zu gestalten, dass die Produkte kontrolliert in die Endposition „geworfen“ werden. Dieses könnte zu einer deutlichen Hubverkürzung und je nach Anwendung zu einer höheren Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine selbst führen.

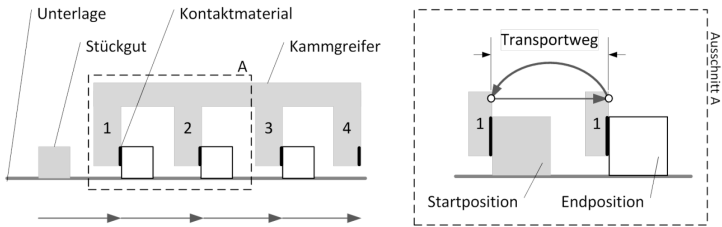


Abb. 1: Allgemeines konventionelles Prinzip für den Transportprozess

In Abb. 1 ist das betrachtete Beispiel für die Transportbewegung dargestellt. Es wird u.a. deutlich, dass durch die geführte Bewegung der gesamte Transportweg vom Arbeitsorgan realisiert werden muss.

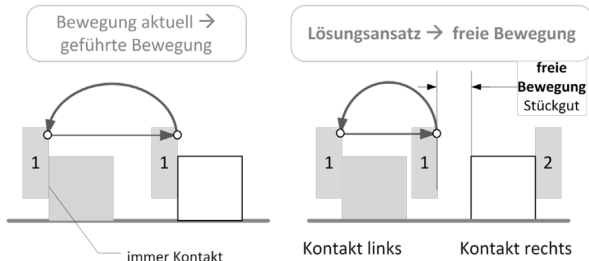


Abb. 2: Allg. Prinzip (links), geführte Bewegung durch Form- und Kraftschluss (Mitte), Prinzip mit freier Bewegung (rechts)

Zu erkennen ist zudem in Abb. 2 ein Vergleich der geführten Bewegung des Stückgutes (links) und dem Prinzip mit freier Bewegung (rechts). Letzteres weist im Vergleich einen Bewegungsbereich ohne Kontakt zum Werkzeug auf. Der Gesamthub des Arbeitsorgans (Kamm) selbst wird hiermit i.A. kürzer, wobei an dieser aber Stelle nicht auf die Vor- bzw. Nachteile dieser Lösung im Gegensatz zu bekannten Lösungen eingegangen werden soll.

3 Grundlagen und Methoden zur Bewegungsberechnung

3.1 Bewegungsdesign

Bereits mehrfach vorgestellt und erfolgreich angewendet, beruht das interaktive Bewegungsdesign auf der manuellen Variation von Knotenpunkten $\varphi_i(t)$, $\dot{\varphi}_i(t)$, $\ddot{\varphi}_i(t)$, die durch Polynome 5. Grades miteinander verbunden werden (siehe z.B. [4] oder [5]). Gesucht ist hierbei ein möglichst günstiger Verlauf der Antriebs- oder Abtriebsgrößen als guter Kompromiss zwischen einer Vielzahl an Gütekriterien. Diese können hierbei dem Anwender objektiv übersichtlich dargestellt werden oder subjektiv wirken. Die intuitive Bewegungsberechnung wurde auch auf Getriebe mit dem Laufgrad $L = 2$ angewendet, wobei entweder

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \end{bmatrix} \text{ oder } \mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

variiert werden. Für die Variation bietet sich aber auch die Trennung von Bahn und Zeitbezug an, was z.B. im Arbeitsraum durch eine normierte Längenparametrisierung der Bahnposition $\mathbf{P}(\tau)$ und dessen zeitlichem Bezug $\tau(t)$ erfolgen kann (vgl. [6]). Diese wird als geeignet vorausgesetzt und im Folgenden betrachtet. Die Eingangsgrößen für die inverse Transformation und folgender kinetostatischer Berechnung des Getriebes können in diesem Fall mit

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(\tau); \dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{P}(\tau)' \dot{\tau}; \ddot{\mathbf{P}} = \mathbf{P}(\tau)'' \dot{\tau}^2 + \mathbf{P}(\tau)' \ddot{\tau}^2 \quad (2)$$

berechnet werden. Für die kinetostatische Berechnung gilt im vorliegenden Fall

$$\mathbf{J}(\Phi)\ddot{\Phi} + \mathbf{J}'(\Phi, \dot{\Phi}) + \mathbf{g}(\Phi) = \mathbf{M} \quad (3)$$

wobei \mathbf{J} und \mathbf{J}' die Trägheitsmomente erster und zweiter Ordnung sind und \mathbf{g} die Gewichtskraft.

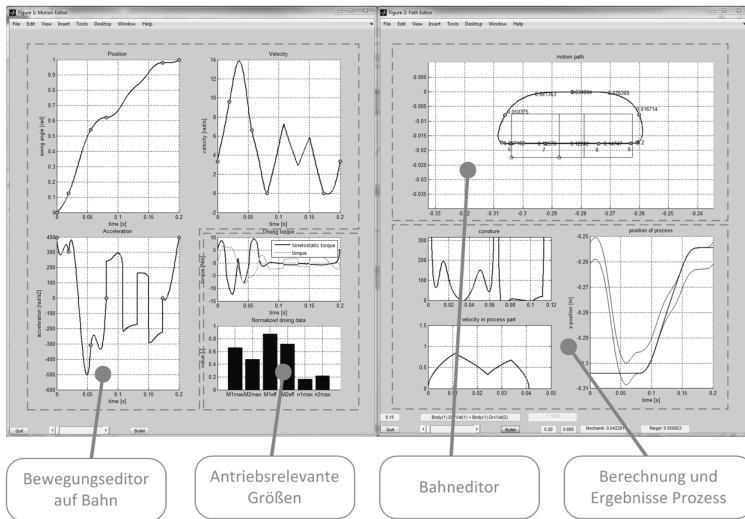


Abb. 3: Bewegungsektor zum Bewegungsdesign

Es wurde eine Berechnungshilfsmittel (ähnlich [7]) umgesetzt, welches in Abb. 3 dargestellt ist. Dieses besteht aus einem Bewegungsektor, einem Bahneditor und den jeweiligen Ausgabegrößen. Mit dem beschriebenen Aufbau ist es in einfacher Weise möglich, günstige Bewegungen für eine statisch beschreibbare Antriebsaufgabe mit einfachen Beschränkungen (maßgeblich Bahn- und Antriebsgrößen) zu berechnen.

Wird das angesprochene Prozessmodell ergänzt, so ergibt sich eine abweichende Situation. Die Lösungsgenerierung orientiert sich maßgeblich an dem zu realisierenden Prozess, d.h. das Finden von Bewegungsvorgaben mit dem der Transport in der vorgestellten Lösungsstruktur (Beschleunigen – freie Bewegung – Abbremsen) und den gewünschtem Endzustand des Stückgutes realisiert werden kann. Somit ist eine sinnvolle Optimierung des gesamten Bewegungsverlaufes nur bedingt möglich. Wird die Aufgabe in Prozess- und Rückhubbereich getrennt, wird die Lösungssuche verbessert, allerdings ist auch in diesem Fall die Erzeugung von geeigneten Bewegungen für den Prozessbereich schwierig. Unter geeignet wird Folgendes verstanden:

- Einhaltung der Lösungsstruktur
- Vermeidung hoher Kontaktkräfte durch Stöße

- Einhaltung des Endzustandes $\mathbf{P}_{S,end} = 0$, $\dot{\mathbf{P}}_{S,end} = 0$

Vorgeschlagen wird die Nutzung der „Graphenmethode“ für den Prozessbereich, um die manuelle Optimierung zu unterstützen.

3.2 Erweiterung zur „Graphenmethode“

In [Doe12] wurde bereits auf die Graphenmethode eingegangen, die in der Literatur vielfach aufgegriffen, erweitert und angewendet wurde (vgl. z.B. [6], [8], [9]). Im vorliegenden Fall soll diese helfen eine geeignete Lösung für den Prozessbereich (Kontakt des Arbeitsorgans mit dem Stückgut) zu finden. Zunächst soll das Problem in drei Teilprobleme aufgeteilt werden:

1. Beschleunigen des Stückgutes auf der Bewegungsbahn unter Kontakt mit dem Arbeitsorgan und mit vorgegebenem Maximalmoment aus dem Startzustand $\mathbf{P}_{S,start} = 0$, $\dot{\mathbf{P}}_{S,start} = 0$ heraus
2. Freie Bewegung des Stückgutes
3. Abbremsen des Stückgutes in den Endzustand mit vorgegebenem Maximalmoment

Die Teilprobleme 1 und 3 werden im vorliegenden Fall unter Beachtung eines vorgegebenen Maximalmomentes der Motoren in Form von Vorwärts- und Rückwärtsgraphen in Längenparametrisierung berechnet, mit

$$\Phi(t) = \Phi(\tau); \dot{\Phi}(t) = \Phi(\tau)' \dot{\tau}; \ddot{\Phi} = \Phi(\tau)'' \dot{\tau} + \Phi(\tau)' \dot{\tau}^2 \quad (4)$$

ergibt sich

$$\mathbf{A}_i \ddot{\tau} + \mathbf{B}_i \dot{\tau}^2 + \mathbf{g}(\tau) = \mathbf{M}_{i,max} \quad (5)$$

was bei monoton steigender Bewegung in

$$\mathbf{A}_i (\dot{\tau}^2)' + \mathbf{B}_i \dot{\tau}^2 + \mathbf{g}(\tau) = \mathbf{M}_{i,max} \quad (6)$$

umgeformt werden kann. Nach [Joh88] kann der max. zulässige Geschwindigkeitsanstieg auf der Bahn ermittelt und das Geschwindigkeitsprofil berechnet werden.

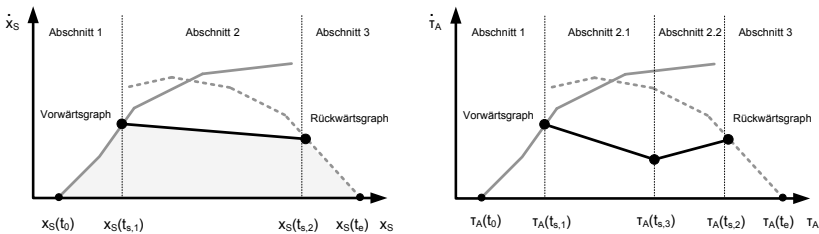


Abb. 4: Prinzip der Bewegungsberechnung, (links bezogen auf das Stückgutposition x , rechts auf die Arbeitsorganposition der Bewegungsbahn τ)

Hiermit ergibt sich der Rahmen für die weiteren Berechnungsschritte. Unter Reduktion des Transportvorganges auf ein eindimensionales Problem, kann die Riegelbewegung zwischen den Punkten 1 und 2 (siehe Abb. 4, links) durch

$$m\ddot{x}(\tau) - F_r = 0 \quad (7)$$

vereinfacht beschrieben werden.

Wird das Stückgut bis zu einer gegebenen Geschwindigkeit $\dot{x}_S(t_{s,1})$ mit gegebenen Maximalmomenten beschleunigt und der Kontakt mit der linken Seite des Kammgreifers aufgehoben (vgl. Abb. 2, rechts), so trifft bei genügend hoher Endgeschwindigkeit in Abschnitt 1 das Stückgut auf die rechte Seite des Kammgreifers bei $x_S(t_{s,2})$ und wird in den Endzustand verzögert. Es wurde bereits darauf eingegangen, dass die nötige Bewegung des Arbeitsorgans in x-Richtung geringer ist als die Bewegung des Stückgutes. Daher ist das Arbeitsorgan kurzzeitig zu verzögern und wieder auf die Übergabegeschwindigkeit $\dot{x}_S(t_{s,2})$ zu beschleunigen. Dieses kann vorteilhaft wiederum durch einen Verzögerungs- und Beschleunigungsgraphen umgesetzt werden und führt zu der Umschaltstelle $\tau_A(t_{A,3})$. Die Höhe der begrenzenden Maximalmomente in diesem Bereich kann z.B. durch manuelle Variation erfolgen und wird durch die gleiche Gesamtzeit

$$t_{s,2} - t_{s,1} = t_{A,2} - t_{A,1} \quad (8)$$

bestimmt. Unter Vorgabe der jeweiligen Maximalmomente und der Geschwindigkeit $\dot{x}_S(t_{s,1})$ oder $\dot{\tau}_A(t_{s,1})$ kann unter Nutzung dieser einfachen Vorgehensweise eine gültige Startlösung ermittelt werden (vgl. Abb. 5).

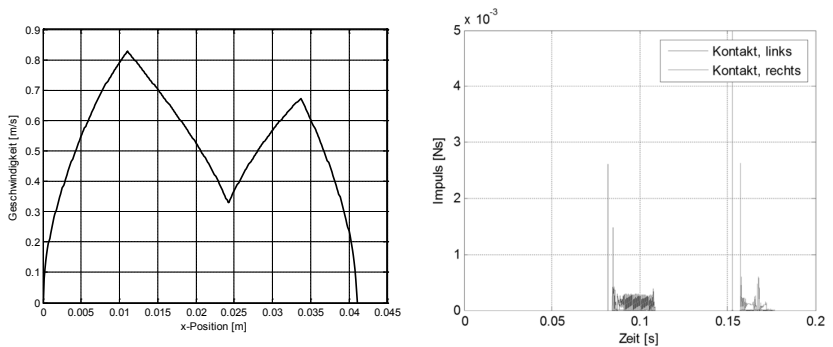


Abb. 5: Berechneter Geschwindigkeitsverlauf des Arbeitsorgans (links), Impulsverlauf in x-Richtung bei Berechnung mit MKS-Simulation

Es kann erkannt werden, dass zwar bei Kontakteintritt leichte Stöße vorliegen, diese aber in vergleichbarer Größenordnung liegen wie die restlichen Impulse bei Verzögerung in den Endzustand.

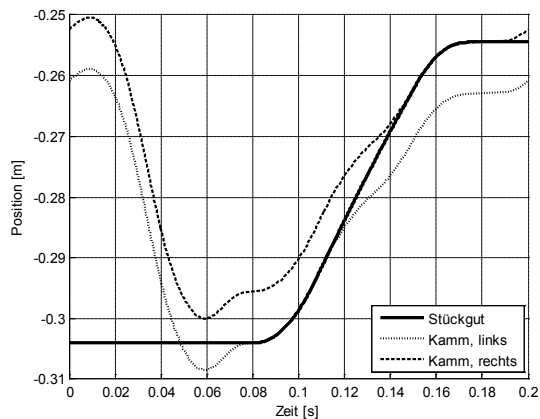


Abb. 6: Simulierter Bewegungsverlauf mit MKS-System

Hiermit ergibt sich der in Abb. 6 dargestellte Positionsverlauf des Stückgutes, welcher zusammen mit den Bezugspositionen der linken und rechten Kontaktfläche des Kammgreifers dargestellt ist.

3.3 Prozessmodellierung

Für die Modellierung eines solchen Stückgutprozesses können unterschiedliche Modellansätze angewendet werden. Sind die in Kontakt tretenden Körper steif, bzw. hat die durch Verformung entstehenden Positionsabweichungen nur geringen Einfluss auf den Bewegungsverlauf, so kann die Starrkörpermethode eingesetzt werden.

Auf den vorliegenden Fall trifft dieses zu und mit den mittels Ersatzversuch identifizierten Simulationsparametern, ist ein hinreichend genaue Abbildung der Stückgutbewegung möglich.

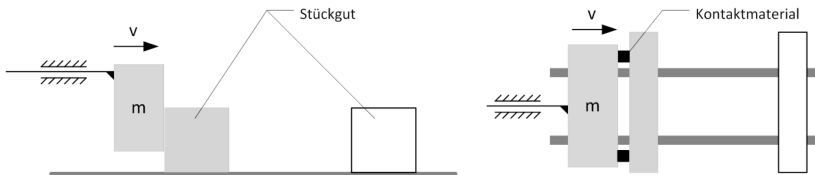


Abb. 7: Ersatzversuch zur Parameteridentifikation, links Seitenansicht, rechts Draufsicht

Der Ersatzversuch ist in Abb. 7 schematisch dargestellt, wobei die Stückgutposition an der Vorderseite und Rückseite photogrammetrisch gemessen wurde. Hierdurch kann die Bewegung des Masseschwerpunktes berechnet werden.

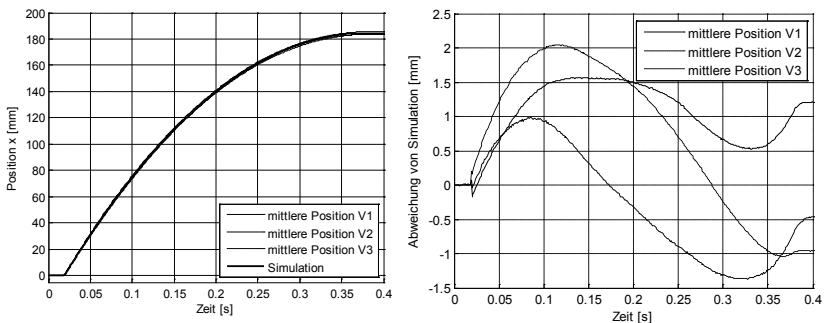


Abb. 8: Mit Ersatzversuch ermittelte Ergebnisse, links gemittelter gemessener und simulierter Positionsverlauf, rechts Positionsabweichungen

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse eines Vergleiches zwischen Simulation und Messung mit dem beschriebenen Versuchsaufbau. Es zeigt sich, dass die relativen Positionsabweichungen im Bereich von ca. $\pm 1\%$ liegen.

In den Betrachtungen wurde das echtzeitfähige MKS-System Bullet¹ für die Untersuchungen genutzt. Hierbei handelt es sich um eine Physik-Engine, die vor allem im Bereich der Computersimulation eingesetzt wird. Wie bereits in [10] dargestellt, steht hierbei die Anforderung an möglichst hohe Stabilität, geringe Rechenleistung und visuelle Plausibilität im Vordergrund. Ein exaktes und deterministisches Verhalten ist nicht in jedem Fall garantiert, es liegt allerdings die Möglichkeit vor, dieses zu erzeugen. Vorteile sind die vielfältige Nutzbarkeit, die geringe Rechenzeit und die leichte Integration in die vorhandene Berechnungsumgebung in Matlab. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das Grundproblem auch auf ein eindimensionales Modell abgebildet werden kann, das gegenüber dem dreidimensionalen Modell weniger aufwändig erscheint. Die geringe Rechenzeit ermöglicht aber eine praktikable Anwendung und es werden hiermit Aussagen zu den Auswirkungen von räumlichen Geometrie- und Simulationsparameteränderungen möglich, was Inhalt weiterer Arbeiten ist.

4 Experimentelle Ergebnisse und Ergebnisdiskussion

4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem ebenen Fünfgelenk zum Bewegen des Kammgreifers, welches oberhalb eines Stückgutumlaufes platziert wurde. Ergänzt wird der Versuchsaufbau durch eine Highspeed-Kamera zur Auswertung der Stückgutpositionen (vgl. Abb. 9).

¹ siehe <http://bulletphysics.org>

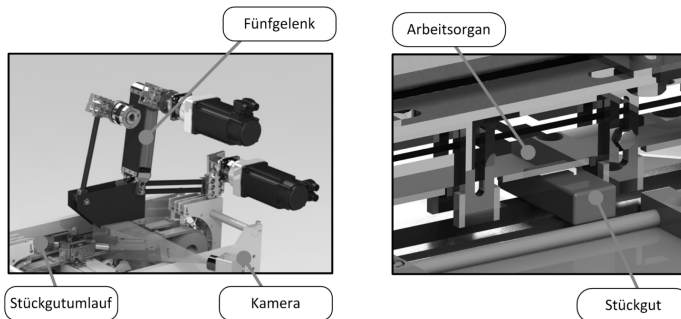


Abb. 9: Versuchsaufbau

4.2 Darstellung der experimentellen Ergebnisse

Die bis hierhin beschriebene Lösung für den Transportvorgang dient, wie dargestellt, als Startlösung für weiterführende Optimierungsschritte. In diesem Abschnitt soll trotzdem die gewonnene Lösung mit einer optimierten Bewegungsvorgabe verglichen werden.

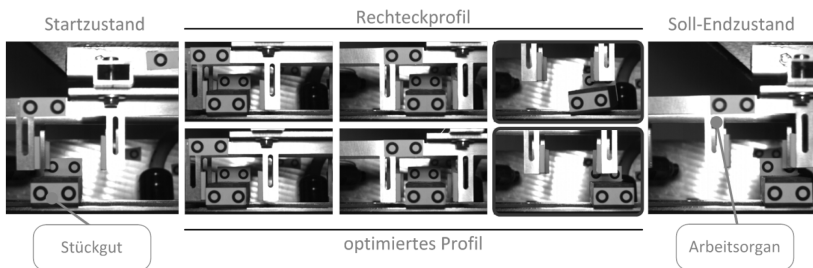


Abb. 10: Bildverlauf einer Messung mit der vorgestellten Startlösung (oben) und Vergleich mit einer optimierten Lösung

Es wird deutlich, dass die hier gewonnene Bewegung (Abb. 9 oben) nicht zielführend ist. Der Kontakt mit der rechten Seite des Kammgreifers (Arbeitsorgan) erfolgt zu früh. Am Versuchsstand ergeben sich durch die rechteckförmigen Verläufe im Prozessbereich hohe Positionsabweichungen durch Schwingungen in der Mechanik und im Antriebssystem. Diese beeinflussen in hohem Maß die Umsetzbarkeit der vorgestellten Lösung und führen dazu, dass Übergabegeschwindigkeiten nicht eingehalten werden

und das Produkt zusätzliche Stöße erfährt. Durch einen nachgelagerten Optimierungsschritt kann die Bewegungsvorgabe so gestaltet werden, dass eine geringere Schwingungsanregung entsteht und die Vorgabe selbst eine höhere Robustheit gegenüber Schwankungen der Initialposition und Modellparameter aufweist. Großen Einfluss hat hierbei die Geschwindigkeit am Ende des ersten Bewegungsabschnittes (vgl. Abb. 4, links). An dieser Stelle ist z.B. die Drehmomentenänderungsrate gegenüber dem Rechteckprofil zu beschränken.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für den Transport von Stückgütern in Verarbeitungsmaschinen gibt es verschiedene Lösungsansätze mit geführter Bewegung der Produkte (Stückgut). Im Beitrag wird dargestellt, wie Bewegungsvorgaben berechnet werden können, die eine freie Bewegung des Produktes (Stückgut) zulassen bzw. nutzen. Hierfür wurde ein Lösungsansatz vorgestellt, welcher ein sensibel auf Eingangsgrößenänderungen reagierendes dynamisches Prozessmodell berücksichtigt. Dieser beruht auf der interaktiven Methode zur Berechnung günstiger Bewegungsvorgaben. Um die manuelle Variation zu unterstützen, wird eine Methode vorgestellt, die das auf einen Freiheitsgrad reduzierte Transportproblem löst und somit in einfacher Weise gültige Bewegungen erzeugt. Die experimentelle Untersuchung zeigt, dass diese Bewegungsvorgaben vorzugsweise einer nachgelagerten Optimierung unterzogen werden sollten.

Dieser Beitrag gliedert sich ein in die an der Professur laufenden Arbeiten zur Einbindung von Prozessmodellen in die Bewegungsberechnung.

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Zeichen MA 4550/3-1 geförderten Projektes "Modellbasierte Bahnplanung" erstellt.

7 Literatur

- [1] Lotze, Alexander: Steuerungsintegrierte Vorgangsdiaagnose in Verarbeitungsmaschinen am Beispiel einer Quersiegeleinheit, Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Diss., 2008.

-
- [2] Prokop G.: „Optimale Prozeßdynamik bei Manipulation mit Robotern.“ VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 713. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998
- [3] Merdol, S. Doruk, Altintas, Yusuf, Virtual cutting and optimization of three-axis milling processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 48, Issue 10, August 2008, Pages 1063-1071
- [4] Braune, R.: Bewegungs-Design – Eine Kernkompetenz des Getriebetechnikers, VDI-Berichte 1567, S. 1-23, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [5] Braune, R.: Koppelgetriebe mit Servo-Antrieb in schnellen Verarbeitungsmaschinen. Tagungsband Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik VVD 2006, Selbstverlag der TU Dresden 2006, ISBN 3-86005-510-0, S.311-348.
- [6] Johanni, R.: Optimale Bahnplanung bei Industrierobotern, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 18, Nr. 51, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- [7] Schwarz, A.: Automatisierte Bewegungsplanung flexibler Handhabungsgeräte in der verarbeitenden Industrie, Dresden, Techn. Univ., Fak. Maschinenwesen, Dissertation, 2011
- [8] Döring, M.; Tietze, S.; Majschak, J.-P.: Methodenvergleich zum Bewegungsdesign in schnelllaufenden Verarbeitungsmaschinen am Beispiel eines Siegelbackenantriebes mit elastischer Antriebsanbindung. Vortrag zur 16. VDI-Getriebetagung Bewegungstechnik 2012. VDI-Berichte 2175 S. 115-131
- [9] Bobrow, J.E., Dubowsky, S., and Gibson, J. S.: Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths, The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No. 3. 1985
- [10] Gössner, S.: Eine Physik-Engine zur webbasierten Mechanismensimulation - Ergebnisse einer Studie, Tagungsband zum 9. Kolloquium Getriebetechnik, Universitätsverlag Chemnitz, 2011