

# Anwendung prozessorientierter und taktratenabhängiger Bewegungen in Verarbeitungsmaschinen

Dipl.-Ing. Clemens Troll\*, Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majtschak\*

Dipl.-Ing. Olaf Holowenko\*\*, Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt\*\*

\*TU Dresden, Professur für Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik  
verarbeitungsmaschinen@tu-dresden.de

\*\* TU Dresden, Professur für Werkzeugmaschinen und adaptive Steuerungen  
werkzeugmaschinen@tu-dresden.de

## Kurzfassung

Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur Steigerung der Ausbringung von Verarbeitungsmaschinen vor, der besonders bei der Umsetzung von Handhabungsaufgaben mittels dezentraler Antriebe wirkungsvoll angewandt werden kann. Ausgehend von einer Analyse bisheriger Ausbringungsbegrenzungen wird ein Konzept vorgestellt, welches Prozessmodelle, deren Nutzung in Bewegungsoptimierungen und die Abarbeitung mit Motion-Control-Systemen beinhaltet. Experimentelle Nachweise an Beispielprozessen, die den Erfolg des beschriebenen Ansatzes zeigen sowie weiterführende Gedanken bilden den Abschluss des Beitrages.

## Abstract

This paper presents an approach for increasing the performance of processing machines, which can be effectively applied especially in the implementation of handling tasks by means of decentralized drives. Based on an analysis of previous

performance limitations, a concept is presented that includes process modelling, its use in motion optimization, and the corresponding realization with motion control systems. Experimental proofs using example processes, which show the success of the described approach, as well as further thoughts form the conclusion of the contribution.

## 1 Einführung

### 1.1 Problemstellung

Verarbeitungsmaschinen dienen der automatisierten Produktion von Massenbedarfsgütern wie z. B. Nahrungsmitteln. Sie zeichnen sich meist durch schnell und periodisch bewegte Arbeitsorgane aus, die die einzelnen Verarbeitungsschritte realisieren. Aus wirtschaftlicher Sicht wird eine Maximierung der Menge an qualitätsgerecht, produzierten Ausbringungseinheiten gefordert. Zur Laufzeit der Maschine ermittelt sich diese Menge einerseits aus der Maschinengeschwindigkeit  $n$  und andererseits aus der Menge an qualitätsgerecht produzierten Einheiten je Arbeitstakt [1]. Ihr Produkt ergibt die erzeugte und verkäufliche Produktionsmenge je Zeiteinheit — die tatsächliche Ausbringung. Wie Abbildung 1 zeigt, steigt die Ausbringung der Maschine aber nur theoretisch linear mit der Maschinengeschwindigkeit.

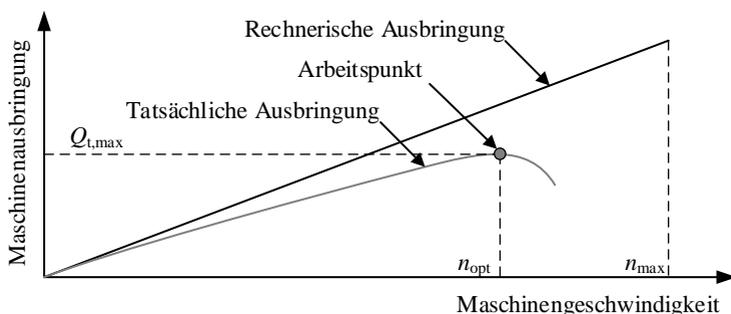


Abb. 1: Produktivitätscharakteristik von Verarbeitungsmaschinen nach [2]: Die theoretische Ausbringung ist nur durch die mechanisch maximal mögliche Maschinengeschwindigkeit begrenzt. Die tatsächliche Ausbringung erreicht ihr Maximum am optimalen Arbeitspunkt der Maschine.

Die Maschinengeschwindigkeit kann bis zu einem maximalen Wert  $n_{\max}$  gesteigert werden, der sich aus der maximalen Beanspruchbarkeit der Mechanik, dem Energieverbrauch und Umgebungsbedingungen ergibt. Da in der Praxis stets Produktausschuss, geplante und ungeplante Stillstandszeiten sowie Zeiten verminderter Ausbringung auftreten, ist die tatsächliche Ausbringung grundsätzlich geringer als die rechnerische. Weiterhin weist die theoretische Ausbringung ein Maximum auf, das mit einer optimalen Maschinengeschwindigkeit gekoppelt ist und den anzustrebenden Arbeitspunkt der Maschine darstellt. Beim Überschreiten der optimalen Geschwindigkeit sinkt die tatsächliche Maschinenausbringung, da Beanspruchungsgrenzen des Verarbeitungsgutes überschritten werden und somit zunehmend Ausschuss entsteht. Aufgrund dieses Zusammenhangs entsteht die Problemstellung, dass die Verarbeitungsmaschine bei einer geringeren Geschwindigkeit betrieben werden muss, als sie mechanisch in der Lage ist und die damit verbundene Ausbringung ebenfalls geringer ist, als sie theoretisch sein könnte.

## 1.2 Ausbringungssteigerung von Verarbeitungsmaschinen

Zur Steigerung der Ausbringung ist zunächst der parallele Einsatz mehrerer Maschinen naheliegend. Dieser zieht jedoch höhere Investitions- und Betriebskosten nach sich und begrenzt somit die Wirtschaftlichkeit. Durch eine Optimierung der Mechanik können störende Einflüsse, wie z. B. Schwingungen und Prozessinstabilitäten, reduziert und die Ausbringung erhöht werden. Diese Maßnahmen sind ebenfalls mit finanziellen Mehrbelastungen verbunden.

Ein möglicher Ansatz zur Erhöhung der maximalen Ausbringung, insbesondere bei in fast allen Verarbeitungsmaschinen anzutreffenden Fördervorgängen, ist der Einsatz von optimal an die Mechanik und den Prozess angepassten Bewegungsvorgaben. Die Bewegungsvorgaben werden dabei im Rahmen des Entwicklungsprozesses der Maschine durch Einsatz geeigneter Design-Ansätze so entworfen, dass Qualitätskriterien erfüllt und geforderte Restriktionen eingehalten werden. Da dabei das Prozessverhalten berücksichtigt werden kann und die maximale Produktbeanspruchbarkeit erst bei höheren Taktraten erreicht werden, ist eine Steigerung der optimalen Maschinengeschwindigkeit prinzipiell möglich.

In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Im Idealfall wird der optimierte Arbeitspunkt durch Anpassung der Bewegungsvorgaben bei der maximalen Maschinengeschwindigkeit erreicht, um somit eine global maximale tatsächliche Ausbringung zu erreichen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese optimale Vorgabe nicht zwingend optimal für andere Maschinengeschwindigkeiten ist und somit bei niedrigeren Geschwindigkeiten durchaus signifikant

niedrigere Ausbringungen auftreten können, da das prozessspezifische Verhalten nur bei der zu optimierenden Geschwindigkeit Berücksichtigung gefunden hat. Es besteht demzufolge die Notwendigkeit, Bewegungsvorgaben maschinengeschwindigkeitsabhängig zu realisieren, um die Ausbringung taktratenunabhängig zu maximieren.

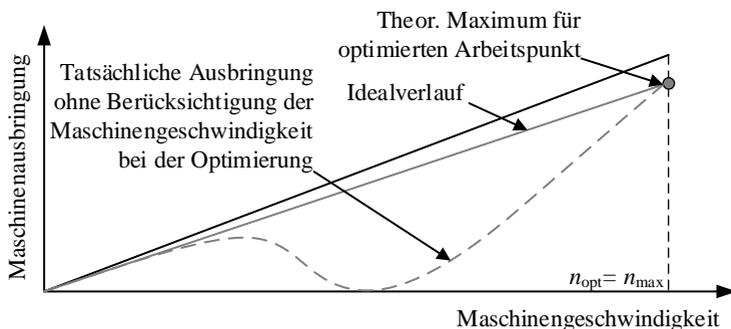


Abb. 2: Angestrebt ist, dass die optimale Maschinengeschwindigkeit gleich der maximal möglichen ist. Ohne Berücksichtigung der Maschinengeschwindigkeit bei der Optimierung ist die dazugehörige rechnerische Ausbringung bei anderen Geschwindigkeiten nicht mehr optimal (grau gestrichelte Linie).

Zur Abarbeitung von Bewegungsvorgaben kommen immer häufiger Motion-Control-Systeme zum Einsatz. Diese bieten neben den bekannten Vorteilen der Flexibilität auch die Möglichkeit, adaptive und auf den jeweiligen Prozess optimal abgestimmte Bewegungen zu realisieren. Hierdurch ergibt sich ein geeigneter Ansatzpunkt zur weiterführenden Steigerung der Ausbringung.

### 1.3 Defizite im Stand der Technik und Forschungsbedarf

Anhand der beschriebenen, ausbringungsbegrenzenden Effekte in Verarbeitungsmaschinen, können im Wesentlichen drei Defizite benannt werden, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses bisher unberücksichtigt bleiben:

- **Bewegungsoptimierung:** Ansätze zur Synthese und Optimierung von Bewegungsvorgaben berücksichtigen zwar meist das kinematische Verhalten des Gesamtsystems in Form von kinematischen und kinetostatischen Modellen, nicht jedoch die dynamische Wechselwirkung zwischen Prozess und Maschine. Dadurch sind die resultierenden Bewegungsvorgaben nicht zwingend optimal an das real auftretende Systemverhalten angepasst.

- **Bewegungsvorgaben:** Sowohl aus Sicht der Bewegungsoptimierung als auch aus Sicht der Bewegungsarbeit fehlt im bisherigen Entwicklungsprozess die Einsicht zur Notwendigkeit des Einsatzes taktratenabhängiger Bewegungsvorgaben, die zwangsläufig dann angewandt werden müssen, wenn dynamisches Systemverhalten berücksichtigt werden soll.
- **Bewegungsarbeitung:** Die Potentiale moderner Servoantriebe werden bisher vor allem zur Reduzierung von Einrichtzeiten genutzt, um damit die Flexibilität der Produktion zu erhöhen. Darüber hinausgehende Potentiale der Servoantriebe zur Online-Anpassung der Bewegungsvorgaben sowohl an veränderliche Randbedingungen als auch an dynamisches Systemverhalten bleiben bisher weitgehend ungenutzt.

Im Folgenden wird an Hand praktischer Beispiele ein generisches Konzept vorgestellt, das Lösungen für die drei diskutierten Defizite so miteinander kombiniert, dass ein signifikanter Beitrag zur Erhöhung von Maschinenausbringungen geliefert wird.

## 2 Beispiele und Anforderungen der verarbeitenden Industrie

Verarbeitungsmaschinen arbeiten in der industriellen Praxis selten eigenständig, sondern meist im Verbund als Anlage. Um sicherzustellen, dass bei Störungen einzelner Maschinen nicht die Anlage stillgesetzt werden muss, werden Speichereinheiten eingesetzt. Diese puffern Verarbeitungsgüter und können nachfolgende Maschinen auch im Störfall weiterhin versorgen. Je nach Auslegung wird dabei eine Änderung der Maschinengeschwindigkeiten der noch laufenden Maschinen erforderlich. Daraus resultiert die Anforderung, dass Prozesse bei unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten so ausgeführt werden, dass alle notwendigen Prozessanforderungen sowie Forderungen an die Maschine aus ihrer maximalen Beanspruchbarkeit weiterhin erfüllt werden. Im Folgenden werden zwei zur Illustration der Anforderungen besonders geeignete Beispiele diskutiert.

**Beispiel 1:** Das erste Beispiel betrachtet den intermittierenden Transport kleinstückiger Güter, der als Fördervorgang z. B. in Verpackungsmaschinen für Schokoladenprodukte zum Einsatz kommt. Um die Stabilität des Prozesses zu gewährleisten, muss eine genaue Positionierung des Stückgutes ohne dessen Beschädigung sichergestellt werden. Wie näher in [3] diskutiert, ist ein formschlüssiger Transport aufgrund von Produkttoleranzen nicht umsetzbar, weshalb auf eine

kraftschlüssige Umsetzung, wie in Abbildung 3 (oben) dargestellt, zurückgegriffen wird. Da es sich bei intermittierenden Fördervorgängen um Rast-in-Rast-Bewegungen handelt, die zwangsläufig Abbremsphasen aufweisen, kommt es bei dieser Variante ab einer Grenzmaschinengeschwindigkeit zum freien Gleiten des Stückgutes. Dies limitiert die Ausbringung, da der Prozess vom Ansatz her nur fehlerfrei ohne eine Fehlpositionierung des Stückgutes funktioniert. Ein alternatives Prozessprinzip ist in Abbildung 3 (unten) dargestellt. Die Eigenbewegung des Stückgutes wird bewusst in die Bewegungsplanung integriert, indem das Stückgut zunächst beschleunigt, danach durch Abbremsen des Arbeitsorgans in freies Gleiten versetzt und abschließend durch das Arbeitsorgan gezielt aufgefangen und bis zum Stillstand abgebremst wird. Hierdurch wird bei der Bewegungsoptimierung die Berücksichtigung eines erweiterten Prozessmodells notwendig, welches das freie Gleiten berechenbar macht.

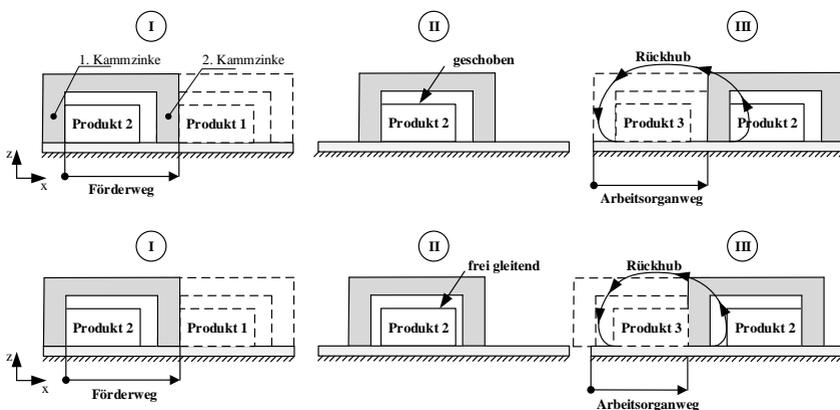


Abb. 3: Konventioneller Bewegungsansatz zum intermittierenden Fördern kleinstückiger Güter (oben) und neuartiger Ansatz zum Fördern unter Ausnutzung des dynamischen Verhaltens des Stückgutes (unten).

Da es sich bei der Arbeitsorgantrajektorie, bestehend aus Förder- und Rückhubphase, um eine 2D-Bewegung handelt, wird meist ein Mechanismus mit dem Laufgrad 2 eingesetzt, welcher mit Servomotoren angetrieben wird.

**Beispiel 2:** Als zweites Beispiel wird der intermittierende Transport niedrigviskoser Flüssigkeiten betrachtet, der in Abfüllanlagen zum Einsatz kommt. Die Rast wird zum Füllen bzw. im nächsten Schritt zum Wiegen des Fluides genutzt, siehe Abbildung 4. Für die Wägung ist es erforderlich, dass die Fluidoberfläche

eine minimale Restschwingung aufweist. Um diese zu minimieren ist ebenfalls eine Modellvorstellung der Oberflächenauslenkung in Abhängigkeit der Bewegungsvorgabe innerhalb der Bewegungsoptimierung notwendig. Der Einsatz von Servomotoren erlaubt die präzise Ausführung der zu synthetisierten Bewegungen.

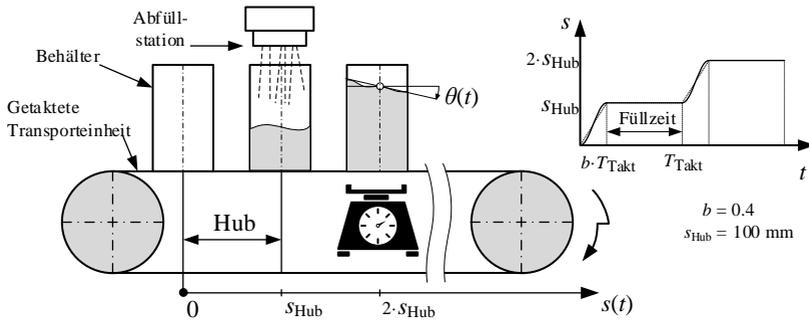


Abb. 4: Intermittierendes Fördern von Flüssigkeiten in offenen Behältern, wobei eine geringe Oberflächenschwingung nach Erreichen der Rastposition gefordert ist.

Die beiden vorgestellten Beispiele weisen drei wesentliche Eigenschaften auf, die stellvertretend für viele Fördervorgänge in Verarbeitungsmaschinen sind:

- Es liegt eine dynamische Wechselwirkung zwischen Arbeitsorgan und Verarbeitungsgut vor, die mit einem Prozessmodell in Form von gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben werden kann. Hierfür sind valide Modellparameter notwendig, die experimentell ermittelt werden müssen.
- Es liegen Beschränkungen bzw. maximale Einsatzgrenzen des Antriebssystems vor, wodurch diese in der Optimierung zu berücksichtigen sind, um eine maximal mögliche Maschinengeschwindigkeit zu erreichen.
- Die Verläufe der Zustandsgrößen des Verarbeitungsguts bestimmen im Wesentlichen den Prozesserfolg und dürfen einen gewissen Toleranzwert nicht überschreiten, um Produktverlust zu vermeiden und somit die tatsächliche Ausbringung zu maximieren.

Für die nicht zu überschreitenden Toleranzwerte ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten Fälle, die im Rahmen einer Anwendbarkeitsuntersuchung von Bewegungsvorgaben ermittelt werden können. Aufgrund der Stellvertreterfunktion der gewählten Beispiele werden diese im Folgenden betrachtet, wobei an dieser Stelle betont werden soll, dass das Vorgehen für alle Fördervorgänge, die die aufgeführten Eigenschaften aufweisen, genutzt werden kann.

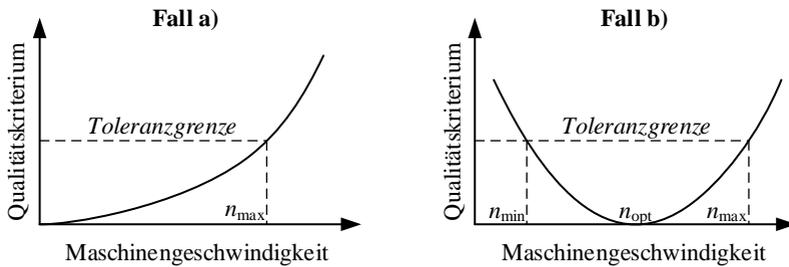


Abb. 5: Arten der Maschinengeschwindigkeitsbegrenzungen durch den Prozess nach [4]:  
 Fall a) zeigt eine einseitige Begrenzung, aus der eine maximale Maschinengeschwindigkeit folgt. Fall b) zeigt eine beidseitige Begrenzung, aus der ein nutzbarer Maschinengeschwindigkeitsbereich folgt.

### 3 Synthese und Umsetzung optimaler Bewegungsvorgaben

#### 3.1 Optimierung von Bewegungsvorgaben

An einer Vorzugsmethode zur Bewegungsoptimierung werden die folgenden Anforderungen gestellt: Erstens muss es möglich sein, Trajektorien verschiedener Dimensionen unter Berücksichtigung maximaler kinematischer Kennwerte zu synthetisieren. Zweitens muss die Berücksichtigung von Prozessmodellen in der Optimierung möglich sein. Drittens sollen beliebige Nebenbedingungen berücksichtigt werden können, wie z. B. maximale kinetostatische Kenngrößen in Form von Antriebsmomenten oder Raumbeschränkungen der Trajektorie.

Zur Lösung der Problematik des Stückguttransportes wurde in [5] erstmalig ein Lösungsansatz vorgestellt, bei dem für die Förderphase die Graphenmethode nach [6] eingesetzt und um ein Prozessmodell ergänzt worden ist. Die Rückhubphase wurde mit Hilfe des grafisch interaktiven Bewegungsdesigns erstellt, wobei die Beachtung des maximalen Antriebsvermögens nur händisch überprüft wurde. Durch den Einsatz der Graphenmethode entstanden allerdings ruckbehaftete Bewegungsvorgaben. Alternativ wurde in [4] ein Lösungsansatz präsentiert, bei dem auch die Förderphase durch abschnittsweise definierte Polynome und unter Beachtung des Prozessmodells erstellt werden und somit ruckfreie Bewegungen erstellt werden konnten. Die Berücksichtigung des maximalen Antriebsvermögens erfolgte für eine berechnete Trajektorie im Nachhinein.

Die zuletzt genannte Herangehensweise der Optimierung ist der Klasse der statischen Optimierungsverfahren zuzuordnen. Hierbei wird eine skalare Zielgröße als Funktion in Abhängigkeit skalarer Parameter optimiert. Im Gegensatz dazu befasst sich die dynamische Optimierung mit der Minimierung von Funktionalen, wie z. B. bestimmte Integralwerte in Abhängigkeit mehrerer Funktionen und deren Ableitungen [7]. Somit sind die zu bestimmenden optimalen Objekte Funktionen, was auf die gesuchten Trajektorien der Arbeitsorgane zutrifft. Die aus der klassischen Variationsrechnung hervorgegangene Optimalsteuerung beschäftigt sich im Besonderen mit der Synthese optimaler Trajektorien zur Steuerung technischer Systeme, deren Verhalten mit gewöhnlichen Differentialgleichungssystemen beschrieben werden kann. Dabei wird zwischen den Zustands- und den Steuergrößen des Systems unterschieden, welche wiederum beschränkt oder unbeschränkt sein können, um somit technische Restriktionen abbilden zu können. Allgemein wird ein Optimalsteuerungsproblem in der folgenden Form notiert:

$$J = \int_0^T \underline{f}_0(t, \underline{x}, t) dt \rightarrow \min_{(\underline{u})} \quad (1)$$

unter Beachtung von:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}(t) &= \underline{f}(t, \underline{x}, \underline{u}) && \text{Systemdifferentialgleichung,} \\ \underline{x}(0) - \underline{x}_0 &= 0 && \text{Startwerte,} \\ \underline{x}(T) - \underline{x}_T &= 0 && \text{Endwerte,} \\ |\underline{u}(t)| - \underline{u}_{\max} &\leq 0, \quad \forall t \in [0, T] && \text{Steuerungsbeschränkung,} \\ \underline{g}(t, \underline{x}, \underline{u}) &\leq 0, \quad \forall t \in [0, T] && \text{Ungleichungsnebenbedingungen,} \end{aligned}$$

wobei  $\underline{x}$  den Vektor der Zustands- und  $\underline{u}$  den Vektor der Steuergrößen darstellt. Zur Lösung dieser Art Problemstellungen kann das Maximumprinzip von PONTRJAGIN herangezogen werden. Damit können jedoch nur Spezialfälle analytisch gelöst werden. Insbesondere nichtlineare Zusammenhänge machen eine numerische Behandlung des Problems notwendig. Für die hier vorgestellten Arbeiten wird dabei auf die direkte Kollokationsmethode zurückgegriffen, bei der die Zustands- und Steuergrößen zeitlich diskretisiert werden und somit das Problem in eine statische Optimierungsaufgabe umformuliert wird [8]. Die Erfüllung der Systemdifferentialgleichung wird dabei über Nebenbedingungen erzwungen.

Zur Synthese optimaler Arbeitsorgantrajektorien für das Beispiel des Stückguttransportes werden die Beschleunigungsänderungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung als

Steuergrößen festgelegt und beschränkt, wodurch die Ruckfreiheit der Lösungen erzwungen wird. Abschließend wird als Nebenbedingung gefordert, dass die zur Umsetzung der Bewegung notwendigen Antriebsmomente nicht die herstellerseitig definierten Höchstwerte überschreiten.

Zur Berücksichtigung des Stückgutverhaltens, wird das in [4] entwickelte erweiterte Prozessmodell der Bewegungsgleichung des Stückgutes in Abhängigkeit der Gleitreibung herangezogen. Als zu minimierendes Gütefunktional wird

$$J = \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^{b-T} (v_{\text{Stückgut},x}(t) - v_{\text{AO},x})^2 dt}_{\text{Prozess}} + \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^T u_x^2(t) + u_y^2(t) dt}_{\text{Antrieb}} \rightarrow \min_{(u)} \quad (2)$$

genutzt. Durch den ersten Integranden wird eine stoßfreie Bewegung des Stückgutes während der Förderphase erzwungen, wohingegen der zweite Integrand minimale Effektivwerte der Steuergrößen während des gesamten Taktes fordert. Eine Lösung des Problems für eine Maschinengeschwindigkeit von 300 Takte/Minute ist in Abbildung 6 dargestellt.

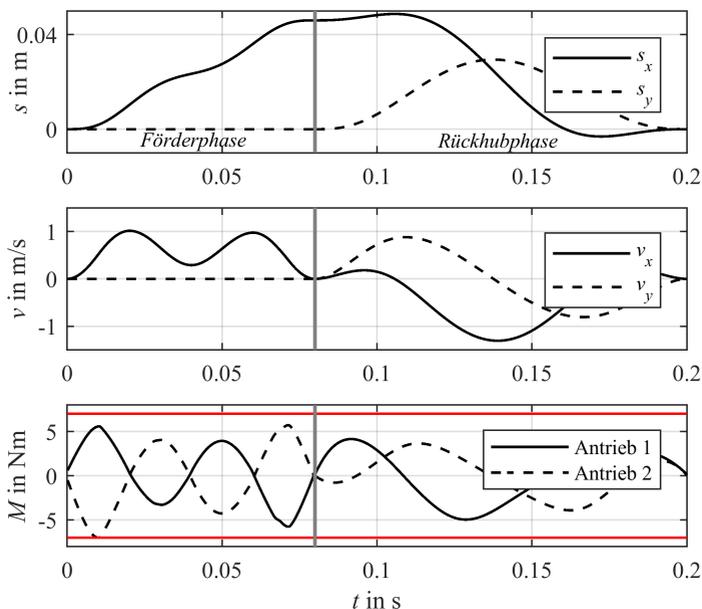


Abb. 6: Ergebnis der Optimalsteuerung für die Arbeitsorgantrajektorie zum Fördern des Stückgutes bei 300 Takte/Minute.

Bei der zu synthetisierenden Trajektorie für das zweite Beispiel handelt es sich um eine eindimensionale Bewegung. Als Steuergröße wird die Beschleunigung gewählt und entsprechend der VDI-Richtlinie 2143 mit einem  $c_a$ -Wert von 4,3 beschränkt. Als Prozessmodell wird das in [9] beschriebene und validierte Pendelmodell herangezogen. Nebenbedingungen sind nicht zu berücksichtigen. Die in Gleichung 3 dargestellten Integralterme werden als zu minimierendes Gütefunktional genutzt. Dabei beabsichtigt die Minimierung des ersten Integranden eine minimale Restschwingung der Fluidoberfläche während der Rastphase, wohingegen der zweite Integrand eine minimale Antriebsbelastung zum Ziel hat. Hierdurch wird der Effektivwert der Beschleunigung minimiert.

$$J = \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^{b:T} \theta^2(t) dt}_{\text{Prozess}} + \underbrace{\frac{1}{2} \int_0^T u^2(t) dt}_{\text{Antrieb}} \rightarrow \min_{(u)} \quad (3)$$

In Abbildung 7 sind die Lösungen des Optimalsteuerungsproblems für drei verschiedene Taktraten dargestellt.

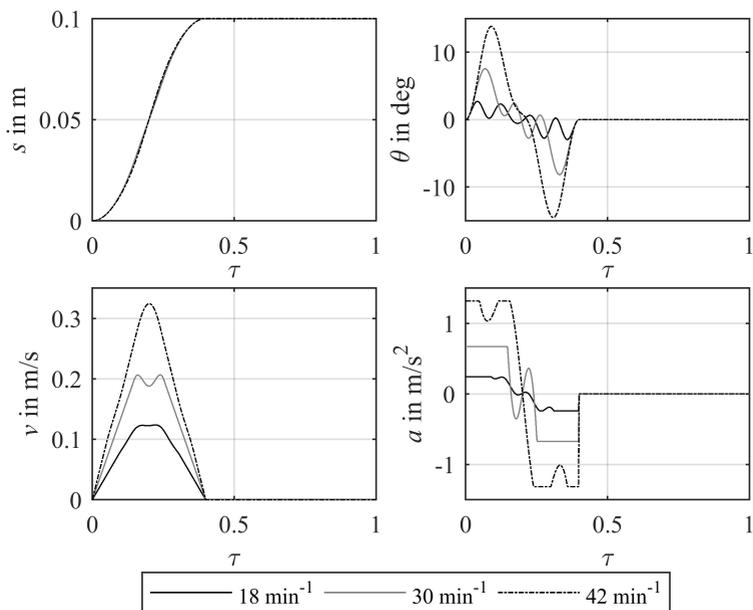


Abb. 7: Ergebnis der Optimalsteuerung für die Arbeitsorgantrajektorie zum Fördern eines Behälters gefüllt mit Fluid bei unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten dargestellt über dem normierten Bahnparameter  $\tau$ .

Ebenfalls dargestellt ist das simulierte Verhalten der Fluidoberfläche. Es ist im Rahmen der Modellgültigkeit möglich, für jede beliebige Taktrate eine Trajektorie zu ermitteln, die theoretisch keine Restschwingung erzeugt. Es wird deutlich, dass die Bewegungsvorgaben taktratenabhängig sein müssen, um das dynamische Verhalten zu berücksichtigen.

### 3.2 Verbund mehrerer Bewegungsvorgaben

In Abbildung 8 ist für das erste Beispiel eine Bewegungsvorgabe, wie sie typischerweise in Verarbeitungsmaschinen eingesetzt wird, über dem Bahnparameter  $\tau$  dargestellt. Dieser erlaubt den Vergleich von Bewegungen für verschiedene Maschinengeschwindigkeiten. Bei Änderung der Maschinengeschwindigkeit  $n$  ergibt sich der in Abbildung 8 dargestellte Verlauf der Bewegungsgrößen. Während sich die Positionsvorgabe nicht mit der Taktrate ändert, ist die Geschwindigkeitsvorgabe proportional zu dieser. Dieses Verhalten entspricht dem einer Kurvenscheibe. Solange bei veränderlichen Maschinengeschwindigkeiten kein störendes dynamisches Verhalten an der Maschine oder im Prozess auftritt, ist eine solche Einzelbewegungsvorgabe ausreichend. Reagiert der Prozess jedoch sehr sensitiv auf Veränderungen der Taktrate, können Einzelbewegungsvorgaben nur in einem sehr kleinen Bereich von Maschinengeschwindigkeiten genutzt werden.

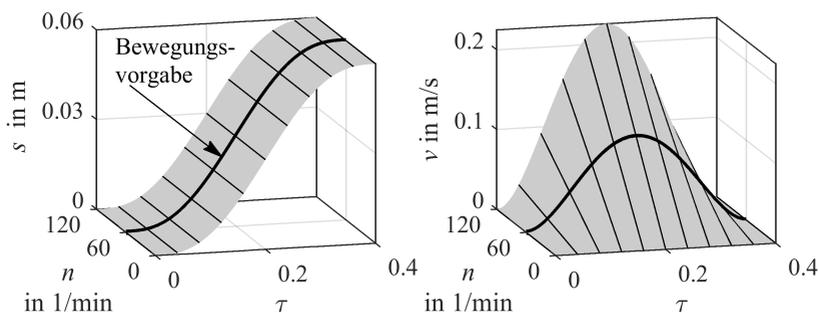


Abb. 8: Eine Bewegungsvorgabe: Änderung der Position und Geschwindigkeit einer Einzelbewegung bei Änderung der Maschinengeschwindigkeit gemäß einem klassischen Mechanismus nach [10].

Der Bedarf, einen maximalen Bereich an Maschinengeschwindigkeiten anwendungsfähig zu machen, führt zum Ansatz der Kombination mehrerer optimaler taktratenabhängiger Bewegungsvorgaben zu einem Bewegungskennfeld. Ein solches ist beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist,

führt eine Taktraterhöhung über Grenztaktraten einzelner Vorgaben hinweg zu Unstetigkeiten sowohl in der Positionsvorgabe, als auch in den höheren Ableitungen. Diese können zu Problemen bei der Abarbeitung führen und beispielsweise unerwünschte Schwingungen im System anregen.

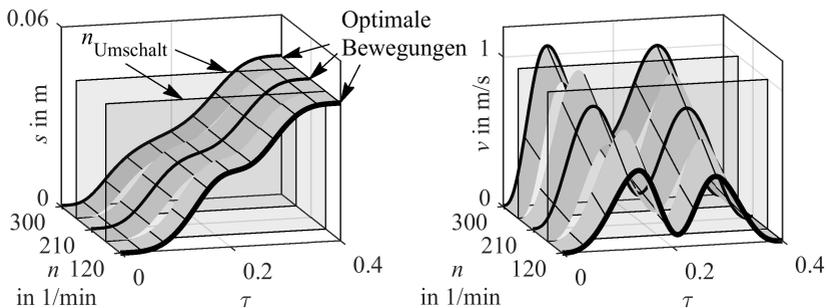


Abb. 9: Diskrete Umsetzung taktratenabhängiger, optimaler Bewegungsvorgaben nach [10] mit sichtbaren Unstetigkeiten im Weg- und Geschwindigkeitsverlauf.

Zur Vermeidung solcher unerwünschter Effekte wird der Ansatz verfolgt, kontinuierlich zwischen optimierten Bewegungsvorgaben umzuschalten. In [11] werden verschiedene Ansätze untersucht und unter Berücksichtigung der zur Speicherung notwendigen Datenmenge und des Aufwandes zur Abarbeitung innerhalb der Steuerung bewertet. Für den hier präsentierten Ansatz wird das Umschalten mittels Linearinterpolation ausgewählt [11]. Ein Verbund optimaler Bewegungsvorgaben, wie er in der Steuerung zur Abarbeitung kommt, ist in Abbildung 10 beispielhaft für den Stückguttransport dargestellt.

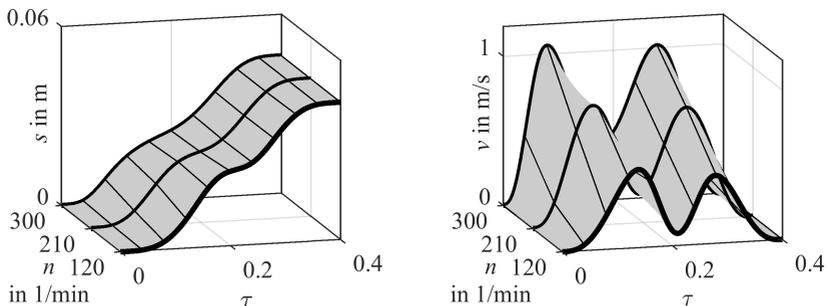


Abb. 10: Abarbeitung mehrerer vorgegebener Bewegungen mit Vermeidung von Unstetigkeiten durch lineare Interpolation in Richtung der Maschinengeschwindigkeit zwischen den optimalen Bewegungsprofilen nach [4].

### 3.3 Abarbeitung optimaler Bewegungsvorgaben

Zur Abarbeitung der Bewegungsvorgaben sind diese so aufzubereiten, dass sie von der Steuerung effizient verarbeitet werden können. Aufgrund der numerischen Lösung des Optimalsteuerungsproblems unter Nutzung der direkten Kollokationsmethode liegen die optimalen taktratenabhängigen Trajektorien an diskreten Punkten vor, wobei durch die Verwendung von kubischen Ansatzfunktionen beliebige Ausgabediskretisierungen erzeugt werden können. Zur Übertragung der Bewegungen an die Steuerung, ist eine Datenverdichtung vorzunehmen, siehe Abbildung 11. Dazu werden Toleranzen für Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung vorgegeben und die Trajektorien mit möglichst langen Polynomen 5. Grades erzeugt, vgl. [11]. Die Koeffizienten der Polynome sowie deren Verwendungsintervalle werden an die Steuerung übertragen.

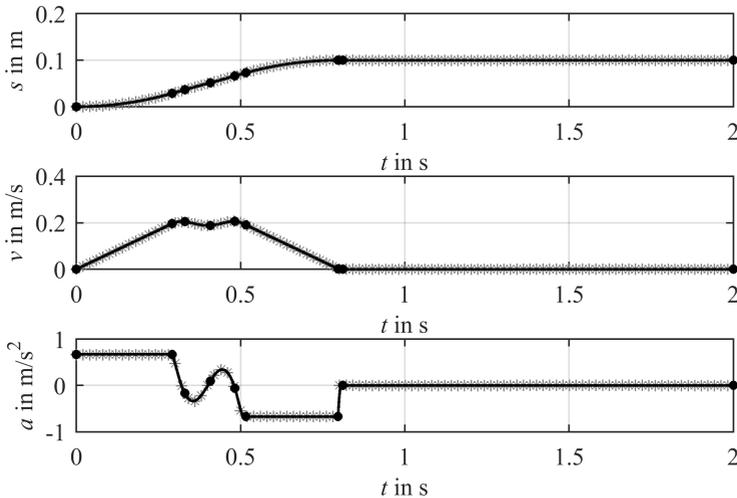


Abb. 11: Zeitlich diskrete Bewegungsvorgabe als Ergebnis einer numerischen Bewegungsoptimierung (graue Sterne) und Datenverdichtung durch maximal lange Polynomabschnitte (schwarze Linien) mit identifizierten Stützpunkten (schwarze Punkte) unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen.

Die Abarbeitung von mehrdimensionalen Bewegungsvorgaben, die sowohl vom Bahnparameter  $\tau$ , als auch von der Maschinengeschwindigkeit  $n$  abhängig sind, wird von konventionellen Steuerungssystemen momentan nicht unterstützt. Diese Lücke im Stand der Technik wird durch den hier vorgestellten Ansatz geschlos-

sen, dessen Aufbau in Abbildung 12 skizziert ist. Anforderung an die Steuerung aus Sicht des Prozesses ist eine hohe Bewegungsgenauigkeit zur möglichst detailreichen Reproduktion der optimierten dynamischen Wechselwirkung zwischen Arbeitsorgan und Verarbeitungsgut.

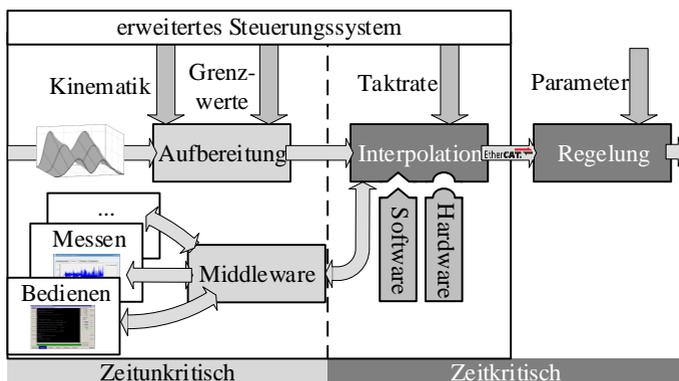


Abb. 12: Aufbau des erweiterten Steuerungssystems unterteilt nach zeitunkritischen und zeitkritischen Funktionalitäten.

Zur Sicherstellung einer hohen Bewegungsgenauigkeit arbeitet der echtzeitfähige, zeitkritische Teil der Steuerung mit einem Interpolationstakt von 8 kHz. Aufgrund der dadurch sehr kurzen, verfügbaren Zeit zur Berechnung aller Steuerungsaktivitäten, ist eine Minimierung des Online-Berechnungsaufwands notwendig. Aus diesem Grund werden alle nicht zwingend online abzuarbeitenden Funktionen, wie z. B. kinematische Transformationen, in die zeitunkritische Offline-Vorverarbeitung verlagert, vgl. [12]. Das Bewegungskennfeld wird nach der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Polynomapproximation an das Steuerungssystem übergeben und im ersten Schritt offline aufbereitet. Durch die Verwendung einer Monom-Basis, lassen sich die Funktionswerte mit dem HORNER-Schema mit minimalem Berechnungsaufwand online lösen [11]. Die berechneten Sollwerte werden dem Umrichter übergeben, in welchem die Regelung erfolgt.

Das Steuerungssystem ist so aufgebaut, dass verschiedene Hardware in die Steuerung integriert, aber auch diverse Algorithmen synchron abgearbeitet werden können. Der Vorteil besteht dabei darin, dass steuerungsinterne Antriebskenngrößen, wie z. B. Soll- und Ist-Positionen, sowie externe Arbeitsorgan- und Produktkenngrößen, wie z. B. deren relative Lage, gemeinsam aufgenommen und anschließend analysiert werden können. Dadurch steigt der Informationsgehalt von Messungen deutlich an, wie in [9, 13] näher ausgeführt wird.

## 4 Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

Abschließend soll experimentell gezeigt werden, dass die Synthese optimaler Bewegungsvorgaben mit Hilfe der Optimalsteuerung und geeigneten Prozessmodellen in Verbindung mit der taktratenabhängigen Steuerungsumsetzung, einen erweiterten Ausbringungsbereich von Verarbeitungsmaschinen ermöglicht.

Für das erste Beispiel des intermittierenden Stückguttransports sind in Abbildung 13 vergleichend die Ergebnisse für die Verwendung einer taktratenunabhängigen Bewegungsvorgabe sowie die Ergebnisse für die Anwendung kontinuierlicher Kennfelder mit zwei bzw. drei optimalen Vorgaben dargestellt.

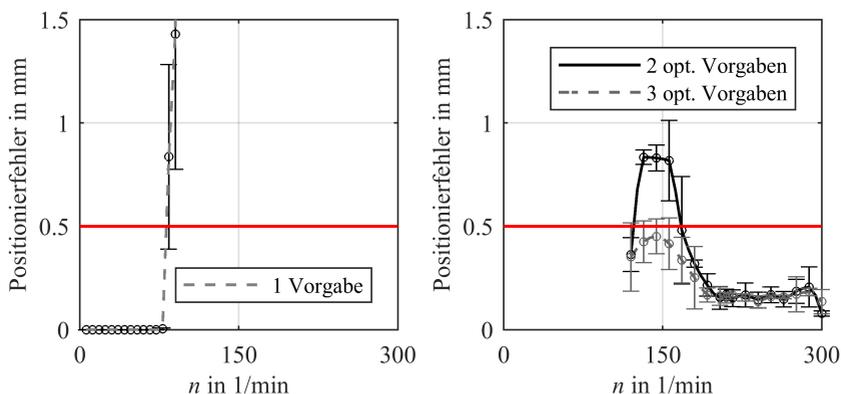


Abb. 13: Experimentelle Ergebnisse des Stückguttransportes. Links: Eine Bewegungsvorgabe am Arbeitsorgan und Abarbeitung nach dem Kurvenscheibenprinzip (vgl. Abbildung 8). Rechts: Zwei bzw. drei taktratenabhängige Bewegungsvorgaben mit stetiger Kennfeldabarbeitung. Toleranz von 0,5 mm Positionierfehler (rote Linie) zur Entscheidung bezüglich des Prozess Erfolges.

Als Gütemaß wird der Positionierfehler des Stückgutes von seiner Sollendposition herangezogen. Bei Annahme eines tolerierbaren, maximalen Positionierfehlers von 0,5 mm ergibt sich durch Anwendung einer Bewegungsvorgabe ein nutzbarer Maschinengeschwindigkeitsbereich von 65 Takte/Minute. Dem gegenüber kann durch Verwendung eines alternativen Prozessprinzips, eines erweiterten Prozessmodells sowie taktratenabhängiger Vorgaben der Bereich nutzbarer Maschinengeschwindigkeiten signifikant erhöht werden. Wie aus Abbildung 13 hervor geht, kann damit der Prozess von 120 bis 300 Takte/Minute durchgehend

erfolgreich durchgeführt werden. Aufgrund des alternativen Prozessprinzips ergibt sich eine untere Beschränkung des nutzbaren Taktratenbereichs. Um dennoch eine Nutzung des gesamten Bereiches zu ermöglichen, müssen weitere optimale Vorgaben für niedrigere Taktraten in das Kennfeld inkludiert werden.

Die experimentellen Ergebnisse des zweiten Beispiels sind in Abbildung 14 dargestellt. Als Gütemaß wird hierbei die maximale Restschwingung der Fluidoberfläche verwendet, abgebildet durch die angenäherte Auslenkung  $\theta$ . Bei Annahme einer maximal tolerierbaren Restschwingung von  $5^\circ$  ergibt sich bei Anwendung einer Bewegungsvorgabe ein maximal nutzbarer Maschinengeschwindigkeitsbereich von 27 Takte/Minute. Dem gegenüber kann bei Anwendung eines kontinuierlichen Kennfeldes mit drei optimalen Vorgaben der Maschinengeschwindigkeitsbereich von 0 bis 47 Takte/Minute ohne Verletzung des Gütekriteriums genutzt werden.

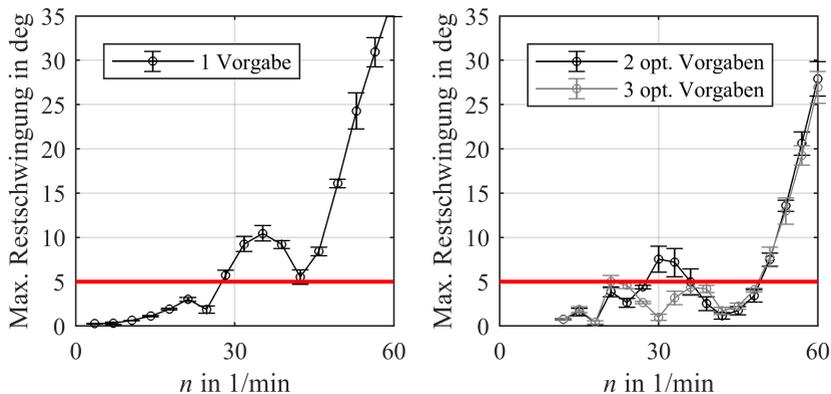


Abb. 14: Experimentelle Ergebnisse des Fluidtransports. Links: Eine Bewegungsvorgabe und Abarbeitung nach dem Kurvenscheibenprinzip. Rechts: Zwei bzw. drei taktratenabhängige Bewegungsvorgaben mit stetiger Kennfeldabarbeitung. Toleranz von  $5^\circ$  Restschwingung als Gütekriterium (rote Linie) zur Entscheidung des Prozessergebnisses.

Es zeigt sich an den zwei betrachteten Beispielen, dass die Vorgabe eines kontinuierlichen Kennfeldes gegenüber der Verwendung taktratenunabhängiger Vorgaben eine Erweiterung des nutzbaren Maschinengeschwindigkeitsbereiches ermöglicht und somit die Ausbringung von Verarbeitungsmaschinen erhöht werden kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt einen Ansatz vor, mit dem eine signifikante Erhöhung der Ausbringung von Verarbeitungsmaschinen möglich wird. Ausgehend von einer Analyse der praktischen Anforderungen an Fördervorgänge und deren bisherige Umsetzung, wurden zwei Praxisbeispiele vorgestellt. An diesen wurden die drei Kernpunkte des neuen Konzepts, taktratenabhängige Bewegungsoptimierung mittels Optimalsteuerung, Verbinden der Bewegungsvorgaben zu einem Kennfeld und effiziente Online-Abarbeitung, dargestellt. Es konnte experimentell gezeigt werden, dass dieses Vorgehen, gegenüber der konventionellen Bewegungserzeugung mit taktratenunabhängigen Bewegungsvorgaben und Motion-Control-Systemen, eine deutliche Steigerung des nutzbaren Bereiches von Maschinengeschwindigkeiten erlaubt, im Beispiel des Stückguttransports um 270% und für den Fluidtransport um 74%.

In zukünftigen Arbeiten sollen sowohl aus Sicht der Bewegungsoptimierung als auch aus Sicht der Bewegungsabarbeitung weitere Aspekte Berücksichtigung finden. Zum einen ist eine Erhöhung der Robustheit der Bewegungen gegenüber Modellparameterschwankungen angestrebt, um die Anwendbarkeit zu erhöhen und auch die industrielle Nutzung außerhalb des Labormaßstabes zu ermöglichen. Dies soll durch die Berücksichtigung von Sensitivitätsfunktionen im Optimalsteuerungsproblem gelingen, wobei eine minimale Sensitivität der zu optimierenden Zustandsgrößen gegenüber den Modellparametern angestrebt wird. Zum anderen sollen Algorithmen zur Datenreduktion des Bewegungskennfelds untersucht werden. Dadurch soll der Zeitaufwand bei der Offline-Bahnaufbereitung gesenkt werden. Dies hat zum Ziel, den aktuellen Forderungen nach Individualisierung der Produktion und schnellen Formatwechseln Rechnung zu tragen.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes *Grundlagen zum effizienten Einsatz mehrachsiger interpolierender Servoantriebe in Verarbeitungsmaschinen* unter der Projektnummer 182157057.

## Literatur

- [1] Norm DIN 8743:2014-01: *Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen - Kennzahlen zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens und Bedingungen für deren Ermittlung im Rahmen eines Abnahmelaufs*. 2014.
- [2] Bleisch, G., Langowski, H.-C. und Majschak, J.-P.: *Lexikon Verpackungstechnik*. 2. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, 2014.
- [3] Troll, C. und Majschak, J.-P.: „Gestaltungsaspekte des prozessorientierten Bewegungsdesigns am Beispiel des intermittierenden Stückguttransports“. In: *VDI-Berichte 2331 zur 19. VDI-Getriebetagung Bewegungstechnik am 19./20. September 2018 in Karlsruhe*. 2018, S. 67–80.
- [4] Troll, C., Schebitz, B., Majschak, J.-P., Döring, M., Holowenko, O. und Ihlenfeldt, S.: „Commissioning new applications on processing machines: Part I – process modelling“. In: *Advances in Mechanical Engineering* (10 2018) 2, S. 1–11. doi: 10.1177/1687814018754953.
- [5] Döring, M. und Majschak, J.-P.: „Berechnung von Bewegungsvorgaben unter Beachtung der Prozessdynamik am Beispiel des schnelllaufenden Transports von kleinformatigen Stückgütern“. In: *Tagungsband zum 10. Kolloquium Getriebtechnik, Ilmenau*. 2013.
- [6] Johanni, R.: *Optimale Bahnplanung bei Industrierobotern*. Dissertation. TU München, 1988.
- [7] Papageorgiou, M., Leibold, M. und Buss, M.: *Optimierung. Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 4. Aufl. Springer-Verlag, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-46936-1.
- [8] Betts, J. T.: *Practical Methods for Optimal Control and Estimation Using Nonlinear Programming*. 2. Aufl. Society for Industrial und Applied Mathematics, 2009.
- [9] Troll, C., Tietze, S. und Majschak, J.-P.: „Investigation on the Application of Operating Speed Dependent Motion Profiles in Processing Machines at the Example of Controlling Liquid Slosh“. In: *Advances in Mechanism and Machine Science* (173 2019), S. 1909–1918.
- [10] Troll, C., Schebitz, B., Majschak, J.-P., Döring, M., Holowenko, O. und Ihlenfeldt, S.: „Commissioning new applications on processing machines: Part II – implementation“. In: *Advances in Mechanical Engineering* (10 2018) 2, S. 1–12. doi: 10.1177/1687814018754955.

- [11] Holowenko, O., Kauschinger, B. und Ihlenfeldt, S.: „Increasing the Performance of Processing Machines by Executing Output Rate Dependent Motion Profiles“. In: *International Journal of Automation Technology* (11 2017) 2, S. 165–170. doi: 10.20965/ijat.2017.p0165.
- [12] Großmann, K., Kauschinger, B. und Holowenko, O.: „Hochdynamische Bahnvorgaben an Verarbeitungsmaschinen effizient abarbeiten“. In: *Tagungsband sps ipc drives*. VDE Verlag, Berlin, 2012, S. 205–214.
- [13] Riedel, M., Holowenko, O. und Ihlenfeldt, S.: „Potenziale der Photogrammetrie bei der Vermessung von Verarbeitungsmaschinen“. In: *Tagungsband der Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik VVD 2018 - Praxis trifft Wissenschaft*. 2018, S. 239–257.