

Dynamische Auslegung elektronischer Kurven

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

Design of electronic cams for optimal dynamics

To design smooth cam profiles for fast and accurate motions in machines and to select the best motor-gear combinations you need a powerful development tool. An intelligent motion editor helps to design problem-specific, harmonic, jerk-free motions with minimal user input. Knowledge-based algorithms generate high-speed cam profiles automatically. Many tasks in motion optimization are done by the software:

- *consistency and collision check for synchronized motions*
- *numeric optimization of parameters of the laws of motion*
- *manual and automatic selection of best-suited motor-gear-combinations from an electronic device catalogue*
- *automatic collision optimization*

Optimized cam design – fast smooth motions – automatic motor/gear selection

1. Einleitung

Elektronische Kurven gehören heute wie mechanische Kurven, Schrittgetriebe und Koppelmechanismen zum Repertoire der Entwickler von Verarbeitungsmaschinen. Um elektronische Kurven zu betreiben, müssen Bewegungsprofile berechnet und in Form von Stützpunkttabellen oder Parametersätzen an die Servosteuerung übertragen werden.

Wie bei mechanischen Kurven ist die harmonische Gestaltung der Bewegungsabläufe auch bei elektronischen Kurven wichtig, um hohe Leistungen bei geringem Verschleiß, geringem Energieverbrauch und hoher Laufruhe zu erzielen, da die leistungsbegrenzende Physik in beiden Fällen sehr ähnlich ist.

Um Servoantriebe bei aller Flexibilität auch mit hohen Taktleistungen zu betreiben, ist ein leistungsfähiges Software-Werkzeug zur harmonischen, schwingungshemmenden Gestaltung von Bewegungsprofilen erforderlich. Diese Software sollte auch die detaillierte Auslegung der Motor-Getriebe-Kombination im Antriebsstrang durchführen, da die Motoren und Getriebe bei hochdynamischen Anwendungen sehr genau zur Bewegungsaufgabe passen müssen, wenn keine Leistungsreserven verschenkt werden sollen.

Im Wettbewerb der Maschinenentwickler kommt es oft gerade auf diese Leistungsreserven an, da sie über den Markterfolg mitentscheiden. Die erreichbare Taktzahl ist für den Verkauf einer Maschine immer noch eines der Hauptargumente.

2. Verbreitete Standardlösungen

Zur Beschreibung von Bewegungsdiagrammen mit elektronischen Kurven werden oft sehr einfache Editoren angeboten, über die eine Folge von Stützpunkten zur linearen oder kubischen Interpolation oder auch eine Folge von Bewegungsabschnitten mit einfachen Bewegungsgesetzen definiert werden kann. Diese Editoren dienen hauptsächlich zur Implementierung bereits ausgelegter Bewegungsabläufe in der Servosteuerung.

Über Stützpunkttafeln oder Splines können Bewegungsverläufe sehr gut dargestellt, aber nur sehr umständlich optimiert werden. Verschiebt man einzelne Stützpunkte im Rahmen einer Optimierung manuell, so entstehen in der Regel sehr wellige, unruhig laufende Bewegungsabläufe. Bereits kleine Ungenauigkeiten im Hundertstelbereich sorgen für erhebliche Beschleunigungsspitzen und damit für Schwingungen. Einfache Bewegungsgesetze (Polynom 5. Ordnung, geneigte Sinuslinie usw.) erlauben zwar Ruckfreiheit, stellen aber nur einen ersten Schritt im Hinblick auf die harmonische, schwingungsarme Bewegungsgestaltung dar.

Das Einbeziehen der Ruckfunktion, das problemspezifische Design von Beschleunigungs- und Leistungsverläufen, Bereichserweiterungen, Randwertanpassungen und Kollisionsoptimierungen ergeben ein erheblich größeres Optimierungspotential für Bewegungsauslegungen. Bei gleichen äußeren Randbedingungen, aber feinerer Bewegungsgestaltung, können elektronische Kurven mit deutlich höherer Taktleistung betrieben werden.

3. Neue Lösungsansätze am Beispiel eines intelligenten Bewegungsplaneditors

An Hand eines existierenden Bewegungsplaneditors zur Auslegung harmonischer Bewegungsabläufe für Servoantriebe, zur Bewegungsoptimierung nach dynamischen Gesichtspunkten und zur Auswahl von Motoren und Getrieben für eine Bewegungsaufgabe soll gezeigt werden, mit welchen Techniken der Entwickler von Bewegungsabläufen unterstützt werden kann.

Dieser Bewegungsplaneditor nimmt dem Anwender durch neue Automatismen und intelligente Algorithmen viele Fleißaufgaben ab. Das hat zwei wesentliche Vorteile:

- a) versierte Anwender sparen sehr viel Zeit
- b) ungeübte Anwender erhalten von der Software Unterstützung bei der fachgerechten Gestaltung von Bewegungsabläufen

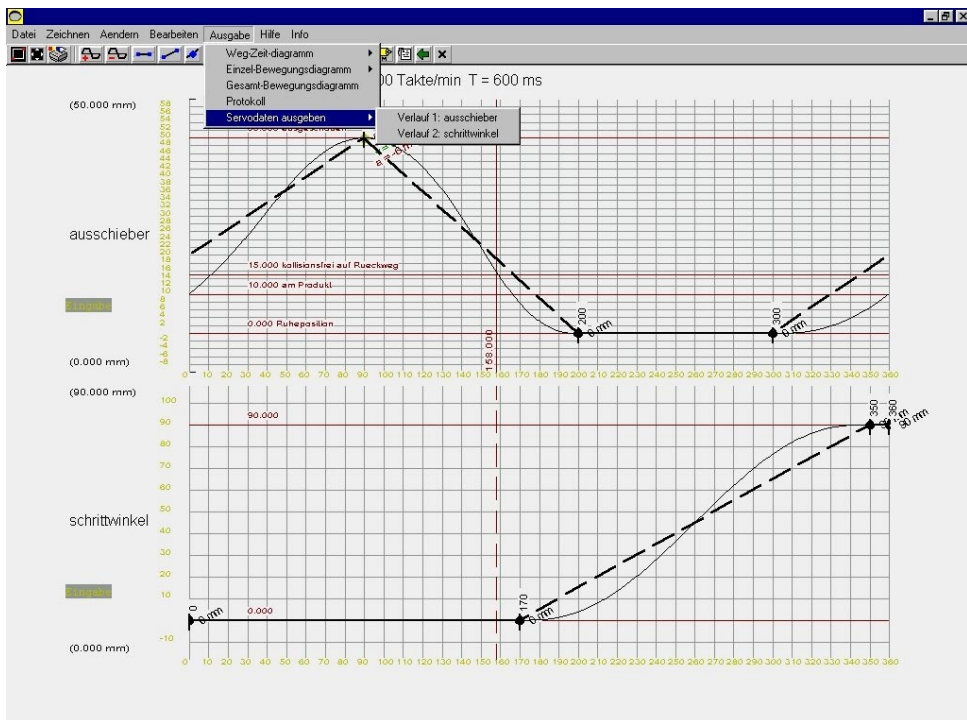


Bild 1: intelligenter Bewegungsplaneditor

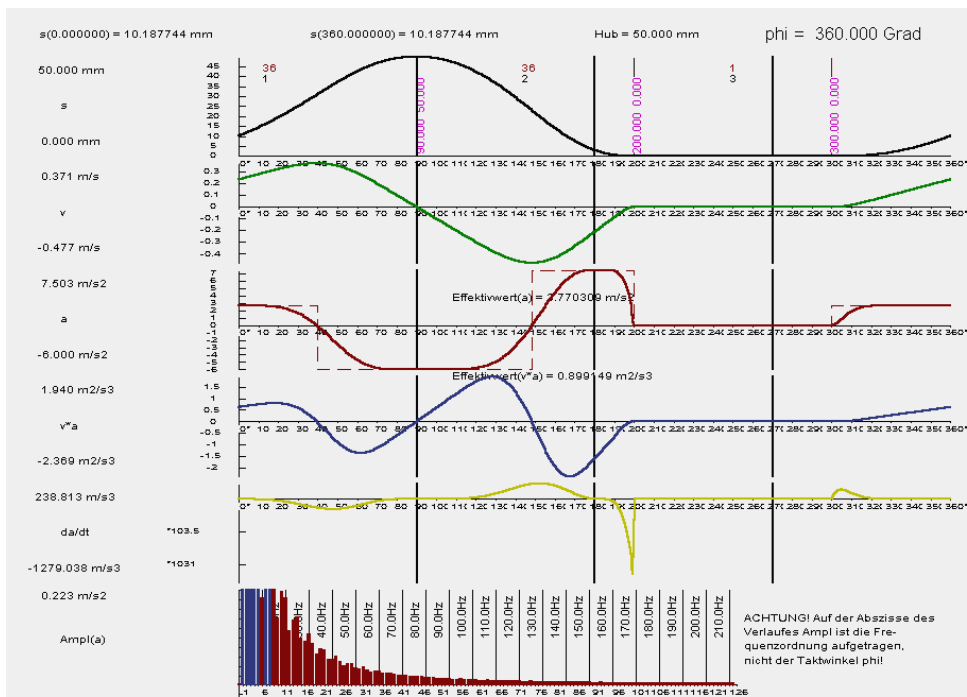


Bild 2: Detailauswertung mit Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung (rot), Momentenverlauf, Ruckfunktion, Fourieranalyse

3.1. Überprüfung und Erhalt der Konsistenz der Bewegungsdiagramme

Der Bewegungsplaneditor stellt sicher, daß die Bewegungsabläufe auch bei komplizierten Bewegungsabläufen stoß- und ruckfrei bleiben und daß kurventechnisch sinnvolle Bewegungsgesetzfolgen entstehen.

Dazu wird der Bewegungsplan bei jeder Änderung einer Konsistenzprüfung unterzogen und automatisch bereinigt.

3.2. Vollautomatische Auswahl und Parameteroptimierung ruckfreier Bewegungsgesetze

Die Software schlägt automatisch eine Folge ruckfreier Bewegungsgesetze mit optimierten Parametern vor, um einen Bewegungsplan in ein konkretes Bewegungsdiagramm zu überführen, und zeigt den resultierenden Bewegungsverlauf online an.

Ein Bewegungsplan ist dabei eine Abfolge von Stillstandsbereichen, Bereichen konstanter Abtriebsgeschwindigkeit, Einzelstützpunkten und tabellarisch vorgegebenen Bewegungsabschnitten.

Freie Bewegungsgesetzparameter (z.B. Randgeschwindigkeiten und – beschleunigungen) werden nach einem speziellen Algorithmus numerisch optimiert. Dieser Algorithmus implementiert die Grundsätze der Beschleunigungsoptimierung, wie sie auch bei mechanischen Kurven angewendet werden.

Man erhält eine Bewegungsauslegung, die von vornherein ruckfrei und harmonisch ist. Versierte Anwender haben damit eine sehr gute Basis für problemspezifische Verfeinerungen am Bewegungsdiagramm, weniger Versierte haben sofort eine gute Lösung für die Praxis.

3.3. Automatische Randwertanpassungen

Problemangepaßte Bewegungsverläufe enthalten in der Praxis oft Übergänge, die sich nicht mit einfachen Rast-in-Rast-Bewegungsgesetzen beschreiben lassen (siehe Bild 2). Es ist dann notwendig, die Randwerte der beteiligten Bewegungsgesetze so festzulegen, daß ruckfreie Übergänge (ohne Sprünge in Geschwindigkeit und Beschleunigung) entstehen. Diese Anpassungen sind immer dann erforderlich, wenn sich eine Vorgabe im Bewegungsplan ändert, z.B. eine Wegkoordinate oder ein Taktwinkel einer Grenzlage.

Randwertanpassungen führt der Bewegungsplaneditor bei jeder Änderung am Bewegungsplan automatisch im Hintergrund durch. Der Anwender spart dadurch sehr viel Zeit.

3.4. Automatische Bereichserweiterung

Bewegungsabläufe können sehr effektiv optimiert werden, indem Bewegungen mehrerer kooperierender Achsen zeitlich überschritten werden. Diese Technik gehört zu den Standardmethoden bei der Optimierung hochdynamischer Bewegungen.

Die zulässigen Überschneidungen können im einfachen Fall durch Toleranzen für die Wegkoordinaten der Grenzlagen im Bewegungsplan definiert werden.

Wenn z.B. eine Rast angelaufen werden soll, und der Abtrieb zum Zeitpunkt T noch 0.5 mm von der Rast entfernt ist, könnte man diesen Zeitpunkt T im Rahmen einer Toleranz von 0.5 mm schon zur Rast rechnen.

Da die Parameter der Bereichserweiterung über die Umkehrfunktionen der Bewegungsgesetze ermittelt werden müssen, sind manuell durchgeführte Bereichserweiterungen aufwendig, insbesondere wenn mehrere Stützpunkte innerhalb eines Bewegungsverlaufs optimiert werden. Die Bereichserweiterungen in den verschiedenen Teilabschnitten beeinflussen sich dann gegenseitig.

Der Bewegungsplaneditor hingegen berechnet aus den vorgegebenen Stützpunkt-Toleranzen automatisch die bestmögliche Lage aller Grenzlagen im Sinne der Beschleunigungsoptimierung. In einem numerischen Verfahren wird auch die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Bereichserweiterungen in einem Bewegungsverlauf berücksichtigt.

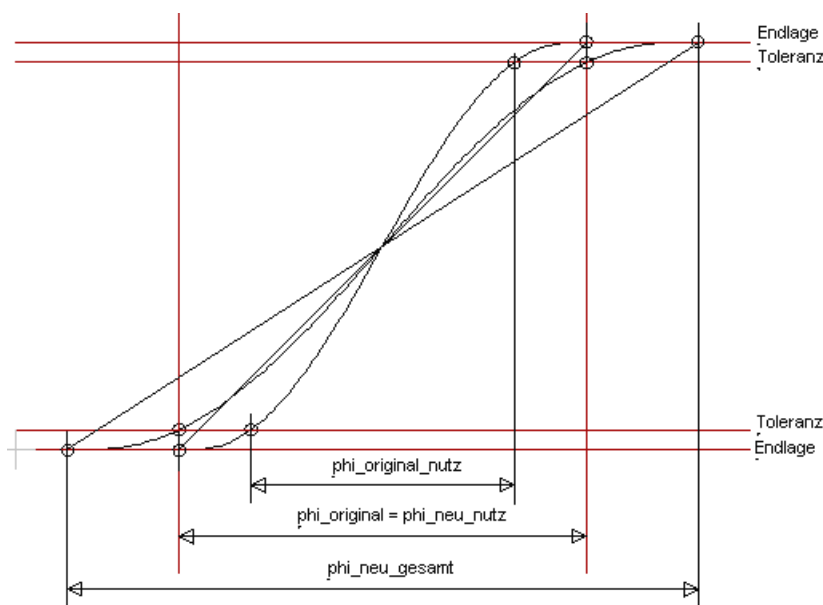


Bild 3: Bereichserweiterung

3.5. Automatische Überprüfung von Kollisionsbedingungen im Bewegungsdiagramm

Zwischen den Bewegungsverläufen in komplexen Bewegungsdiagramme bestehen meist vielfältige Beziehungen, die die Kollisionsmöglichkeiten von Werkzeugen und Bauteilen untereinander abbilden.

Obwohl sich Kollisionen streng genommen nur über die Geometrie der in den Mechanismen bewegten Teile definieren und kontrollieren lassen, können Sie doch in vielen Fällen ebenso gut über eine spezielle Verknüpfung zwischen den Funktionswerten der beteiligten Abtriebs-Bewegungsverläufe beschrieben werden (siehe Bild 4).

Bewegungsplanprogramm: Bedingung Wenn-Dann fuer Bewegungseingriffe

Wenn der Bewegungseingriff **horizontal** im Taktwinkelbereich **60** bis **120** Grad den Wert **15.8** annimmt, dann muss der Wert von **vertikal** kleiner gleich groesser **19.9** sein. Konditionierungswert: **1**

(bitte passendes ankreuzen)

Bild 4: Kollisionsbedingungen im Bewegungsdiagramm

Im Bewegungsplaneditor werden solche Kollisionsbedingungen systematisch für alle kollisionsgefährdeten Stellen des Bewegungssystems menügeführt erfaßt.

Bei jeder Änderung am Bewegungsplan und bei jeder Bewegungsdiagramm-Ausgabe wird automatisch geprüft, ob eine oder mehrere dieser Bedingungen verletzt sind. In diesem Fall wird automatisch eine Warnung angezeigt, so daß der Anwender eine Kollision ohne besondere Aktion unmittelbar erkennt.

3.6. Überprüfung von Motor-/Getriebeauslegungen mit Warnungen und Änderungsvorschlägen

Über spezielle Dialoge werden die Übersetzungen, Massen, Massenträgheitsmomente und sonstigen Belastungen am Antriebsstrang definiert (siehe Bild 5). Außerdem werden die zulässigen Momente und Drehzahlen für Motor und Getriebe angegeben.

OPTIMUS MOTUS (R)

Fertig Abbruch ? x Konfig

Bewegungsplan Antriebsdefinition Verlauf s (Strecke)

Abtriebslast:

Kommentar: _____

Abtriebsmasse		kg
Konstante Abtriebs-Zusatzkraft		N
Wirkdurchmesser Abtriebs-scheibe		mm

Kupplung:

Kommentar: _____

Trägheitsmoment Kupplung am Getriebeausgang		kg*m2
Nennmoment Kupplung am Getriebeausgang		Nm
Maximalmoment Kupplung am Getriebeausgang		Nm
Maximaldrehzahl Kupplung am Getriebeausgang		U/min

Getriebe:

Kommentar: _____

Trägheitsmoment Getriebe an Eingangswelle		kg*m2
Konstantes Zusatzmoment am Getriebeausgang		Nm
Getriebeübersetzung i = 1 :		
Nennmoment Getriebe an Ausgangswelle		Nm
Maximalmoment Getriebe an Ausgangswelle		N
Maximaldrehzahl Getriebe an Eingangswelle		U/min

Motorwelle:

Kommentar: _____

Trägheitsmoment Motorwelle		kg*m2
Nennmoment Motor		Nm
Maximalmoment Motor		Nm
Maximaldrehzahl Motor		U/min

Bild 5: Festlegung von Antriebsdaten

Bei der Ausgabe eines Bewegungsdiagramms prüft der Bewegungsplaneditor automatisch, ob die durch den Bewegungsablauf, die Belastungsverläufe und die Massenträgheiten bedingten Belastungen auf Motor und Getriebe innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Dabei werden auch die Momentenkennlinien für die Dauer- und die Spitzenbelastung der Motoren berücksichtigt.

Kann der konfigurierte Antrieb die Belastungen kurzzeitig oder auf Dauer nicht verkraften, erscheint automatisch eine Warnung. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 6.

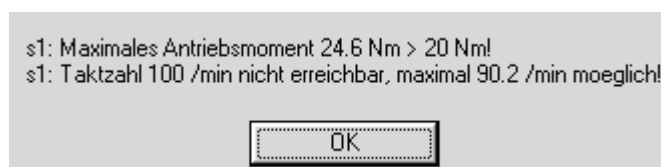


Bild 6: Warnung bei Überschreitung zulässiger Belastungen

Der Anwender erkennt ohne besondere Aktion unmittelbar, ob er sich mit der Bewegungsauslegung noch innerhalb der dynamischen Grenzen des Antriebsstrangs befindet, oder ob und auf welche Grenzwerte hin er noch optimieren muß.

3.7. Auswahl von Motoren und Getrieben aus einem herstellernerneutralen Katalog von Antriebskomponenten

Die Auswahl der Antriebskomponenten, die zur Umsetzung eines Bewegungsablaufs mit gegebenen Lasten am besten geeignet ist, ist in der Regel nicht trivial. Bei hochdynamischen Antrieben beeinflussen die Eigenträgeiten von Motor und Getriebe, die Übersetzungsverhältnisse und das Getriebeispiel die erreichbare Taktzahl erheblich.

Will man manuell die beste Antriebslösung finden, muß man in der Regel mehrere, mitunter viele Antriebslösungen parallel durchrechnen und bewerten. Dies kostet relativ viel Zeit und stellt eigentlich eine Fleißaufgabe dar.

Der Bewegungsplaneditor enthält einen elektronischen Katalog, in den beliebig viele Motoren und Getriebe jeglicher Hersteller eingefügt werden können. Der Anwender kann sich damit auch einen speziellen Katalog der von ihm bevorzugten Motoren und Getriebe anlegen.

Systematisch prüft der Bewegungsplaneditor für jede Motor-Getriebe-Kombination, ob Motor und Getriebe baulich, d.h. von den Anschlußmaßen her, zusammenpassen, und welche Taktzahl für die Bewegungsaufgabe erreichbar ist.

Zum Schluß wird eine Empfehlung abgegeben, welche Motor-Getriebe-Kombinationen die Aufgabe am besten erfüllen würden.

3.8. Automatische Optimierung des Bewegungsplans hinsichtlich Kollisionsfreiheit und dynamischer Ausgewogenheit

Die komplexeste Methode der Bewegungsplan-Optimierung besteht darin, aus den vorgegebenen Kollisionsbedingungen (siehe 3.5.) und den vorgegebenen dynamischen Grenzwerten der Antriebe (siehe 3.6.) vollautomatisch mit speziellen numerischen Algorithmen das bestmögliche Bewegungsdiagramm zu finden.

Ein solcher Algorithmus entbindet den Anwender fast von aller manuellen Optimierungsarbeit, denn die Bewegungsdiagrammlösung mit der größten erreichbaren Taktzahl steht praktisch auf Knopfdruck zur Verfügung.

Diese Methode ist besonders geeignet, wenn eine elektronische Kurve für mehrere verschiedene Produktformate ausgelegt bzw. beschleunigungsoptimiert werden soll. Der Benutzer definiert dann einmal die Randbedingungen, in der sich die Bewegungslösungen bewegen dürfen, und überläßt die Optimierung der Software. Eine spezielle Software-Lösung dieser Art ist in /3/ beschrieben.

Die Zeitersparnis bei Untersuchungen für ein ganzes Produktspektrum ist mit solch einer Automatik gewaltig.

4. Einsatzbereiche und Betriebserfahrungen

Die neuen Automatismen ermöglichen auch Benutzern, für die Bewegungsauslegungen eher ein fremdes Thema sind, technologisch anspruchsvolle Bewegungsabläufe für elektronische Kurven zu gestalten. Versierte Benutzer sparen Zeit, da die Software viele im Optimierungsprozeß anfallende Fleißaufgaben automatisch erledigt.

Die Akzeptanz dieser Automatismen bei Anwendern ist hoch, da sie die Bedienung von Software zur Bewegungsauslegung stark vereinfachen, aber trotzdem für hochwertige Ergebnisse und schnellaufende Maschinen sorgen.

5. Literatur

/1/ Nolte, R.: „Kollisionsoptimierung in Mechanismen mit OPTIMUS MOTUS“, VDI-Bericht 1281, VDI-Verlag. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 1996.

/2/ Nolte, R.: „Schwingungsarme Bewegungsgestaltung bei elektronischen Kurven“. Beitrag zur SPS/IPC/Drives 1998.

/3/ Nolte, R.: „Automatische Kollisionsoptimierung komplexer Anlagen mit gesteuerten Antrieben“, VDI-Bericht 1567, VDI-Verlag. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 2000.