

Schwingungsarme Bewegungsgestaltung bei elektronischen Kurven

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

1. Einleitung

Bei der Entwicklung von Verpackungsmaschinen, Abfüllanlagen, Montageautomaten, Textilmaschinen, Biegeautomaten und Maschinen mit vergleichbaren Bewegungsanforderungen sind häufig komplizierte Bewegungsabläufe für mehrere koordiniert zusammenarbeitende Werkzeuge zu verwirklichen.

Seit jeher werden für solche Aufgabenstellungen mechanische Getriebe eingesetzt, in der Regel Kurvenscheiben mit nachgeschalteten Koppelmechanismen.

Die Anforderungen der Betreiber solcher Anlagen werden immer spezieller, so daß die konstruierten Maschinen immer flexibler an die Kundenanforderungen anpaßbar sein müssen. Maschinen müssen immer häufiger für die jeweils optimale Verarbeitung unterschiedlicher Produkte geeignet sein, und die Umrüstung auf die verschiedenen Produkttypen muß einfach möglich sein.

Gleichzeitig werden jedoch nach wie vor hohe Verarbeitungsleistungen bei hoher Produktionsqualität verlangt. Anlagen müssen schnell und schwingungsarm laufen.

In diesem Kontext greifen Ingenieure immer mehr zu elektronischen Lösungen für die Bewegungserzeugung. Servosteuerungen bieten heute in der Regel Möglichkeiten, einzelne oder mehrere Achsbewegungen synchron zu einer Leitachse nach vorgegebenen Bewegungsverläufen zu verfahren.

Diese Bewegungsverläufe werden der Servosteuerung als Tabellen von Weg-Zeit-Stützpunkten oder Spline-Koeffizienten übergeben, so daß bei der Wahl des Bewegungsprofils völlige Freiheit besteht.

Für die Auslegung von Bewegungen bei mechanischen Kurven hat sich über viele Jahrzehnte hinweg ein bestimmtes Know-How etabliert, das die Ingenieure zur Steigerung der Verarbeitungsleistung und -qualität ihrer Maschinen heranziehen. Noch vor wenigen Jahren war es üblich, daß Servosteuerungen nur wenige einfache Verfahrprofile zur Bewegungsgestaltung anboten (Rampenfunktion, Sinus-Quadrat). Der Anwender solcher Steuerungen hatte damit zwar Kontrolle über den grundsätzlichen Bewegungsablauf an der Folgeachse, aber nur sehr beschränkte Möglichkeiten zur Optimierung der Abläufe nach dynamischen Kriterien, also entsprechend dem in der Mechanik etablierten Wissen über Beschleunigungsoptimierung.

Daß eine Servosteuerung Stützpunkttabellen interpolieren kann, ist also für den Ingenieur Voraussetzung dafür, daß er dem Stand der Technik entsprechend dynamisch optimierte Bewegungsverläufe mit der Steuerung realisieren kann.

Im folgenden sollen die Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie heute mit der entsprechenden Software Bewegungsabläufe gestaltet und für die Übergabe an Servosteuerungen aufbereitet werden können.

2. Bewegungsplan

Zu Beginn einer jeden Bewegungsauslegung für eine Maschine, die ein bestimmtes Produkt be- oder verarbeiten soll, steht eine Idee, welche Werkzeuge an der Bearbeitung beteiligt sind und wie diese grundsätzlich zusammenarbeiten sollen.

Diese Vorstellung konkretisiert der Maschinenentwickler in einem Bewegungsplan, der als zentrales Dokument für die Bewegungsgestaltung in der Maschine dient.

Ein Beispiel für einen Bewegungsplan zeigt Bild 1.

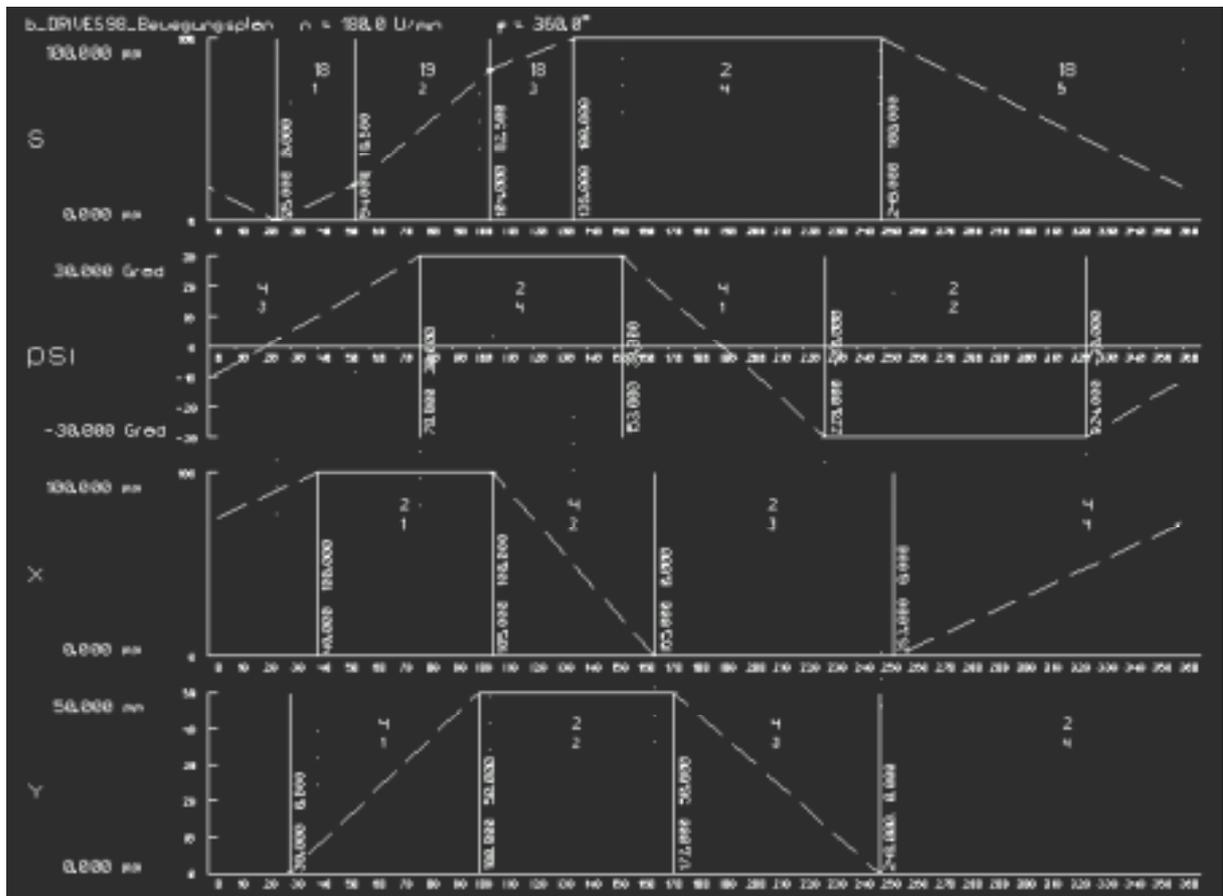


Bild 1: Bewegungsplan

Der Bewegungsplan ist eine schematische Darstellung der Bewegungsverläufe an den Werkzeugen, d.h. direkt am Organ. Diese können, müssen aber nicht den Verläufen an den Servoachsen entsprechen, denn zwischen den Servomotoren und den Werkzeugen sind vielleicht noch ungleichmäßig übersetzende Mechanismen zwischengeschaltet.

Im Bewegungsplan werden alle Rastbereiche, Bereiche konstanter Geschwindigkeiten, Start- und Endpunkte der einzelnen Bewegungen sowie zu durchlaufende Zwischenpunkte mit den zugehörigen Angaben für den Zeitpunkt und die entsprechende Wegkoordinate festgehalten. Zeiten werden üblicherweise als Taktwinkel auf einer Skala von 0 bis 360 Grad notiert, die einer Bewegungsperiode entspricht.

Bewegungen werden im Bewegungsplan abschnittsweise definiert.

Häufig wird der Bewegungsplan kommentiert. Es wird festgehalten, welche speziellen Bedingungen von den Bewegungsverläufen einzuhalten sind und welche Abhängigkeiten - z.B. Kollisionsbedingungen - zwischen den einzelnen Bewegungsverläufen beachtet werden müssen.

Die Verteilung der Zeiten für die einzelnen Bewegungsübergänge ist für die Belastung der Achsen von grundlegender Bedeutung, da damit auch die relative Auslastung der Achsen bei Maximaldrehzahl bestimmt wird. Da vor diesem Hintergrund der Bewegungsplan besonders intensiv optimiert wird, sollte ein graphischer Editor auf einem PC zur Verfügung stehen, um diese Optimierungen und die daran angeschlossenen Bewertungen durchzuführen.

3. Bewegungsdiagramm

Der nächste Schritt auf dem Weg zu Stützpunkttabellen für die Servosteuerung besteht in der Konkretisierung des Bewegungsplans. Es muß festgelegt werden, nach welchen konkreten Weg-Zeit-Gesetzen die noch offenen Übergänge (in Bild 1 gestrichelt dargestellt) zu durchlaufen sind.

Durch diesen Konkretisierungsschritt entsteht das Bewegungsdiagramm. Ein Beispiel zeigt Bild 2.

Bei diesem Übergang findet nun das angesprochene Know-How in der Bewegungsauslegung hauptsächliche Anwendung.

Aus der VDI-Richtlinie 2143 /1/ sind grundlegende Bewegungsgesetze zur Beschreibung von Übergangsfunktionen seit langem bekannt. Hier sind Funktionen wie die Geneigte Sinuslinie (Helling-Bestehorn) und das Polynom 5. Ordnung beschrieben, die in der Kurventechnik große Verbreitung gefunden haben.

Über diese grundlegenden Bewegungsgesetze hinaus sind aber vielfältige andere Funktionen zur Beschreibung des Weg-Zeit-Verhaltens während eines

Bewegungsabschnittes einer Achse denkbar und in entsprechender Software auch implementiert:

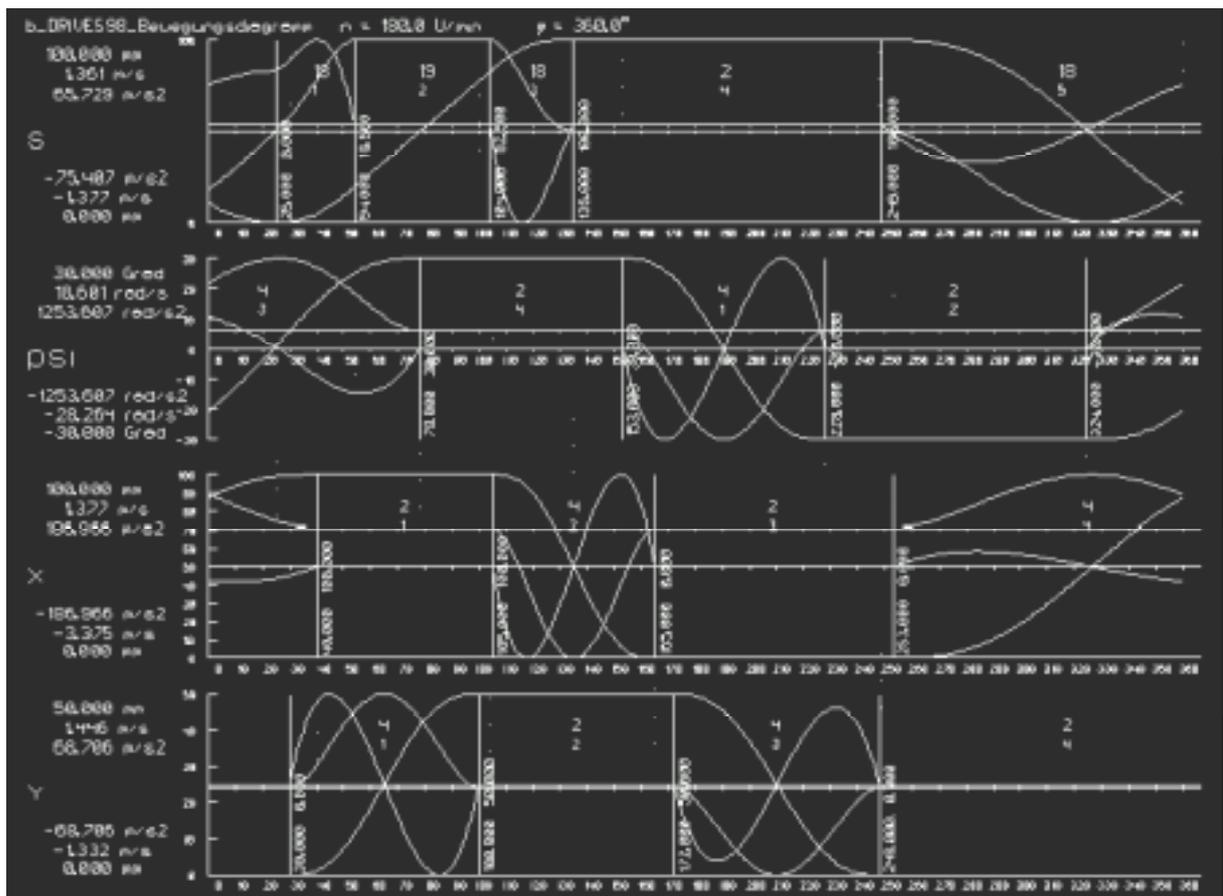


Bild 2: Bewegungsdiagramm

- verallgemeinerte Sinuskombinationen
- Polynome höherer Ordnung
- allgemeine Polynominterpolatoren
- Spline-Funktionen zur Stützpunktinterpolation
- HS-Profile

Für die Dynamik der Maschinen ist es besonders wichtig, daß jeweils die richtigen Bewegungsgesetze ausgewählt werden.

Keinesfalls ist ein einzelnes Bewegungsgesetz für alle Aufgabenstellungen optimal. Es hängt stark von der Aufgabenstellung ab, ob ein Bewegungsgesetz vorteilhaft oder eher schädlich ist.

Wenn man eine Aufgabenstellung nach bestimmten Kriterien klassifiziert, läßt sich ein Anforderungsprofil für die auszuwählenden Bewegungsgesetze aufstellen. Durch Vergleich mit den spezifischen Eigenschaften der Bewegungsgesetze kann man

seine Kandidaten dann systematisch ermitteln. Kriterien, die zur Klassifizierung dienen, sind z.B.:

- Sind große Massen zu bewegen?
- Treten große Feder- oder Gewichtskräfte auf?
- Ist der Mechanismus am Abtrieb schwingungsanfällig bzw. elastisch?
- Tritt nennenswertes Gelenkspiel auf?
- Bietet der Antrieb ausreichend Leistung und Drehmoment?
- Treten Elastizitäten im Antriebsstrang auf?

Da die Bewegungsgesetze unterschiedliche dynamische Eigenschaften haben, läßt sich an Hand dieser Kriterienliste das Bewegungsgesetz auswählen, das am besten zur Charakteristik des Mechanismus paßt.

Die Betrachtung wird nun dadurch verkompliziert, daß in der Regel nicht das einzelne Bewegungsgesetz allein, sondern der gesamte Bewegungsverlauf für eine Achse der Bewertung unterzogen werden muß, d.h. man wählt nicht nur einzelne Bewegungsgesetze aus, sondern immer eine Gesamtauslegung.

Für die Bewertung einer Bewegungsverlaufs-Auslegung sind verschiedene Kriterien zu betrachten und entsprechend dem o.g. Fragenkatalog gegeneinander abzuwägen.

Bild 3: Detailbewertung eines Bewegungsverlaufs

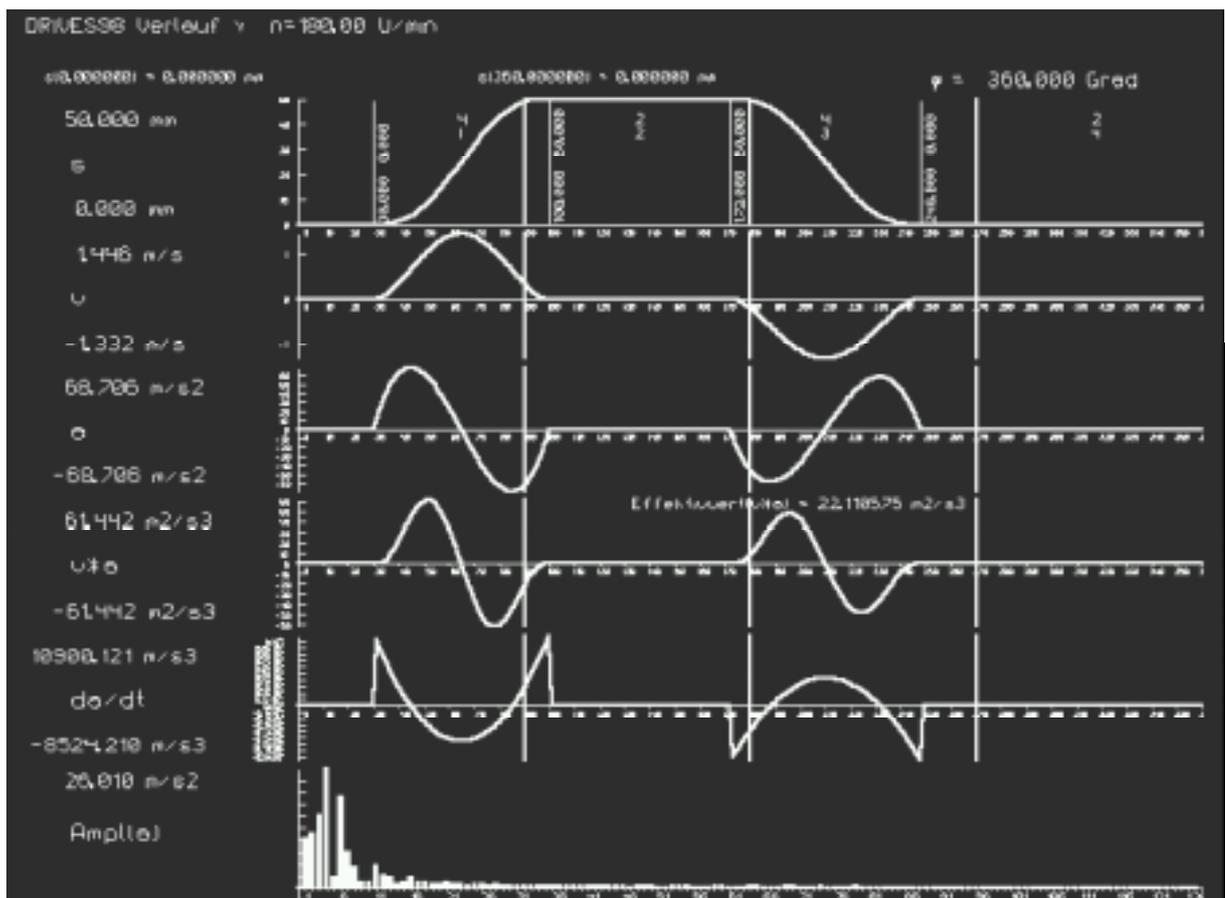


Bild 3 zeigt für einen Bewegungsverlauf aus dem Bewegungsdiagramm eine Detailbewertung mit Verläufen für

- den Weg
- die Geschwindigkeit, die die durch den Servoantrieb vorgegebenen Grenzwerte nicht überschreiten darf und grundsätzlich niedrig zu halten ist
- die Beschleunigung, die möglichst harmonisch gestaltet werden sollte und deren Extremwerte niedrig zu halten sind
- die spezifische Antriebsleistung, die bei der thermischen Auslegung des Servomotors und bei der Betrachtung der Dynamik im Antriebsstrang von Bedeutung ist
- die Ruckfunktion, deren Extrema bei hochdynamischen Aufgaben niedrig zu halten sind
- die Fourieranalyse des Beschleunigungsverlaufs, die Aufschluß darüber gibt, wie stark der Bewegungsverlauf Schwingungen anregt

An Hand der Effektivwerte der Beschleunigung bzw. der Antriebsleistung wird entschieden, ob ein gegebener Servoantrieb für den Dauerbetrieb mit dem geforderten Bewegungsprofil geeignet ist.

Bei der Auslegung von Bewegungen entstehen für jede Bewegungsachse normalerweise mehrere ganz unterschiedliche Vorschläge für Gesamtauslegungen, die untereinander verglichen werden, um die beste Lösung zu erhalten.

4. Simulation und Kollisionskontrolle

Im Prinzip können aus dem so optimierten Bewegungsdiagramm direkt die Stützpunkttabellen für die Servosteuerung erstellt werden (siehe Abschnitt 5). Es sollte allerdings noch ein Zwischenschritt eingelegt werden, der für die Leistung der Maschine von großer Bedeutung ist.

Die einzelnen Werkzeuge sollten mit der für sie vorgesehenen CAD-Geometrie, insbesondere mit allen Kollisionskanten, graphisch simuliert werden.

Zum einen wird so überprüft, ob Kollisionen zwischen zwei Werkzeugen oder einem Werkzeug und dem Gestell bzw. dem Produkt auftreten.

Zum anderen aber kann das Zusammenspiel der Werkzeuge so im Detail optimiert werden. Die Zeiten für die einzelnen Übergänge können mit solchen Simulationen optimal auf die einzelnen Bewegungsachsen verteilt und insgesamt maximiert werden, um höchste Taktzahlen und Verarbeitungsqualitäten zu erzielen.

Eine Momentaufnahme aus einer solchen Simulation zeigt Bild 4.

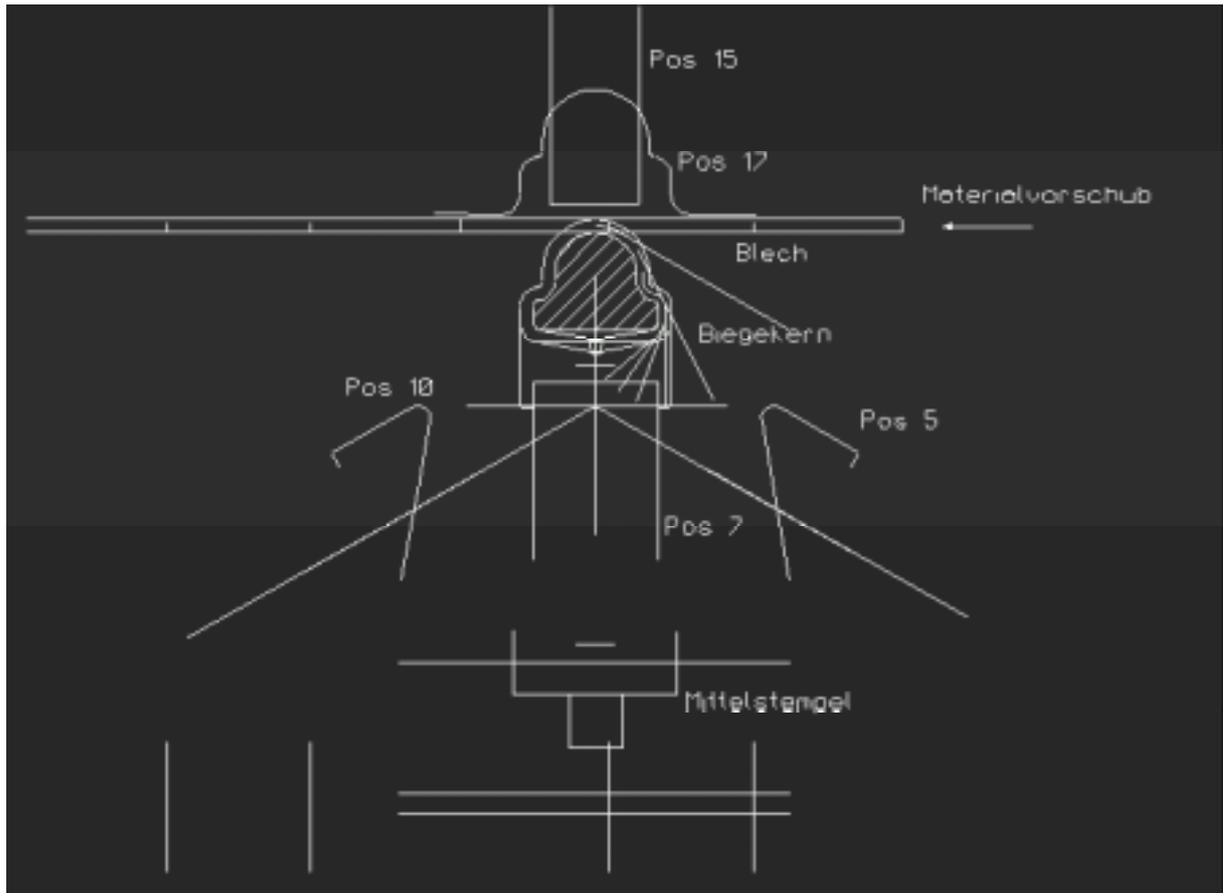


Bild 4: Graphische Simulation und Kollisionsoptimierung

Das Beispiel aus Bild 4 stammt aus dem Bereich Biegen/Stanzen von Metallteilen.

Mit einem Biegeautomaten soll eine Schelle gebogen werden. Das Blech (10 mm breit, 1 mm dick) wird durch den Materialeinzug von einer Endlos-Trommel abgezogen und dann mit einer Stanze in Formstücke von 35 mm Länge zerteilt. Der Materialeinzug wird von einem sechsgliedrigen, die Stanze von einem viergliedrigen Koppelgetriebe bewegt.

Die Blechstücke werden durch den Materialeinzug mittig über dem Biegekern plziert.

Der eigentliche Biegeprozeß wird von fünf Schiebern ausgeführt, die rings um den Biegekern angeordnet sind. Der Biegekern dient als Gegenhalter für das Blech, er gibt dem Blech beim Biegen die endgültige Form.

Die Schieber werden durch Servoachsen angetrieben. Für die praktische Umsetzung der Bewegungsabläufe müssen für alle Achsen Tabellendateien erzeugt werden.

Um das Blech zu einer Schelle zu biegen, muß das Blech zuerst über dem Biegekern stehen. Dann fährt der Schieber „Pos 15“ abwärts vor das Blech und fixiert das

Blech, damit es sich beim Biegen nicht über dem Biegekern verdrehen kann. Der Schieber „Pos 15“ greift quasi vor das Blech, er bewegt sich zwischen dem Betrachter der Zeichnung und dem Blech.

Anschließend fährt der Schieber „Pos 17“ abwärts, um den ersten Biegevorgang durchzuführen.

Damit der relativ schwache Biegekern unter dem Druck des Biegewerkzeugs „Pos 17“ nicht abgebrochen wird, muß der Schieber „Pos 7“ zur Unterstützung direkt unter dem Biegekern stehen, während die Verformung stattfindet.

Anschließend zieht sich „Pos 7“ nach unten zurück, und die beiden Schieber „Pos 5“ und „Pos 10“ stoßen zeitlich kurz nacheinander vor, um die noch nach unten stehenden Laschen des Blechs unter den Biegekern zu drücken und die Schelle damit zu schließen.

Das Blech wird beim Stanzen auf der einen Seite mit einer Lasche, auf der anderen mit einer Einbuchtung (wie bei einem Puzzle-Teil) versehen, so daß nach dem Schließen der Schelle ein sicherer Kontakt besteht. Wegen dieses Formschlusses dürfen die beiden Schieber „Pos 5“ und „Pos 10“ nicht zeitgleich biegen.

Da Metall nicht nur plastisch, sondern zu einem gewissen Anteil auch elastisch verformt wird und somit zurückfedert, wenn sich die Schieber „Pos 5“ und „Pos 10“ jetzt zurückziehen, muß Schieber „Pos 7“ noch einmal zum Biegekern zurückkehren und die Schelle kurz andrücken.

Anschließend ziehen sich alle Biegewerkzeuge zurück, und von hinten stößt der Mittelstempel die fertig gebogene Schelle aus, so daß das Spiel mit dem nächsten Blechstreifen erneut beginnen kann.

Mit der graphischen Simulation können diese Bewegungsabläufe - also das Bewegungsdiagramm - so optimiert werden, daß alle Teilbewegungen möglichst eng aufeinanderfolgen und keine Zeit „verschwendet“ wird. Damit kann eine höchstmögliche Ausbringung des Biegeautomaten erzielt werden.

5. Realisierung der Bewegungsverläufe

Abschließend werden die auch graphisch optimierten Bewegungsverläufe an den Werkzeugen über die ggf. zwischen den Werkzeugen und den Antrieben liegenden Mechanismen auf die Antriebsachsen umgerechnet. Wenn die Servoachsen diese umgerechneten Bewegungsverläufe realisieren, so führen die Werkzeuge genau die im Bewegungsdiagramm vorgesehenen Bewegungen aus.

Da die Verzerrungen durch die nichtlinear übersetzenden Mechanismen erheblich sein können, und da die graphische Optimierung des Bewegungsdiagramms gerade darauf hinausläuft, sich möglichst nah an die möglichen Kollisionen heranzutasten, kann auf eine exakte Rückrechnung nicht verzichtet werden.

Für die so reduzierten Bewegungsverläufe werden nun steuerungsspezifisch mit Hilfe geeigneter Software Stützpunktdateien erzeugt.

Die verschiedenen Steuerungen interpolieren Stützpunkttabellen auf sehr unterschiedliche Weise:

a) Vorgabe von Stützpunkten im Lageregeltakt

Bei jedem Zyklus greift der Lageregler aus der Tabelle einen neuen Sollwert. Problematisch dabei ist, daß für jede Drehzahl (also auch für die verschiedenen Phasen des Hochlaufens der Maschine) neue Tabellendateien mit unterschiedlichen Stützpunktzahlen erzeugt werden müssen, da eine Bewegungsperiode je nach Drehzahl aus unterschiedlich vielen Lageregler-Zyklen besteht.

b) Lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten

Hier können sich Probleme ergeben, wenn die Antriebe sehr langsam laufen. Die Steuerung versucht dann, die Ecken im Weg-Zeit-Polygon exakt nachzufahren. Diese - wenn auch kleinen - Stöße erzeugen Schwingungen im nachgeschalteten mechanischen System.

c) Kubische Interpolation zwischen den Stützpunkten

d) Verwendung höherer Polynome zur Interpolation

Je höher die Art der Interpolation ist, desto weniger Stützpunkte werden im Durchschnitt benötigt, um ein gewünschtes Bewegungsprofil mit hinreichender Genauigkeit abzubilden.

6. Schrifttum

/1/ VDI-Richtlinie 2143, Oktober 1980

/2/ Nolte, R.: „Auslegen und Optimieren von Servoantrieben“. Maschinenmarkt, Würzburg 101 (1995) 47, S. 56ff