

Anforderungen an Maschinen zur Hochleistungszerspanung

Produktivitätssteigerung zur Reduzierung der Fertigungskosten in der Holzbearbeitung wurde bisher insbesondere durch Verringerung der Nebenzeiten mit Hilfe der NC-Technik erreicht. Ziel der Hochleistungszerspanung ist es, die Hauptzeiten zu reduzieren, ohne die Qualitätsanforderungen zu vernachlässigen. Die ersten Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet gehen in die zwanziger Jahre zurück. Eine erhebliche Bedeutung gewann die Materialzerspanung mit hohen Geschwindigkeiten erst 60 Jahre später, in den achtziger Jahren, durch Möglichkeiten der gegebenen Maschinenteknologie und der vorhandenen harten Schneidstoffe für die Werkzeuge. Umfangreiche Forschungsvorhaben befaßten sich mit der Hochgeschwindigkeitszerspanung von verschiedenen Metallegierungen und faserverstärkten Kunststoffen, wobei für den Begriff Hochgeschwindigkeit bei jedem Werkstoff ein bestimmter Bereich definiert werden mußte. Es zeigte sich, daß das Optimum des Zeitspanvolumens erheblich über den üblichen Werten liegt und eine wesentliche Verringerung der Bearbeitungskosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Oberflächenqualität erreicht werden kann. Die teilweise noch andauernden Forschungsvorhaben im Bereich der Holzbearbeitung lassen ähnlich günstige Ergebnisse erwarten. – Von Dipl.-Ing. Paul-Heinz Beyer¹⁾.

¹⁾ Bei dem Beitrag handelt es sich um einen Auszug aus einem Vortrag auf einer Fachtagung in Bielefeld, die vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurde. Der Verfasser ist Leiter der Entwicklung und Konstruktion in der Maschinenfabrik Reichenbacher GmbH in Dörfles-Esbach bei Coburg.

Allgemeine Anforderungen

Nachfolgend wird für die Begriffe Hochleistungszerspanung, Hochgeschwindigkeitszerspanung, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung und Hochgeschwindigkeitsfräsen die Abkürzung HGF verwendet. Die Bezeichnung Hochgeschwindigkeit oder High Speed (High Speed Cutting, HSC) bezieht sich auf die Schnittgeschwindigkeit, also auf Werkzeugdrehzahl mal Werkzeugum-

fang. Es geht um die hohe Umfangsgeschwindigkeit des Fräswerkzeugs, und die erfordert eine entsprechend hohe Werkzeugdrehzahl und eine ausreichende Antriebsleistung der Frässpindel.

Zunächst interessiert aber für den Maschinenbau (Abb. 1) eine andere Eigenschaft, die ebenfalls durch die hohe Schnittgeschwindigkeit bedingt ist, nämlich die Vorschubgeschwindigkeit oder Bahngeschwindigkeit, mit der das Werkzeug auf seiner programmierten Bahn durch das zu zerspanende Material bewegt wird. Oder die Argumentation umgedreht: Um kürzere Hauptzeiten zu erreichen, muß die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden. Der dann höhere Zahnvorschub verschlechtert die Bearbeitungsqualität. Folglich muß neben einer Erhöhung der Werkzeugzähnezahl auch die Werkzeugdrehzahl erhöht werden.

Im Unterschied zu bisher üblichen Bearbeitungsverfahren treten beim HGF ganz andere dynamische Belastungsfälle auf, die neue Anforderungen an die Maschinen stellen. Die bewegten Maschinenteile müssen schnell verfahren werden, und Beschleunigung und Verzögerung der bewegten Massen erhalten eine besonders große Bedeutung. Erhöhte Fliehkräfte und Schwingungen erfordern dynamisch hochbelastbare Maschinengestelle, also eine formsteife und schwingungsarme Konstruktion. Nur Steifigkeit (auch als Steifheit bezeichnet) aller bewegten Teile bei gleichzeitig geringen Massen ergeben die erforderlichen dynamischen Eigenschaften.

Wenn von hohen Vorschubgeschwindigkeiten gesprochen wird, geht es neben dem Positionieren vor allem um die Werkzeugbewegung beim Spanen und das Erzielen einer guten Oberfläche, ohne Werkzeugschlag, Facetten, Rattermarken usw.

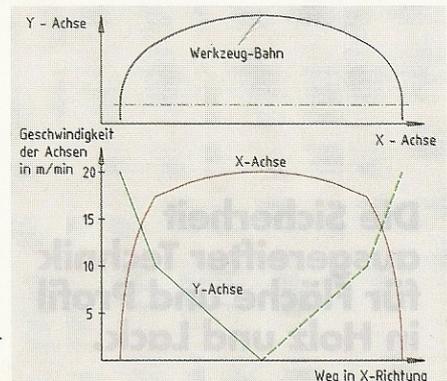
Vorschubgeschwindigkeit

Die Bahnvorschubgeschwindigkeit setzt sich aus den Vorschubgeschwindigkeiten einzelner Maschinenachsen zusammen, also beispielsweise in der waagerechten Ebene aus den Vorschubgeschwindigkeiten der X-Achse und der Y-Achse. In Abb. 2 ist eine ellipsenförmige Werkzeugbahn dargestellt. Die



Abb. 1: CNC-Maschine für das Hochgeschwindigkeitsfräsen

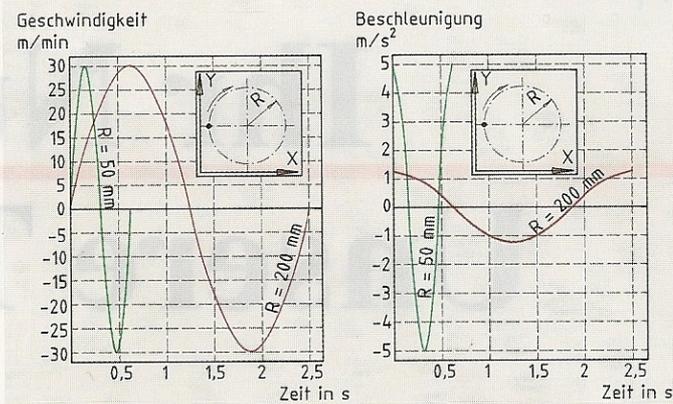
Abb. 2: Anteile der X- und Y-Achse an der Bahngeschwindigkeit



Bahngeschwindigkeit des Werkzeugs ist angenommen 20 m/min, unveränderlich über den ganzen Weg. Obwohl sie konstant ist, ändern sich die Geschwindigkeiten der beiden Maschinenachsen laufend.

Die X-Achse wird aus dem Stillstand heraus immer schneller und hat am Scheitelpunkt mit 20 m/min ihre höchste Geschwindigkeit, wird anschließend wieder langsamer bis zum Stillstand. Am Anfang beim Stillstand der X-Achse hat die Y-Achse ihre größte Geschwindigkeit, wird langsamer und kehrt mit Geschwindigkeit Null am Scheitelpunkt ihre Richtung um. Die Vorschubachsen einer NC-Maschine müssen fast ununterbrochen ihre Geschwindigkeit verändern.

Abb. 3: Beschleunigungswerte in der Kreisbahn



Vorschubbeschleunigung

Geschwindigkeitsänderung bedeutet Beschleunigen und Verzögern. Jede Geschwindigkeitsänderung ist ein positiver oder ein negativer Beschleunigungsvorgang. In Abb. 3 bewegt sich das Werkzeug mit konstant 30 m/min auf einer Kreisbahn. Der Radius ist 50 bzw. 200 mm. Dargestellt sind Geschwindigkeit und Beschleunigung für eine volle Kreisbewegung nur von der X-Achse. Die Geschwindigkeit erreicht nach dem ersten Viertelkreis ihr Maximum und wird nach dem zweiten Viertelkreis wieder Null mit anschließender Richtungsumkehr.

Die Beschleunigung ist jeweils im Bereich der Richtungsumkehr am größten, und sie wird im Bereich der größten Geschwindigkeit Null. Bei einem Radius von 50 mm würden Beschleunigung und Verzögerung bis auf 5 m/s^2 ansteigen, bei einem Radius von 200 mm (weniger gekrümmte Bahn) liegt der Maximalwert bei etwas über 1 m/s^2 .

Die Kreisbahn kann man stellvertretend für jeden beliebigen Konturverlauf sehen, der abwechselnd alle möglichen Krümmungen haben kann. Sollen optimale Spannungsparameter eingehalten werden, dann muß die Vorschubgeschwindigkeit immer konstant bleiben. Das ist wegen der Beschleunigung umso schwieriger, je kleiner die Krümmungsradien sind.

In Abb. 4 sind Geschwindigkeit und Beschleunigung an einer Eckenrundung für die X-Achse dargestellt: Eine Bahngeschwindigkeit von 20 m/min erfordert an einem Radius von 20 mm eine maximale Beschleunigung von über 5 m/s^2 . Wenn mit einer Maschine die notwendige Beschleunigung für einen Konturzug nicht erreicht wird, kann auch die vorgesehene Bahngeschwindigkeit nicht eingehalten werden. Das heißt andererseits, wenn die Bahngeschwindigkeit gesteigert werden soll, dann müssen entsprechend hohe Beschleunigungswerte möglich sein. An den Vorschubachsen einer HGF-Maschine müssen möglichst hohe Beschleunigungswerte erreicht werden.

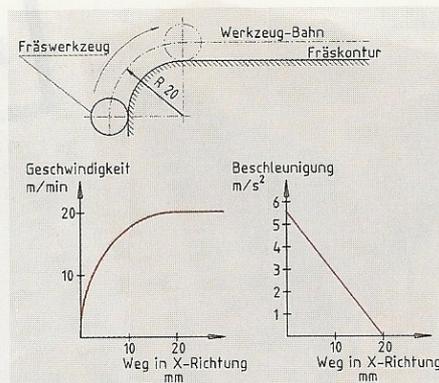


Abb. 4: Beschleunigungswerte in einer Eckenrundung

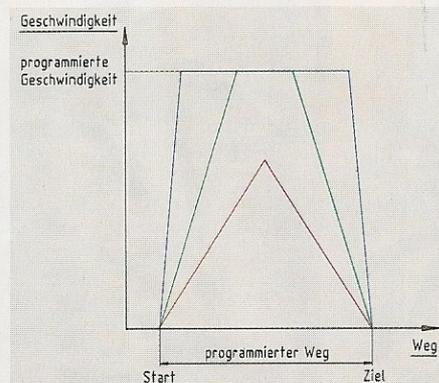
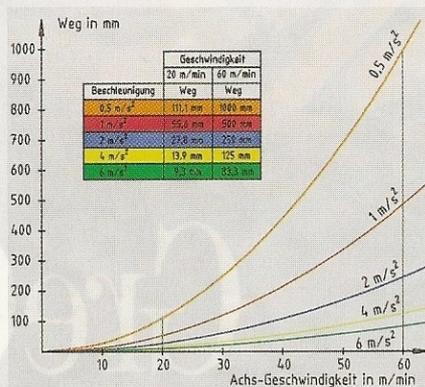


Abb. 5: Schnelles Erreichen der programmierten Geschwindigkeit

Abb. 6: Anfahr- und Bremsweg in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Beschleunigung



Beschleunigungsweg

Die hohen Beschleunigungen werden benötigt, um eine große Bahngeschwindigkeit bei der Konturbearbeitung einhalten zu können. Sie werden aber auch benötigt, um eine gewählte Geschwindigkeit zum Positionieren zwischen zwei Haltepunkten oder beim Bearbeiten an scharfen Ecken möglichst schnell erreichen und möglichst spät wieder verlassen zu können.

Es ist wenig sinnvoll, wenn vor dem Erreichen der Sollgeschwindigkeit schon wieder abgebremst werden muß (Abb. 5). Um vom Stillstand aus die programmierte Geschwindigkeit zu erreichen und umgekehrt, wird je nach Beschleunigung mehr oder weniger Zeit benötigt. Während dieser Zeit wird ein Weg zurückgelegt, auf dem die vorgesehene Geschwindigkeit noch nicht erreicht ist. Dieser Bahnabschnitt soll möglichst kurz und deshalb die Beschleunigung möglichst groß sein.

Bei den herkömmlichen NC-Fräsmaschinen sind Beschleunigungswerte meist nicht über 1 m/s^2 erreichbar und auch nicht erforderlich. Für das HGF sollte man dagegen möglichst 5 m/s^2 erreichen. Das hat aber Folgen an der Maschine, wie später noch erläutert wird.

Um beispielsweise von der Geschwindigkeit 20 m/min zum Stillstand zu kommen und umgekehrt, wird bei einer Beschleunigung von 1 m/s^2 rund 56 mm und bei 6 m/s^2 etwa 9 mm Verfahrensweg benötigt (Abb. 6). Bei 60 m/min sind es dagegen bereits 500 bzw. 83 mm.

Hohe Beschleunigungen sind vor allem auch für einen kurzen Anhalteweg im Gefahrenfalle wichtig. Bei einer Abschaltvorrichtung (Abb. 7), wie beispielsweise einem Safety-Bumper, ist vom Erreichen des Schaltpunktes (Abb. 8, links) bis zur maximalen Betätigung (Abb. 8, rechts) ein Sicherheitsweg (maximal verfügbarer Anhalteweg) vorhanden, auf dem die Maschinenachse von ihrer höchsten Geschwindigkeit aus (beispielsweise 60 m/min) zum Stillstand kommen muß. Hohe Beschleunigungswerte werden einerseits für hohe Geschwindigkeiten an Bahnkrümmungen und andererseits für kurze Beschleunigungswege benötigt, aber auch für einen möglichst geringen Schleppfehler.

(Weiter auf Seite 39)



Abb. 7: Schalteinrichtung mit Annäherungsreaktion (Beispiel Safety-Bumper)

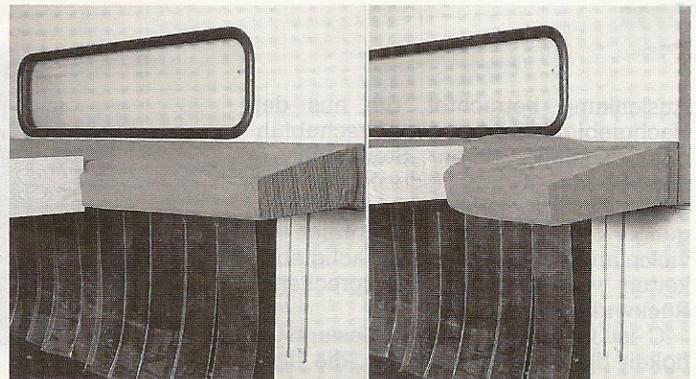


Abb. 8: Safety-Bumper (Schaltpunkt und maximale Betätigung)

Schleppfehler

Bei der Werkstückbearbeitung sollen nicht nur kurze Hauptzeiten und hochwertige Oberflächen erzielt werden, sondern auch die notwendigen Form- und Maßgenauigkeiten. In der NC-Regelungstechnik ist es begründet, daß sich beim Abfahren der programmierten Bahn ein Schleppfehler einstellt. Man kann sich das so vorstellen, als ob die NC-Steuerung die Maschinenachse an einem Seil hinter sich herzieht. Je größer die Geschwindigkeit ist, um so länger wird das Seil. Die Länge des Seils ist der Schleppabstand oder Schleppfehler. Der Schleppfehler ist auf einer geraden Bahn praktisch ohne Auswirkung, beim Erreichen des Ziels und Stillstand der Achse ist er wieder auf Null abgebaut, das heißt „das Seil ist wieder aufgerollt“. Dagegen wird bei einer gekrümmten Bahn die Vorschubbahn nach innen gezogen und das umso mehr, je größer der Schleppfehler ist. Daraus ergibt sich die Konturabweichung ϵ_k (Abb. 9).

Der Schleppfehler ist immer proportional zum sogenannten k_v -Faktor, das ist der einstellbare Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor aus dem Lageregelkreis der NC-Achse. Die Konturabweichung ϵ_k wird größer mit dem Quadrat der Bahngeschwindigkeit, und sie wird kleiner mit dem Produkt aus Bahnradius mal Quadrat des k_v -Faktors.

Der k_v -Faktor bei einer NC-Maschine – auch bei einer Werkzeugmaschine für die Metallbearbeitung – liegt üblicherweise bei 1 m/min/mm. Das heißt, auf einen Weg von 1 mm wird die Geschwindigkeit um 1 m/min verändert, das Verhältnis Schleppfehler zu Geschwindigkeit ist 1. Beim HGF müssen bei den Vorschubantrieben und der Maschinenmechanik die Voraussetzungen geschaffen werden, daß dieser Wert

des k_v -Faktors mindestens verdreifacht werden kann. Ein k_v -Faktor von 5 ergibt allerdings schon eine sehr hohe Beanspruchung der mechanischen Bauteile. Ein hoher k_v -Faktor steht in direktem Zusammenhang mit einer hohen Beschleunigung.

Ein k_v -Faktor von 1 reicht aus, wenn beispielsweise ein Radius von 200 mm mit 5 m/min gefahren werden soll und eine Konturabweichung von $1/10$ mm zulässig ist (Abb. 10). Bei 30 m/min ist bei gleichen Voraussetzungen bereits ein k_v -Faktor von 5 notwendig. Neben guten dynamischen Eigenschaften ist ein geringer Schleppfehler wichtig, um keine Genauigkeitsverluste bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten hinnehmen zu müssen.

Steifigkeit

Man könnte nun annehmen, um hohe Beschleunigungswerte zu erreichen – weil sie in vielfältiger Weise wichtig sind – brauche man nur die Vorschubantriebe leistungsstark genug auszulagern. Das wäre falsch, weil keine saubere Werkstückoberfläche erzielt werden kann, wenn die Maschinenmechanik die notwendigen Beschleunigungswerte nicht verträgt. Die Gründe dafür lassen sich am Beispiel einer Portalmaschine mit einzelnen Frässpindeln in einer Reihe (Abb. 11) aufzeigen. Das Portal fährt in Y-Richtung, vorn am Portalträger ist die seitlich verfahrnde X-Achse angebaut und davor auf dieser die Z-Achse mit den Frässpindeln.

In Abb. 12 ist diese Portalmaschine

von der Seite gesehen schematisch dargestellt. Die Bezeichnungen C_1 bis C_{13} stehen für die Einzelsteifigkeiten von einzelnen Bauteilen oder Baugruppen und C für die auf das Werkzeug bezogene Gesamtsteifigkeit. Die Steifigkeit ist der Kehrwert der Nachgiebigkeit und sie hat die Einheit $N/\mu m$. Eine Steifigkeit von beispielsweise $500 N/\mu m$ heißt, daß eine Kraft von 500 N wirken muß, um an dem Bauteil ein Nachgeben von $1 \mu m$ zu bewirken.

C_1 steht für die Steifigkeit der gesamten Frässpindel und C_2 für die Steifigkeit der Verbindung zwischen Spindel und Maschinenschlitten. C_{11} bezeichnet beispielsweise die Steifigkeit der Vorschubführung mit ihrem Umfeld.

Bei der Beurteilung der Steifigkeiten an einem Maschinenaufbau ist zu beachten, daß die Gesamtsteifigkeit immer kleiner ist, als die kleinste Einzelsteifigkeit, wie es das einfache Zahlenbeispiel in Abb. 13 zeigt: Die Gesamtsteifigkeit ist 0,25 und damit kleiner als die kleinste Einzelsteifigkeit von 0,5 (Einheiten angenommen $kN/\mu m$). Die Gesamtsteifigkeit ist immer kleiner als die kleinste Einzelsteifigkeit.

Auslenkung am Werkzeug

In Abb. 14 wird gezeigt, welche Auslenkungen Δy und Δz am Werkzeug erfolgen, durch einen Beschleunigungsstoß aus der Vorschubkraft F_v , die in Y-Richtung über die Vorschubspindel eingeleitet wird. Es wird dabei nur die

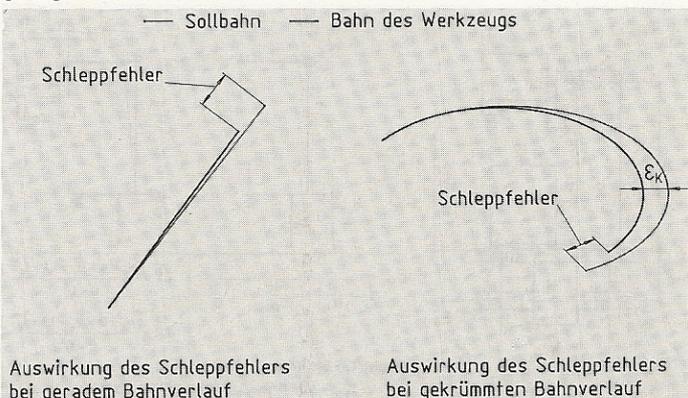


Abb. 9: Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor k_v und Schleppfehler

Bahngeschwindigkeit = 5 m/min

R	k_v	m/min		
		1	3	5
10	1,25	0,14	0,05	
20	0,63	0,07	0,03	
30	0,42	0,05	0,02	
40	0,31	0,03	0,01	
50	0,25	0,02	0,01	
100	0,13	0,01	0,01	
200	0,06	0,01	0,00	
300	0,04	0,01	0,00	
400	0,03	0,00	0,00	
500	0,03	0,00	0,00	
1000	0,01	0,00	0,00	

Bahngeschwindigkeit = 30 m/min

R	k_v	m/min		
		1	3	5
10				1,80
20			2,50	0,90
30			1,67	0,60
40			1,25	0,45
50			1,00	0,36
100			0,50	0,18
200	2,25	0,25	0,09	
300	1,50	0,17	0,06	
400	1,13	0,13	0,05	
500	0,90	0,10	0,04	
1000	0,45	0,05	0,02	

Konturfehler ϵ_k (mm)

Auslenkung betrachtet, die aus den Nachgiebigkeiten an der Vorschubführung kommt, deren Steifigkeit in Abb. 12 mit C_{11} bezeichnet ist. Das ganze System macht eine Kippbewegung. Tatsächlich sind natürlich an vielen anderen Stellen auch Nachgiebigkeiten vorhanden, die entsprechende Rückwirkungen auslösen.

C ist in diesem Fall die Gesamtsteifigkeit des Führungssystems, die darin enthaltenen Einzelsteifigkeiten sind: C_F für die Führung selbst, C_M für die Anbaustelle am Maschinenbett, C_{Schr} für die Verschraubung und C_U für die Umbauteile. Für die Führung insgesamt ergibt sich mit $205 \text{ N}/\mu\text{m}$ – wie schon bekannt – eine kleinere Steifigkeit als die kleinste Einzelsteifigkeit.

Die Auslenkung Δy ergibt sich aus der Masse m_s (auf den Massenschwerpunkt reduzierte Gesamtmasse) mal Beschleunigung a mal Schwerpunktabstand zur Krafteinleitung an der Vorschubspindel und mal Führungsabstand zum Werkzeug, dividiert durch die Steifigkeit des Führungssystems und durch das Quadrat der Führungslänge. Für Δz gilt sinngemäß das gleiche. Um die für die Bearbeitungsqualität schädliche Auslenkung möglichst gering zu halten, müssen Masse, Beschleunigung und Ausladungen eines Portales möglichst klein sein und Steifigkeit und Führungslänge möglichst groß. Da aber tatsächlich die Beschleunigung nicht klein sein darf, sondern groß sein muß (siehe oben), muß die Masse um so kleiner und die Steifigkeit um so größer sein.

Eigenfrequenz

Aus Masse, Steifigkeit und den Abmessungen läßt sich die Eigenfrequenz f (Hz) des Systems bestimmen (Abb. 15). Stark vereinfacht kann man sagen, die Eigenfrequenz f ist die Wurzel aus Steifigkeit durch Masse, oder umgestellt $m:C = 1:f^2$. Die Auslenkung ist, ebenfalls vereinfacht, Masse mal Beschleunigung durch Steifigkeit

$$C_1 = 0,5 ; C_2 = 1 ; C_3 = 2 ; C_4 = 4 ; C_5 = 4$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5}}$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}}$$

$$C = \frac{1}{2 + 1 + 0,5 + 0,25 + 0,25}$$

$$C = \frac{1}{4} = 0,25$$

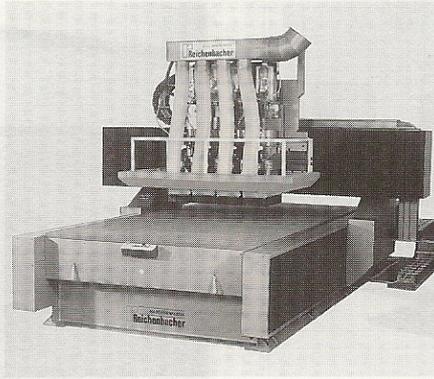
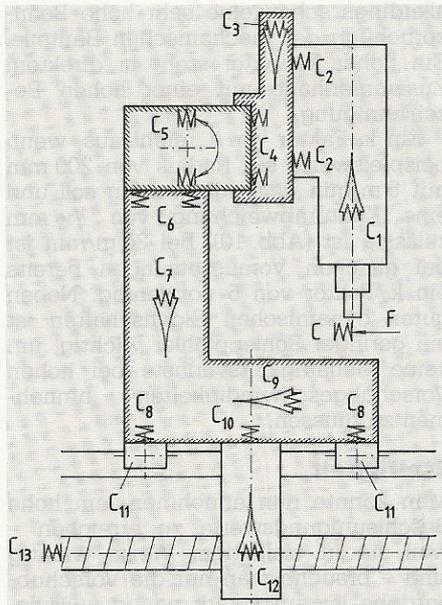


Abb. 11: CNC-Fräsmaschine in Portalbauweise mit Einzelspindeln

Abb. 12: Schematische Darstellung Maschinenportal (Einzelsteifigkeiten)



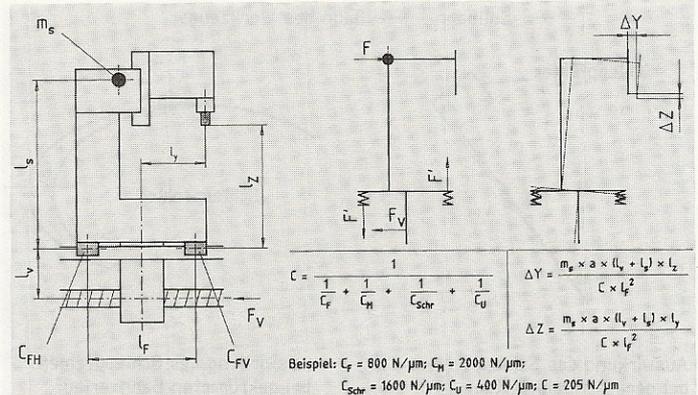
($a \cdot m : C$, siehe oben). Wird $m : C$ mit $1 : f^2$ ersetzt, ergibt sich für die nicht gewollte Auslenkung $\Delta z = a : f^2$ (Beschleunigung durch das Quadrat der Eigenfrequenz). Die Beschleunigung kann und muß groß sein – jedoch kann durch eine hohe Eigenfrequenz die Auslenkung akzeptabel klein gehalten werden.

In Abb. 16 sieht man, daß eine niedrige Eigenfrequenz eine große Auslenkung und ein langes Ausschwingen ergibt im Gegensatz zu einer hohen Eigenfrequenz. Beim HGF sind hohe Geschwindigkeiten und große Beschleunigungen notwendig. Deshalb

Abb. 13: Gesamtsteifigkeit, kleinste Einzelsteifigkeit

10,0	5,0	0,5
20,0	2,5	0,25
50,0	1,0	0,1
100,0	0,5	0,05

Abb. 14: Auswirkung der Steifigkeit einer Vorschubführung auf die Auslenkung am Werkzeug



muß man anstreben, die Eigengewichte (Massen) der bewegten Baugruppen zu verringern, ohne die Steifigkeit zu reduzieren. Damit erreicht man ein hochdynamisches Regelkreisverhalten und verbessert Oberflächenqualität und Arbeitsgenauigkeit.

Bearbeitungszentrum

Unter Berücksichtigung dieser Gesetzmäßigkeiten ist das bewegliche Maschinenportal in Abb. 14 in das in Abb. 17 gezeigte umgestaltet worden. Durch die symmetrische Spindelanzordnung werden die Auslenkungen zusätzlich reduziert. Die bewegten Massen sind auf etwa ein Drittel reduziert und der Schwerpunktabstand zur Führung auf die Hälfte. Man kann dabei davon ausgehen, daß in Zukunft Leichtbauwerkstoffe zunehmende Bedeutung haben werden, wie beispielsweise faserverstärkte Kunststoffe. Abb. 18 zeigt dieses Konzept als Maschine realisiert. Dieses Bearbeitungszentrum hat vier gesteuerte Achsen und automatischen Werkzeugwechsel, und es können gleichzeitig zwei Werkstücke bearbeitet werden. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit im Bahnsteuerbetrieb ist $60 \text{ m}/\text{min}$.

Einzelkomponenten

In der Praxis verhält sich eine NC-Maschine wie ein schwingungsfähiges System. Die einzelnen Massen, angefangen bei einem dynamisch möglichst hochbelastbaren Maschinengestell über die Vorschubantriebe, Führungen usw. bis hin zur Bearbeitungsspindel bzw. bis zur Werkstückspannvorrichtung, sind miteinander durch Elastizitäten verbunden und verhalten sich auch selbst so.

In Abb. 19 sind diese Elastizitäten, die wie Federn wirken, dargestellt und sinnbildlich. Am Ende dieser Kette befindet sich auf der einen Seite das Werkstück und auf der anderen das Werkzeug. Dazwischen findet der Spannungsprozeß statt, der nicht durch Schwingungen mit den bereits angesprochenen Auslenkungen beeinflusst werden darf. Alle Systemkomponenten, einschließlich der Vorschubantriebe mit Ansteuerung, müssen die gegensätzlichen Forderungen nach hoher Dynamik

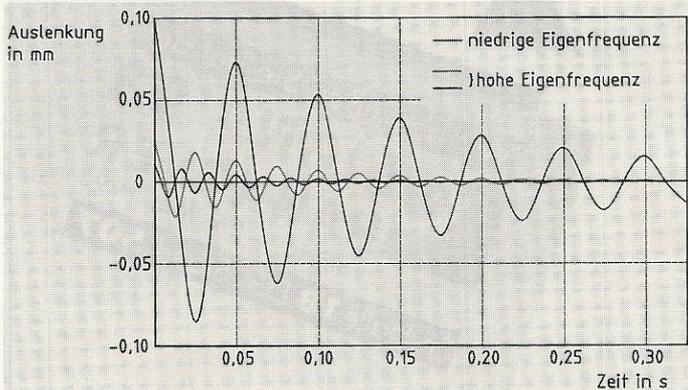


Abb. 16: Auslenkung (Schwingungsamplitude) und Ausschwingdauer am Werkzeug

bei gleichzeitig großer Steifigkeit erfüllen.

Das klassische Bauelement für die Umsetzung der rotatorischen in eine translatorische Vorschubbewegung ist der Kugelgewindtrieb und weniger die Zahnstange. Der Kugelgewindtrieb ist bekannt für Verschleißfestigkeit, hohen Wirkungsgrad, hohe Genauigkeit, praktisch Spielfreiheit und hoher Axialsteifigkeit – und das alles bei hoher Lebensdauer. Bei dem Bearbeitungszentrum in Abb. 18 wurden für die Z-Achse und die Y-Achse die üblichen Kugelgewindspindeln vorgesehen, für die X-Achse auf beiden Seiten aber Zahnstangen.

Das Antriebssystem Zahnstange/Ritzel wird oft als zweitrangig eingestuft – das ist zwar grundsätzlich richtig, aber man muß differenzieren und relativieren. Bei der großen Vorschubgeschwindigkeit wird eine entsprechend hohe Drehzahl der Kugelgewindspindel bzw. des Mutternsystems notwendig. Das würde bei den großen Verfahrenswegen zu einer Überschreitung der kritischen Drehzahl führen. Die Spindeldrehzahl kann man zwar durch Vergrößerung der Gewindesteigung reduzieren. Mit dem Quadrat der Steigung verringert sich aber die Torsionssteifigkeit der Spindel. Mit der Zahnstange ist man dagegen bei Axialsteifigkeit und Verfahrensgeschwindigkeit völlig längenunabhängig, und die Beschleunigung wird von keinem längenabhängigen Trägheitsmoment begrenzt. Wichtig ist für den Einsatz der Zahnstange, sich an die Vorteile der Kugelgewindspindel weitgehend anzunähern und ein Vorspannsystem einzusetzen, das das Zahnspiel beseitigt.

Abb. 18: Bearbeitungszentrum für die Hochleistungszerpannung

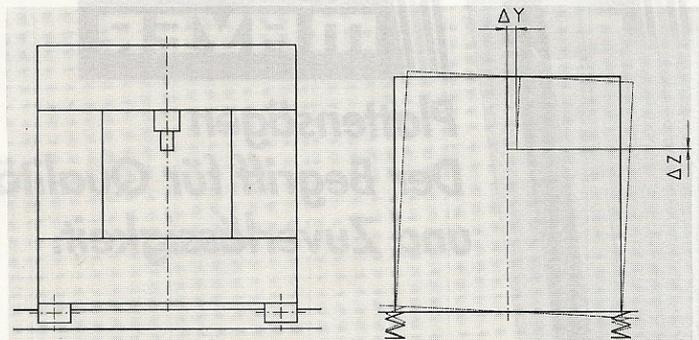
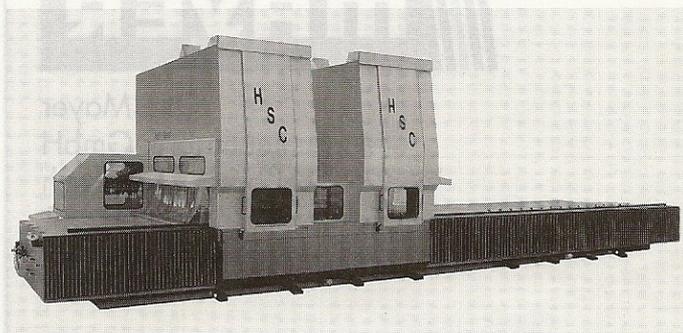


Abb. 17: Symmetrischer Portalaufbau

Vereinfachte Form (Einmassenschwinger):

$$\text{Eigenfrequenz } f = \sqrt{\frac{c}{m}} \times \frac{1}{2\pi} \times \frac{l_f}{l_s}$$

Konstante Faktor

Weitere Vereinfachung

$$f = \sqrt{\frac{c}{m}} \rightarrow \frac{m}{c} = \frac{1}{f^2}$$

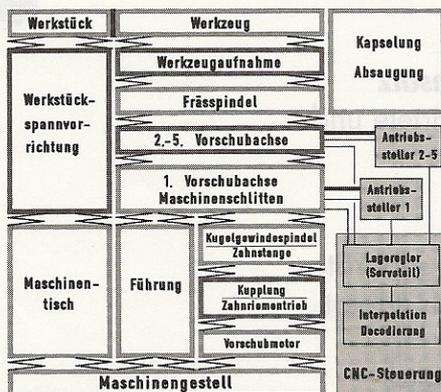
$$\text{Auslenkung } \Delta Z = \frac{m \times a}{c}$$

$$\Delta Z = \frac{a}{f^2}$$

Abb. 15: Auslenkung umgekehrt proportional zum Quadrat der Eigenfrequenz

An die Arbeitsspindel oder Frässpindel, üblicherweise als Hauptspindel bezeichnet, werden vielfältige und hohe Anforderungen gestellt, wie ausreichen-

Abb. 19: Schema Einzelkomponenten der CNC-Maschine



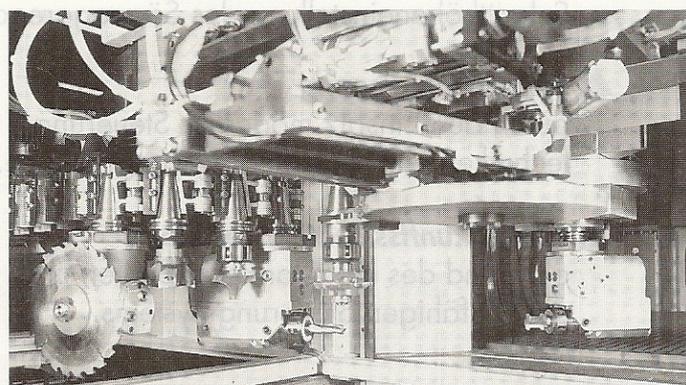
de Tragfähigkeit, Steifigkeit, Rundlaufgenauigkeit, geringe Erwärmung usw., bis hin zu einem Werkzeugaufnahmesystem für die sichere Übertragung des Drehmoments, exakte Positioniergenauigkeit und automatischem Werkzeugwechsel.

In der Metallbearbeitung wird das HGF vorzugsweise zum Feinfräsen bei dünnwandigen Werkstücken und zum Schlichten eingesetzt, so daß man zwar auch hohe Drehzahlen, aber doch eher begrenzte Leistungen benötigt. In der Holzbearbeitung, wenn das HGF erst einmal voll in die Praxis übergegangen sein wird, werden vermutlich auch hohe Leistungen für die Zerspaltung verlangt werden, denkbar wären beispielsweise 40 kW bei 40 000 min⁻¹. Diese Spindeln gibt es heute noch nicht zu einem Preis, der für eine Holzbearbeitungsmaschine akzeptabel wäre.

Bei dem Bearbeitungszentrum wurde an die Grenzen des heute vernünftig Machbaren gegangen, und es sind zwei Spindeln mit folgenden Daten eingesetzt: 20 kW, 21 000 min⁻¹ (angesteuert mit statischem Frequenzumrichter), automatischem Werkzeugwechsel mit SK 40-Aufnahme und der notwendigen Sensorik, Fettschmierung (um Kosten und Problematik der Leckläbsaugung zu vermeiden), Wasserkühlung und eine kurze Bauform (damit sie auch bei einem 5-Achs-Kopf verwendbar ist).

Die Schnittstelle Spindel/Werkzeug liegt im Kraftfluß zwischen Maschine und Werkstück. Bei hohen Drehzahlen und den damit verbundenen erhöhten Fliehkräften muß das Werkzeugaufnahmesystem seine Funktion unter erschwerten Bedingungen erfüllen. Höchste Wichtigkeit haben größte Rund- und

Abb. 20: Werkzeugwechsler mit 24 Magazinplätzen



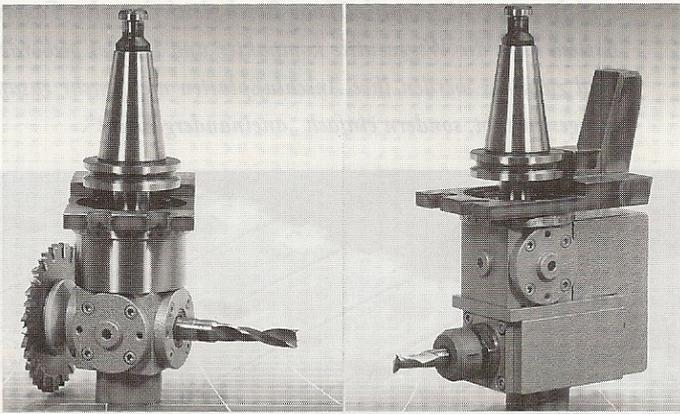


Abb. 21: Auswechselbare Bearbeitungsaggregate

Planlaufgenauigkeit und höchste Wuchtgüte für Werkzeugaufnahme und Werkzeug. Die im Normalbereich schon sehr wichtige kurze Baulänge der Werkzeuge hat beim HGF einen noch viel höheren Stellenwert. Zwischenfutter sollten möglichst vermieden werden.

Neben der Schnittstelle zur Spindel sind für die Werkzeuge die wichtigsten Kriterien Schneidstoff, Schneidengeometrie und konstruktive Gestaltung. Das HGF für Holz und ähnliche Werkstoffe steht am Anfang und wird zweifellos weitere Fortschritte machen. Neben den Hauptspindeln besteht der größte Entwicklungsbedarf bei den Werkzeugen.

Bei den hohen Geschwindigkeiten kommt der Sicherheit natürlich eine zusätzliche Bedeutung zu. Das Bearbeitungszentrum ist mit einer mitfahrenden Kapselung ausgestattet, die vor Staub, Lärm und mechanischen Gefahren schützt. Die Absaugung wird durch eingebaute Radialgebläse verstärkt.

Bearbeitungskonzept

Um die Maschinensupporte des Bearbeitungszentrums möglichst kompakt zu halten und damit der unerwünschten Auslenkung am Werkzeug entgegenzuwirken, steht für jeden Bearbeitungsplatz nur eine leistungsfähige Spindel zur Verfügung, die mit automatischem Werkzeugwechsel ausgestattet ist (Abb. 20). Die Kettenmagazine haben 24 oder 48 Ablageplätze. Die negativen Auswirkungen der Werkzeugwechselzeit werden dadurch gemindert, daß nach Möglichkeit immer mehrere Werk-

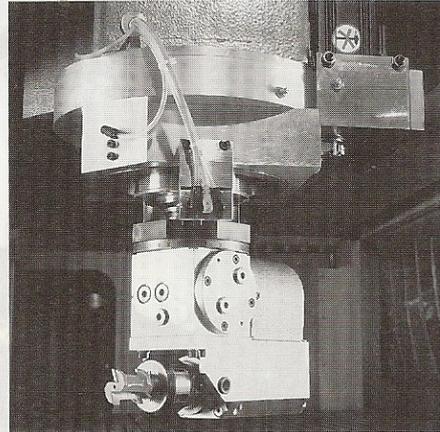


Abb. 22: Schwenken der auswechselbaren Bearbeitungsaggregate (C-Achse)

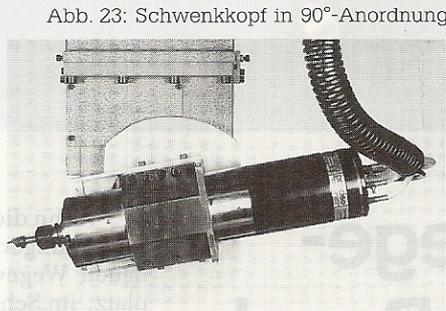


Abb. 23: Schwenkkopf in 90°-Anordnung

stücke nacheinander mit demselben Werkzeug bearbeitet werden, bevor wieder gewechselt wird. Da die Baulänge der Maschine wegen des Zahnstangensystems in X-Richtung nicht begrenzt ist und die Verfahrensgeschwindigkeiten hoch sind, wird in der Regel auch die Möglichkeit der wechselseitigen Beschickung genutzt.

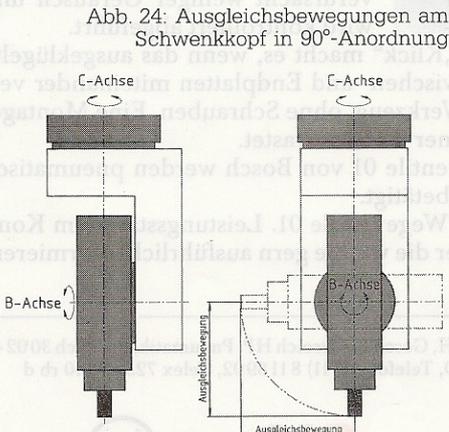


Abb. 24: Ausgleichsbewegungen am Schwenkkopf in 90°-Anordnung

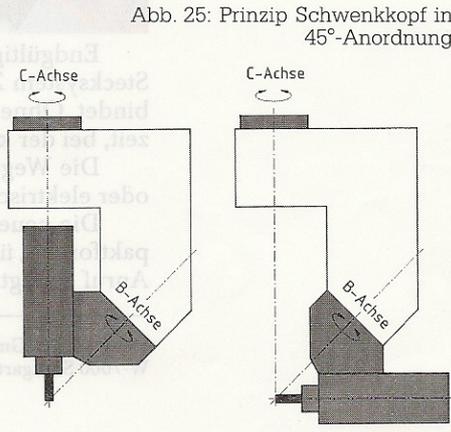


Abb. 25: Prinzip Schwenkkopf in 45°-Anordnung

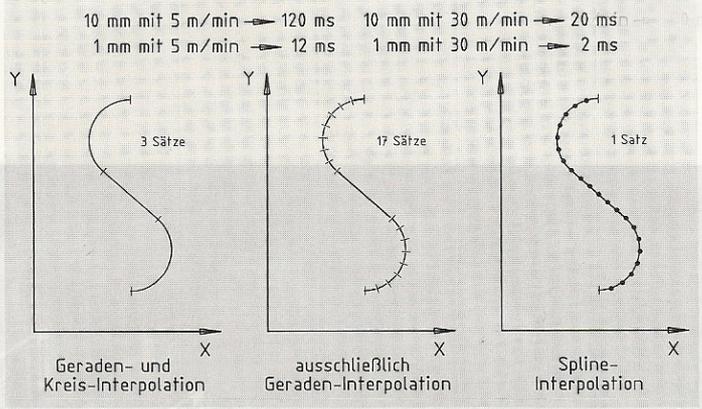


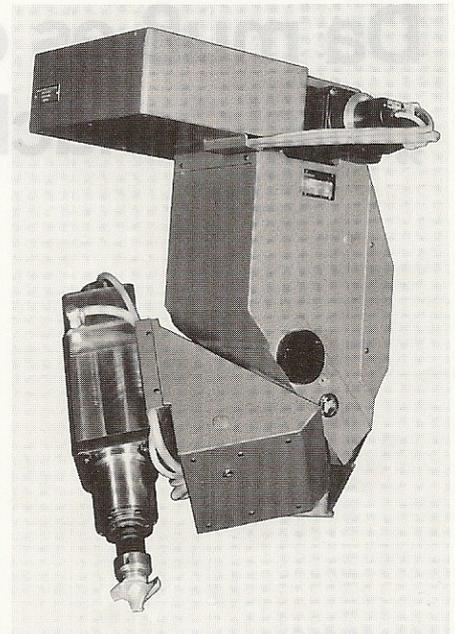
Abb. 27: CNC-Steuerung: Interpolationsarten (Bildnachweis: Verfasser, Reichenbacher)

Universelle Bearbeitungsmöglichkeiten sind durch auswechselbare Bearbeitungsaggregate gegeben (Abb. 21). Bei horizontalen Bearbeitungen muß das Werkzeug in beliebige Richtungen verschwenkt werden können. Zu diesem Zweck ist unter jeder Hauptspindel eine weitere NC-Achse integriert, mit der diese Aggregate endlos auch während des Spannungsvorgangs geschwenkt werden können (Abb. 22).

5-Achs-Bearbeitung

Zur Abrundung des ganzen Konzepts kann das Bearbeitungszentrum alternativ auch mit einem Schwenkkopf (Abb. 23) mit vierter und fünfter NC-Achse ausgestattet werden. Die übliche Schwenkkopfausführung (Abb. 24) hätte den Nachteil, daß mit jedem beliebigen Schwenkvorgang das Werkzeug vom Arbeitspunkt wegwandert und Ausgleichsbewegungen in allen Linearachsen erfolgen müßten. Das würde wiederum Bearbeitungszeit kosten, und die Achswege müßten nach allen Richtungen um die Ausgleichsbewegungen größer werden, wenn man von gleichen Werkstückabmessungen ausgeht. Dar-

Abb. 26: Schwenkkopf in 45°-Anordnung (Kardanischer Arbeitskopf)



aus folgte dann die gegensätzliche Wirkung zum Streben nach Kompaktheit der Maschine.

Deshalb ist für die 5-Achs-Bearbeitung eine Arbeitskopfausführung vorgesehen, bei der der theoretische Arbeitspunkt des Werkzeuges, unabhängig von der Schwenkstellung, unverändert an derselben Stelle bleibt (Abb. 25, 26). Mit dem Schnittpunkt der Schwenkachsen im theoretischen Arbeitspunkt des Werkzeuges ergeben sich die größten Arbeitsgenauigkeiten. Abweichungen aus den Schwenkachsen, die sich aus erforderlichen minimalen Toleranzen ergeben, werden im gemeinsamen Schnittpunkt zu Null.

Die Richtungsumkehrspanne (Nachgiebigkeit aus Grenzen der Steifigkeit auch bei „spielfreien“ Ausführungen) wird bis zum Werkzeug nicht vervielfacht wie bei anderen Achsen-Anordnungen. Außerdem haben die Schnittkräfte vom Werkzeug fast keine Auswirkung auf das notwendige Drehmoment der Achsantriebe.

CNC-Steuerung

Zum Thema gehören auch einige Anmerkungen zum Steuerungsbereich. Die verfügbaren CNC-Steuerungen und Servoantriebe sind durchaus für den Einsatz beim HGF geeignet. Es sind Servoabtastzeiten von 1 bis 2 ms möglich, das heißt die Wegmeßsysteme werden pro Sekunde 500 bis 1 000 mal abgefragt. Dadurch werden zusätzliche Genauigkeitsverluste durch die Regeltechnik bei hohen Geschwindigkeiten vermieden.

Ein Engpaß besteht allerdings durch die Mindestaufbereitungszeiten für die Programmsätze. Je höher die Bahngeschwindigkeit ist, um so kürzer ist die Zeitspanne, die für einen NC-Satz, abhängig von dem im Satz enthaltenen Verfahrensweg, zur Verfügung steht. Die Leistungsfähigkeit der Rechner-Hardware steigt fortlaufend, damit werden auch die Mindestzeiten für die Satzaufbereitung immer kürzer.

Üblicherweise bestehen die Konturen, also die Werkzeugbahn, aus Geraden und Kreisbögen (Abb. 27). Dabei kann es gerade bei hohen Geschwindigkeiten vorkommen, daß die Wegabschnitte zu kurz sind und es dann zwangsläufig zu Geschwindigkeitseinbrüchen kommt. Umso mehr ist es unzweckmäßig, bestimmte (automatisierte) Programmierverfahren aus der Metallbearbeitung zu übernehmen, bei denen die Konturen nur aus extrem kurzen Geradenstückchen zusammengesetzt werden.

In der Regel kann man diese Problematik auch heute schon umgehen, indem man eine höhere Interpolationsart, die Spline-Interpolation, anwendet. Damit lassen sich mehrere kleine Wegstrecken zu einem Kurvenstück verbinden. Anstelle von mehreren Geraden- und Kreisbogenstücken tritt jeweils ein Polynom-Abschnitt, so daß sich die

Weglänge pro Satz um einen Faktor meist zwischen 10 und 30 vergrößert. Dadurch werden außerdem die Verfahrensbewegungen weicher.

Anwendung in der Praxis

Die HGF-Forschungen sind noch nicht abgeschlossen und zumindest zeigen Arbeitsspindeln und Werkzeuge heute noch Grenzen auf. Erfahrungen, die bisher in der Fertigungspraxis gemacht wurden, zeigen aber, daß Leistungssteigerungen von 50 % möglich sind und mit Werkzeugverbesserungen stetig weiter erhöht werden. Es werden Massivholz und selbst schwierige Materialien wie Volkern bereits mit Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 12 und 20 m/min und Schnittgeschwindigkeiten von 4 000 bis 5 000 m/min bearbeitet, und es wird dabei eine qualitativ hochwertige Profiloberfläche erreicht. Das war bisher kaum möglich. Steigende Produktionskosten erfordern zwangsläufig die Anwendung neuartiger Produktionsmethoden. Mit dem HGF wird ein Weg aufgezeigt.

Literatur

- Westkämper, E., Licher, E., Prekwinkel, F.: Hochgeschwindigkeitszerspannung von Holz und Holzwerkstoffen. HK Holz- und Möbelindustrie, Heft 12/1990 S. 1438-1441, Heft 3/1991 S. 300-302.
- Schulz, H.: Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München Wien 1989.
- Klimke, W.: Kugelgewindetrieb - Zahnstangentrieb, Vorteile und Grenzen. AGT Dokumentation, Heft III/1987 S. 30-33.