

Warum Bewegungsdesign wichtig ist

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

1. Ein Vergleich zum Einstieg

Haben Sie schon einmal ein Formel 1-Rennen im Fernsehen gesehen?

Für Ingenieure und Elektrotechniker ist das ein faszinierender Sport. Es gibt etliche Parallelen zum Maschinenbau.

Es wird auf mehreren Ebenen hart gekämpft.

Es zählen die Technik und das Können der Fahrer.

Es geht um viel Geld.

Die Teams betreiben großen Aufwand, um die Rundenzeiten zu verbessern.

Kleine Performance-Unterschiede geben den Ausschlag, wer die vorderen Plätze belegt und den Großteil der Prämien kassiert.

Mich erinnert das immer an die klassische Situation im Maschinenbau, wenn das Team, also ALLE aus der Technik, die Maschinen optimieren, um der Konkurrenz auf dem Markt den entscheidenden Schritt voraus zu sein.

Zu verbessern gibt es in der Technik immer etwas. In der Totalen und mit normaler Geschwindigkeit sieht es aus, als lägen die Wagen brethart auf der Straße und führen wie auf Schienen. Aber in Zeitlupe und Großaufnahme sieht man, wie sich die Karosserien und die Radaufhängungen winden und schütteln. Diese Schwingungen bedeuten, dass der Kontakt zur Straße noch nicht optimal sein kann, dass man immer noch feilen kann.

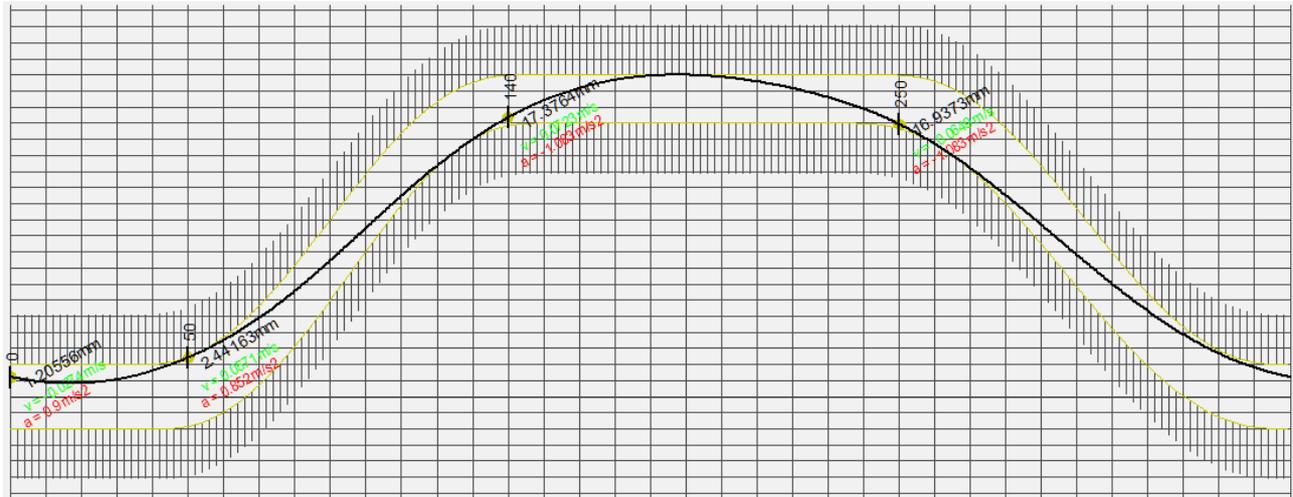
Steht der Wagen dann auf dem Rennkurs, versucht der Fahrer, alles aus ihm herauszuholen. Er sucht die Linie mit der kürzesten Rundenzeit. Möglichst viel Gas geben und nicht bremsen. Wer immer schön in der Mitte des Rennkurses fährt, verliert sofort. Wer am konsequentesten über die „curbs räubert“, ohne die Strecke zu verlassen, also Toleranzen ausnutzt, und gleichzeitig schonend mit dem Material umgeht, gewinnt.

Für Maschinen mit Kurven oder Servoantrieben läuft das genauso: wer den dynamisch besten Bewegungsablauf findet, die besten Bewegungen „designt“, holt aus der Maschinenkonstruktion die höchste Performance und die höchste Lebensdauer heraus.

Das wichtigste dabei: Bewegungsdesign macht Maschinen nicht teurer, nur schneller und langlebiger! Wer Bewegungsdesign auslässt, verschenkt Performance.

Betrachten Sie das folgende Bild! Sehen Sie die „Straße“, den „Rennkurs“ aus Minimal- und Maximalverlauf? Das als dickere schwarze Kurve dargestellte Bewegungsdiagramm

wurde numerisch so optimiert, dass es den Toleranzschlauch mit möglichst kleinen Maximalbeschleunigungen einhält.



2. Einleitung

Bewegungsdesign ist die Planung und Feingestaltung von Bewegungen in Maschinen.

Bewegungsdesign macht Maschinen schneller, leiser, Energie sparender und verfügbarer, bei gleichen Herstellkosten.

Bewegungsdesign geht dabei sehr weit über die einfache Anwendung festgelegter Bewegungsgesetze (z.B. Polynom 5. Grades oder Modifizierte Sinuslinie) hinaus.

Mit "Bewegungsdesign" ist vielmehr ein umfassender Optimierungsprozess gemeint, in dem die Bewegungen im Detail so gestaltet werden, dass gesteckte Optimierungsziele bestmöglich erreicht werden. Insbesondere wird auch die charakteristische Form eines Bewegungsgesetzes umgestaltet, wenn es von Vorteil ist. Und wir optimieren Bewegungen auch mit numerischen Methoden, wenn es drauf ankommt.

Typisch ist die Optimierung auf hohe erreichbare Taktzahlen hin, häufig sind aber auch die Baugrößen von Servomotoren, Getrieben und Umrichtern, die Lebensdauern von Kurven und Rollen oder die dynamischen Gestellkräfte im Fokus der Optimierung. Auch Kombinationen von Kriterien sind möglich.

Je besser das Bewegungsdesign, desto leistungsfähiger die Maschinen. Und in der Konkurrenzsituation kommt es eben gerade auf die letzten Prozentpunkte an, um den Auftrag für sich zu gewinnen. Das gilt gleichermaßen für klassisch kurvengesteuerte Anlagen wie auch für flexible Konzepte mit Servosteuerungen.

Bewegungsdesign trägt eine neue Qualität in Ihre Maschinen hinein und bringt sie auf das nächste Level.

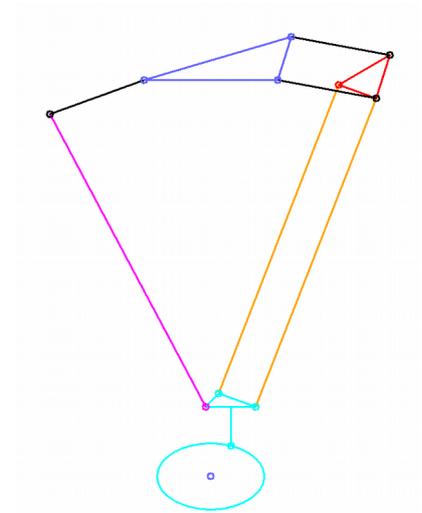
Bewegungsdesign ist ein Muss für Hersteller von Maschinen, bei denen Taktzahl, Laufruhe, Reproduzierbarkeit und Verfügbarkeit eine Rolle spielen.

3. Beispiele

Praxisbeispiel 1:

Delta-Roboter für Pick & Place oder Führungsbewegungen

- Vorgabe der Bahnkurve mit Überschneidungen in X / Y
- Berücksichtigung der Nichtlinearität des Mechanismus
- Optimierung der Beschleunigungen und der Belastung beider Motor-Getriebe-Kombinationen



Ziele:

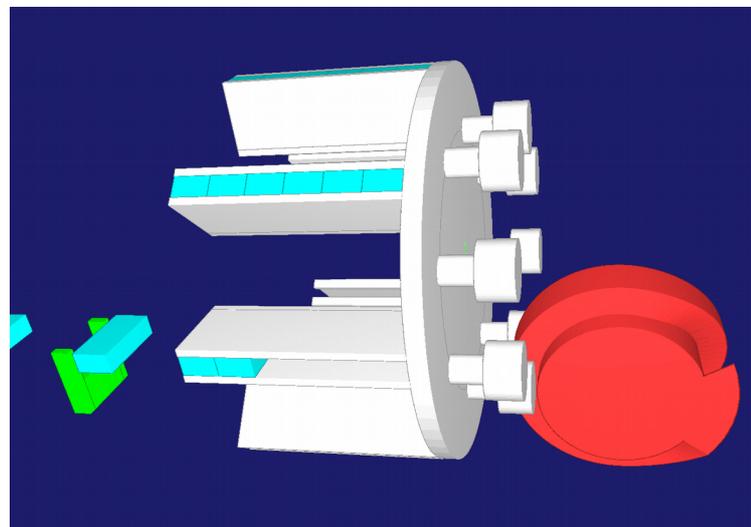
- Bestmögliche Ausnutzung der Antriebe
- Taktzahl maximieren
- Schwingungen am Greifer vermeiden durch weiche Bewegungen

Praxisbeispiel 2:

Sammelscheibe mit Eintaktrechen in einer Verpackungsmaschine

Ein Servomotor mit Getriebe treibt eine mechanische Schaltkurve an, die eine Sammelscheibe schaltet. Ein Rechen (als grüner Finger dargestellt) schiebt Einzelartikel in die Sammelscheibe ein. Zwischen zwei Einzelartikeln dreht die Sammelscheibe eine Teilung weiter.

Für die Schaltbewegung sind nur 45 Millisekunden Zeit vorgesehen!

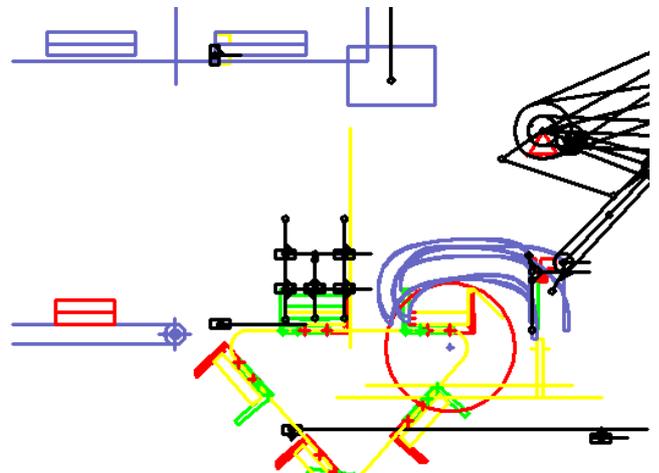


Durch die Kombination von Servo und mechanischer Kurve werden die Antriebsbelastungen aus Eigenträgheiten (Motor+Getriebe) und Lastträgheit (Sammelscheibe) entzerrt, so dass die Taktzahl gesteigert werden kann. Beschleunigungen, Kräfte und Momente werden durch Simulation und Kollisionsbetrachtung verringert.

Praxisbeispiel 3:

Einrichtung zum Stapeln von Büchern

- 10 synchrone Servoachsen
- Große Format- und Optionsvielfalt
- Optimale Bewegungsgestaltung mit ruckfreien Bewegungsgesetzen für alle Formatvarianten mit Berücksichtigung von Kollisionen



Ziele:

- Taktzahl maximieren für alle Formate
- optimale Ausnutzung der Mechanik für alle Formate

Anmerkung: Diese Animation haben wir schon 1998 erstellt.

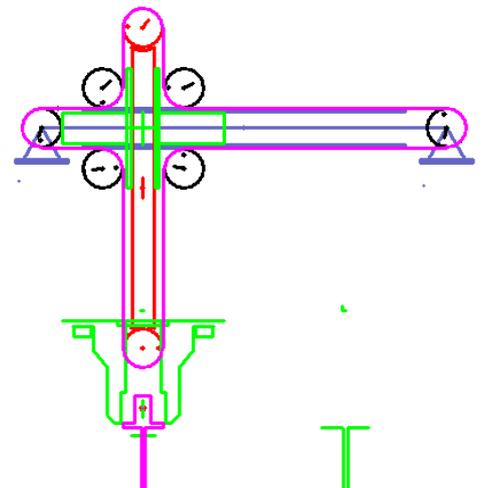
Praxisbeispiel 4:

Pick & Place mit 2 gestellfesten Servoantrieben und Riementrieb

Eine Gantry-Kinematik mit zwei gestellfesten Antrieben und Riemen bewegt einen Greifer, der Bauteile zu greift und montiert.

Schwingungen durch die Elastizität des Riemens und der lamellenartigen Artikel selbst würden das Einsetzen der Artikel behindern.

Speziell gestaltete, weiche Bewegungen verringern die Schwingungsanregung und erlauben höhere Taktzahlen.



Praxisbeispiel 5:

Bändertransport für Schokoriegel

Schokoriegel werden mit Servobändern aus einer Gießmaschine an die nachfolgende Verpackungsmaschine gegeben. Gleichzeitig werden die Schokoriegel durch Versatzbewegungen auf konstanten Abstand gebracht.



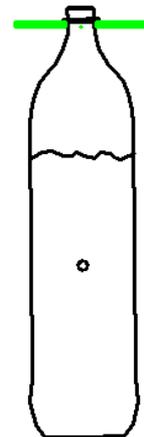
Bei den geforderten Taktzahlen müssen die Beschleunigungen der Servobänder minimiert werden, damit die Artikel wegen der geringen Reibung der Transportbänder nicht verrutschen.

Praxisbeispiel 6:

Anti-Schwappbewegung beim Transport von Flüssigkeiten

Artikeltransport mit Servo und Kette in einer Abfüllmaschine (Becher oder Flaschen).

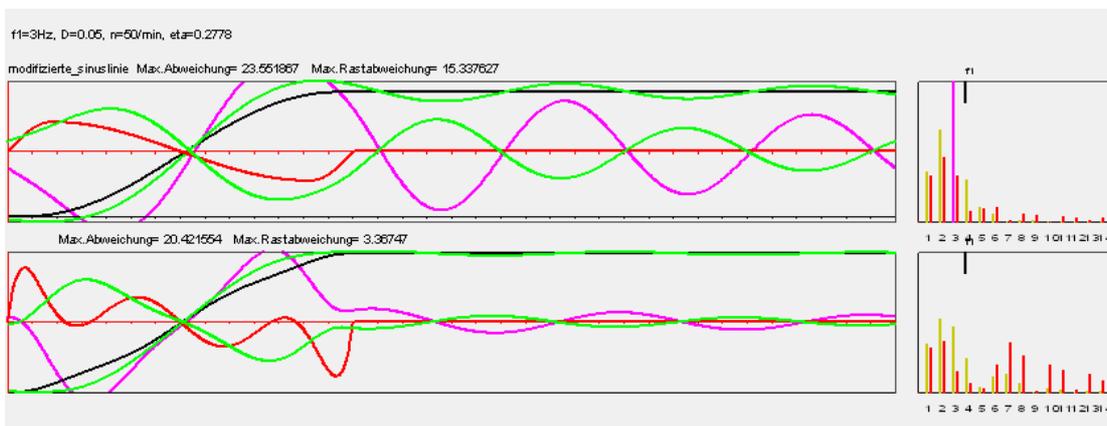
Ansatz 1 mit konventioneller Bewegungsgestaltung (z.B. Modifizierter Sinus oder Polynom 5. Grades): Die Behälter selbst schwingen, bzw. die Flüssigkeit in den Behältern schwapp mit sehr niedriger Eigenfrequenz.



Problem:

Mit "normalen" Bewegungen (ruckfrei, Polynom 5. Grades oder ähnliches) können die Eigenschwingungen nicht ausreichend reduziert werden.

Ansatz 2: Durch zwei spezielle Verfahren der Bewegungsgestaltung für sehr niedrige Eigenfrequenzen können wir die resultierenden Schwingungen weitgehend bzw. vollständig eliminieren.



dargestellt, magentafarben die Reaktion des Schwappguts. Die Amplitude der nachwirkenden Schwingung in der Rast ist schon um fast 80% zurückgegangen.

Mit einem von uns entwickelten weiteren Verfahren, das auch Dämpfungen berücksichtigt, können wir auch diese Restschwingungen noch eliminieren.

Durch den speziellen Ansatz kann das Nachschwingen der Flaschen bzw. der Flüssigkeit mit der Eigenfrequenz unterbunden werden.

4. Bewegungsdesign

Die optimale Bewegungsgestaltung hängt sehr stark von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Generell werden Kurven und Servoantriebe dynamisch auf möglichst große Leistung hin optimiert. Leistung bedeutet

- hohe Taktzahl
- geringer Verschleiß
- präzise Verarbeitung des Produkts
- ruhiger Lauf

In der Regel bedingt die Optimierung eines dieser vier Kriterien die Verbesserung der anderen drei. Bewegungsoptimierung bedeutet, für folgende und eventuell weitere Kriterien den bestmöglichen Kompromiß zu finden:

- Beschleunigungsmaxima am Abtrieb
- Beschleunigungsverlauf am Abtrieb
- Ruckfunktion am Abtrieb
- Schwingungsanregung
- Maximales Antriebsmoment
- Verlauf des dynamischen Antriebsmoments
- Effektives Antriebsmoment
- Gestellkräfte
- Kurvenlebensdauer
- Rollenlebensdauer
- Energieumsatz

Es gibt kein absolut bestes Bewegungsgesetz und keine absolut beste Bewegungsauslegung. Die Güte einer Bewegungsauslegung kann nur in Bezug auf einen bestimmten Mechanismus mit bestimmten dynamischen Eigenschaften bewertet werden. Für den festliegenden Mechanismus muß also festgelegt werden, wie die einzelnen Bewertungskriterien im Rahmen der Bewegungsoptimierung gewichtet werden sollten. Für diese Gewichtung ist oft eine gewisse Erfahrung mit den dynamischen Eigenschaften der eigenen Maschinen und mit Bewegungsoptimierung im allgemeinen hilfreich.

Wir optimieren Bewegungen insbesondere mit folgenden Maßnahmen:

- Bewegungsgesetzwahl und -gestaltung
- Wendepunktverschiebung

- Randwertanpassung
- Bereichserweiterung
- Gestaltung allgemeiner Sinuskombinationen
- Gestaltung allgemeiner Polynome
- Gestaltung allgemeiner Polynomsplines
- Gestaltung und Optimierung von HS-Profilen
- dynamisch ausgewogene Verteilung der Übergangszeiten
- Kollisionsoptimierung
- numerische Optimierung der Bewegungsdiagramm-Parameter

Durch die geeignete Bewegungsgesetz Auswahl schafft man die Grundlage für die Optimierung, weil die einzelnen Bewegungsgesetze von sich aus unterschiedliche Gewichtungen in den Einzelbewertungskriterien setzen. Dabei kann auch die charakteristische Form des Bewegungsgesetzes verändert oder völlig neu gestaltet werden, wenn es von Vorteil ist.

Die Wendepunktverschiebung betont Start bzw. Ende einer Bewegung und verlagert das Innere des Übergangs zeitlich vor oder zurück.

Mit Randwertanpassungen werden Geschwindigkeit, Beschleunigung und ggf. weitere Ableitungen in den Übergangspunkten zwischen den Abschnitten stetig gehalten.

Allgemeine Sinuskombinationen, allgemeine Polynome, allgemeine Polynomsplines und HS-Profile sind jeweils sehr leistungsfähige Ansätze zur Anpassung der Bewegungen an die dynamischen Eigenschaften der Mechanismen. Mit diesen Methoden holt man die entscheidenden Prozente an Performance heraus!

Die Bereichserweiterung (auch "Hubzeit-Verlängerung" genannt) verlängert Bewegungsabschnitte zeitlich über den theoretisch vorgesehenen Zeitrahmen hinaus, so dass konkurrierende Bewegungen sich im Rahmen vorgegebener Toleranzen überlappen.

Wichtig ist, die voneinander abhängigen Bewegungsabschnitte zeitlich so zu verteilen, dass alle Einzelmechanismen ("Achsen") im Vergleich und jeder Einzelmechanismus über den Zyklus hinweg dynamisch gleichwertig belastet ist. Die Belastungen sollten insgesamt ausgewogen verteilt sein. Das klingt banal, aber man benötigt eine leistungsfähige Mechanismensoftware, um die Verteilung der Lasten über der Zeit und über die Achsen prüfen zu können. Die Verteilung zu schätzen, ist praktisch unmöglich. Bewegungspläne, die nur nach der Erfahrung der Konstrukteure aufgestellt wurden, sind in der Praxis oft weit entfernt von der Ausgewogenheit. In solchen Fällen gibt es immer viel Potenzial, die Taktzahl mit einfachen Maßnahmen zu steigern.

Die Kollisionsoptimierung ist ein sehr effektives Mittel zur Bewegungsoptimierung. Kollisionsoptimierung bedeutet dynamische Optimierung mit Kollisionskontrolle. Parallel zur Optimierung des Bewegungsdiagramms wird der daraus entstehende Bewegungsablauf grafisch simuliert. Man versucht, die Kollisionen im Bewegungsablauf so knapp wie zulässig zu vermeiden, und dabei die dynamischen Belastungen gleichmäßig auf alle Einzelantriebe zu verteilen. Letztlich sollten alle Einzelantriebe die gleiche maximale Taktzahl erreichen.

Die Kollisionsoptimierung ist sehr wirkungsvoll bei gleichzeitig niedrigem Aufwand. Sie hat für den Maschinenentwickler quasi ein optimales Preis-Leistungs-Verhältnis. Bewegungspläne können mit der Software Optimus Motus parametrisch aufgebaut werden, und die Parameter können mit numerischen Verfahren auf beliebige Zielfunktionen hin numerisch optimiert werden. Das ist die ultimative Art der Bewegungsoptimierung.

Bewegungsdesign ist ein ganzheitliches Vorgehen zur dynamisch günstigen Gestaltung von Bewegungsdiagrammen. Ziel ist die optimale Ausnutzung der Mechanismen und der Antriebe, um möglichst hohe Performance zu erreichen.

5. HS-Profil

HS-Profile bezeichnen eine spezielle Art der Bewegungsgestaltung für periodisch arbeitende Mechanismen mit Kurven. „HS“ steht für „**H**armonische **S**ynthese“ und bedeutet, dass Bewegungen als Fourierreihe, durch Überlagerung von Sinusfunktionen mit jeweiligen Amplituden und Phasenverschiebungen gestaltet werden. HS-Profile werden besonders für schnell laufende „**H**igh-**S**peed“-Mechanismen verwendet, die für Eigenschwingungen anfällig sind.

HS-Profile beziehen sich auf den gesamten Bewegungszyklus der periodisch arbeitenden Maschine, nicht auf einen einzelnen Bewegungsabschnitt.

Bei der Berechnung von Kurven wird die gewünschte Bewegung meist am Abtrieb vorgegeben. Die Kurvenprofile werden daraus rein kinematisch berechnet, ohne Berücksichtigung von Elastizitäten.

Mechanismen sind aber in Wirklichkeit immer elastisch. Der kinematischen Grundbewegung sind deshalb immer Eigenschwingungen überlagert. Oft ändern sich die Eigenfrequenzen während eines Umlaufs nur wenig und können als konstant betrachtet werden. Bei entsprechend hoher Taktzahl bzw. hohem Abstimmungsverhältnis $\eta = \text{Taktzahl/Eigenfrequenz}$ werden die überlagerten Eigenschwingungen so groß, dass die Funktion des Mechanismus beeinträchtigt wird.

Es ist nicht möglich, eine feste Grenze für das zulässige Abstimmungsverhältnis anzugeben, bis zu der die überlagerten Eigenschwingungen unbedenklich sind, weil die Anregung der Eigenschwingungen sehr von der Bewegungsgestaltung abhängt und die Genauigkeitsanforderungen unterschiedlich sind. Man kann die überlagerten Eigenschwingungen aber grob mit Hilfe von Einmassenschwingermodellen abschätzen oder genauer durch Simulation mit MKS-Programmen ermitteln.

Ziel beim Einsatz eines HS-Profiles ist, die dynamischen Abweichungen von der gewollten Bewegung bei Betriebsdrehzahl zu minimieren.

Die Idee besteht darin, den Mechanismus im Bereich der Eigenfrequenzen möglichst wenig anzuregen, da eine Anregung in diesem Bereich die kinematisch vorgegebene

Bewegung besonders stark verfälscht. Deshalb wird die Bewegung aus wenigen Harmonischen zusammengesetzt, deren höchste Frequenz deutlich unter der niedrigsten Eigenfrequenz des Mechanismus bleibt. Die k-te Harmonische ist dabei eine Sinusfunktion mit der Frequenz $k \cdot$ Taktzahl.

Die resultierende Bewegung am Abtrieb setzt sich aus der anregenden Bewegung der Kurve und den überlagerten Eigenschwingungen zusammen. Diese resultierende Bewegung soll bei Betriebsdrehzahl so nah wie möglich an der für den Abtrieb gewünschten Bewegung liegen.

Folgende zwei Ansätze sind bei der Anwendung von HS-Profilen besonders bedeutsam:

Ansatz 1:

Vorgabe eines Bewegungsdiagramms und Verwendung der ersten N Harmonischen aus der Fourieranalyse:

$s(\varphi)$ = vorgegebene Bewegung mit Periodenlänge 2π

Darstellung als unendliche Fourierreihe:

$$s(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(k \cdot \varphi) + b_n \cdot \sin(k \cdot \varphi)]$$

Die Fourierkoeffizienten a_k und b_k , die zusammen Amplitude und Phase einer Harmonischen k definieren, sind mit Hilfe der Fourieranalyse aus dem vorgegebenen Bewegungsverlauf $s(\varphi)$ berechenbar:

$$a_k = 1/\pi \cdot \int_0^{2\pi} s(x) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot dx$$

$$b_k = 1/\pi \cdot \int_0^{2\pi} s(x) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot dx$$

Die Amplitude A_n der k . Harmonischen ist berechenbar durch

$$A_k^2 = a_k^2 + b_k^2$$

Die Phasenverschiebung φ_k der k . Harmonischen ist bestimmt durch

$$\tan(\varphi_k) = a_k / b_k$$

Das HS-Profil $s^*(\varphi)$ ergibt sich als Summe der ersten N Harmonischen:

$$s^*(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^N [a_n \cdot \cos(k \cdot \varphi) + b_n \cdot \sin(k \cdot \varphi)]$$

Die Anzahl N zu berücksichtigender Harmonischer kann so gewählt werden, dass die Abweichung der resultierenden Bewegung am Abtrieb von der gewünschten Bewegung minimal wird.

Bei zu wenigen Harmonischen ist die kinematische Abweichung durch das HS-Profil sehr groß, so dass der Mechanismus schon bei kleiner Taktzahl nicht funktioniert.

Bei zu vielen Harmonischen facht man schon die Eigenschwingungen an.

Ansatz 2:

Vorgabe von Toleranzschläuchen für die resultierende Bewegung am Abtrieb und numerische Ermittlung des HS-Profiles:

Bei dieser Technik gibt man Toleranzkanäle vor, die sowohl von der kinematischen Bewegungsvorgabe (der Anregung) als auch von der auf Basis eines Einmassenschwinger-Modells abgeschätzten Reaktion am Abtrieb eingehalten werden sollen.

Ein numerisches Verfahren [1] sucht ein HS-Profil mit einer vorgegebenen Zahl von Harmonischen, das diese Toleranzkanäle einhält und außerdem eine lineare Zielfunktion optimiert, beispielsweise die Summe der Amplituden der Harmonischen.

So benötigt man meist nur sehr wenige Harmonische, um mit Anregung und Reaktion die Toleranzkanäle einzuhalten.

6. Fazit

Bewegungsdesign

- macht Maschinen schneller
- vermeidet Ausfallzeiten durch Verringerung störender Schwingungen
- verlängert die Lebensdauer
- ermöglicht kleinere und günstigere Antriebe
- spart Energie

bei klassisch kurvengesteuerten Maschinen und genauso auch bei flexiblen Konzepten mit Servoantrieben.

Bewegungsdesign steigert die Performance überall dort, wo Massen beschleunigt werden!

Man kann die Methoden des Bewegungsdesign auch gut in SPS-Projekten nutzen!
Sie sind dann aber frühzeitig einzubeziehen.

7. Literatur

[1] Lüder, R.: „Zur Synthese periodischer Bewegungsgesetze von Mechanismen unter Berücksichtigung von Elastizität und Spiel“. VDI Reihe 11, Nr. 225. Düsseldorf. VDI Verlag (1995) ISBN 3-18-322511-5