

Methoden zur Auswahl und Synthese von Bewegungsgesetzen für mechatronische Systeme zur effizienten Prozesssteigerung

Thorsten Speicher, M. Eng., *Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik, 09126 Chemnitz, Deutschland, thorsten.speicher@mb.tu-chemnitz.de*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger, *Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik, 09126 Chemnitz, Deutschland, maik.berger@mb.tu-chemnitz.de*

Kurzfassung

Der zunehmende Trend zur Flexibilisierung in engem Zusammenhang mit Industrie 4.0 gewinnt im industriellen Umfeld immer stärker an Bedeutung. Um dem Konkurrenzdruck in diesem Bereich standhalten zu können, sind Unternehmen gezwungen, sich durch innovative Ansätze vom Wettbewerb abzuheben. In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise zur effektiven Optimierung von Bewegungsprofilen vorgestellt. Dazu wird die Auswahl bzw. Synthese von Bewegungsfunktionen unterstützt, die das komplette Leistungsvermögen der Maschine ausnutzen, um Taktzeiten zu reduzieren und folglich die Ausbringungsmenge zu erhöhen. Zudem bietet der Ansatz die Möglichkeit zur softwareseitigen Implementierung in eine SPS, um online produkt- oder prozessspezifische Bewegungsprofile zu optimieren.

Abstract

The increasing trend toward flexibility and industry 4.0 becomes more important in industrial environments. Because of the competitive pressure, the companies are forced to develop new and innovative approach setting themselves apart from the competition.

This paper presents a method for the effective optimization of motion profiles. The selection and synthesis of motion law are supported, that can use the entire performance of the processing machine to reduce the cycle time and to increase the output quantity. Moreover, this approach enables implementing in the PLC to realize an online optimization of product- or process-specific motion profiles.

1 Einleitung

Unter Betrachtung der betriebswirtschaftlichen Zwänge produzierender Unternehmenszweige in Bezug auf die permanente Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeiten sowie dem gleichzeitigen Wunsch nach Flexibilisierung, bietet das Bewegungsdesign durch die Gestaltung optimaler Bewegungsfunktionen die Möglichkeit, Taktzeiten ohne den Einsatz von leistungsfähigeren Antriebskomponenten zu reduzieren. In der VDI Richtlinie 2143 aus dem Jahr 1980 [6] wird eine Arbeitsweise zur Gestaltung von Bewegungsverläufen durch die abschnittsweise Zusammensetzung von mathematischen Funktionen vorgestellt.

Aus einem Katalog können fest definierte, normierte Funktionen (Bewegungsgesetze) anhand vergleichbarer Gütekennwerte ausgewählt und mittels einer Transformation an die technologischen Randbedingungen angepasst werden. Aus aktuellen Veröffentlichungen zu den Themen „Optimierungen von Bewegungsgesetzen“ und „Entwicklung neuer Kennwerte“ geht hervor, dass diese Vorgehensweise vor allem für kurvengesteuerte Bewegungssysteme und Motion-Control-Systeme eine heute immer noch gängige Praxis ist [1], [2], [5]. Unter Einsatz leistungsfähiger Rechentechnik wurden spezielle Softwarelösungen entwickelt, die durch eine grafisch-interaktiv geprägte Arbeitsweise auch Möglichkeiten zur Bewegungsoptimierung bieten [3], [4]. Die angebotenen Softwareprodukte ermöglichen die Definition beliebig

vieler Stützpunkte mittels „PC-Maus“ in einem Diagramm-Editor, während zeitgleich, ähnlich einer Spline-Interpolation, die Berechnung eines geschlossenen Bewegungsverlaufs erfolgt. Eine Verschiebung der einzelnen Punkte (auch in den Ableitungen) unter gleichzeitiger Beobachtung der sich ergebenden Verläufe bezweckt eine Optimierung.

Bei detaillierter Analyse dieser heute gängigen Arbeitsweisen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Effizienz, vor allem in Bezug auf die flexible Optimierung von Bewegungsabläufen, ergeben sich neue Ansätze, die eine Erweiterung des Stands der Technik als sinnvoll erscheinen lassen.

Folgende Schwachstellen wurden identifiziert:

- Die fest definierten Funktionsverläufe der normierten Bewegungsgesetze mit ihren spezifischen Extrema der 1. und 2. Ableitung reizen in aller Regel die dominierenden prozess-, produkt- oder durch die Mechanik bedingten Bewegungsgrenzen (Geschwindigkeit und Beschleunigung) des mechatronischen Bewegungssystems nur einseitig aus. Einbußen in der Taktzeit und ferner in der Ausbringungsmenge sind die Konsequenz. Nur in bestimmten Ausnahmesituationen wird durch den Einsatz der angebotenen Bewegungsgesetze das Leistungsvermögen der Maschine annähernd vollständig ausgenutzt.

- Es fehlt eine effektive Methode zur effizienten Identifikation und Synthese taktzeitgünstiger Bewegungsgesetze für unterschiedliche Anforderungen.
- Das grafisch-interaktive Bewegungsdesign erlaubt oftmals eine Optimierung der Bewegungsprofile, sodass das Leistungspotential der Maschine weitgehend ausgenutzt werden kann. Diese aufwendige und zeitintensive Arbeitsweise setzt die Nutzung von kommerziellen Softwarelösungen voraus und ist aufgrund der händischen und simultanen Variation der einzelnen Punkte sowie der fehlenden systematischen Vorgehensweise nur für einen Experten zu empfehlen. Ein weiterer Nachteil ist die schlechte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, eine Verfahrensweise zur Taktzeitoptimierung zu präsentieren, die die Auswahl und die Synthese von normierten Bewegungsgesetzen unterstützt, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der zulässigen Bewegungsgrenzen des Systems. Im Vordergrund steht vor allem die einfache und strukturierte Anwendbarkeit, die es Anwendern ohne Expertenwissen und softwareunabhängig ermöglicht, gute Ergebnisse zu erzielen. Gleichzeitig soll die Voraussetzung zur softwareseitigen Implementierung in die Steuerung gegeben sein, um im Rahmen der Flexibilisierung auch individuell optimierte Bewegungsprofile im Online-Betrieb automatisiert zu berechnen und auszuführen.

In Bezug auf die Umsetzung der formulierten Ziele, werden neue Kennzahlen zur Charakterisierung der dominierenden Restriktionen des Bewegungssystems und der Bewegungsgesetze hinzugezogen. Diese Kennzahlen unterstützen neben der Auswahl von bekannten normierten Bewegungsgesetze, auch die Synthese vorgeschlagener normierter Parameterfunktionen.

Die mit diesem Verfahren gewählten Funktionen reizen größtenteils die maximalen Bewegungsgrenzen des Systems aus und führen im Vergleich zu alternativen Optimierungsmethoden mit einem merklich reduzierten Zeitaufwand zu guten Optimierungsergebnissen.

Die Demonstration der Methoden erfolgt in diesem Beitrag anhand einer häufig im industriellen Umfeld eingesetzten Rast-in-Rast-Bewegung.

2 Grundlagen

In der Praxis kommen zur Realisierung solcher Bewegungsabläufe in der Regel kurvengesteuerte Mechanismen oder nach dem Master-Slave-Prinzip gesteuerte Motion-Control-Systeme zum Einsatz. Für eine konstante Antriebsgeschwindigkeit $\dot{x} = konst$ - bei Kurvengetrieben Antriebswinkelgeschwindigkeit und bei Motion-Control-Systemen generell die Geschwindigkeit der Leitachse - besteht der folgende Zusammenhang zwischen der Lage y , der Geschwindigkeit \dot{y} und der Beschleunigung \ddot{y} der Abtriebsbewegung für einen Abschnitt, mit der

Länge x_{ij} und dem Hub y_{ij} , und dem normierten Bewegungsgesetz $f(z)$ [6][7]:

$$y(x) = y_i + y_{ij} \cdot f(z) \quad (1)$$

$$\dot{y}(x) = \frac{y_{ij}}{x_{ij}} \cdot f'(z) \cdot \dot{x} \quad (2)$$

$$\ddot{y}(x) = \frac{y_{ij}}{x_{ij}^2} \cdot f''(z) \cdot \dot{x}^2 \quad (3)$$

$$\text{mit } z = \frac{x - x_i}{x_{ij}}$$

Durch Einsetzen der Beziehung

$$\dot{x} = \frac{x_{ij}}{t_{ij}} \quad (4)$$

in die Gleichungen (2) und (3), wobei t_{ij} die Taktzeit des Abschnitts darstellt und unter Berücksichtigung der normierten Kennwerte C_v und C_a ergeben sich die maximalen Bewegungsgrößen nach den Gleichungen:

$$\dot{y}_{\max} = \left| \frac{y_{ij}}{t_{ij}} \cdot C_v \right| \quad (5)$$

$$\ddot{y}_{\max} = \left| \frac{y_{ij}}{t_{ij}^2} \cdot C_a \right| \quad (6)$$

Die beiden Kennwerte C_v und C_a charakterisieren das betragsmäßige Maximum der jeweiligen Ableitung der normierten Bewegungsgesetze.

3 Kennwertentwicklung

Durch Einsetzen der max. zul. Geschwindigkeit $\dot{y}_{\max, zul}$ und Beschleunigung $\ddot{y}_{\max, zul}$ des Bewegungssystems in Gln. (5) und (6) ergeben sich die folgenden minimalen Taktzeiten für die Geschwindigkeitsbetrachtung

$$t_{ij, \min v} = \left| \frac{y_{ij}}{\dot{y}_{\max, zul}} \cdot C_v \right| \quad (7)$$

und für die Beschleunigungsbetrachtung

$$t_{ij, \min a} = \sqrt{\frac{y_{ij}}{\ddot{y}_{\max, zul}} \cdot C_a} \quad (8)$$

Ferner wird die min. zul. Taktzeit bestimmt mit:

$$t_{ij, \min} = \max(t_{ij, \min v}, t_{ij, \min a}) \quad (9)$$

Nun wird folgender Ansatz betrachtet:

$$t_{ij, \min v} = t_{ij, \min a} \quad (10)$$

Durch Einsetzen von Gln. (7) und (8) in (10) und bei gleichzeitiger Trennung der bewegungsgesetz- und der bewegungssystemabhängigen Größen resultiert:

$$\frac{C_a}{C_v^2} = \left| \frac{\ddot{y}_{\max, \text{zul}} \cdot y_{ij}}{\dot{y}_{\max, \text{zul}}^2} \right| \quad (11)$$

Es werden die folgenden, neuen dimensionslosen Größen eingeführt:

Der *Abstimmungskennwert* des Bewegungsgesetzes

$$C_\kappa = \frac{C_a}{C_v^2} \quad (12)$$

und das *Abstimmungsverhältnis*

$$\kappa = \left| \frac{\ddot{y}_{\max, \text{zul}} \cdot y_{ij}}{\dot{y}_{\max, \text{zul}}^2} \right| \quad (13)$$

zur Charakterisierung der Bewegungsgrenzen des Systems.

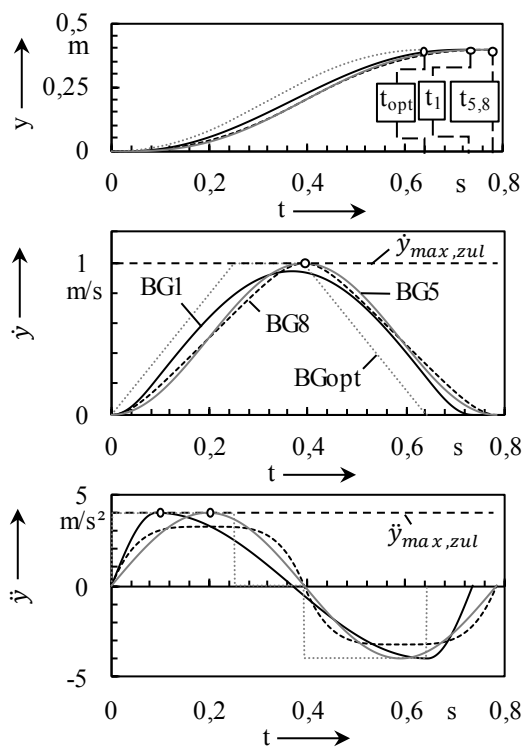


Bild 1 Fallunterscheidung

Anhand des betragsmäßigen Vergleichs dieser beiden Größen sind nachstehende allgemeingültige Bewegungscharakteristiken ableitbar (Bild 1):

Beschleunigungslimitation (Fall 1): $\kappa < C_\kappa$

Die min. zul. Taktzeit wird nach Gl. (8) bestimmt und nur die max. zul. Beschleunigung des Systems wird ausgereizt (BG1).

Fall 2: $\kappa = C_\kappa$

Die min. zul. Taktzeit wird mit Gln. (7) oder (8) bestimmt und die max. zul. Geschwindigkeit und Beschleunigung des Systems werden erreicht (BG5).

Geschwindigkeitslimitation (Fall 3): $\kappa > C_\kappa$

Die min. zul. Taktzeit wird mittels Gl. (7) bestimmt und die max. zul. Geschwindigkeit des Systems wird ausgereizt (BG8).

4 Optimierungsmethoden

Dieses Kapitel präsentiert zwei neu entwickelte Methoden zur Taktzeitoptimierung für Bewegungsabläufe in Maschinen:

Die Methode **Kennwertorientierte Funktionsauswahl (KOFA)** erleichtert die anforderungsspezifische und systemabhängige Identifikation der taktzeitbesten Funktion aus einem Katalog mit bekannten normierten Bewegungsgesetzen.

Die Methode **Kennwertorientierte Funktionssynthese (KOSY)** ermöglicht hingegen eine effiziente Anpassung einer in Parameterform vorliegenden normierten Funktion unter Berücksichtigung der Bewegungsgrenzen des Systems. Stellt der Bewegungsgesetz-Katalog keine geeignete Funktion zur Verfügung, die annähernd das gesamte Leistungspotenzial der Maschine ausnutzt, eignet sich der Einsatz dieser Methode.

4.1 KOFA

Zur Herleitung und Demonstration der Methode KOFA zeigt die Tabelle 1 acht normierte Bewegungsgesetze mit ihren spezifischen *Abstimmungskennwerten*, die in diesem Beitrag den zur Optimierung verfügbaren Funktionskatalog bilden. [6][8]

Tabelle 1 Funktionskatalog für Rast-in-Rast (stoß- und ruckfrei)

Bez.	Bewegungsgesetz	C_κ
BG1	Modifizierte Sinoide	1,79
BG2	Polynom 5. Grads	1,63
BG3	Sinoide von Gutman	1,28
BG4	Modifiziertes Beschleunigungstrapez	1,22
BG5	Polynom 6. Grads	1,25
BG6	Polynom 7. Grads	1,57
BG7	Polynom 8. Grads	1,17
BG8	Sinoide von Besthorn	1,57

Durch einen betragsmäßigen Vergleich der beiden neu eingeführten Größen *Abstimmungsverhältnis* und -*kennwert* sind nachstehende allgemeingültige Aussagen zur Taktzeit möglich:

Liegt beim Einsatz aller Bewegungsgesetze eine Beschleunigungslimitation (Fall 1) vor, d. h. $\kappa < \min(C_{\kappa, BG1} \cdot C_{\kappa, BG8})$, so stellt das Gesetz mit dem geringsten C_a Kennwert das Optimum dar.

Ebenso gilt für den Fall $\kappa > \max(C_{\kappa, BG1} \cdot C_{\kappa, BG8})$, d. h. es liegt in jedem Fall eine Geschwindigkeitslimitation (Fall 3) vor, dass das Gesetz mit dem betragsmäßig geringsten C_v -Kennwert das Optimum bestimmt.

Hat das vorliegende Bewegungssystem hingegen ein *Abstimmungsverhältnis*, das sich betragsmäßig im Intervall der Kennwerte befindet

$(\min(C_{\kappa, BG1} \cdot C_{\kappa, BG8}) < \kappa < \max(C_{\kappa, BG1} \cdot C_{\kappa, BG8}))$, kann aufgrund der sich auf einen kleinen Bereich beschränkten Kennwert-Beträge keine vereinfachte Aussage über die Wahl des günstigsten Bewegungsgesetzes formuliert werden. Die sich hier ergebende Taktzeit wird maßgeblich vom Funktionsverlauf und weniger von der Nähe zu den Bewegungsgrenzen, oder deren Erreichung, bestimmt. Folglich ist das Optimum nur durch einen Vergleich der zuvor einzeln ermittelten Taktzeiten identifizierbar.

Um hier eine Steigerung der Effizienz des Auswahlprozesses zu erreichen, kann unter beispielhafter Annahme der Bewegungsgrenzen des Systems

$$\ddot{y}_{\max, zul} = 1 \frac{m}{s^2} \quad (14)$$

$$\dot{y}_{\max, zul} = 1 \frac{m}{s} \quad (15)$$

bei variierendem Hub y_{ij} die äquivalenten Funktionen

$$\kappa(y_{ij}) = \left| \frac{\ddot{y}_{\max, zul} \cdot y_{ij}}{\dot{y}_{\max, zul}^2} \right| = y_{ij} \frac{1}{m} \quad \text{für } y_{ij} > 0m$$

oder

$$y_{ij}(\kappa) = \kappa m \quad \text{für } \kappa > 0 \quad (16)$$

definiert werden.

Das Einsetzen der Gln. (14) und (15) in (7) und (8) führt zur Taktzeit

$$t_{\min}^*(y_{ij}) = \begin{cases} \sqrt{y_{ij} \cdot C_a} \frac{s}{\sqrt{m}} & \text{für } \kappa < C_{\kappa} \\ y_{ij} \cdot C_v \frac{s}{m} & \text{für } \kappa \geq C_{\kappa} \end{cases}$$

jedes einzelnen Bewegungsgesetzes oder in äquivalenter Form durch ergänzendes Einsetzen der Gl. (16) zu

$$t_{\min}^*(\kappa) = \begin{cases} \sqrt{\kappa \cdot C_a} s & \text{für } \kappa < C_{\kappa} \\ \kappa \cdot C_v s & \text{für } \kappa \geq C_{\kappa} \end{cases} \quad (17).$$

Bild 2 zeigt die entsprechenden Funktionsverläufe der Bewegungsgesetze BG1...BG8.

Eine absolute Bewertung kann anhand des Beschleunigungsrechtecks BGopt (Bild 1) erfolgen. Der charakteristische Funktionsverlauf, ununterbrochen entlang einer oder beider vorgegeben Grenzen, stellt das (theoretisch erzielbare) Optimum dar, von dessen Verwendung allerdings aufgrund der bereits in der 2. Ableitung existierenden Unstetigkeiten (ruckbehaftet) abgeraten wird.

Für ein allgemeines Beschleunigungsrechteck ergibt sich die Taktzeit aus

$$t_{BGopt}(y_{ij}, \dot{y}_{\max, zul}, \ddot{y}_{\max, zul}) = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{y_{ij}}{\ddot{y}_{\max, zul}}} & \text{für } \kappa \leq 1 \\ \frac{\dot{y}_{\max, zul}}{\ddot{y}_{\max, zul}} + \left| \frac{y_{ij}}{\dot{y}_{\max, zul}} \right| & \text{für } \kappa > 1 \end{cases} \quad (18)$$

In Analogie zur Herleitung von Gl. (17) kann die optimale Taktzeit für die in Gln. (14) und (15) definierten Annahmen wie folgt berechnet werden (Bild 2):

$$t_{BGopt}^*(\kappa) = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\kappa} s & \text{für } \kappa \leq 1 \\ (1 + \kappa) s & \text{für } \kappa > 1 \end{cases} \quad (19)$$

Aufgrund des proportionalen Verhaltens der resultierenden Taktzeiten für den Fall 1 (Beschleunigungslimitation, Kap. 3)

$$t_{ij, \min a} \sim \sqrt{\frac{y_{ij}}{\ddot{y}_{\max, zul}}}$$

und für den Fall 3 (Geschwindigkeitslimitation)

$$t_{ij, \min v} \sim \left| \frac{y_{ij}}{\dot{y}_{\max, zul}} \right|$$

können diese Diagramme bei einem beliebigen *Abstimmungsverhältnis* κ zur qualitativen Auswahl eines taktzeitgünstigen Bewegungsgesetzes hinzugezogen werden. Die zusätzlich enthaltene Information über die vorliegende Bewegungscharakteristik (Fall 1, Fall 2 oder Fall 3) unterstützt die Wahl der richtigen Gleichung, Gl. (7) oder (8), zur endgültigen Berechnung der resultierenden Taktzeit.

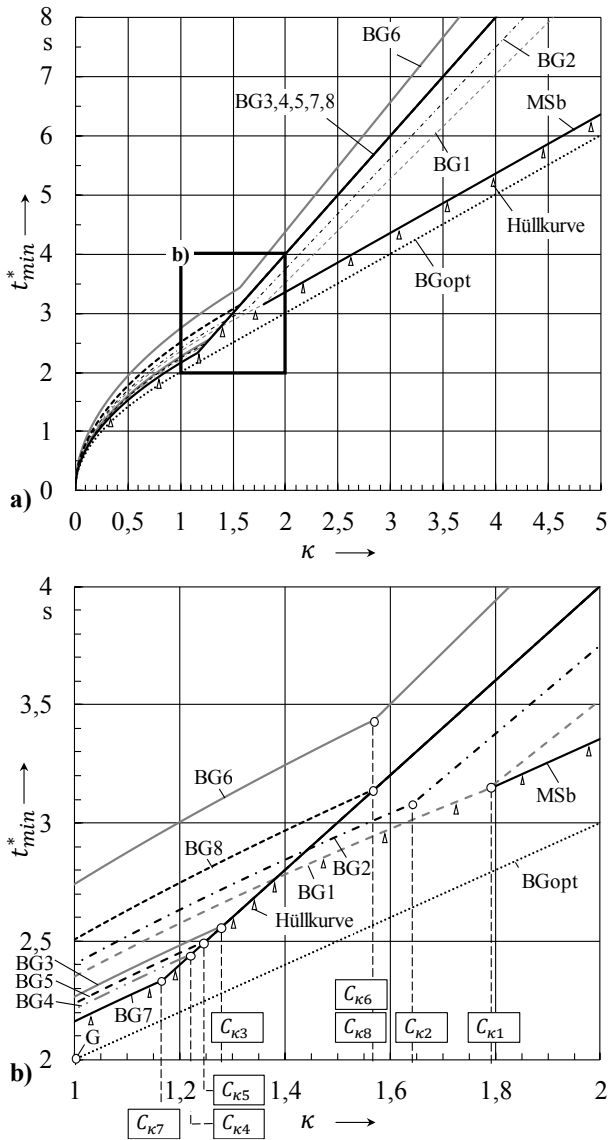


Bild 2 Taktzeiten der normierten Bewegungsgesetze a) Gesamtübersicht b) Bereichsdarstellung

Bild 3 zeigt als zusätzliche Auswahlhilfe die taktzeitbesten Bewegungsgesetze in Bezug auf das Abstimmungsverhältnis κ (vgl. Hüllkurve, Bild 2).

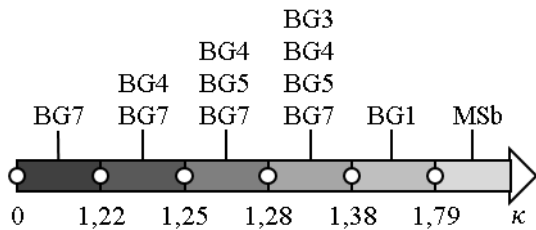


Bild 3 Auswahlhilfe

4.2 KOSY

Ein qualitativer Vergleich der im Bild 2 aufgeführten Funktionen legt dar, dass einerseits im Fall 1 (Beschleunigungslimitation, Kap. 3) mit Hilfe der bekannten Bewegungsgesetze bereits gute Annäherungen an das theoretische Optimum erzielt werden können, und andererseits im Fall 3 (Geschwindigkeitslimitation) bei steigendem Abstimmungsverhältnis κ ein Abdriften der Funktionen vom Optimum erkennbar ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass vorhandene Bewegungsgesetze die max. zul. Beschleunigung des Systems immer weniger ausschöpfen.

Hierfür bietet **KOSY** einen methodischen Ansatz zur Entwicklung eines auf die Bewegungsgrenzen angepassten Bewegungsgesetzes und garantiert auch für betragsmäßig große κ eine optimale Ausnutzung des Leistungspotenzials der Maschine.

Die Beschreibung der Methode erfolgt am Beispiel der normierten Parameterfunktion *Modifizierte Sinoide mit Geradenanteil (MSb)*, die aufgrund des parametrisierbaren Bereichs der Länge b mit konstanter 1. Ableitung die Geschwindigkeitsgrenze des Systems für $\kappa > 1,79$ effektiv ausnutzen kann.

Mit der Substitution

$$a(b) = 4\pi + 12\pi b - 16b + 16 \tag{20}$$

wobei b im Intervall $0 \leq b \leq 1$ definiert ist, gilt für die Funktion der *MSb* nach [9]:

Bereich 1: $0 \leq z < \frac{1-b}{8}$

$$f(z) = \frac{1}{a(b)} \left[4\pi z + \sin\left(\frac{4\pi z}{b-1}\right)(1-b) \right] \tag{21}$$

Bereich 2: $\frac{1-b}{8} \leq z < \frac{1-b}{2}$

$$f(z) = \frac{1}{a(b)} \left[4\pi z + 9\sin\left(\frac{4\pi z - \pi b + \pi}{3b-3}\right) \dots \dots (1-b) - 8b + 8 \right] \tag{22}$$

Bereich 3: $\frac{1-b}{2} \leq z \leq \frac{1+b}{2}$

$$f(z) = \frac{1}{a(b)} [16\pi z - 6\pi + 6\pi b - 8b + 8] \tag{23}$$

Bereich 4: $\frac{1+b}{2} < z \leq \frac{7+b}{8}$

$$f(z) = \frac{1}{a(b)} \left[4\pi z + 9\sin\left(\frac{4\pi z + \pi b - 5\pi}{3b-3}\right) \dots \dots (1-b) - 8b + 12\pi b + 8 \right] \tag{24}$$

Bereich 5: $\frac{7+b}{8} < z \leq 1$

$$f(z) = \frac{1}{a(b)} \left[\begin{array}{l} 4\pi z + \sin\left(\frac{4\pi - 4\pi z}{b-1}\right), \dots \\ \dots (1-b) - 16b + 12\pi b + 16 \end{array} \right] \quad (25)$$

Für die Kennwerte gelten die Gleichungen:

$$C_v(b) = \frac{4\pi}{\pi - 4b + 3\pi b + 4} \quad (26)$$

$$C_a(b) = -\frac{4\pi^2}{(b-1)(\pi - 4b + 3\pi b + 4)} \quad (27)$$

Durch Einsetzen der Gl. (26) und (27) in Gl. (12), gilt für den *Abstimmungskennwert*:

$$C_\kappa(b) = \frac{C_a(b)}{C_v^2(b)} = -\frac{\pi - 4b + 3\pi b + 4}{4(b-1)} \quad (28)$$

Für die Parametrierung der *MSb* wird zunächst Gl. (28) in die nachstehende äquivalente Form gebracht:

$$b = -\frac{\pi - 4C_\kappa + 4}{4C_\kappa + 3\pi - 4} \quad (29)$$

Ein Bewegungsgesetz, dass die Grenzen des Systems ausreizt, fordert die Bedingung

$$C_\kappa = \kappa \quad (\text{Fall 2}).$$

Somit ist der Parameter b anhand des *Abstimmungsverhältnisses* κ gemäß Gl. (30) ermittelbar.

$$b = -\frac{\pi - 4\kappa + 4}{4\kappa + 3\pi - 4} \quad (30)$$

Das synthetisierte Bewegungsgesetz ergibt sich folglich nach Gl. (21) bis (25).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich Bewegungsgesetze mit Hilfe dieser neu entwickelten Vorgehensweise einfach und effizient synthetisieren lassen, und dass dadurch, besonders für betragsmäßig große κ , im Vergleich zu bekannten Gesetzen, deutliche Taktzeit-Verbesserungen erzielbar sind (Bild 2).

5 Beispiel zur Anwendung der Methoden

Zur Realisierung nacheinander folgender Umsetzbewegungen von in der Masse variierenden Produkten innerhalb einer Handhabungsstation, kommt aufgrund der Produkt-Sensibilität ein mit geringem Anpressdruck betriebener Sauggreifer zum Einsatz (Bild 4). Die Bewegung wird mittels eines Motion-Control-Systems erzeugt und kann im Betrieb beliebig angepasst werden.

Gefordert ist eine Optimierung des Zeitfensters t_{ij} für den Umsetzprozess. Bild 5 zeigt dazu die entsprechende Bewegungsaufgabe.

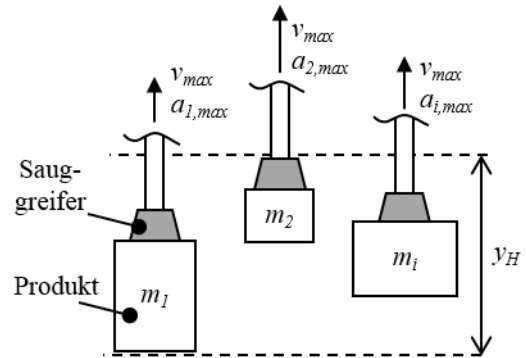


Bild 4 Anwendungsfall

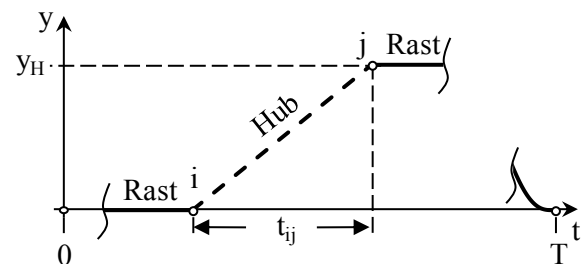


Bild 5: Umsetzbewegung

Prozessbedingt und unter Beachtung der Mechanik gibt es folgende Restriktionen:

- Hub $y_H = 0,3\text{m}$
- max. zul. Geschwindigkeit $v_{\max} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Die vorhandene Saugkraft des Greifers erlaubt unter Beachtung der wirkenden Gewichts- sowie Trägheitskräfte max. Beschleunigungen von:

$$a_{1,\max} = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (\text{Produkt 1})$$

$$a_{2,\max} = 75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (\text{Produkt 2})$$

Die Anwendung der entwickelten Methoden zur Optimierung des geforderten Prozesses wird im Folgenden am Beispiel der Produkte 1 und 2 demonstriert:

Prozessoptimierung für Produkt 1 (P₁):

-Schritt 1-

Berechnung des Abstimmungsverhältnisses nach Gl. (13)

$$\kappa_1 = 1,33$$

-Schritt 2-

Anwendung von KOFA:

Der Anwender hat die Wahl zwischen den Gesetzen BG4, BG5, und BG7 (Bild 3), die angesichts der betragsmäßig gleichen Geschwindigkeitskennwerte $C_V = C_{V,BG4} = C_{V,BG5} = C_{V,BG7} = 2$ und dem vorliegenden Fall 3 (s. Kap. 3) Taktzeiten von jeweils

$$t_{12} = \frac{y_H}{v_{\max}} \cdot C_V = 0,2 \text{ s}$$

erzielen.

Gegenüber dem häufig verwendeten Polynom 5. Grads wird eine Verbesserung um ca. 4% erzielt ($t_{12,BG2} = 2,08 \text{ s}$). Welches der drei Bewegungsgesetze schließlich in Frage kommt, kann anhand weiterer Kriterien entschieden werden. In diesem Fall wurde das Bewegungsgesetz BG4 ausgewählt (Bild 5).

Prozessoptimierung für Produkt 2 (P₂):

-Schritt 1-

Berechnung des Abstimmungsverhältnisses nach Gl. (13)

$$\kappa_2 = 2,5$$

-Schritt 2-

Anwendung von KOSY:

In diesem Fall wird nach Bild 3 die Anpassung der parametrischen Funktion MSb empfohlen.

Nach Gl. (30) folgt

$$b = 0,185$$

Für die Taktzeit resultiert:

$$t_{12} = \frac{y_H}{v_{\max}} \cdot C_V = 0,154 \text{ s}$$

$$\text{mit } C_V(b = 0,185) = 1,54 \text{ (nach Gl. (26))}$$

Im Vergleich zum Polynom 5. Grads wird hier eine Verbesserung um ca. 18% erzielt ($t_{12,BG2} = 1,88 \text{ s}$).

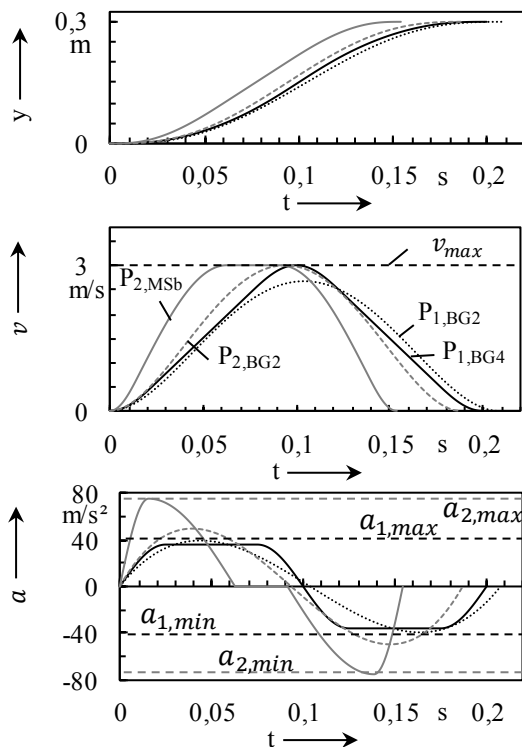


Bild 5 Optimierungsergebnis des Anwendungsfalls

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise zur Optimierung von Bewegungen hinsichtlich der Taktzeit beschrieben. Die beiden neu entwickelten Methoden KOFA und KOSY ermöglichen die effiziente Auswahl und Synthese von Bewegungsgesetzen, die nahezu das gesamte Leistungsvermögen der Maschine zur Steigerung der Taktzeit nutzen.

Die geringe Komplexität der Ansätze im Vergleich zu anderen Optimierungsverfahren erlaubt es, dass Anwender ohne Expertenwissen gute Ergebnisse erzielen. Des Weiteren erfüllt der Ansatz die notwendige Voraussetzung zur softwareseitigen Implementation in die Steuerung, um im Betrieb Online-Profil-Anpassungen vornehmen zu können. Durch die Online-Berechnung produktspezifischer taktzeitoptimierter Bewegungsprofile wird auch im Kontext der im industriellen Umfeld geprägten Ausrichtung nach Flexibilität und Industrie 4.0 eine effiziente Methode zur Optimierung von Bewegungsbereichen bis hin zu gesamten Technologiefunktionen ermöglicht.

In Zukunft wird sich der Autor mit der Erweiterung des Ansatzes für andere Bewegungsaufgaben, wie G-G oder G-U, sowie mit der Entwicklung anderer Bewegungsgesetze befassen. Die Erprobung der Gesetze hinsichtlich dynamischer Effekte mit Hilfe eines vorhandenen Prüfstands ist ebenso geplant.

7 Literatur

- [1] ALPERS, Burkhard: Zur Vermeidung des kinematischen Schwingens beim Bewegungsdesign. In: VDI (Hrsg.). Bewegungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verl., 2014 (VDI-Berichte, 2237), S. 51–62
- [2] ALPERS, Burkhard: Schranken und Extremalfunktionen für die Kennwerte der VDI Richtlinie 2143. In: VDI (Hrsg.). Bewegungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016 (VDI-Berichte, 2286).
- [3] BRAUNE, Reinhard: Bewegungs-Design mit interaktiver Variation von Stützwerten. In: VDI (Hrsg.). Bewegungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verl., 2006 (VDI-Berichte, Nr. 1966), S. 47–76
- [4] HEINE, Andreas; MATTHES, Jörg; SCHULZ, Ringo; BERGER, Maik: MOCAD – Ein grafisch interaktives Werkzeug zur Berechnung und Optimierung von Kurvengetrieben und Motion Control Systemen. In: VDI (Hrsg.). Bewegungstechnik. Düsseldorf: VDI, 2010 (VDI-Berichte, 2116).
- [5] PLAB, Wilfried L.: Online Auslegung von Kurvenscheiben. In: VDI (Hrsg.). Bewegungstechnik. Düsseldorf: VDI, 2010 (VDI-Berichte, 2116), S. 87–96
- [6] VDI Richtlinie 2143 Blatt 1. 1980. Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe
- [7] FRICKE, Andreas; GÜNZEL, Detlef; SCHAEFFER, Thomas: Bewegungstechnik: Konzipieren und Auslegen von mechanischen Getrieben. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2015
- [8] VOLMER, Johannes (Hrsg.); MÜLLER, Jörg (Hrsg.): Getriebetechnik: Kurvengetriebe. 2., stark bearb. Aufl. Ilmenau, Berlin: Ges. zur Förderung der Digitalen Mechanismen- und Getriebelibrary; Verl. Technik, 1989
- [9] HEINE, Andreas: Ein Beitrag zur kennwertorientierten Entwicklung kurvengesteuerter, ebener Schrittgetriebe. Chemnitz, Universitätsbibliothek, TU Chemnitz. Dissertation. 2015

Methoden zur Auswahl und Synthese von Bewegungsgesetzen für mechatronische Systeme zur effizienten Prozesssteigerung

Speicher, Thorsten; Berger, Maik

In: IFToMM D-A-CH Konferenz / Fünfte IFToMM D-A-CH Konferenz 2019

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/48191>

URN: <urn:nbn:de:hbz:464-20190221-174412-2>

Link: <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de:443/servlets/DocumentServlet?id=48191>

Lizenz:

Sofern nicht im Inhalt ausdrücklich anders gekennzeichnet, liegen alle Nutzungsrechte bei den Urhebern bzw. Herausgebern. Nutzung - ausgenommen anwendbare Schrankenregelungen des Urheberrechts - nur mit deren Genehmigung.