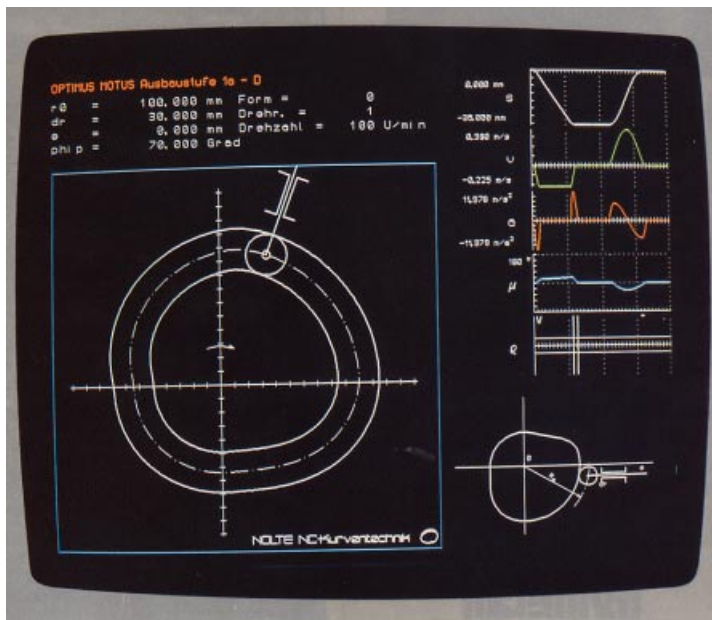


## Optimierungsläufe

Maschinenmarkt Ausgabe 2 - 1991

### Ausgleich von Spitzenlasten bei Kurvengetrieben über federbelasteten Momentenverlauf

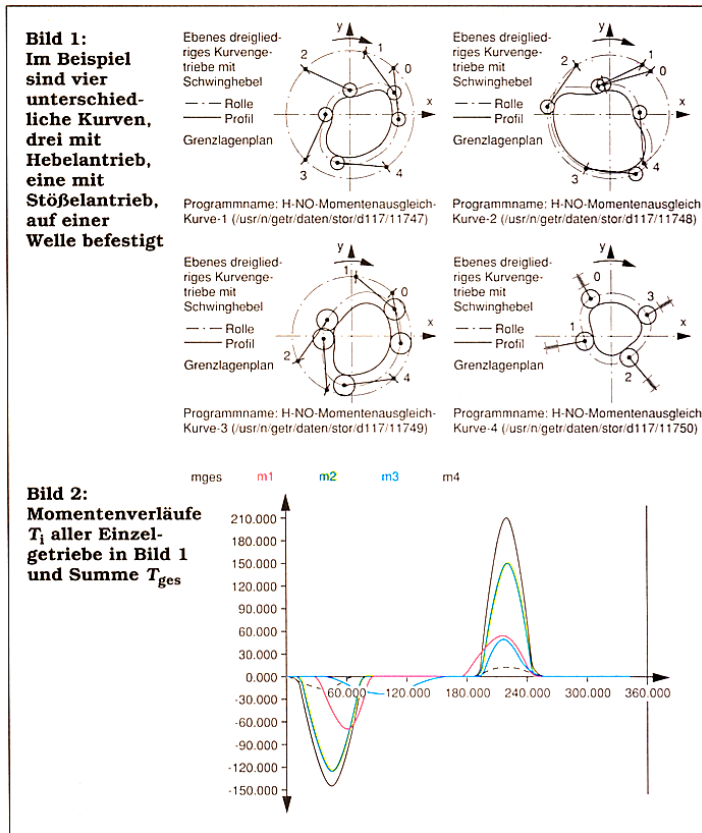
Wenn mehrere Kurven auf einer Welle komplizierte, motorbelastende Lastspitzen erzeugen, muß man diese reduzieren. Dafür gibt es verschiedene konstruktive Möglichkeiten. Noch bestehende Spitzen lassen sich über einen Momentenausgleich mindern. Die Berechnung ist mit einem Programm in mehreren Optimierungsläufen möglich.



Komplizierte Bewegungsabläufe werden in Maschinen oftmals von einem Satz Kurven erzeugt. Meistens faßt man mehrere Kurven auf einer gemeinsamen Welle zusammen, um ihre Zugänglichkeit zu erhöhen. Die dynamischen Lasten, die durch die Abtriebsmassen und die Federn auf die Kurven und damit auf den Motor wirken, können in der Summe zu ungünstigen Lastspitzen führen. Der Antrieb ist dann sehr groß zu dimensionieren, damit er die erforderlichen Momente aufbringen kann und die Antriebsdrehzahl in etwa konstant bleibt.

Diese Problematik wird um so schwerwiegender, je mehr Kurven ein Antriebsmotor bewegt und je größer die bewegten Massen und die zurückgelegten Hübe sind. Bild 1 zeigt ein Beispiel: auf einer Welle sind vier einzelne Kurven befestigt, die unterschiedliche Massen über unterschiedliche Hübe bewegen. Drei Kurven besitzen einen Hebelabtrieb, eine einen Stoßelabtrieb. Alle Kurvengetriebe sind kraftschlüssig ausgeführt, damit bei einer Funktionsstörung kein Bauteil Schaden nimmt.

Die Berechnungen, die zur Behandlung dieses Beispiels erforderlich sind, lassen sich mit einem Kurven- und Gelenkgetriebeprogramm ausführen (1 und 2).



Um Lastspitzen zu vermeiden, sind zunächst die Antriebsmomentenverläufe der einzelnen Kurvengetriebe zu bestimmen. Diese vom Motor aufzubringenden Momente ergeben sich aus der Getriebegeometrie, dem Bewegungsplan, der bewegten Masse, den Federdaten und der Kurvendrehzahl. Sie werden bei der Kurvenberechnung automatisch mit ermittelt und in einer Kinetostatikdatei abgelegt. Bild 2 zeigt stellvertretend alle berechneten kinetostatischen Werteverläufe im Kurvengetriebe Nummer eins.

Anschließend werden die Momentenverläufe  $T_i$  aller Einzelgetriebe in ein Diagramm übernommen und gemeinsam mit der Summe  $T_{ges}$  graphisch dargestellt (Bild 3). Es ist zu sehen, daß bei

einem Winkel von  $50^\circ$  und bei  $230^\circ$  Taktwinkel besonders hohe Summenmomente entstehen von  $-151.3 \text{ Nm}$  und  $220.5 \text{ Nm}$ .

Es gibt einfache, auch in Kombination anwendbare Möglichkeiten, diese Maximalbelastungen zu vermindern: Verlagern der beteiligten Bewegungsabschnitte, Verändern der Bewegungsgesetztypen, Verändern der Bewegungsgesetzparameter, Optimieren des Übertragungswinkels, Optimieren von Federkennwerten und Einbringen einer Momentenausgleichskurve.

Zum Verlagern der beteiligten Bewegungsabschnitte ist es am einfachsten, die momentbildenden Bewegungsabschnitte zeitlich auseinanderzuziehen. Die Einzelmomente bleiben dann unverändert, aber die Summenwirkung wird gemindert. Die normierten Bewegungsgesetztypen rufen aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeitskennwerte unterschiedliche statische Antriebsmomente hervor. Um den Antrieb zu entlasten, lassen sich Gesetze mit besonders niedrigen Geschwindigkeitskennwerten verwenden.

Fast alle Bewegungsgesetze verfügen neben Hub- und Taktwinkelangabe über weitere Eingabeparameter, z. B. die Wendepunktverschiebung  $\lambda$ - $w$ . Diese Parameter bewirken ähnlich wie die Verschiebung der Bewegungsgesetzabschnitte im wesentlichen eine Ortsveränderung der Maximalmomente und können daher auch benutzt werden, um die Maxima der Einzelmomente auseinanderzuziehen.

Der Übertragungswinkel im Kurvengetriebe ist der Winkel, unter dem sich die Tangente an die Kurvenkontur und der Vektor der Rollenmittelpunktsgeschwindigkeit schneiden. Wenn Reibung vernachlässigt wird, ist der Übertragungswinkel die maßgebende Größe für die Belastung der Kurve und der Rolle bei gleichbleibender äußerer Last. Je näher der Übertragungswinkel bei  $90^\circ$  liegt, desto "besser" wird der Antrieb für die Kraftübertragung ausgenutzt.

Der Übertragungswinkel läßt sich über alle Hauptabmessungen des Kurvengetriebes variieren. Er wird als kinematische Größe vom Berechnungsprogramm ermittelt. Anhand seiner Extremwerte, die automatisch bereitgestellt werden, kann jedes einzelne Kurvengetriebe optimiert werden.

Über den Übertragungswinkel werden somit die Einzellasten reduziert. Bei kraftschlüssigen Kurven müssen bei allen Kräfteberechnungen die Federdaten berücksichtigt werden. Federsteifigkeit und Vorspannung (Federkraft in der ersten Getriebestellung) können dazu benutzt werden, die Amplitude und den Verlauf der Einzelantriebsmomente anzupassen. Nebenbedingung ist dabei, daß die Normalkraft der Rolle auf die Kurve einen Mindestwert nicht unterschreitet, damit die Rolle nicht abhebt. Grundsätzlich ist anzustreben, daß die maximalen Normalkräfte möglichst klein bleiben.

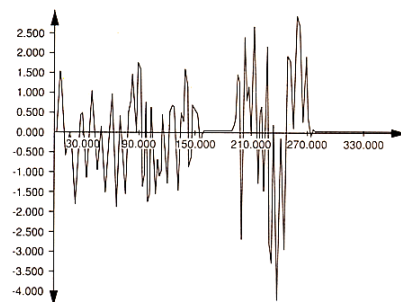


Bild 3:  
Verlauf des  
Gesamt-  
momentes  
nach einer  
Anpassungs-  
rechnung

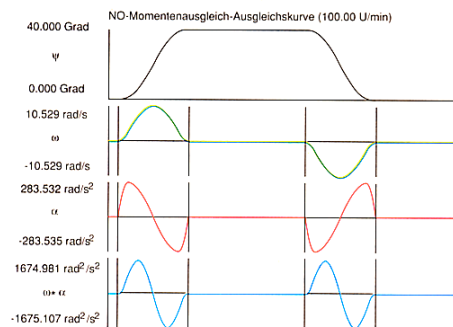


Bild 4:  
Bewegungsplan-  
vorgabe für  
die Momenten-  
ausgleichskurve

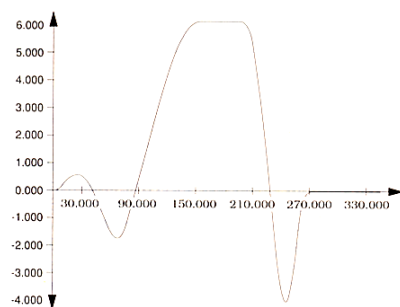


Bild 5: Im Ver-  
laufe der Opti-  
mierung ent-  
standene Diffe-  
renz des Bewe-  
gungsplan

Die nach Berücksichtigung aller möglichen Maßnahmen noch auftretenden Lastspitzen kann man auf dem Wege eines Momentenausgleichs mindern.

Bei der Anwendung dieser Möglichkeiten ist zu beachten, daß je nach Orientierung der Hübe und Anordnung des Getriebes sowohl Momente erzeugt werden, die den Motor bremsen als auch solche, die ihn antreiben. Ziel der Optimierung ist es, ihre Gesamtwirkung möglichst auf Null zu reduzieren. So kann es sinnvoll sein, die Last einzelner Kurvengetriebe zu erhöhen, um ein oder mehrere entgegengesetzte Antriebsmomente zu kompensieren.

Die bisher gezeigten Verfahren des Momentenausgleichs erlauben nur eine grobe, überschlägige Reduzierung der maximalen Gesamtantriebsmomente, da sie nur Änderungen in einer ihnen spezifischen Art und Weise zulassen. Üblicherweise unterliegen die Bewegungspläne und die geometrischen Abmessungen festen Randbedingungen, die die Optimierungsmöglichkeiten weitgehend einschränken. Die Hauptabmessungen von Getrieben ergeben sich oft aus den baulichen Gegebenheiten der Maschine. So können zum Beispiel sämtliche Hebel auf einer gemeinsamen Achse gelagert sein. Die Abfolge der Bewegungen und damit der Bewegungsplan werden vom technischen Prozeß am Produkt bestimmt, so daß Hübe und Drehwinkel meistens nur in sehr engen Grenzen veränderbar sind.

Eine beachtenswerte konstruktive Lösung für den Momentenausgleich besteht in einer zusätzlichen federbelasteten Kurve, die die von den Arbeitskurven erzeugten Momente an der Welle gerade ausgleicht. Aus deren Summenmomentverlauf läßt sich die Rollenmittelpunktsbahn der Ausgleichskurve eindeutig berechnen, wenn die Hauptabmessungen und die angestrebten Federdaten angegeben sind.

Leider ist die analytische Behandlung des Problems sehr kompliziert. Weil die Verläufe von Weg und Geschwindigkeit des Abtriebsgliedes an der Ausgleichskurve für die Berechnung des Kompensationsmomentes wichtig sind, entsteht für diesen Abtriebsverlauf je Getriebebauform eine komplizierte nichtlineare Differentialgleichung 1. Ordnung, die letztlich nur iterativ lösbar ist. Mit einem Kurvenberechnungsprogramm läßt sich jedoch eine solche Ausgleichskurve ermitteln.

Ausgehend von einer plausiblen Startvorgabe ändert das Iterationsprogramm schrittweise den Bewegungsplan im Ausgleichskurvengetriebe. Eine vernünftige Startvorgabe ergibt sich recht schnell, wenn man ausnutzt, daß die Lage der Momentenmaxima bei

Verwendung von symmetrischen Bewegungsgesetzen etwa in der Mitte eines Bewegungsabschnitts liegt und die Amplitude des Momentenverlaufs in etwa proportional zum Hub am Abtriebsglied ist. Bei der Verteilung der Hübe auf die sich ergebenden Bewegungsabschnitte ist nur noch zu beachten, daß die Abtriebslasten bei  $0^\circ$  und  $360^\circ$  gleich sein müssen.

Die Iteration überlagert dem bisherigen Bewegungsplan ein Bewegungsplaninkrement, also einen kompletten Abtriebsverlauf mit kleinen Hübchen. Die Hübe in diesem Inkrementverlauf und die Lage der Bewegungsabschnitte berechnet das Programm automatisch anhand der Abweichungen des Ist-Gesamtmomentenverlaufs (Summe aus Arbeitskurven und Ausgleichskurve) vom Sollwert (Nullfunktion). Aus der Überlagerung von vorangegangenen Abtriebsverlauf und Inkrementverlauf ergibt sich der Abtriebsverlauf für den jeweils nächsten Schritt. Die Iteration läßt sich schrittweise beliebig weit treiben. Sobald das Maximum des Gesamtmomentenverlaufs unter eine vorgegebene Toleranzgrenze sinkt, endet die Iteration. Bild 3 gibt den Verlauf des Gesamtmoments nach einer solchen Anpassungsrechnung mit der entsprechenden Skalierung wieder. Bild 4 zeigt die Bewegungsplanvorgabe für die Momentenausgleichskurve. Bild 5 die Differenz, die im Verlauf der Optimierung entstanden ist.

Der Erfolg dieser Berechnung besteht darin, daß der Antriebsmotor der Kurven nur noch die Reiblasten aufbringen muß. Diese werden geringfügig dadurch erhöht, daß die Federkennwerte und die Verteilung der bewegten Massen in der ausgeführten Maschine nur mit bestimmten Genauigkeiten ermittelbar sind.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Reduktion motorantreibender Momente. Im Einstellbetrieb kann eine Verletzungsgefahr durch Maschinenteile entstehen, wenn die Kurvenwelle durch solche antreibenden Momente plötzlich anläuft.