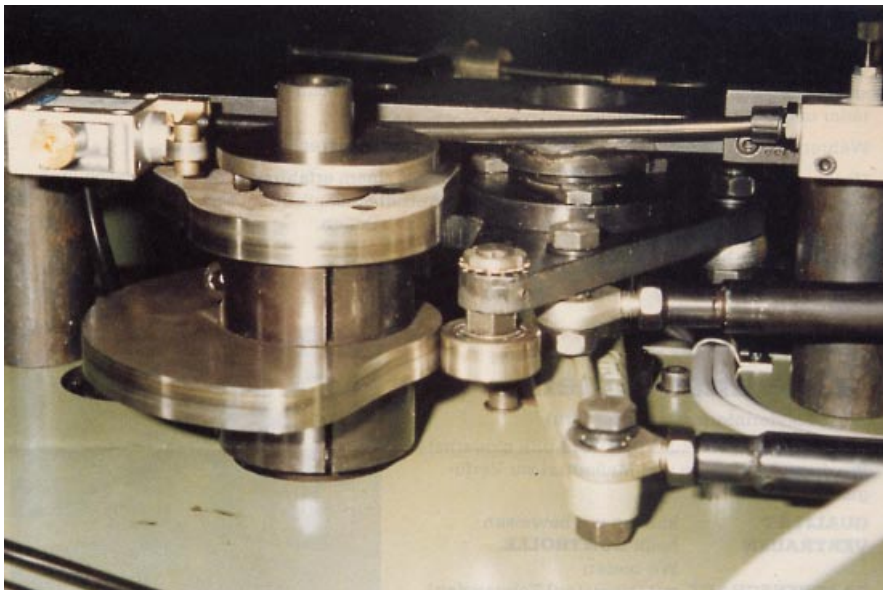


Takt für Takt

Maschinenmarkt 98 Ausgabe 14 - 1992

Ungleichförmige Bewegungsabläufe optimieren mit einem kinematischen Softwareprogramm

Um ungleichförmige kinematische Bewegungen auszulegen, greift der Konstrukteur



meist auf seine Erfahrungen zurück. Der Bewegungsplan der zuletzt konstruierten Maschine dient als Vorlage für lokale Änderungen, beispielsweise der Spitzenbeschleunigung. Damit wird das anschließende Optimieren des Gesamtbewegungsplans sehr zeitaufwendig. Mit einem Softwareprogramm jedoch lässt sich dieser

Aufwand nun minimieren.

Mit einem Kinematik-Softwareprogramm lassen sich Kurven- und Gelenkgetriebe berechnen, graphisch darstellen, simulieren, bewerten, optimieren und Datenträger für die Kurvenfertigung bereitstellen. Konzipiert ist das Softwareprogramm für Konstrukteure, die in ihren Maschinen ungleichförmige Bewegungen erzeugen müssen, beispielsweise in Verpackungsmaschinen, Druckmaschinen, Montageautomaten, Webstühlen, Pressen, Textilmaschinen und Nähautomaten.

Das Softwareprogramm eignet sich für Ingenieure, die die Technik ihrer Maschinen beherrschen und ihre spezifischen Kenntnisse von den notwendigen Bewegungsabläufen in die Berechnung einbringen können. Insofern ist dieses Kinematikprogramm ein Hilfsmittel, mit dem der Konstrukteur aufgrund seines Know-hows effektiv fortschrittliche Lösungen entwickeln und anschließend konkrete Fertigungsunterlagen herstellen kann.

Das bestehende Programmpaket erweiterte man nun um ein Bewegungsplanprogramm, das es dem Konstrukteur erstmals erlaubt, das gesamte Maschinentaktdiagramm, den Gesamtbewegungsplan der Maschine, am Rechnerbildschirm in seiner Gesamtheit zu optimieren. Dem Konstrukteur stehen hierbei zwei Betriebsarten zur Verfügung:

- Er kann in einer Gesamtdarstellung mit allen Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen jeden Bewegungsgesetzparameter mit der Maus "einfangen" und bei Neuplazieren der Maus umdefinieren. Den sich daraus neu ergebenden Bewegungsverlauf stellt das Bewegungsplanprogramm sofort dar. Abhängigkeiten, die zwischen den Bewegungsgesetzparametern definiert wurden, zieht das Programm selbständig nach, beispielsweise bei automatischen Randwertanpassungen.
- Darüber hinaus formuliert der Konstrukteur Bedingungen für die Bewegungsverläufe, aus denen das Bewegungsplanprogramm automatisch die erforderlichen Bewegungsgesetzparameter ermittelt. Bedingungen sind aus einem Menü wählbar oder können als mathematische Formeln frei definiert werden. Alle Bewegungsgesetzparameter in allen im Programm vorhandenen Bewegungsgesetzen lassen sich als Optimierungsvariable heranziehen.

Bisher wurde der Bewegungsplan im wesentlichen aufgrund von Erfahrungen mit Vorgängermaschinen entwickelt. Änderungen wurden meist lokal angebracht, beispielsweise um eine einzelne Spitzenbeschleunigung zu reduzieren oder einen Kontrollpunkt zu durchfahren. Entsprechend langwierig gestaltete sich auch das Optimieren des Gesamtbewegungsplans von Maschinengeneration zu Maschinengeneration.

Das Bewegungsplanprogramm bietet zwei wesentliche Vorteile gegenüber dem bisherigen Vorgehen:

- Der Konstrukteur verbessert nicht nur einzelne Stellen im Bewegungsplan, sondern den Bewegungsplan als Ganzes. Das Bewegungsplanprogramm unterstützt ihn also bei der Suche nach globalen Optima für die Bewegungsgesetzparameter, wie zum Beispiel Hübe, Taktwinkel, Wendepunktparameter und Randwerte.
- Der Zeitraum für das Finden einer guten Lösung reduziert sich drastisch dadurch, daß man die Auswirkungen von manuellen Änderungen beziehungsweise rechnerischen Optimierungsschritten am Rechnerbildschirm sofort ablesen kann. Wofür die Entwicklung sonst Jahre brauchte, kann nun innerhalb von Stunden oder Tagen abgewickelt werden.

Bewegungsplanprogramm für Montageautomat

Die Arbeit mit dem Bewegungsplanprogramm soll nun anhand eines Beispiels aus der Praxis deutlich werden (Bild 1).

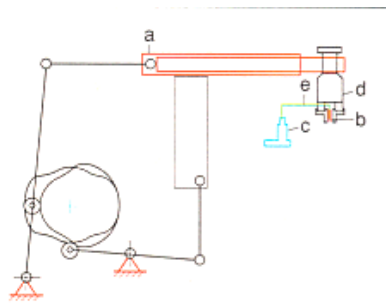


Bild 1: Arbeiten mit einem Bewegungsplanprogramm am Beispiel eines Montageautomaten
a Montageautomat, b Hülse, c Vorrichtung, d Greifer, e Bahnkurve des Greifers

Ein Montageautomat a zieht eine Hülse b aus einem Magazin und steckt sie auf einen Stift. Der Stift ist auf einer Vorrichtung c befestigt, die in Bild 2 blau dargestellt ist. In Schwarz ist der Greifer d eingezeichnet, der auf der Unterseite über zwei Klemmböden verfügt. Die ebene Bewegung des Greifers wird mit Hilfe eines Kontrollpunktes auf dem Greifer beschrieben, der im Zentrum der Klemmböden sitzt. Die idealisierte, prinzipielle Bahnkurve des Greifers ist grün dargestellt. Der Greifer zieht die Hülse aus dem Magazin, wenn sein Kontrollpunkt den Bahnpunkt ganz rechts unten erreicht hat. Die Aufgabe besteht nun darin, den Bewegungsplan für die ebene Bewegung des Greifers im Sinne minimaler Beschleunigungen und günstiger

Beschleunigungsverläufe für eine Drehzahl von 60 min^{-1} zu optimieren.

Angenommen, es sei nun der Moment erreicht, in dem der Greifer gerade bei dem Magazin ankommt - Bild 2 zeigt den Greifer in dieser Getriebestellung, die auch den Nullpunkt $\varphi = 0^\circ$ im Bewegungsplan (Bild 3) kennzeichnet - dann müssen im einzelnen nacheinander folgende Teilbewegungen ausgeführt werden:

- Der Greifer muß warten, bis die jeweiligen Klemmböden eine entsprechende Hülse gegriffen haben. Während dieser Zeit darf sich der Greifer nicht bewegen. Aus technologischen Gründen muß diese Zeit mindestens 50 ms betragen, das entspricht bei einer Drehzahl von 60 min^{-1} (1HZ) einem Kurvendrehwinkel von 18° . Um sicherzugehen, wird der Taktwinkel für diesen Bewegungsabschnitt auf 20° festgelegt.
- Der Greifer muß senkrecht nach oben fahren, bis die Hülse vollständig aus dem Magazin herausgezogen wurde und demnach freigeht. Die zulässige Abweichung von der senkrechten Linie beträgt 0,2 mm, die für das Optimieren der Beschleunigungen auch voll ausgenutzt werden kann. Der Greifer muß so einen senkrechten Hub von mindestens 30 mm

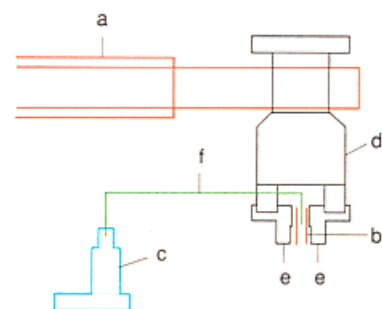


Bild 2: Bewegungsplan eines Montageautomaten
a Montageautomat, b Hülse, c Vorrichtung, d Greifer, e Klemmböden, f idealisierte Bahnkurve des Greifers

durchlaufen. Im Sinne günstiger Beschleunigungen darf er aber auf maximal 40 mm erweitert werden. Die Hülse geht frei, wenn der Greifer 28 mm Hub zurückgelegt hat. Die Zeit für diese Bewegung ist beliebig wählbar.

- Der Greifer fährt 100 mm nach links zum Stift. Die Zeit für diese Bewegung ist ebenfalls beliebig. Sie wird so gewählt, daß sich insgesamt günstige Beschleunigungen ergeben. Dieser Bewegungsabschnitt darf sich mit dem vorangegangenen und dem nachfolgenden überschneiden, so daß sich keine rechteckige Bahnkurve ergeben wird, sondern eine abgerundete.
- Der Greifer wird senkrecht abgesenkt auf die Höhe des Magazins. In dieser Höhe (y-Koordinate) wird auch die Hülse auf den Stift montiert. Der Hub ergibt sich aus Abschnitt 2 (Bild 3), die Zeit für diesen Abschnitt ist ebenfalls frei wählbar. Die Abweichung von der Senkrechten darf innerhalb der letzten 28 mm nicht wesentlich größer sein als 0,1 mm, denn das Mindestspiel zwischen Hülse und Stift beträgt 0,15 mm.
- Der Greifer muß warten, bis die Klemmbacken die Hülse losgelassen haben. Auch dieser Vorgang dauert mindestens 50 ms, so daß 20° Kurvendrehwinkel für diesen Bewegungsabschnitt veranschlagt werden. Die Klemmbacken öffnen sich dabei um 0,5 mm.

- Der Greifer fährt senkrecht nach oben. Bei einem Hub von 25 mm gehen die Klemmbacken frei. Sie überdecken also die Hülse nicht vollständig. Bis dahin darf die Bewegung des Greifers bis zu 0,4 mm von der Senkrechten abweichen, weil die Klemmbacken geöffnet bleiben. Der Hub für diese Bewegung muß mindestens 30 mm betragen, darf aber auf 40 mm erweitert werden. Die Zeit für diesen

Bewegungsabschnitt ist ebenfalls im Sinne günstiger Beschleunigungen frei wählbar.

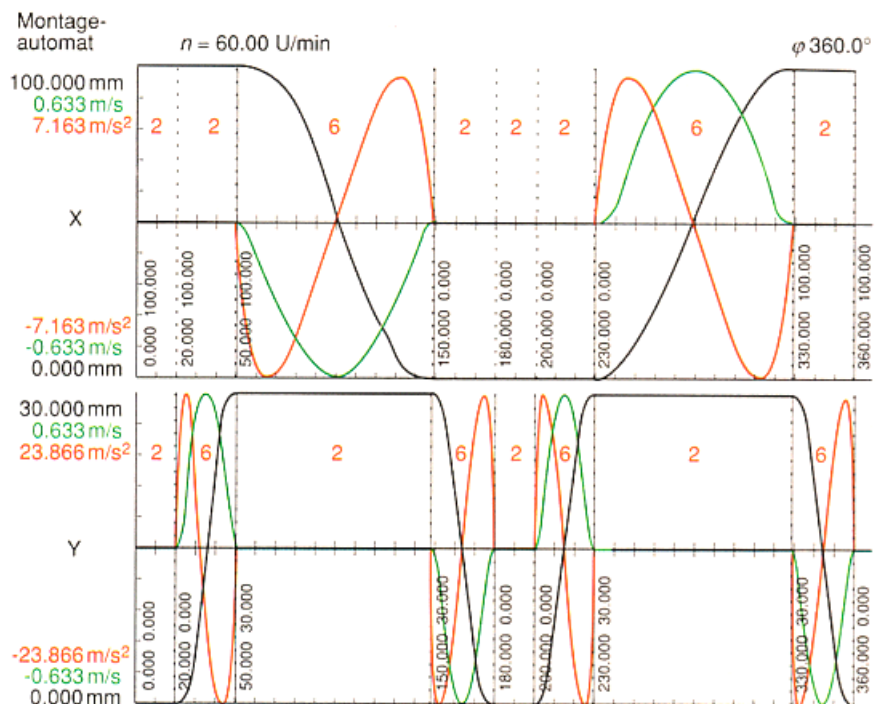


Bild 3: Horizontale (x) und vertikale (y) Bewegungsabläufe des Greifers eines Montageautomaten

- Der Greifer fährt in beliebiger Zeit 100 mm nach rechts. Diese Bewegung darf sich mit der vorangegangenen und der nächsten überschneiden.
- Der Greifer wird senkrecht abgesenkt in die Ursprungsposition. Auch die Zeit für diese Bewegung ist beliebig, der Hub ergibt sich aus Abschnitt 6 (Bild 3). Innerhalb der letzten 25 mm darf die Abweichung von der Senkrechten nicht mehr als 0,4 mm betragen, weil die Klemmbacken des Greifers immer noch geöffnet sind.

Ziel des Optimierens

Ziel des Optimierens ist es, die freien Hübe und Drehwinkel so zu bestimmen, daß unter Ausnutzung aller zulässigen Abweichungen die Beschleunigungsverläufe insgesamt "optimal" werden. Zunächst ist der Begriff "optimal" zu definieren: für diese Aufgabenstellung soll der optimale Bewegungsplan derjenige sein, der die von den Toleranzen vorgegebenen Grenzbedingungen einhält und - über beide Bewegungsverläufe x und y betrachtet - die niedrigste Maximalbeschleunigung "max" ($\max(x''(\varphi), \varphi = 0^\circ \text{ bis } 360^\circ)$, $\max(y''(\varphi), \varphi = 0^\circ \text{ bis } 360^\circ)$) hervorruft. Der Optimierungsprozeß mit dem Bewegungsplanprogramm vollzieht sich in drei Schritten:

- Eingegeben wird zunächst ein Bewegungsplan als Startvorgabe für die Lösungssuche.
- Dann wird von Hand voroptimiert, indem man die Bewegungsgesetzparameter mit der Maus verschiebt.
- Der dritte Schritt umfaßt das rechnerische Endoptimieren unter Vorgabe der Grenzbedingungen aus der Aufgabenstellung.

Für das manuelle Vor- und das rechnerische Endoptimieren ist zuerst ein Bewegungsplan einzugeben, der rein von der Struktur her die Abfolge der Einzelbewegungen (Rast, positiver Hub, Rast und negativer Hub) korrekt umsetzt. Während der Parameteroptimierung ändert sich diese Bewegungsplanstruktur nicht. Die Parameterwerte für die einzelnen Bewegungsgesetzabschnitte sind in dieser Anfangsphase noch nicht wichtig. Allerdings verkürzt sich der Weg zur endgültigen Lösung, wenn man schon mit der Startvorgabe einen relativ guten Bewegungsplan vorgibt.

So könnte der Konstrukteur als Startvorgabe beispielsweise den in Bild 3 dargestellten Bewegungsplan verwenden. x bezeichnet die horizontale Bewegung des Greifers (100 mm Hub) und y die vertikale. Der Nullpunkt für die Koordinaten x und y liegt im Montagepunkt der Hülse, also in dem Punkt der Bahnkurve des Greiferkontrollpunkts, der am weitesten links unten liegt. Dargestellt sind die Verläufe von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung der x - und y -Koordinaten des Greiferkontrollpunkts in Abhängigkeit vom Kurvendrehwinkel und bezogen auf die Kurvendrehzahl von 60 min^{-1} .

Modifizierte Sinuslinie ist Bewegungsgesetz

Die Zeiten für die einzelnen Hubabschnitte wurden proportional zu den Hübten verteilt. Den Abschnitten mit 30 mm Vertikalhub werden damit jeweils 30° Kurvendrehwinkel zugeordnet, den Abschnitten mit 100 mm Horizontalhub entsprechend 100°. Damit ergibt sich gerade ein Gesamtdrehwinkel von 360°. Als Bewegungsgesetz wurde für alle Hubabschnitte die modifizierte Sinuslinie (Kennziffer 6) verwendet. Dieses Bewegungsgesetz hat sich in ähnlichen Anwendungsfällen hinsichtlich Laufverhalten und Laufruhe der Kurvengetriebe gut bewährt.

In Bild 3 sind neben den Verläufen auch die Extremwerte für Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung der x- und y-Koordinaten angegeben. Die Maximalbeschleunigung für die Bewegung in x-Richtung beträgt 7,2 m/s², für die Bewegung in y-Richtung hingegen 23,9 m/s², also mehr als das Dreifache. Es wird klar, daß der Bewegungsplan hinsichtlich der Beschleunigungen nicht ausgewogen gestaltet ist. Die Bewegungsabschnitte der Vertikalbewegung - bisher 30° Drehwinkel - müssen verlängert werden, während die Horizontalbewegungen - bisher 100° Drehwinkel - zeitlich gestaucht werden müssen.

Es wird vorgeschlagen, die 30°-Abschnitte auf 40° zu verlängern. Die 100°-Abschnitte verkürzen sich damit auf 80°. Zur Vereinfachung während der Phase des manuellen Voroptimierens wird angenommen, daß die Drehwinkel der Bewegungsabschnitte der Verläufe x und y jeweils gleich sein sollen. Beim späteren rechnerischen Optimieren können sich aufgrund der unsymmetrischen Verteilung der Toleranzen geringfügige Differenzen ergeben.

Zunächst wird die graphisch-interaktive Betriebsart des Bewegungsplanprogramms gestartet. Das Programm zeigt den Bewegungsplan wie in Bild 3 auf dem Bildschirm an.

Um den ersten Bewegungsabschnitt von 30° Drehwinkel im Verlauf y auf 40° zu verlängern, fährt man mit der Graphik-Maus auf den Drehwinkelwert der rechten Grenzlage dieses Abschnitts (die Zahl 50.000) und drückt die linke Maus-Taste. Das Bewegungsplanprogramm erkennt daran, daß die rechte Grenzlage des ersten 30°-Abschnitts im Verlauf y verschoben werden soll. Der Benutzer identifiziert anschließend die 60°-Marke im Verlauf y mit Hilfe der Maus. Das Bewegungsplanprogramm verschiebt daraufhin die Grenzlage bei 50° Drehwinkel auf 60 Grad, indem es den 30°-Abschnitt auf 40° verlängert und die 100°-Rast auf 90° verkürzt.

In gleicher Weise ändert man die anderen fünf Hubabschnitte der Verläufe x und y. Dieser Vorgang ist innerhalb von zwei Minuten abgeschlossen.

Es ergibt sich der in Bild 4 gezeigte Bewegungsplan. Deutlich erkennbar ist, daß die Maximalbeschleunigungen der Verläufe x und y besser ausgeglichen sind (11,2 m/s² in x-Richtung und 13,4 m/s² in y-Richtung).

Um den Bewegungsplan weiter zu verbessern, werden die vorgegebenen Toleranzen genutzt. Dieses Vorgehen senkt ganz allgemein die Maximalbeschleunigungen. Außerdem wird angestrebt, die Maximalbeschleunigungen in x- und y-Richtung abzugleichen, denn dann wird das Maximum von beiden voraussichtlich gerade minimal werden.

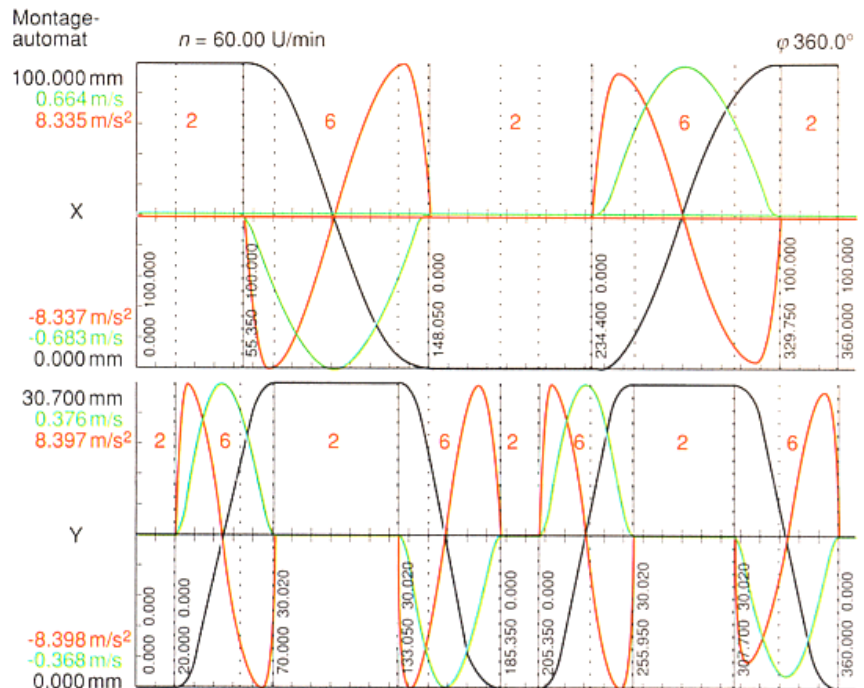


Bild 4: Bewegungsplan eines Greifers nach dem rechnerischen Optimieren horizontaler (x) und vertikaler (y) Bewegungsabläufe

Manuelles Optimieren hat seine Grenzen

Das manuelle Optimieren stößt hier an seine Grenzen, denn um eine optimale Lösung zu finden, müssen zehn Bewegungsgesetzparameter anhand relativ frei formulierter Optimierungsbedingungen gefunden werden. Die rechnerische Optimierung führt nun das Bewegungsplanprogramm durch. Dazu müssen zunächst die vorgegebenen Toleranzen in Zielbedingungen für die rechnerische Lösungssuche übersetzt werden. Das Bewegungsplanprogramm bietet dafür problemorientierte Bedingungsarten an.

Für die Lösung des anstehenden Problems gibt man acht Bedingungen genau in der hier angegebenen Form ein. Die ersten vier Bedingungen sind:

1. $(\max(t,100,180,x''(t))-\max(t,200,270,x''(t)))*0.002=0$
2. $(\max(t,0,360,x''(t))-\max(t,0,360,y''(t)))*0.002=0$
3. $(\max(t,20,60,y''(t))-\max(t,300,360,y''(t)))*0.002=0$
4. $(\max(t,20,60,y''(t))-\max(t,140,230,y''(t)))*0.002=0$

Weitere Bedingungen sind:

5. Wenn x im Bereich von 40 bis 70 Grad den Wert 99.8 mm annimmt, muß der Wert von $y \geq 28$ mm sein. Konditionierung: 25.575660
6. Wenn x im Bereich von 125 bis 175 Grad den Wert 0.1 mm annimmt, muß der Wert von $y \geq 28$ mm sein. Konditionierung 88.484334
7. Wenn x im Bereich von 205 bis 275 Grad den Wert 0.4 mm annimmt, muß der Wert von $y \geq 25$ mm sein. Konditionierung: 91.517369
8. Wenn x im Bereich von 300 bis 350 Grad den Wert 99.6 annimmt, muß der Wert von $y \geq 25$ mm sein. Konditionierung: 67.612333

Jede der angegebenen Bedingungen interpretiert das Bewegungsplanprogramm als Gleichung oder als Ungleichung, die es zu erfüllen gilt. Das Bewegungsplanprogramm minimiert daraufhin die Summe der konditionierten Residuenquadrate aus den vorgegebenen Bedingungsgleichungen oder -ungleichungen.

Das Bewegungsplanprogramm muß zwei zusätzliche Probleme lösen: zum einen können die Residuen aus den Bedingungen von sehr unterschiedlicher Größenordnung sein, zum anderen können die Rechenbedingungen für den Anwender von unterschiedlicher Bedeutung sein, so daß er sie möglicherweise wichten möchte. Deshalb bietet das Bewegungsplanprogramm die Möglichkeit, Gleichungen oder Ungleichungen zu konditionieren, ihre Residuen also mit geeigneten Zusatzfaktoren zu versehen, die die Fehlerwerte in die richtige Relation zueinander bringen.

Die Konditionierungswerte für allgemeine Formelbedingungen, die ersten vier Bedingungen also, können einfach durch zusätzliche Faktoren (siehe oben: 0.002) eingeführt werden. Bei den anderen vier problemorientierten Bedingungen werden die Konditionierungswerte vom Konstrukteur separat definiert oder vom Bewegungsplanprogramm automatisch vorgeschlagen.

Maximalbeschleunigung um 40% gesenkt

Das Optimieren mit Hilfe des Bewegungsplanprogramms anhand der acht Bedingungen ergibt schließlich den in Bild 4 dargestellten Bewegungsplan. Aufgrund der optimalen Überschneidung aller Bewegungsabschnitte wurde die Maximalbeschleunigung auf $8,4 \text{ m/s}^2$ gesenkt, also um etwa 40%!! Die Taktwinkel für die einzelnen Bewegungsgesetzabschnitte wurden auf $0,05^\circ$ genau bestimmt, so daß sich der Bewegungsplan nach Bild 4 kaum weiter verbessern läßt. Interessant ist auch, daß die Möglichkeit, den y-Hub auf über 30 mm auszudehnen, nicht benötigt wird: Offenbar treten die kleinsten Beschleunigungen tatsächlich bei dem kleinsten zulässigen y-Hub auf.

Um festzustellen, wie sich das Ergebnis der Optimierung ändert, wenn andere Optimalitätskriterien zugrundegelegt werden, führte man einen entsprechenden Test durch: Als "optimal" sollte nun der "beste" Kompromiß aus Minimierung der Maximalbeschleunigung in x-Richtung und Minimierung der Maximalbeschleunigung in y-Richtung gelten. Das Bewegungsplanprogramm schlug dazu eine Lösung vor, aus der erkennbar wurde, daß eine Verkleinerung der Beschleunigungswerte in x-Richtung erkaufte wird mit einer Vergrößerung der Maximalbeschleunigungen in y-Richtung.

Ein Bewegungsplanprogramm kann hilfreich sein, um die Abstimmung der Bewegungen in einer kurven- oder NC-gesteuerten Maschine zu optimieren. Mit Hilfe einfacher Zielbedingungen und der Angabe der veränderbaren Parameter findet das Bewegungsplanprogramm selbständig optimale Werte.