

Steuerungen und Antriebe für leistungsfähige Holzbearbeitungsmaschinen

Bei dem Beitrag handelt es sich um einen Auszug aus einem Vortrag auf dem 9. Holztechnischen Kolloquium des Instituts für Werkzeugmaschinen (IWF) der Technischen Universität Braunschweig. – Von Dipl.-Ing. Paul-Heinz Beyer¹⁾.

Einleitung

Das System Moderne Holzbearbeitungsmaschine kann man unterteilen in die Maschinenmechanik einerseits und die elektronische Steuerung andererseits, in der Regel eine CNC-Steuerung. Als wichtige Einheit zwischen beiden befinden sich die Antriebe für die Vorschubachsen, die letztlich die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug bewerkstelligen.

Leistungsfähige Holzbearbeitungsmaschine bedeutet hohe Schnittgeschwindigkeit, große Vorschubgeschwindigkeit und höchste Bearbeitungsqualität. Die Anforderungen an die Maschinenmechanik sind hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringen Eigenmassen der Bauteile. Das ergibt eine hohe Eigenfrequenz des Systems. Für hochdynamische Regelvorgänge muß man diese Eigenschaften voraussetzen.

Was erwartet man heute im Blick auf den aktuellen Stand der Technik von Steuerungen und Antrieben für leistungsfähige Holzbearbeitungsmaschinen (Abb. 1)? Vor der Beantwortung dieser Frage sind erst einmal die Bewegungsabläufe an den Maschinenachsen etwas näher zu betrachten.

Die Bahngeschwindigkeit des Werkzeugs an der Werkstückkontur setzt sich aus den Vorschubgeschwindigkeiten einzelner Maschinenachsen zusammen,

also am Beispiel einer ellipsenförmigen Werkzeugbahn (Abb. 2) in der XY-Ebene aus den Vorschubgeschwindigkeiten der X-Achse und der Y-Achse. Die Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs ist, mit angenommen 20 m/min, unveränderlich über den ganzen Weg.

Die X-Achse wird aus dem Stillstand heraus immer schneller und hat am Scheitelpunkt mit 20 m/min ihre höchste Geschwindigkeit, anschließend wird sie 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. Es bleibt festzuhalten: Selbst bei konstanter Bahngeschwindigkeit verändern die einzelnen Vorschubachsen der NC-Maschine fast ununterbrochen ihre Geschwindigkeit.

Vorschubbeschleunigung

Geschwindigkeitsänderung bedeutet aber Beschleunigen und Verzögern. Anders ausgedrückt: 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 einmal mit 50 und das andere Mal mit 200 mm angenommen. Der Startpunkt ist links. Dargestellt sind Geschwindigkeit und Beschleunigung

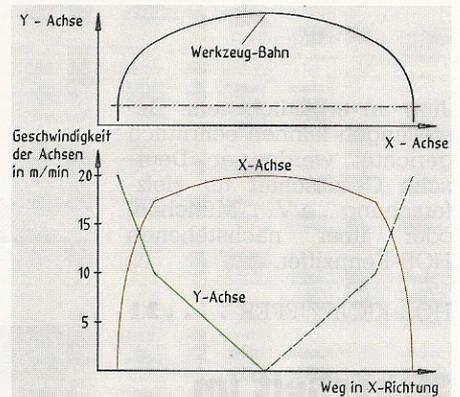


Abb. 2: Anteile der X- und Y-Achse an der Bahngeschwindigkeit

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 Null im Bereich der größten Geschwindigkeit. Bei einem Radius von 50 mm würden Beschleunigung und Verzögerung bis auf 5 m/s² ansteigen, bei einem Radius von 200 mm, also einer weniger gekrümmten Bahn, liegt der Maximalwert bei etwas über 1 m/s². Die Kreisbahn kann man stellvertretend für jeden beliebigen Konturverlauf sehen, der abwechselnd alle möglichen Krümmungen haben kann. Sollen optimale Zerspanungsparameter eingehalten werden, dann muß die Vorschubgeschwindigkeit immer konstant bleiben. Das ist wegen der Beschleunigung um so schwieriger, je kleiner die Krümmungsradien sind.

Wenn die Bahngeschwindigkeit hoch und/oder konstant sein soll, dann müssen als Voraussetzung entsprechende hohe Beschleunigungswerte möglich sein. Es gibt aber noch einen weiteren Grund für hohe Beschleunigungswerte: Bei der Werkstückbearbeitung sollen nicht nur kurze Hauptzeiten und hochwertige Oberflächen erzielt werden, sondern auch die notwendige Form- und Maßgenauigkeit.

Schleppfehler

In der NC-Regelungstechnik ist es begründet, daß sich – wie in Abb. 4 dargestellt – 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. Er ist auf einer geraden Bahn praktisch ohne Auswirkung, denn beim Erreichen des Ziels und Stillstand der Achse hat er sich wieder auf Null abgebaut, das heißt, das Seil ist wieder aufgerollt. Bei einer gekrümmten Bahn wird jedoch die Vorschubbahn nach innen gezogen und das um so mehr, je größer der

¹⁾ Der Verfasser ist Leiter der Entwicklung und Konstruktion in der Maschinenfabrik Reichenbacher GmbH in Dörfles-Esbach bei Coburg.

Abb. 1: Bearbeitungszentrum für die Hochleistungszerspanung



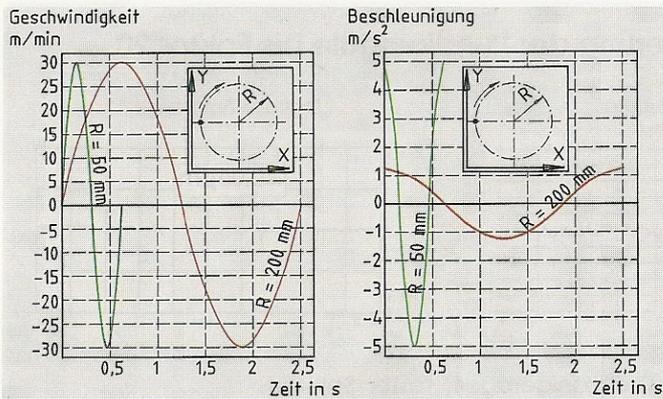


Abb. 3: Beschleunigungswerte in der Kreisbahn

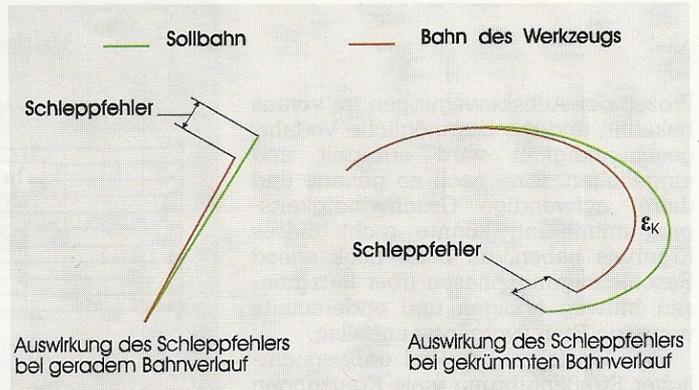


Abb. 4: Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor k_v und Schleppfehler

Schleppfehler ist. Und daraus ergibt sich dann eine Konturabweichung ϵ_k .

Nun ist der Schleppfehler 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. Einen hohen k_v -Faktor kann man aber nur einstellen, wenn die Beschleunigung entsprechend hoch ist.

Auswirkung des k_v -Faktors

Der k_v -Faktor bei einer NC-Maschine – auch bei einer Werkzeugmaschine für die Metallbearbeitung – lag in der Vergangenheit üblicherweise bei 1 m/min/mm. Auf einem Weg von 1 mm wird die Geschwindigkeit um 1 m/min verändert, und das Verhältnis Schleppfehler zu Geschwindigkeit ist 1. Bei einer Hochleistungsmaschine muß der k_v -Faktor wesentlich höher sein. Ein recht hoher k_v -Faktor ergibt allerdings eine sehr hohe Beanspruchung der mechanischen Bauteile. Doch dieser Beanspruchung kann andererseits mit einer modernen Steuerung entgegengewirkt werden.

In den Beispielen in Abb. 5 sieht man, daß ein k_v -Faktor von 1 ausreicht, wenn man einen Radius von 200 mm mit 5 m/min fährt und eine Konturabweichung von 1/10 mm zulässig ist. Bei 30 m/min ist bei gleichen Voraussetzungen bereits ein k_v -Faktor von 5 notwendig. Ein geringer Schleppfehler ist also wichtig, um keine Genauigkeitsverluste bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten hinnehmen zu müssen. Das erfordert unter anderem, daß die Vorschubantriebe hoch genug beschleunigen können müssen.

Anforderung an Antriebe

Die beste Maschine und auch die beste Steuerung nützen wenig, wenn die Antriebe nicht mitspielen. Hohe Dynamik und eine hohe reproduzierbare Genauigkeit der Werkstücke werden nicht allein vom Antriebsregler bestimmt. Mechanische Steifigkeit der Vorschubmotoren sind die Basis für eine sehr gute Verstärkung im Drehzahl- und Lageregelkreis. Niedrige Rotorträgheitsmomente sind die Voraus-

setzung für kurze Hochlauf- und Bremszeiten und damit für die erforderliche Dynamik. Rundlaufqualität und Laufruhe machen eine hohe Oberflächengüte am Werkstück erst möglich.

Digitale Antriebstechnik

Mit dem Übergang von den Gleichstromantrieben auf die bürstenlosen Drehstromservos erfolgte vor Jahren ein großer Schritt in der Antriebstechnik. Er war aber sehr klein im Vergleich zum Übergang von der analogen zur digitalen Antriebstechnik, die jetzt am Beginn ihrer Einführung steht. Der prinzipielle Unterschied ist, daß die Sollwertübermittlung von der NC-Steuerung an die Antriebsregler nicht mehr als analoges Spannungssignal erfolgt, sondern als digitales Telegramm.

Die Analogtechnik ermöglicht zweifellos hervorragende Ergebnisse. Trotzdem bringt die Digitaltechnik zusätzlich sehr viele Vorteile. Einer davon ist die Rundlaufgüte des Vorschubmotors, die bei einer sehr guten Mechanik die Oberflächengüte am Werkstück begrenzt. Eine Verbesserung des Lageistwertes an der Motorwelle um den Faktor 20 ist möglich, wenn keine Mechanik angeschlossen ist, wie die Meßprotokolle in Abb. 6 zeigen. Mit Mechanik ergibt sich immer noch ein Faktor von etwa 4, so daß wieder genügend Weiterentwicklungsspielraum für Maschinen und Werkzeuge gegeben ist.

Konturverbesserung

Auf den nächsten Diagrammen in Abb. 7 sieht man aus dem Kreisform-

test bei der Abweichung von der idealen Kreiskontur fast eine Verbesserung um Faktor 2 zwischen der analogen und der digitalen Antriebstechnik. Ein weiteres Beispiel für die Leistung eines modernen Steuerungs- und Antriebskonzepts ist die Quadrantenfehlerkompensation.

Bei einer bogenförmigen Werkzeugbewegung sind die Konturabflachungen am Werkstück bekannt, die sich aus der Maschinenmechanik beim Richtungswechsel einer Achse ergeben können. Die Gründe dafür sind im Antriebsstrang die Reibung, die Lose – also das Umkehrspiel – und die Torsion, die einem Aufzieheffekt gleichkommt. Auch bei einer guten Mechanik ist die Erscheinung vorhanden, wenn auch so gering, daß man sie nicht sieht. Abb. 8 zeigt die Abweichungen als Differenz zur idealen Achsposition mit etwa 0,015 mm, die vollkommen kompensiert werden.

NC-Steuerung und Antriebe haben sich zu einem System entwickelt, das eine intelligente Bewegungsführung möglich macht. Beispiele dafür sind die Funktion Look ahead, die den Ablauf schneller macht, die dynamische Vorsteuerung, die noch mehr Genauigkeit an schwierigen Stellen bringt, und die geführte Ruckbegrenzung, die die Belastung der Mechanik reduziert.

Schneller zum fertigen Werkstück

Beim Look ahead wird fortlaufend eine große Anzahl von NC-Sätzen rechtzeitig betrachtet und analysiert. Der Konturverlauf ist damit im dynamischen

Bahngeschwindigkeit = 5 m/min				Bahngeschwindigkeit = 30 m/min					
R	k_v	m/min/mm			R	k_v	m/min/mm		
		1	3	5			1	3	5
10	1,25	0,14	0,05	10			1,80		
20	0,63	0,07	0,03	20		2,50	0,90		
30	0,42	0,05	0,02	30		1,67	0,60		
40	0,31	0,03	0,01	40		1,25	0,45		
50	0,25	0,02	0,01	50		1,00	0,36		
100	0,13	0,01	0,01	100		0,50	0,18		
200	0,06	0,01	0,00	200	2,25	0,25	0,09		
300	0,04	0,01	0,00	300	1,50	0,17	0,06		
400	0,03	0,00	0,00	400	1,13	0,13	0,05		
500	0,03	0,00	0,00	500	0,90	0,10	0,04		
1000	0,01	0,00	0,00	1000	0,45	0,05	0,02		

Abb. 5: Kreisbahnfehler in Abhängigkeit von Kreisradius, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor k_v

Konturfehler ϵ_k (mm)

Verbesserung der Rundlaufgüte bis Faktor 20

Prozeß der Achsbewegungen im voraus bekannt, und die bestmögliche Verfahrensgeschwindigkeit wird ermittelt und eingehalten. Eine noch so genaue und damit aufwendige Geschwindigkeitsprogrammierung könnte nicht dieses Ergebnis haben, da beim Look ahead Beschleunigungsphasen über Satzgrenzen hinweg erfolgen und andererseits unnötige Bremsvorgänge entfallen.

Ein Autofahrer, der bei unübersichtlicher Straßenführung viele Kreuzungen mit Rechts-vor-links Regelung vor sich hat, wüßte durch Look ahead, wie er optimal vorankommt und wann er selbst über mehrere, kurz aufeinanderfolgende Kreuzungen hinweg beschleunigen kann.

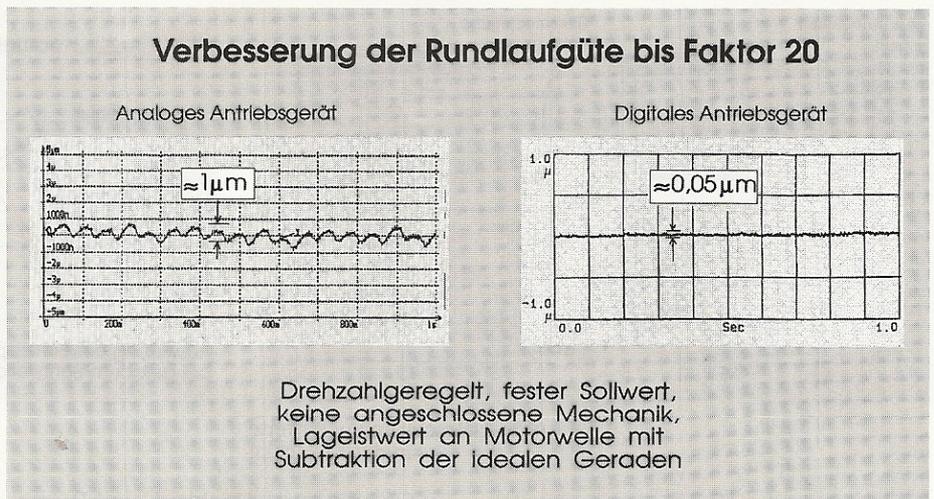
Genauer durch Vorsteuerung

Mit der dynamischen Vorsteuerung kann der voreingestellte k_v -Faktor programmierbar erhöht werden. Hinter dem Begriff Schleppfehler verbirgt sich die Erkenntnis, daß bestimmte Abweichungen zwischen programmierter Soll- und tatsächlicher Istkontur unumgänglich sind. Das wirkt sich besonders bei hohen Geschwindigkeiten aus. Durch die Vorsteuerung werden verzögerungsfreie Antriebsreaktionen erreicht, d.h. der Regelvorgang wird härter. An beliebigen Stellen des Werkstücks kann die erzielbare Genauigkeit praktisch vorprogrammiert werden. In Abb. 9 sieht man symbolisch am Beispiel der Kreiskontur, wie die bekannten Abweichungen kompensiert werden. Das Blockschaltbild der Vorsteuerung ist in Abb. 10 dargestellt.

Die Schnittstelle zwischen NC und Antrieb liegt traditionsgemäß zwischen Lage- und Drehzahlregler. Der untere Regelstrang allein entspricht der üblichen Regelung ohne Vorsteuerung. Bei einer analogen Schnittstelle zwischen Antrieb und Steuerung ist die Drehzahlvorsteuerung möglich. Dabei wird ein zusätzlicher Sollwert am Lageregler vorbei direkt auf den Drehzahlregler geschaltet. Bei der digitalen Schnittstelle kann die noch effektivere Drehmomentvorsteuerung realisiert werden, wobei außerdem auch am Drehzahlregler vorbei ein weiterer Sollwert auf den Stromregler geschaltet wird.

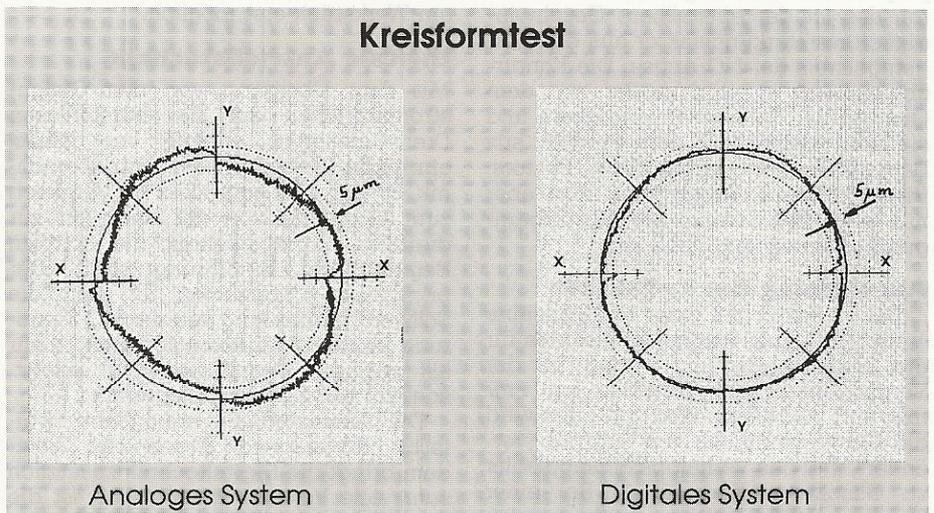
Die zunehmende Ausnutzung der Maschinenleistungsfähigkeit, wie bei der Anwendung der Vorsteuerung, bringt auch eine nicht so vorteilhafte Steigerung der Maschinenbelastung mit sich, also mehr Bauteilverschleiß. Um gerade das Gegenteil zu erreichen, wurde ein mechanischschonendes Beschleunigungsprofil für eine weiche, ruckfreie Beschleunigung entwickelt, das einer \sin^2 -Funktion entspricht und an jeder Stelle programmiert werden kann. Wegen der steileren Zwischenphase dauert der Beschleunigungs- und Bremsvorgang nicht länger als bei der herkömmlichen Methode.

Man kann es als selbstverständlich

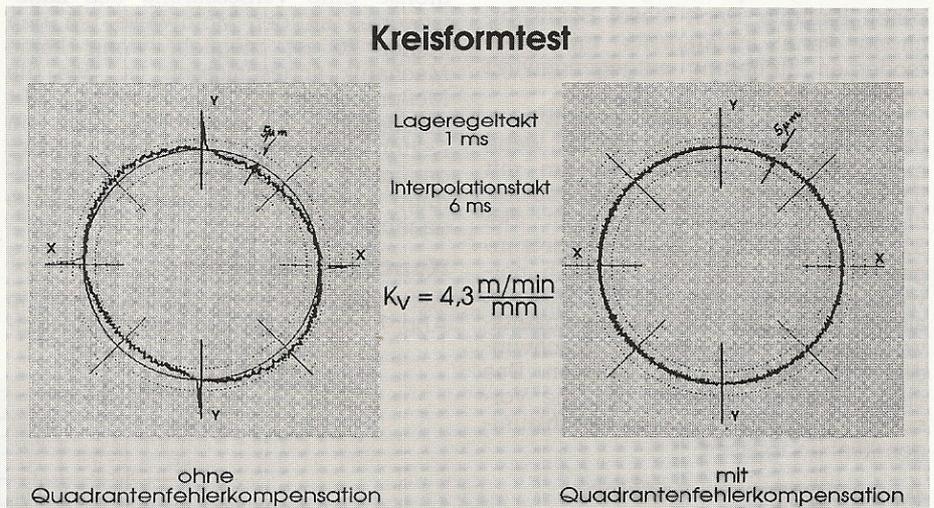


▲ Abb. 6: Verbesserung der Rundlaufgüte durch digitales Antriebssystem

▼ Abb. 7: Konturenverbesserung durch digitales Antriebssystem



▼ Abb. 8: Konturenverbesserung durch Quadrantenfehlerkompensation



voraussetzen, daß eine leistungsfähige Steuerung viel Programmierkomfort bietet, wie beispielsweise Makro-Definitionen. Damit kann sich der Anwender seinen Programm-Standard selbst erstellen, indem er mit einem beliebigen Text einzeilige Programmanweisungen zusammenfaßt. So könnte man zum Beispiel für den Programmstart am Anfang der Bearbeitung Anweisungen

wie etwa G0 G40 D0 G54 G60 G90 mit dem Makro Normieren ersetzen.

Besonders bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten an komplizierten Konturen entsteht leicht ein Engpaß bei den Aufbereitungszeiten 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,

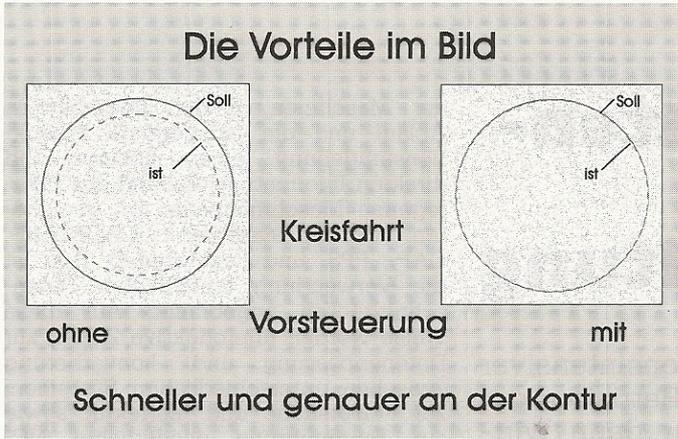


Abb. 9: Dynamische Vorsteuerung

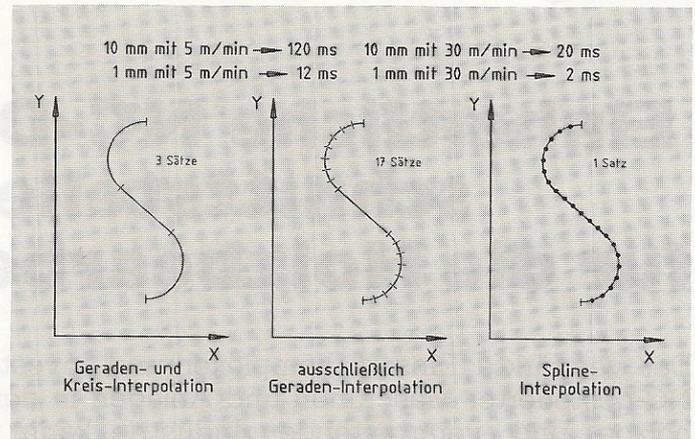


Abb. 10: Blockschaltbild Vorsteuerung

Abb. 11: Interpolationsarten einer CNC-Steuerung

zur Verfügung steht. Üblicherweise bestehen die Konturen aus Geraden und Kreisbögen (Abb. 11). Dabei kann es vorkommen, daß die Wegabschnitte zu kurz sind und es dann zwangsläufig zu Geschwindigkeitseinbrüchen kommt. Unzweckmäßig sind deshalb Programmierverfahren, bei denen die Konturen nur aus kurzen Geradenstücken zusammengesetzt werden.

Diese Problematik kann man umgehen, indem man eine höhere Interpolationsart, nämlich 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.

Mit leistungsfähiger Hardware haben sich inzwischen auch die Satzaufbereitungszeiten etwa um den Faktor 10 reduziert, bei anwendbarer Satzvordekodierung sogar bis um den Faktor 40, bis hinunter auf die Interpolator-Abtastzeit. Mit heute verfügbaren Universal-Interpolatoren können verschiedene Spline-Arten zur Anwendung kommen und daneben auch jede Art von mathematischen Geometriebeschreibungen, wie beispielsweise Ellipse, Parabel, Hyperbel usw.

Je größer die Vorschubgeschwindigkeit ist, um so weniger kann man ungebremst um Ecken fahren. Soweit das Werkstück es zuläßt, ist es deshalb hilfreich, daß man ein zulässiges Überschleifmaß programmieren kann. Denn die Produktivität steigt um ein weiteres Stückchen, wenn selbst Ecken auf der Ideallinie genommen werden können (Abb. 12).

Abb. 13: Einfache Koordinatenumrechnung im Raum

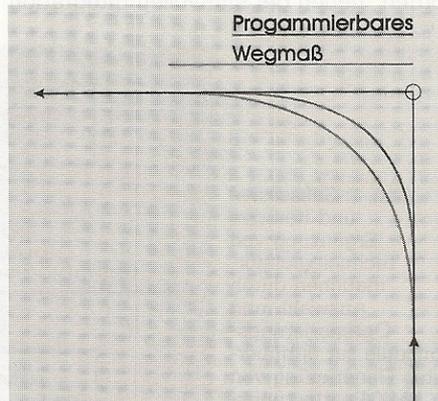
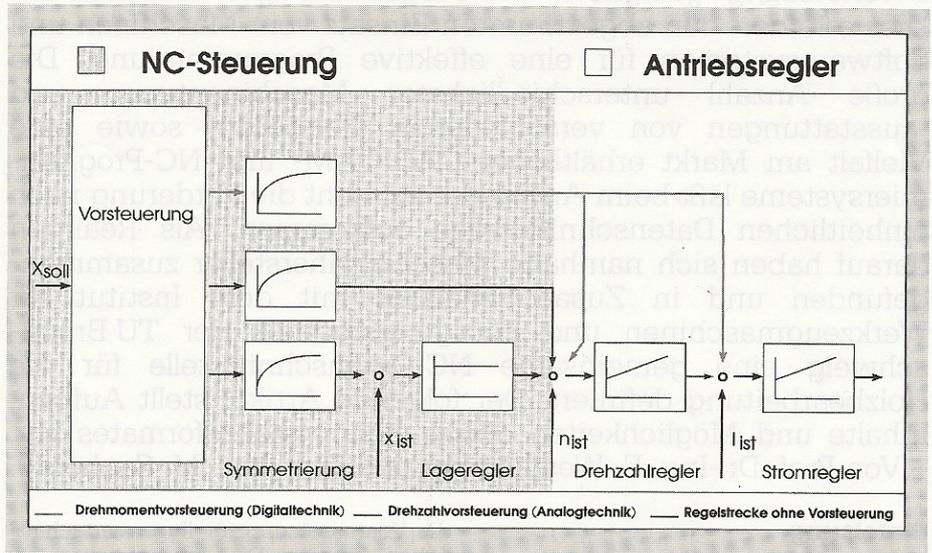
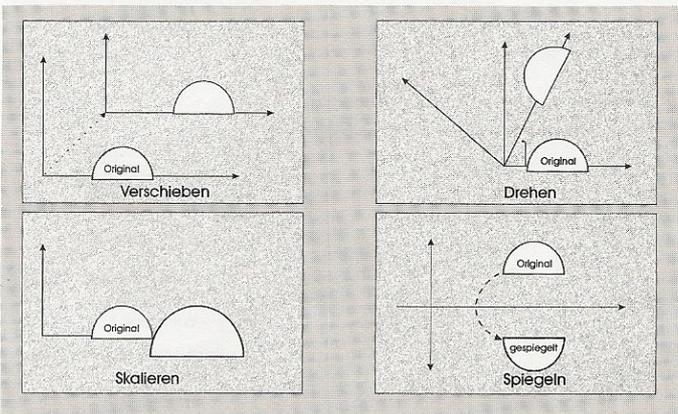
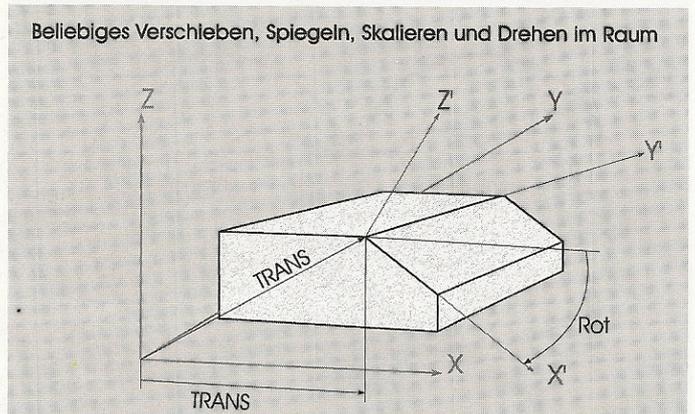


Abb. 12: Programmierbares Überschleifen

Neben dem bekannten Verschieben und Spiegeln von Programmteilen sind auch beliebige Maßstabsveränderungen (Weiter auf Seite 30)

Abb. 14: Bearbeitung schräger Flächen (Bildnachweis: Reichenbacher, Siemens)



(Fortsetzung von Seite 23)

rungen und beliebiges Verdrehen im Raum möglich (Abb. 13). So kann das Koordinatensystem auf einfache Weise auf die Lage einer zu bearbeitenden schrägen Fläche geschwenkt werden. Dann kann ein normales 3-Achsen-Programm mit allen Werkzeugkorrekturen ablaufen (Abb. 14).

Je umfangreicher, eleganter und moderner die Funktionalität eines Steuerungssystems ist, um so rechenintensiver sind die Abläufe und um so leistungsfähiger muß die Hardware und Software sein. Das Bedienfeld einer leistungsfähigen Steuerung enthält neben Farbbildschirm und Tastatur auf der Rückseite einen vollwertigen PC mit 486er-DX-Prozessor und eine Festplatte mit 200 MB – und das alles bei einer Einbautiefe von nur 80 mm. Die zugehörige Logikkomponente besteht aus dem Netzgerät mit der Zwischenkreisregelung für die Antriebe, dem 50 mm breiten Einschub mit der kompletten NC und SPS und den Einschüben für die Antriebsregler.

Schlußfolgerung

Wirtschaftlichkeit ist angesichts der allgemeinen Wettbewerbssituation das Maß aller Dinge. Zum Sichern oder gar zum Ausbau der eigenen Position steht der Holzbearbeiter Forderungen gegenüber, die er nur erfüllen kann, wenn er die Kosten im Griff hat. Das heißt unter anderem immer kürzere Durchlaufzeiten, immer höhere Flexibilität. Daraus ergibt sich als Forderung an die leistungsfähige Holzbearbeitungsmaschine: Höchste Dynamik und Präzision, intelligente Bewegungsführung und hohe Funktionalität, d.h. ein „starkes Gespann“ aus Maschine, Antrieben und Steuerung.

Literatur

Beyer, P.-H.: Anforderungen an Maschinen zur Hochleistungszerspanung. HOB Die Holzbearbeitung, 5/1993, S. 34–45 und die dort genannten Quellen.