

## **Methodisches Auslegen komplexer Bewegungsabläufe**

Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Rainer Nolte

Nolte NC-Kurventechnik GmbH  
Hellingstraße 17  
D - 33609 Bielefeld  
Telefon 0049-521-74477  
Telefax 0049-521-750880  
e-Mail: [Nolte-NC-Kurventechnik@t-online.de](mailto:Nolte-NC-Kurventechnik@t-online.de)  
Internet: [www.nolte-nc-kurventechnik.de](http://www.nolte-nc-kurventechnik.de)

### **Zusammenfassung**

Verpackungsmaschinen, Montageanlagen, Buchbindemaschinen und andere Maschinenarten zeichnen sich durch eine hohe Zahl nichtlinearer und voneinander abhängiger Bewegungen aus, die durch Kurven, Schrittgetriebe oder Servoantriebe gesteuert werden, oft unterschiedlich für verschiedene Produktformate.

Die Komplexität vieler Bewegungssteuerungen ist so hoch, daß auch der versierteste Entwickler ohne genaue Dokumentation der Rahmenbedingungen und der genauen Parameter der Auslegungsvarianten leicht den Überblick über den Auslegungsprozeß verliert und Gefahr läuft, Fehler zu machen.

Insbesondere entstehen Fehler durch Kommunikation, wenn Parameter oder Zusammenhänge nur verbal erläutert, aber nicht schriftlich dokumentiert werden, oder wenn Skizzen ausgetauscht werden, ohne daß man sich formell auf eine bestimmte Auslegungsvariante und die entsprechenden Antriebskomponenten bezieht.

Verbreitete Praxis ist heute, komplexe Bewegungsauslegungen ohne schriftliche oder softwaregestützte Festlegung der Rahmenbedingungen für die verschiedenen Auslegungsvarianten zu betreiben.

Der vorliegende Beitrag soll eine Vorgehensweise vorstellen, wie man mit Hilfe geeigneter Dokumente, Abläufe und Werkzeuge systematisch zu hochwertigen Bewegungslösungen kommt.

Folgende Daten sollten bei der methodischen Bewegungsauslegung definiert werden:

### **Festlegungen für das zu verarbeitende Produkt:**

- Formatspektrum (minimales/maximales/gängiges Produkt) mit Abmessungen und Toleranzen
- Geforderte und gewünschte Verarbeitungsleistung
- Belastungsgrenzen während der Verarbeitung des Produkts
- Allgemeine Hinweise zur Bearbeitung des Produkts

### **Kommentierter Bewegungsplan**

- Schematische Darstellung der Bewegungsabläufe
- Festlegung aller Kollisionsbedingungen („Wenn Verlauf x im Bereich  $\varphi_1 \dots \varphi_2$  den Wert a erreicht, muß der Wert des Verlaufes y kleiner als b sein“, o.ä.)
- Festlegung dynamischer Grenzen (Geschwindigkeit, Beschleunigung etc.) für jeden Bewegungsverlauf

### **Festlegung der Auslegungsvarianten**

- Bezeichnung der Variante
- Genaue Definition der Parameter, die diese Auslegungsvariante ausmachen

### **Für jede Auslegungsvariante**

- Geometrie der Werkzeuge und Störkanten (Kollisionskanten)
- Kinematische Abmessungen der Mechanismen (Kurven, Schrittgetriebe, Servos, Koppelmechanismen)
- Vorgesehene Antriebskomponenten
- Dynamische Grenzwerte für die Bewegungsauslegungen (zulässige Pressungen, Kräfte, Spitzenmomente, Nennmomente, Drehzahlen, Übertragungswinkel usw.)
- Besondere Bedingungen, die bei der Bewegungsgestaltung zu beachten sind

## Einleitung

Verpackungsmaschinen, Montageanlagen, Buchbindemaschinen und andere Maschinenarten zeichnen sich durch eine hohe Zahl nichtlinearer und voneinander abhängiger Bewegungen aus, die durch Kurven, Schrittgetriebe oder Servoantriebe gesteuert werden, oft unterschiedlich für verschiedene Produktformate.

Der konkreten Gestaltung der Bewegungsabläufe im Hinblick auf Beschleunigungen, Antriebsmomente, Pressungen usw. kommt eine besondere Bedeutung zu, weil sie in hohem Maße über die erreichbare Taktleistung und Verarbeitungsqualität der Gesamtanlage entscheidet.

Mit relativ geringem Aufwand läßt sich das Preis/Leistungs-Verhältnis einer Anlage erheblich steigern, wenn man die Bewegungsabläufe in der Anlage systematisch plant und konsequent optimiert.

Steigerungsraten von 30 % und mehr sind fast durchweg realistisch.

Wie eigentlich bei allen Tätigkeiten in der Konstruktion sollten Entwickler auch bei der Auslegung von Bewegungssteuerungen eine bestimmte Methodik verfolgen, um zu hochwertigen Ergebnissen zu kommen.

Der Einsatz entsprechender Werkzeuge zur Bewegungssimulation bei gleichzeitiger Optimierung nach dynamischen Kriterien ist dafür eine wichtige Voraussetzung, macht aber allein noch kein methodisches Vorgehen aus.

Die Komplexität vieler Bewegungssteuerungen ist so hoch, daß auch der versierteste Entwickler ohne genaue Dokumentation der Rahmenbedingungen und der genauen Parameter der Auslegungsvarianten leicht den Überblick über den Auslegungsprozeß verliert und Gefahr läuft, Fehler zu machen.

Insbesondere entstehen Fehler durch Kommunikation, wenn Parameter oder Zusammenhänge nur verbal erläutert, aber nicht schriftlich dokumentiert werden, oder wenn Skizzen ausgetauscht werden, ohne daß man sich formell auf eine bestimmte Auslegungsvariante und die entsprechenden Antriebskomponenten bezieht.

Beide Kommunikationspartner glauben dann, den Sachverhalt verstanden zu haben, haben aber in Wirklichkeit über unterschiedliche Dinge geredet.

Solche Fehler werden oft erst festgestellt, wenn die Anlage montiert ist und – meist wenige Tage vor dem Abnahmetermin – getestet wird. Die Zeit zur Korrektur der Fehler, zur Beschaffung neuer Kurven oder neuer Servoantriebe ist dann sehr knapp. Außerdem entstehen durch solche Fehler hohe Kosten durch die Neubeschaffung der Komponenten und vor allem durch die Verzögerung der Maschinenauslieferung.

Verbreitete Praxis ist heute, komplexe Bewegungsauslegungen ohne schriftliche oder softwaregestützte Festlegung der Rahmenbedingungen für die verschiedenen Auslegungsvarianten zu betreiben.

Der vorliegende Beitrag soll eine Vorgehensweise vorstellen, wie man mit Hilfe geeigneter Dokumente, Abläufe und Werkzeuge systematisch zu hochwertigen Bewegungslösungen kommt.

Wichtig ist dabei vor allem, daß alle relevanten Informationen **schriftlich** und **strukturiert** niedergelegt werden, so daß alle an der Auslegung beteiligten auf eindeutige und verlässliche Daten zurückgreifen können.

### **Konzepte für die Bewegungserzeugung**

Je nachdem, wie Formatänderungen auf die einzelnen Bewegungsverläufe durchschlagen, wählt man für jede einzelne Bewegung aus, auf welche Weise sie technisch realisiert werden soll:

- a) Bevorzugt durch einen Servoantrieb, wenn bei jeder Formatänderung ein neues Bewegungsdiagramm erzeugt werden muß.
- b) Bevorzugt durch ein Kurvengetriebe, wenn der Bewegungsablauf für alle Produktformate ohne größere Leistungseinbußen gleich bleiben kann.
- c) Durch ein Kurvengetriebe mit Verstellmechanismus, wenn die Bewegungscharakteristik über größere Formatbereiche hinweg gleich bleiben kann.

Wenn fast alle Bewegungen über Servoantriebe und nur einzelne Bewegungen über mechanische Kurven erzeugt werden, kann man überlegen, diese auch noch durch Servoantriebe zu ersetzen.

Umgekehrt ist es oft vorteilhaft, einzelne Servoantriebe durch mechanische Kurven zu ersetzen, wenn die Anlage dadurch ganz frei von Servoantrieben wird. Einzelne Servoantriebe innerhalb einer sonst kurvengesteuerten Anlage verteuern die Anlage und beschränken die Absatzmöglichkeiten, da zu ihrem Betrieb eine spezielle Ausbildung notwendig ist.

Pneumatik ist nicht geeignet, dynamisch hochwertige Bewegungen zu erzeugen.

## Definition der Produktformate

Kurvengesteuerte Anlagen sollen oft nicht nur ein klar definiertes Produktformat bearbeiten, sondern innerhalb eines bestimmten Maßbereiches jedes denkbare Produkt.

Die einzelnen Produktabmessungen bzw. –eigenschaften sind zwar oft nicht kontinuierlich, sondern nur in bestimmter Abstufung zu berücksichtigen, trotzdem ist die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten so groß, daß man bei der Auslegung der Bewegungssteuerungen nicht alle möglichen Produktformate wirklich durchspielen kann.

Zunächst wird definiert, welche Produktabmessungen bzw. –eigenschaften in welchen Grenzen und ggf. in welcher Abstufung variiert werden können.

Anschließend wählt man wenige repräsentative Produktformate aus, die möglichst alle bewegungstechnischen Extremsituationen abdecken, so daß mit ihnen überprüft werden kann,

- ob alle Servoantriebe die Spitzen- und Dauerbelastungen in allen Fällen aushalten werden,
- ob alle Kurven für alle Produktformate unterschneidfrei sind, günstige Übertragungswinkel aufweisen und die Werkstoffbelastungen aushalten werden,
- ob alle Bewegungen für alle Produktformate kollisionsfrei ablaufen werden

Es bietet sich an, wenigstens folgende Produktformate zu berücksichtigen und für die Auslegung festzuschreiben:

- das kleinste Produktformat
- das größte Format
- ein mittleres Format
- das am häufigsten verwendete Format
- das Format mit der höchsten geforderten Taktleistung
- das Format mit der niedrigsten geforderten Taktleistung

Für jedes Produktformat sollten außerdem die Maßtoleranzen beschrieben werden, da diese unter Umständen bei der Kollisionsprüfung einberechnet werden müssen.

Es sollte auch beschrieben werden, welche maximalen Belastungen das Produkt selbst aushält, z.B.

- Stoßgeschwindigkeiten beim Auftreffen eines Schiebers,
- Beschleunigungen beim Vorschub

- Verformungsgeschwindigkeiten
- Kräfteinwirkungen, z.B. beim Greifen

Für jedes Produktformat muß auch die geforderte Taktleistung festgelegt werden. Kleine, leichte Produkte müssen oft schneller verarbeitet werden als große, so daß sich die Wichtungen der dynamischen Belastungen innerhalb der Anlage bei verschiedenen Produktformaten gegeneinander verschieben.

### **Festlegung der Mechanismenstrukturen und der kinematischen Abmessungen**

Zunächst entwirft man für alle Bewegungen in erster Näherung Mechanismen mit geeigneter Struktur und geeigneten kinematischen Abmessungen, um die Bewegungsbereiche für alle Produktformate abdecken zu können.

Für die späteren Kollisionsoptimierungen muß auch die Geometrie der verarbeitenden Werkzeuge (Schieber, Greifer usw.) festgelegt werden. Die bewegten Massen werden zunächst abgeschätzt, da sie erst nach der Detailkonstruktion genau zur Verfügung stehen.

Sowohl die Struktur als auch die kinematischen Abmessungen können sich im Nachhinein ändern, wenn dies zu besseren Bewegungslösungen führt.

Der gesamte Auslegungsprozeß hat stark iterativen Charakter, so daß getroffene Auslegungsentscheidungen später revidiert werden können.

### **Auslegungsvarianten**

Für jedes repräsentative Produktformat wird nun unabhängig voneinander eine Kollisionsoptimierung durchgeführt /1,2/, d.h. mit gegebenen kinematischen Abmessungen der Mechanismen werden die Bewegungsabläufe aller Einzelbewegungen dynamisch so optimiert, daß Kollisionen gerade eben vermieden werden und daß die Anlage rechnerisch mit höchstmöglicher Taktzahl arbeiten kann.

Die Kollisionsoptimierung führt zu realistischen Bewegungsabläufen, mit denen sowohl die Kurven als auch die Servoantriebe dynamisch bewertet und ausgelegt werden können.

Diese dynamischen Auslegungen können zu einer Vielzahl von Auslegungs-Untervarianten für Mechanismenstrukturen, Abmessungen (Hebel-, Koppellängen usw.), Servomotoren und Getrieben führen, wenn die beste Mechanismenlösung für eine Bewegung im Vorhinein nicht festgelegt werden konnte.

Um die Übersicht zu behalten, sollte man für jede Auslegungsvariante eines Einzelmechanismus und einer Mechanismengruppe genau festhalten, was diese Variante ausmacht:

- Geometrie der Werkzeuge und Störkanten (Kollisionskanten)
- Kinematische Abmessungen der Mechanismen (Kurven, Schrittgetriebe, Servos, Koppelmechanismen)
- Vorgesehene Antriebskomponenten
- Dynamische Grenzwerte für die Bewegungsauslegungen (zulässige Pressungen, Kräfte, Spitzenmomente, Nennmomente, Drehzahlen, Übertragungswinkel usw.)
- Besondere Bedingungen, die bei der Bewegungsgestaltung zu beachten sind

### Kollisionsoptimierung

Im Rahmen der Kollisionsoptimierung für die Einzelformate werden hauptsächlich Bewegungspläne (Bild 1) bzw. Bewegungsdiagramme (Bild 2) optimiert.

Kollisionsoptimierung bedeutet, die Bewegungsabläufe der gesamten Anlage mit Hilfe grafischer Simulationen so zu optimieren, daß die Anlage insgesamt mit maximaler Taktzahl kollisionsfrei arbeiten kann. Wichtigstes Hilfsmittel dabei ist die konsequente Ausnutzung von Bewegungsüberschneidungen.

Es geht darum, die dynamischen Belastungen auf die Antriebe zu minimieren und Kollisionen knapp zu vermeiden.

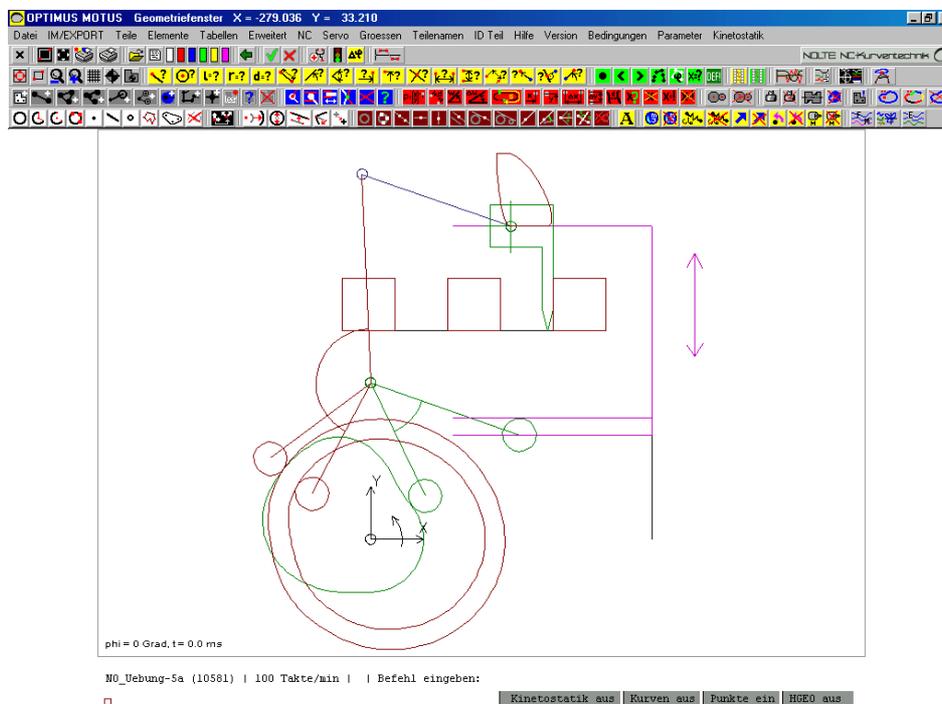


Bild 1: Kollisionsoptimierung mit Teilegeometrie

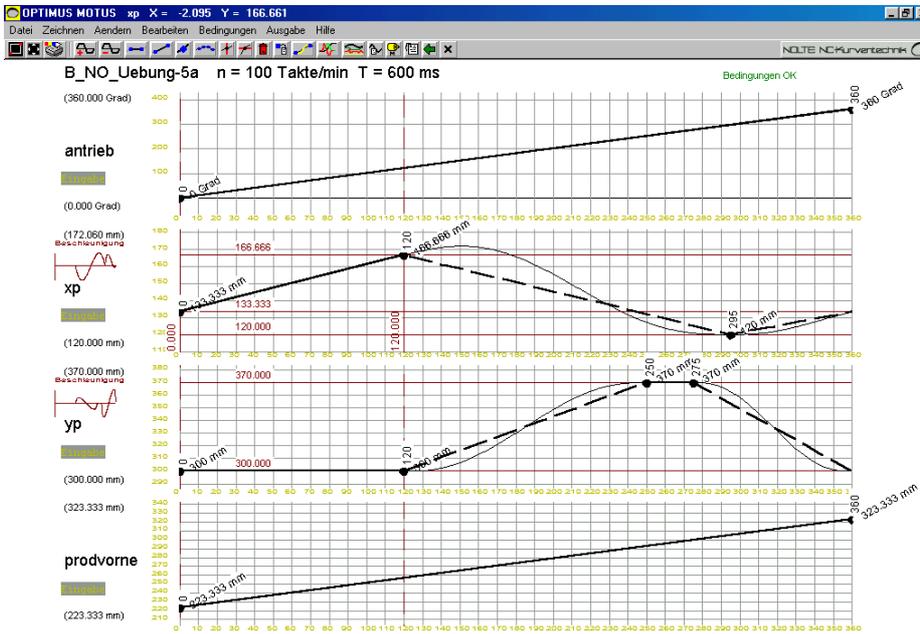


Bild 2: Bewegungsplan

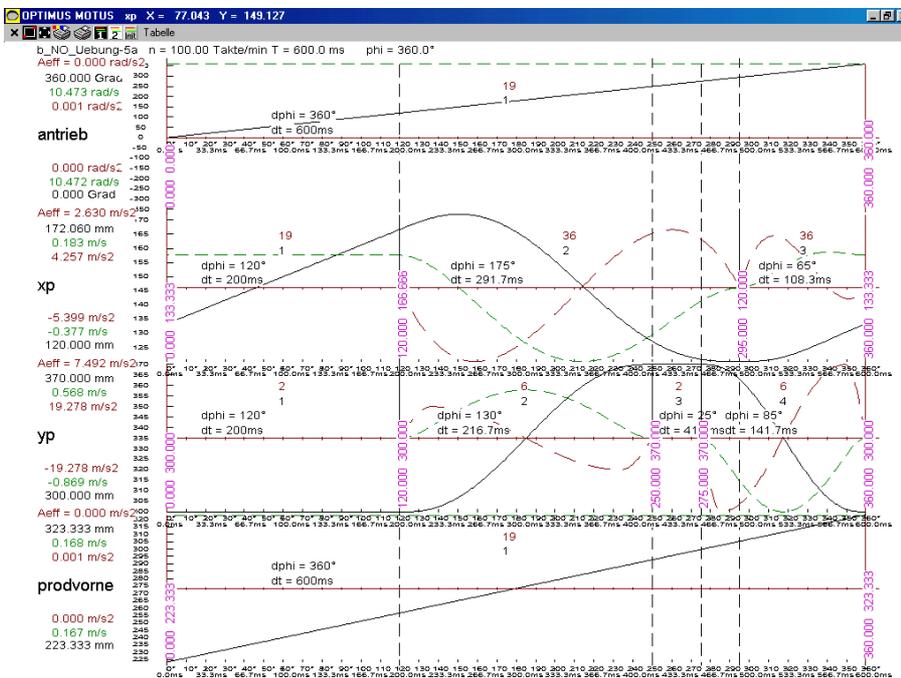


Bild 3: Bewegungsdiagramm

Die Kollisionsoptimierung basiert auf bestimmten Regeln und Beschränkungen für die Bewegungsabläufe der Einzelantriebe untereinander.

Diese Regeln legen fest, wie sich die Einzelantriebe zueinander bewegen dürfen, ohne daß Kollisionen zwischen Bauteilen und Produkten auftreten. Meistens lernt der Entwickler bei den Kollisionsoptimierungen der ersten Produktformate, welche Regeln (= Kollisionsbedingungen) wichtig sind.

Die Beschränkungen für die Bewegungen der Einzelantriebe rühren von den dynamischen Grenzen (Momente, Pressungen, Drehzahlen usw.) der gewählten Antriebskomponenten und von der Belastbarkeit der Produkte selbst her.

Um eine systematische Entwicklung und eine spätere Kontrolle zu ermöglichen, ist es wichtig, die Kollisionsbedingungen formal festzulegen:

- 16) M9/Zange am Packer/M6: Zange (Annahme: mittig zum Stapel, 70 mm breit) muss vollstaendig offen sein, wenn der Packer DURCH den Vorderanschlag faehrt (10 mm unter dem Mehrfachsammlpack)  
Bedingung: erfuehlt
- 17) M8/M9: Packer: Sammlpack darf nicht DURCH den Vorderanschlag fahren, betrifft Drehsequenz und Produktabgabe (Hoehentoleranz: 10 mm)  
Bedingung: erfuehlt
- 18) M8/M9/M7: Drehsequenz: Sammlpackunterkante muss 10 mm hoeher fahren als Oberkante des Abgabeproduktstroms, wenn der drehender Sammlpack mit der Vorderkante ueber die Linie faehrt, die 60 mm rechts von der Hinterkante des Produktstroms liegt (Bewegung vorwaerts und rueckwaerts)  
Bedingung: erfuehlt
- 19) M9/M10/Greifer: Sicherheitsabstand zwischen Dreheinheit und Greifer: eingehalten, wenn die Kollisionskante der Dreheinheit links von der Rueckseite des Rueckanschlags (in Ruheposition) am Mehrfachsammlpack bleibt (Dreheinh.: Durchmesser oben =  $\sqrt{(2 \cdot 230)^2 + \text{Produktbreite}^2}$ , D. unten =  $\text{MAX}(\sqrt{(\text{Produkthoehe} + 342)^2 + \text{Produktbreite}^2}, \text{Produkthoehe} + 342 + 100)$ )  
Bedingung: erfuehlt
- 20) Andruckstempel Packer: beim leeren Horizontalrueckhub des Packers muss der Andruckstempel ueber dem Finger des Vorderanschlags herfahren  
Bedingung: erfuehlt
- 21) M9/M7: Synchronbedingung mit Auslaufband beim Absetzen des Mehrfachsammlpacks (Synchronlauf waehrend der Schwenkbewegung der Zangen und der ersten 20 mm des Hochfahrens am Andruckstempels)  
Bedingung: erfuehlt
- 22) M8: Packer muss vor dem Greifen des ersten Sammlpacks 12 mm unter Produktniveau fahren  
Bedingung: erfuehlt
- 23) M5/M6/M8: Ausschieben nur, wenn die Mehrfachsammlpackkassette leer ist  
Bedingung: erfuehlt

Bild 3: Kollisionsbedingungen für eine Packanlage (Auszug)

Die Kollisionsbedingungen gelten prinzipiell für alle Produktformate.  
Die dynamischen Grenzwerte der Antriebskomponenten und bestimmte Zahlenwerte aus den Kollisionsbedingungen sind jedoch von der jeweiligen Auslegungsvariante abhängig.

Bei der Auslegung von Bewegungen, die unabhängig vom Produktformat sind oder zumindest für mehrere Produktformate gleich angenommen werden sollen, muß man darauf achten, daß diese Bewegungen in allen Kollisionsoptimierungen der entsprechenden Formate gleich definiert werden.

Wenn die meisten Bewegungen in der Anlage formatunabhängig sind, ist es zweckmäßig, für alle diese Produktformate nur eine gemeinsame Kollisionsoptimierung durchzuführen, bei der alle Produktformate gleichzeitig in der Simulation dargestellt werden.

Die wenigen verbleibenden Bewegungsverläufe, die sich formatabhängig ändern, werden dabei mit jeweils unterschiedlichen Bewegungsdiagrammen, aber auch überlagert dargestellt, so daß für alle Formatvarianten die gleiche Simulation verwendet wird.

Im Allgemeinen erstellt man für jedes Produktformat eine eigene Simulation zur Kollisionsoptimierung.

Zur Kollisionsoptimierung gehört auch die dynamische Bewertung der Einzelantriebe und der Gesamtanlage:

- 1.) Berechnung der Kurven mit Überprüfung der Hertzschen Pressungen, Summenantriebsmomente, Übertragungswinkel, Krümmungsradien
- 2.) Dynamische Bewertung der Servoantriebe und Getriebe mit Spitzenmoment, Nennmoment, Spitzendrehzahl, Wirkungsgrad, Momentenkennlinien
- 3.) Abschätzung der erreichbaren Taktzahl für die Gesamtanlage an Hand
  - der Hertzschen Pressungen auf den Kurven
  - der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen an den Produkten und in den Lagern
  - der Drehzahlen und Momente an den Motoren und Getrieben

Die Kollisionsoptimierung zielt darauf ab, die erreichbare Taktzahl bei einem Produktformat für alle Einzelantriebe zu maximieren. Dabei ist der Mechanismus mit der rechnerisch kleinsten erreichbaren Taktzahl der begrenzende Faktor.

## **Neu-Festlegung der Antriebskomponenten**

Nachdem die Kollisionsoptimierung für alle repräsentativen Produktformate durchgeführt wurde, hat man einen besseren Überblick, mit welchen Mechanismen und Antriebskomponenten die Anlage über alle Formate hinweg optimal arbeiten wird.

Mit diesen Erkenntnissen definiert man die Auslegungsvarianten für die verschiedenen Produktformate neu, indem die fest in die Anlage einzubauenden Antriebskomponenten (Mechanismen, Motoren, Getriebe) für alle Varianten als bindend erklärt werden, und führt die Kollisionsoptimierungen für alle Produktformate mit veränderten dynamischen Grenzen, aber gleichen Kollisionsbedingungen neu durch.

## **Fazit:**

Die genaue, formalisierte Dokumentation aller Randbedingungen während der gesamten Bewegungsauslegung gibt allen Beteiligten Übersicht und eine verlässliche Datenbasis, verhindert Fehler und ermöglicht, sich auch nach Jahren wieder schnell in die Maschinenauslegung hineinzudenken.

## **Literaturhinweise:**

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

/2/ Nolte, R.: „Automatische Kollisionsoptimierung komplexer Anlagen mit gesteuerten Antrieben“, VDI-Bericht 1567, VDI-Verlag. Beitrag zur VDI-Getriebetagung 2000.

/3/ Internet-Seite [www.nolte-nc-kurventechnik.de](http://www.nolte-nc-kurventechnik.de), Stichwort „Kollisionsoptimierung“