

Kurve oder Servo? Immer Bewegungsdesign!

Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. **Rainer Nolte**, Nolte NC-Kurventechnik GmbH

Kurzfassung

Der Autor ist seit über 30 Jahren in der Praxis tätig, um Kurven und Schrittgetriebe zu berechnen, Mechanismen zu simulieren, Servoantriebe auszulegen und komplexe Bewegungsabläufe in Maschinen nach dynamischen Kriterien zu optimieren. In Gesprächen mit Maschinenentwicklern trifft er nach seinem Empfinden häufig auf die Grundeinstellung, dass mechanische und elektrische Konstruktion getrennt, fast unabhängig voneinander betrachtet werden, nach folgendem Muster: die Konstruktion entwickelt zunächst eine Mechanik und hat dabei auch das günstige Zusammenspiel der Bewegungen im Sinn, anschließend implementiert die Elektrotechnik fast unabhängig davon die Bewegungssteuerung nach eigenen Kriterien, die sich allerdings eher auf das Software-Engineering als auf die Dynamik beziehen. Genau an dieser Schnittstelle zwischen Mechanik und Elektrotechnik kann viel von der Leistungsfähigkeit der Maschinen verloren gehen, nämlich die dynamische Qualität der Bewegungen. Der Beitrag plädiert für mehr Miteinander beim Bewegungsdesign für Maschinen und für den Einsatz durchgängiger Auslegungssoftware für Mechanik und Servos.

Abstract

The author calculates cams and indexing cams, simulates mechanisms, evaluates servo drive chains and optimizes complex motions with dynamical criteria for more than 30 years now. He feels that mechanical and electrical engineers often work separated from each other: one develops the mechanical part of the machine, considering also the dynamically optimized interplay of the motions, the other then almost independently implements the motion control, more thinking about software engineering than about machine dynamics. With this kind of interface between mechanical and electrical engineering, the machine

looses something important: the dynamical motion quality. This article suggests to work closer together on the topic of motion design to improve the speed and the efficiency of machines, and to use integrated software that supports motion design, mechanical and servo drive design.

1. Gegenüberstellung von Kurven und Servoantrieben

Bei der Bewegungssteuerung von Maschinen steht manchmal die Denkweise „Entweder Kurven oder Servos“ im Vordergrund. Als die Servosteuerungen leistungsfähig genug für die Steuerung schneller Bewegungen geworden waren, wurden anfangs ganze Kurvensätze vollständig durch Servoantriebe ersetzt. Gängig ist heute jedoch, mechanische und elektronische Kurven in einer Maschine gleichzeitig zu verwenden.

Sowohl die mechanischen Kurven als auch die Servoantriebe haben dabei spezifische Vorteile:

Mechanische Kurven:

- Mechanische Kurven erzeugen reproduzierbar exakte Bewegungsendlagen.
- Mechanische Kurven sind langfristig einfacher ersetzbar, denn für sie gibt es keine Inkompatibilitäten zu Elektronik- oder Softwareständen.
- Mechanische Bewegungssteuerungen lassen sich einfacher in Betrieb nehmen.
- Bei mechanische Bewegungssteuerungen ist das Zusammenspiel der Bewegungen automatisch gesichert. Einzelbewegungen müssen nicht programmtechnisch gegeneinander abgesichert werden.
- Bei durchlaufenden Bewegungen kann eine Kurve von mehreren umlaufenden Abtrieben gleichzeitig benutzt werden, wie z.B. bei den karussellartig laufenden Stationen in Abfüll- und Etikettieranlagen. Die Mehrfachabnahme steigert die Ausbringung auf einfache Weise.
- Wegen der meist konstanten Antriebsdrehzahl treten bei mechanischen Kurven vergleichsweise kleine Antriebsmomente auf.

Einige wenige Beispiele für den Einsatz rein mechanischer Kurvensteuerung:

- Schrittgetriebe für den Antrieb von Produktvorschüben (Taktketten)

- Montageautomaten
- Biegemaschinen (Dauerläufer)
- Abfüll-, Verschleiß- und Etikettiermaschinen in der Getränkeindustrie
- Verpackungsmaschinen (bei eng begrenztem Formatbereich)
- Drehautomaten

Servoantriebe:

- Servoantriebe erlauben die flexible Anpassung der Bewegungen an geänderte Parameter (z.B. Hübe, Übergangszeiten, Referenzpunkte, Eigenfrequenzen bewegter Objekte, z.B. von Flüssigkeiten).
- Servoantriebe sind relativ unempfindlich in Bezug auf Geschwindigkeit und Beschleunigung, solange diese innerhalb der dynamischen Grenzen des Antriebs liegen. Mechanische Kurven können hingegen durch schlechte Übertragungswinkel (verknüpft mit der Geschwindigkeit) oder Krümmungsradien (verknüpft mit der Beschleunigung) an ihre Grenzen kommen.
- Servoantriebe haben kein dem besonderen Verschleiß unterliegendes Kurvengelenk, das besonders geschmiert werden muß oder Pittingbildung bzw. Gleitverschleiß ausgesetzt ist.
- Durch die Programmierbarkeit aller Abläufe können Servo-Antriebssteuerungen während des Laufs flexibel auf alle möglichen Ereignisse reagieren, z.B. um volle Gebinde auch beim Aussondern von Ausschussartikeln zu gewährleisten, oder um Bewegungsabläufe an veränderliche Parameter anzupassen.

Einige wenige Beispiele für den Einsatz von Servoantrieben zur Bewegungssteuerung:

- Getakteter Produktvortrag (Taktketten), mit Filterung von Eigenfrequenzen gegen das Schwappen von Flüssigkeiten
- Papierabzug und Messer in einer Verpackungsmaschine
- Vereinzelungs- und Gruppierbänder in Verpackungsanlagen
- Biegemaschinen (bei kleinen Losgrößen)
- Antrieb einer Kurvenwelle, wenn die exakte Synchronisation zu anderen Anlagenteilen notwendig ist

Generell kommen mechanische Kurven eher für Einzweckmaschinen bzw. Maschinen für ein enges Formatspektrum zum Einsatz, während Servoantriebe eher verwendet werden, wenn die Bewegungen häufig verändert werden müssen.

Dabei wird meist bezogen auf eine Bewegungsachse entschieden, ob entweder ein Servoantrieb oder eine mechanische Kurve zum Einsatz kommt.

Eine Trennung in eine Welt der Mechanik und eine Welt der Elektrotechnik ist jedoch nicht wünschenswert.

Beide Fakultäten arbeiten am gleichen Projekt, der zu entwickelnden Maschine, mit dem gleichen Ziel, diese Maschine mit bestmöglicher Performance und Verlässlichkeit zu geringstmöglichen Gesamtkosten herzustellen.

Sowohl mechanische Kurven als auch Servoantrieben bewegen massebehaftete Übertragungs- oder Führungsgetriebe, die zu Eigenschwingungen angeregt werden können. Also kann man sowohl bei mechanischen als auch bei elektronischen Kurven die Bewegungen durch geeignete Methoden so gestalten, dass die Antriebe besonders schnell, effizient und ruhig laufen.

Das Thema „Bewegungsdesign“ ist für mechanische Kurven und für Servoantriebe gleichermaßen wichtig.

In der Praxis wird das Bewegungsdesign für Servoantriebe von den Ausführenden jedoch leider noch zu oft gar nicht als Thema wahrgenommen.

2. Beispiele

Manchmal ist gerade eine Kombination von mechanischen Kurven mit Servoantrieben besonders wirkungsvoll. Eine kleine Auswahl an praktischen Beispielen soll dies andeuten:

Beispiel Sammelscheibe:

In einer Verpackungsmaschine sollen streifenförmige Einzelartikel zu einer Artikelgruppe zusammengeführt werden. Ein Schieber führt die Artikel dazu seitlich in eine mit Aussparungen versehene Walze ein. Die Anzahl Artikel je Gruppe ist variabel, so dass die Wartezeit der Walze im Verhältnis zur Drehzeit ebenfalls variabel ist. Schon in der Aussparung liegende Artikel werden vom nachfolgenden Artikel um eine Position weiter geschoben. Wenn die Artikelgruppe voll ist, taktet die Walze eine Teilung weiter. Je größer die Anzahl Artikel in der Gruppe ist, desto kleiner ist im Verhältnis zur Gesamtzykluszeit die

Zeit zum Drehen der Sammelscheibe, denn die Drehung muß immer zwischen dem Einschubende eines letzten Artikels und dem Einschubbeginn des nächsten Artikels stattfinden.

Hier bietet es sich an, die eigentliche Drehung von einer mechanischen Kurve durchführen zu lassen, z.B. einer Zylinderschaltkurve mit kleinem Eigen-Massenträgheitsmoment.

Die Kurve wird nach einer zur Anzahl Artikel je Gruppe passenden Wartezeit auf ihre konstante Arbeitswinkelgeschwindigkeit beschleunigt, führt dann bei konstanter Antriebswinkelgeschwindigkeit die Drehung der Sammelscheibe aus und wird schließlich nach einem Gesamtdrehwinkel von 360 Grad wieder in den Stillstand abgebremst.

Die Aufteilung der Zeiten für das Beschleunigen und Verzögern der Kurve auf der einen und das Drehen der Sammelscheibe auf der anderen Seite wird so festgelegt, dass die beim Beschleunigen der Kurve und beim Drehen der Sammelscheibe auftretenden Maximalmomente an der Kurvenwelle in etwa gleich groß sind.

Die mechanische Kurve wird nur für den eigentlichen Schaltvorgang betätigt, so dass der Schaltwinkel der Kurve, also der Antriebswinkel für die Abtriebsdrehung, relativ groß ausfällt. Das ermöglicht eine Kurve mit kleinem Durchmesser und deshalb kleinem Eigenträgheitsmoment.

Beispiel Hin- und Herbewegung mit festem Hub bei variablen Zeiten:

Bei diesem Beispiel treibt ein Servoantrieb eine sehr kleine Kurve gleichen Durchmessers an, die ihrerseits einen Schlitten oder einen Hebel hin- und herbewegt. Bis zu fast 360 Grad Drehung an der Kurvenwelle bewirken einen Hub am Abtrieb. 180 Grad Kurvendrehwinkel je Hub ist ein typischer Wert bei einer umlaufenden Kurve. Bei oszillierender Kurvenwelle ist der Kurvendrehwinkel ein Optimierungsparameter, der das Verhältnis der vom Abtriebsschieber und von den Antriebs-Eigenträgheiten herrührenden Antriebsmomente bestimmt. Die Kurve kann so klein ausfallen, dass im Extremfall der Kurvendrehpunkt außerhalb der Kurvenflanke liegt. Die Kurve gewährleistet durch Rasten auf Größt- und Kleinstradius die exakte Einhaltung der Bewegungsendlagen, selbst wenn die Antriebsdrehung der Kurvenwelle gewissen Ungenauigkeiten unterworfen ist. Durch Vorspannung der Kurvenrollen kann das Spiel im Kurvengelenk kompensiert werden.

Beispiel Thermoformmaschine:

Zur Bewegung des Hubtisches einer Thermoformmaschine haben sich mechanische Kurvenscheiben bewährt. Um die Zeiten für das Einziehen und das Formen der Folie variabel zu halten, wird die Kurve über einen Servoantrieb bewegt. Der Servoantrieb minimiert die Kurvendrehwinkel mit konstantem Kurvenradius, so daß möglichst viel Drehwinkel für die eigentlichen Hübe zur Verfügung steht.

3. Bewegungsdesign in Mechanik und Elektrotechnik

Die dynamisch günstige Gestaltung kooperierender Bewegungen hat bei mechanischen Kurven, gerade bei Maschinen mit komplexem Bewegungszusammenspiel, z.B. Verpackungsmaschinen oder Montageanlagen, eine lange Tradition. Wurden Bewegungsdiagramme und Kurvenschablonen noch vor 50 Jahren wochenlang am Reißbrett ausgefeilt, fing man etwa um 1970 an, Kurven mit Computern zu berechnen und Lochstreifen für die Kurvenfertigung zu erstellen. Bewegungsdesign bestand damals in der Auswahl des „richtigen“ Bewegungsgesetzes und in der angemessenen Vorgabe der Übergangszeiten mit kleinen zeitlichen Überschneidungen konkurrierender Bewegungen. Mit dem Aufkommen leistungsstärkerer Rechner ab ca. 1985 wurde das Zusammenspiel der Bewegungen grafisch simuliert, um Kollisionen zu erkennen und zu vermeiden und gleichzeitig das Gesamtbewegungsdiagramm dynamisch zu optimieren [1,2]. Zunächst bedeutete das hauptsächlich, die Maximalbeschleunigungen zu verringern. Mit der Zeit wuchsen aber die Leistungsanforderungen an die Maschinen, und man erfuhr unterschiedliche dynamische Begrenzungen der Leistungsfähigkeit von Maschinen, z.B. Maximalgeschwindigkeiten und -beschleunigungen, Lagerkräfte und Lebensdauern, maximale und effektive Antriebsmomente von Motoren, die Anregungen von Eigenschwingungen, die die vorgegebene Sollbewegung am Abtrieb überlagern und die Positionsgenauigkeit des Abtriebsgliedes beeinträchtigen, und zusätzlich produktspezifische Kriterien. Um den steigenden Anforderungen gerecht werden zu können, wurden immer mehr und unterschiedliche Methoden zur Bewegungsgestaltung entwickelt, mit denen man immer detaillierter auf das Profil der dynamischen Eigenschaften einer Maschine eingehen konnte.

Wurde in den 70er und 80er Jahren diskutiert, ob das Polynom 5. Grades, die Geneigte Sinuslinie nach Helling-Bestehorn oder die Modifizierte Sinuslinie nach Neklutin das „beste“ Bewegungsgesetz sei, so können Bewegungen heute mit einer breiten Palette an Methoden

so gestaltet werden, dass sie den dynamischen Eigenschaften einer Maschine optimal begegnen, um verlässlich hohe Ausbringungen zu erreichen.

Folgende Liste an Gestaltungsmethoden, die in einer bekannten Software zur Kurven-, Servo- und Mechanismenoptimierung implementiert sind, soll davon eine Idee vermitteln:

- Auswahl von Bewegungsgesetzen mit stetiger dritter und ggf. auch vierter Ableitung, um die Anregung von Eigenschwingungen durch Ableitungsunstetigkeiten zu vermeiden
- Feingestaltung eines Bewegungsabschnitts mit Polynomen beliebigen Grades, z.B. zur Verringerung der Maximalgeschwindigkeit und/oder der Maximalbeschleunigung bei gleichzeitig stetiger Ruckfunktion
- Polynomsplines [3] zur Gestaltung sehr harmonischer, weicher Bewegungsdiagramme, die bis in höhere Ableitungen hinein stetig sind und deren Spektrum oft mit dem von HS-Profilen vergleichbar ist
- nach verschiedenen Verfahren numerisch optimierte Polynomfolgen zur Ausnutzung von Toleranzkanälen mit möglichst kleinen Maximalbeschleunigungen
- Verallgemeinerung der durch Sinusfunktions-Stücke gebildeten Bewegungsgesetze, die „Allgemeine Sinuskombination“, z.B. um lange Phasen mit konstant kleiner Beschleunigung oder den bestmöglichen Kompromiß für die Gestaltung eines Bewegungsabschnitts zu erreichen
- HS-Profile (Harmonische Synthese) in unterschiedlicher Ausgestaltung (abgeschnittenes Spektrum einer Bewegungsvorgabe, numerisch optimierte Harmonische oder mit dem im Programm mHSL [4] implementierten Simplex-Algorithmus) zur Verringerung der überlagerten Eigenschwingungen am Abtrieb
- HS-Bewegungsgesetze für Rast-in-Rast-Übergänge, die auf mHSL-Profilen basieren und bei stetiger Ruckfunktion Toleranzen der Rastpositionen ausnutzen, um durch gezielte Überschwinger die Übergangszeiten zu verlängern
- grafisch-interaktive Bewegungsoptimierung mit dem Ziehen von Stützpunkten und Ableitungswerten bei unmittelbarer Aktualisierung der Bewertungsverläufe
- numerische Optimierung der Randwerte für Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ruckfunktion und Pingfunktion
- Polydynfunktionen und inverse HS-Reaktionen zur gezielten Schwingungskompensation bei bestimmten Verhältnissen Eigenfrequenz/Taktzahl
- die ausdrückliche numerische Optimierung von Parametern der Bewegungsgestaltung, z.B. um kleine maximale Antriebsmomente oder große rechnerische Rollen- und Kurvenlebensdauern zu erreichen, d.h. letztlich die erreichbare Taktzahl zu maximieren

Während das Bewegungsdesign in der mechanischen Konstruktion einen hohen Reifegrad erreicht hat, reduziert sich die entsprechende Methodik beim Übergang in die Elektrotechnik schnell auf ein Minimum.

Verbreitet ist hier die Beschreibung von Bewegungen durch eine Abfolge von Polynomen 5. Grades, die zwar ruckfrei sind, d.h. stetig bis zur Beschleunigung, aber spezielle Optimierungen im Hinblick auf hohe Taktzahlen nicht oder nur mit sehr großem Aufwand zulassen.

Bei der Implementierung komplexer Bewegungssteuerungen mit gesteuerten Antrieben steht im Vordergrund, die Vielfalt der Bewegungszustände in einer Maschine zu beherrschen und dafür eine entsprechend komplexe Software zu entwickeln. Software ist ein abstraktes, masseloses Gebilde. Die Softwareentwickler legen ihr Augenmerk eher auf Fragen des Software Engineering als auf Fragen der Maschinendynamik, weil dies viel eher ihrer Ausbildung und ihrem beruflichen Hintergrund entspricht.

Das Thema Bewegungsdesign verschwindet quasi beim Übergang in die Implementierung der Bewegungssteuerung.

Dabei besteht durchaus die Möglichkeit, die ausgefeilte Feingestaltung des Bewegungsdiagramms nach dynamischen Kriterien in das SPS-Projekt zu übertragen. Auch wenn die Sollwertgeneratoren in den Servosteuerungen schließlich nur einfache Interpolationen (meist lineare, kubische, quintische Interpolation) für Stützpunktfolgen anbieten, können die Basisverläufe, auf die sich die Interpolationen beziehen, innerhalb des SPS-Projekts und damit von der Steuerung der laufenden Maschine bei Bedarf mit aktuellen Parameterwerten neu berechnet werden, bei entsprechender Prozessorleistung sogar während des laufenden Betriebs.

Die oben erwähnte Software exportiert deshalb Quelltexte in den Sprachen C oder ST, die in ein SPS-Projekt eingebunden werden können und die Berechnung aktueller Bewegungstabellen implementieren.

Damit die dynamisch hochwertige Bewegungsgestaltung auch bei den Servoantrieben ankommt, sollte den SPS-Softwareentwicklern die Wirksamkeit des Bewegungsdesigns bei schnell laufenden Maschinen bewußt sein. Sie bewegen massebehaftete, elastische Mechanismen, die auch schwingen können, und deren Bewegungsqualität man durch angemessene Bewegungsgestaltung erheblich verbessern kann.

Mechanik und Elektrotechnik arbeiten gemeinsam daran, möglichst leistungsfähige Maschinen zu entwickeln.

4. Literaturangaben

[1] Nolte, R.: „Kollisionsoptimierung von Mechanismen mit OPTIMUS MOTUS (R)“, Beitrag zur VDI-Getriebetagung 1996 in Veitshöchheim, VDI-Bericht 1281.

[2] Nolte, R.: „Automatische Kollisionsoptimierung komplexer Anlagen mit gesteuerten Antrieben“. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 2000 in Veitshöchheim, VDI-Bericht 1567.

[3] Nolte, R.: „Bewegungsdesign mit Polynomsplines“. Beitrag zur VDI-Getriebetagung am 5.+6.10.2010 in Nürnberg, VDI-Bericht 2116.

[4] Lüder, R.: „Zur Synthese periodischer Bewegungsgesetze von Mechanismen unter Berücksichtigung von Elastizität und Spiel“, VDI-Fortschrittsberichte, R11, Nr. 225, VDI-Verlag Düsseldorf 1995