Seit jeher werden Menschen von geschnitzten Kunstwerken aus Holz fasziniert. Selbst künstlerisch veranlagt, gründete der Ingenieur Hermann Reichenbacher 1954 eine Maschinenfabrik und baute Bildhauerkopiermaschinen. Das sind die sogenannten Schnitzmaschinen, mit denen mittels einer mechanischen Abtastung handbedient komplizierte Formteile aus Holz und Kunststoff vervielfältigt werden können

Der Roboter für die Schnitzerwerkstatt

Von Dipl.-Ing. Paul-Heinz Beyer, Dörfles-Esbach

Zur Ligna 1991 brachten Winfried und Wolfgang Reichenbacher als heutige Inhaber der Maschinenfabrik, ein NC-gesteuertes Handhabungsgerät – das ist ein Roboter – auf den Markt, der diese Schnitzmaschinen automatisiert, und dies unabhängig vom Fabrikat.

Das Unternehmen hatte eine stetige Aufwärtsentwicklung (240 Mitarbeiter 1991), wobei bereits 1974 der Einstieg in die NC-Maschinenfertigung als erster Holzbearbeitungs-Maschinenfabrik in Europa erfolgte. Diese High-Tech-Produkte machen seit langem über 80 % des Umsatzes aus, und man hat damit eine führende Marktstellung erreicht.

Begonnen mit den mechanischen Kopiermaschinen und ständig erweitert und weiterentwickelt, über die automatischen Kopiermaschinen bis hin zur heutigen CNC-Technik, bekam diese Produktpalette einen besonderen Farbtupfer mit diesem Roboter, der – „vollgestopft" mit modernster Rechnertechnik und nachrüstbar – das erste Firmenerzeugnis ist, das selbsttätig arbeiten kann.

Handbediente Schnitzmaschine

Mit der handbedienten Schnitzmaschine werden kompliziert geformte Modellteile, wie z. B. Kunstgegenstände aus Holz und Schnitzarbeiten an Möbelteilen, originalgetreu vervielfältigt. Diese Maschinen haben bis zu 20 und manchmal noch mehr Frässpindeln. Zwischen den mittleren Spindeln wird das Modellteil eingespannt und von einer Bedienperson über einen starren Fühler mechanisch abgetastet. Mit den Tasterbewegungen werden die damit festverbundenen Frässpindeln mitgeführt, so daß aus den eingespannten Rohlingen entsprechend viele Nachbildungen des Originals entstehen (Abb. 1).

Außer den drei Hauptachsen X, Y, Z – für Bewegungen nach links und rechts, vor und zurück, auf und ab – hat die Maschine eine Pendelachse A für das Kippen von Taster und Werkzeugen nach vorne und hinten (für Hinterschnitte und um „pendelnd" Feinstbearbeitung machen zu können) und eine Drehachse B zum synchronen Drehen von Modell und Werkstücken (Abb. 2).

Alle Bewegungen sind kugelgelagert, die Gewichtskräfte sind durch Gegengewichte ausgeglichen, und seitlich wirkende Zerspanungskräfte heben sich durch gegenläufig drehende Frässpindeln auf. Bei der Handbedienung müssen nur die Massenkräfte geringe Reibung und ein Teil der Zerspanungskräfte (besonders beim Vorschruppen von Bedeutung) überwunden werden.

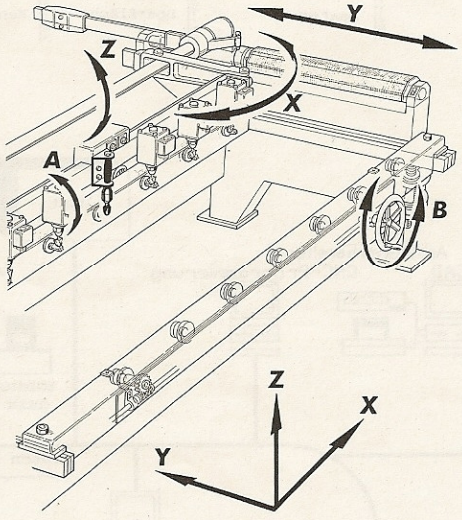


Abb. 2 Kinematik handbediente Schnitzmaschine

Vom Vorfräsen bis zur Feinstbearbeitung werden nacheinander verschieden große Fräswerkzeuge verwendet (meist 24 bis 30 mm), wobei der Taststift in Form und Durchmesser mit dem Werkzeug übereinstimmt. Nur beim Vor-

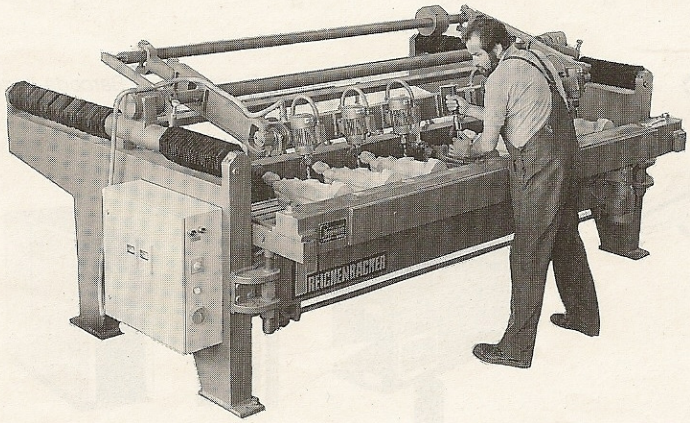


Abb. 1 Handbediente Schnitzmaschine (Alle Fotos und Skizzen: Werkfotos Reichenbacher)

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

schruppen ist der Taster etwas größer und steht etwas weiter vor, damit eine Materialzugabe für die Feinbearbeitung erhalten bleibt. Das Werkstück wird zwischen einzelnen Bearbeitungsabschnitten weitergedreht.

In einer Weiterbildung wird die handbediente Schnitzmaschine auch als Kopierpantograph zum Verkleinern von Originalen eingesetzt. Die Fräswerkzeuge werden gegenüber dem Taststift im selben Maßstab kleiner verwendet. Man erreicht mit diesen Maschinen einen noch höheren Fertigungsgrad, wobei meist ein noch viel größerer Zeitaufwand beim Kopieren getrieben wird (Abb. 3).

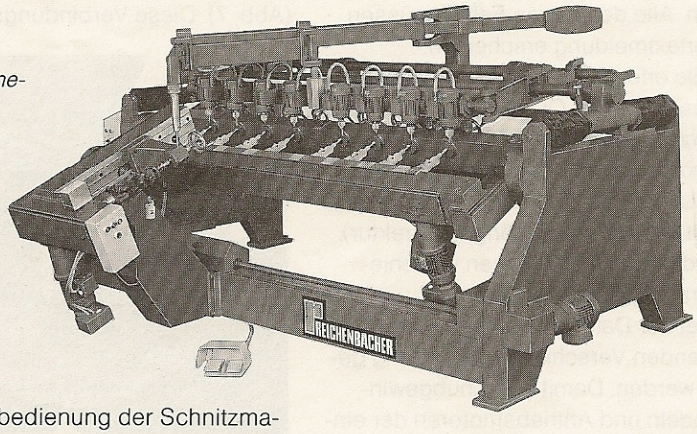


Abb. 3 Verkleinerungsmaschine

Die Handbedienung der Schnitzmaschinen kann keineswegs als rein mechanischer Vorgang betrachtet werden, sondern sie erfordert langjährige Übung und Erfahrung. Besonders bei der Feinbearbeitung sind außerordentliche Handfertigkeit und viel Geduld erforderlich, die sich sehr auf die Qualität der Nachbildungen auswirken. Das Vorschruppen erfordert meist größere Kraftanstrengung und beim stundenlangen Arbeiten ist die Bedienperson erheblichen Lärm- und Staubbelastungen ausgesetzt. Mit jedem neuen Satz von Werkstücken muß das Handabtasten – mehr oder weniger gleich gut – erneut erfolgen. Die Vorteile einer automatischen Maschine liegen klar auf der Hand.

Automatische Fräsmaschinen

An der Automatisierung der Schnitzmaschine haben sich schon viele versucht,

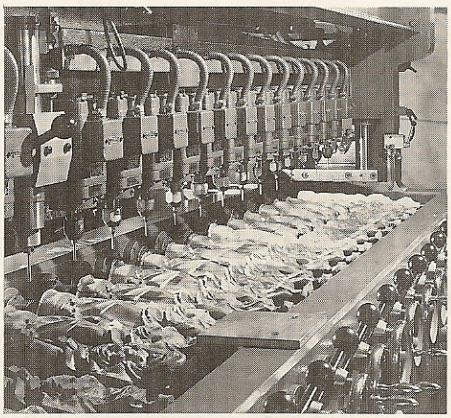


Abb. 4 Automatische Kopierfräsmaschine

ohne daß es bisher die eigentliche Lösung gab. Bei Reichenbacher wird seit 1969 eine automatische Kopiermaschine gebaut, die mit einem Fühlersystem nach dem Prinzip des induktiven Weggebers arbeitet (Abb. 4). Bei dieser Maschine wird das Modell zeilenweise mit Vorschubgeschwindigkeiten bis max. 1,5 m/min abgefahren, und sie ist nur bei einem Teil der vorkommenden Schnitzarbeiten wirtschaftlich. Der Einsatz erfolgt vorwiegend in Möbelfabriken.

Man kann auch ein automatisches Fühlersystem für eine „handbediente" Maschine einsetzen, mit dem Vorteil, daß dann die Daten aufgezeichnet und automatisch wiedergegeben werden können, gleichzeitig entfällt der Kraftaufwand bei der Bedienung. Dabei besteht aber der Nachteil, daß die Handfertigkeit des Bedieners, die sich aus Wegverlauf und Dynamik der Bedienbewegungen zusammensetzt, durch die vorhandene Servoverstärkung verlorengeht. Außerdem hat noch niemand in Verbindung mit diesen Fühlersystemen die Problematik des Pendelns mit der A-Achse gelöst.

Unzulänglich ist ein System, bei dem das Modell mit einer Videokamera aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen und dann von einem Computer ein NC-Programm generiert wird. Die geforderten Genauigkeiten sind wirtschaftlich nicht zu erreichen, die Art der Werkzeugführung einer erfahrenen Bedienperson wird nicht berücksichtigt.

Beim Betrachten einer Schnitzerei kann auch der Laie erahnen, wie wichtig für die Oberflächenqualität bestimmte, von Hand beeinflußte Parameter sind, wie z. B. Vorschubgeschwindigkeit, Beschleunigung bei Richtungsveränderungen, Spantiefe und freie, richtungsunabhängige Beweglichkeit des Taststiftes im Arbeitsraum (Abb. 5).

Abb. 5 Geschnitztes Ornament

Das Entwicklungsziel

Nachdem 1989 die Entscheidung gefallen war, die Schnitzmaschine zu automatisieren, wurde die Aufgabenstellung schriftlich definiert. Das über hundertseitige Pflichtenheft kann man damit zusammenfassen, daß für die Herstellung von Schnitzarbeiten nach einem Modell Meßdaten aufgenommen, weiterbearbeitet und gespeichert werden müssen, um dann beliebig oft mit diesen Daten den Herstellungsvorgang automatisch steuern zu können.

Es soll nicht manuell oder rechnergestützt programmiert werden, sondern die Daten müssen entstehen, während gleichzeitig auf der handbedienten Schnitzmaschine mindestens ein Teil – kontrollierbar und korrigierbar – gefräst wird.

Um unveränderte Originaltreue zu erzielen, müssen die von der Bedienperson erzeugten Fräsbewegungen bei der späteren automatischen Bearbeitung mit höchster Wiedergabepräzision nachvollzogen werden. Auch spiegelbildliche und maßstäblich veränderte Kopien (besonders Verkleinerungen) sollen erzeugt werden können. Weiter soll es möglich sein, die Vorschubgeschwindigkeit bei der Wiedergabe bis zu 6 m/min zu erhöhen.

Das Abtasten bei der Datenaufnahme muß mit dem üblichen starren Taster und darf nicht mit einem Fühlersystem (Servotaster) erfolgen. Die Datenwiedergabe muß mit derselben Maschine und wahlweise auch mit einer anderen gleichartigen möglich sein. Die Anwendung darf nicht auf die eigenen Maschinen und gleichartige Kinematik beschränkt bleiben, und auch die Kopierpantographen als mechanische Verkleinerungsmaschinen müssen vom Roboter bedient werden können.

Das bisherige Bedienpersonal der handbedienten Schnitzmaschine muß ohne weitere Schulung den Automaten bedienen können, eine Programmierung darf nicht erforderlich sein. Der Bedienumfang ist so gering wie möglich und sehr einfach zu halten, die Bedienerführung am Bildschirm muß lückenlos sein. Bedienereingaben müssen automatisch auf Erfüllung von Voraussetzungen und weitestgehend auf Plausibilität geprüft werden. Alle denkbaren Fehler müssen als Klartextmeldung erscheinen.

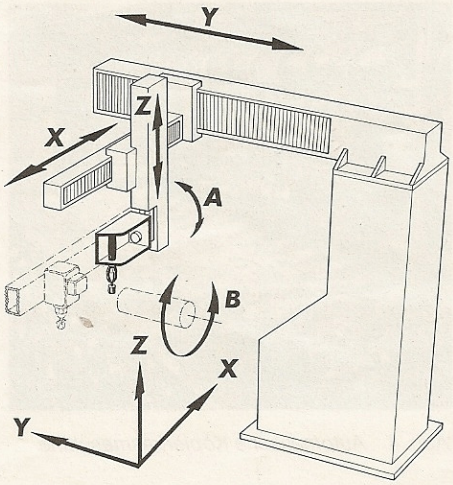


Abb. 6 Kinematik Roboter

Alle erforderlichen Einrichttätigkeiten müssen durch Quittierungsanforderung erzwungen werden. Beim Einspannen und Justieren der Werkzeuge muß deren Länge automatisch erfaßt und verrechnet werden (Fräserlängenkorrektur). Die Bildschirmtexte müssen verschiedensprachig verfügbar sein.

Bei der Datenaufnahme müssen die auftretenden Verschiebekräfte gering gehalten werden. Damit Vorschubgewindespindeln und Antriebsmotoren der einzelnen Maschinenachsen von Hand nicht mitbewegt werden müssen, sind die Achsen freizuschalten. Dazu kann ein System verwendet werden, das für ein bestimmtes NC-Aggregat im eigenen Haus bereits entwickelt wurde.

Aus der Gesamtheit dieser Anforderungen wurde der Schluß gezogen, daß nicht unterschiedliche, einzelne Maschinen automatisiert werden sollten, sondern ein Roboter mit einer universellen Kinematik zu entwickeln ist (RACC 2000 = Reichenbacher automatic carving control) . Sein 4-Achsen-Betätigungsarm kann neben dem Tastergriff jeder Schnitzmaschine angekoppelt werden. Der Antrieb für die Werkstückdrehung an der jeweiligen Schnitzmaschine (B-Achse/Handrad oder Getriebemotor) kann gegen einen Servomotor ausgetauscht werden (Abb. 6).

Die Realisierung

Das vorgenommene Entwicklungsziel wurde in der Realisierungsphase ohne nennenswerte Rückschläge zügig erreicht, nicht zuletzt deshalb, weil das Know-how für die NC-Technik und für die maschinelle Schnitztechnik in einem Team mit langjähriger Einsatz- und Entwicklungserfahrung optimal vorhanden war.

Der Tastergriff der Schnitzmaschine mit der nach unten zeigenden Aufnahme für den Taststift mußte seitlich eine mechanische Schnittstelle für die Ankopplung des Roboterarms bekommen (Abb. 7). Diese Verbindungsstelle ist für jede beliebige Schnitzmaschine leicht realisierbar.

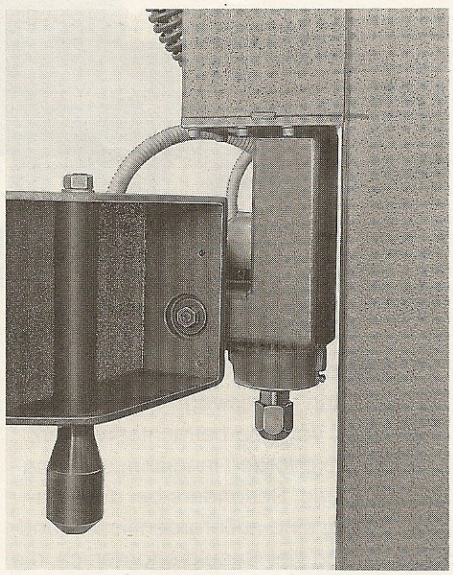


Abb. 7 Mechanische Schnittstelle zwischen Schnitzmaschine und Roboter

Beim mechanischen Aufbau des Roboters wurden die im normalen NC-Maschinenprogramm bewährten Prinzipien, wie Robustheit, Steifheit und hochwertige Bauteile beibehalten. Das war auch wichtig, nicht nur wegen den notwendig guten dynamischen Eigenschaften des Roboters (Präzision und Reaktionsvermögen), sondern auch um Schwingungsrückkopplungen mit den meist recht labilen Schnitzmaschinen zu vermeiden (Abb. 8). Die einzelnen Robo-

terachsen, einschließlich der B-Achse für die Werkstückdrehung, sind vollwertige NC-Achsen mit Servoantriebssystem und Lageregelkreis.

Rechnerkonfiguration

Zur Datenaufnahme und -weiterbearbeitung und zur Steuerung des Roboters ist bei der notwendigen hohen Leistung, bei gleichzeitig einfachster Bedienung, ein Multiprozessor-Rechnersystem erforderlich. Ein gutes Preis-/Leistungsverhältnis muß gewahrt bleiben, aber der Einsatz von Bürocomputern (PC, Workstation) kommt wegen den zu steuernden Achsen aus sicherheitstechnischen Gründen nicht in Frage.

Eine NC-Steuerung, die allen Anforderungen entspricht, gibt es nicht am Markt. Aber es galt ein Prinzip zu beachten, nämlich nichts erneut zu erfinden (z. B. Überwachungs-/Unterbrechungsfunktionen in industriell bewährter Sicherheitstechnik) und nur Steuerungen zu verwenden, die schon in großen Stückzahlen unter Produktionsbedingungen eingesetzt werden. So wurden unter diesen Gesichtspunkten geeignete Rechnerkomponenten ausgewählt, Bildschirme und Bedientafeln bis auf eine Ausnahme weggelassen, Zusatzsoftware weitestgehend aus Standardmodulen implementiert und alles mittels einer industrieerprobten Rechnerkopplung integriert.

Damit entstand die RCMD-Steuerung (Reichenbacher carving modular design), eine 5-Achsen-Bahnsteuerung mit sieben Prozessoren, teilweise in

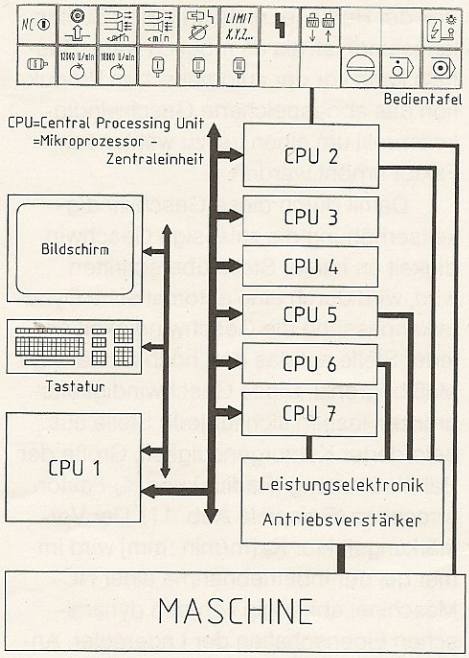


Abb. 9 Rechnerkonfiguration

32-Bit-Technik, die von Anfang an störungsfrei die geforderten Funktionen brachte (Abb. 9).

Mit diesem Konzept ist Aufwärtskompatibilität, Weiterentwicklung und Ersatzteilsicherheit gewährleistet. Es sind DNC-fähige Standardschnittstellen vorhanden, um den Roboter in Fertigungsinseln zu integrieren oder an einen Fertigungsleitrechner anzubinden, oder um z. B. ein Wechselplattenlaufwerk für die Datenauslagerung anzuschließen. Für die Installation sind standardmäßig alle VDE-Vorschriften eingehalten worden, und der Schaltschrank ist mit einem Wärmetauscher anstelle von Ventilatoren ausgerüstet, um vollkommene Staubdichtheit garantieren zu können.

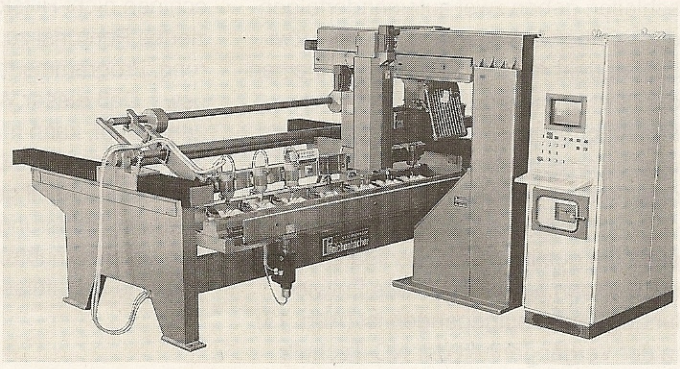


Abb. 8 Roboter RACC 2000 mit handbedienter Schnitzmaschine

Datenaufnahme

Beim nun nur noch einmaligen Kopieren eines Modells muß im Bedienermenue „Datenaufnahme" angewählt werden. Das entsprechende Programm wird dann automatisch aktiviert und die Roboterachsen sind freigeschaltet. Die Schnitzmaschine kann ganz normal von Hand bedient werden – der Bediener braucht sich um nichts weiter zu kümmern.

Um dem Bediener Freizügigkeit bei der Datenaufnahme zu gewähren, ist sichergestellt, daß er beliebig oft unterbrechen kann – er muß sich dazu mit dem Taster nur ein Stückchen vom Modell entfernen. Es werden nur reine Kopierbewegungen und notwendige Positionierbewegungen und keine Pausenzeiten aufgezeichnet. Erfolgt eine ungewollte Unterbrechung, z. B. eine Störung oder das Fahren in eine Sicherheitsbegrenzung, so ist ein geordneter Wiedereintritt in die Datenaufnahme einfach möglich.

Bei komplizierten und filigranen Schnitzereien läßt die geforderte Originaltreue einen maximalen Konturfehler von 0,10 mm zu, deshalb haben die Meßsysteme an den Roboterachsen eine Auflösung von 0,005 mm (20fache Feinheit). Das ist die Voraussetzung für eine genügend genaue Datenaufnahme und -wiedergabe. Um aber auch genügend Daten aufzunehmen, ist die Abtastrate mit 125 Hz festgelegt, d. h. in jeder Sekunde wird an jeder Achse 125mal die Position und die augenblickliche Geschwindigkeit an der Fräserspitze abgefragt.

Bevor die aufgenommenen Daten endgültig abgespeichert werden, erfolgt zeitgleich mit der Aufnahme eine Transformation und eine Reduktion. Die Achspositionen werden in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert, damit Punkte im Raum für die Werkzeugspitze und räumliche Orientierungswinkel für die Werkzeugachse entstehen.

Bei der anschließenden Datenreduktion werden aus der Flut der aufgenommenen Daten nur diejenigen endgültig abgespeichert, die zur Wiedergabe der Konturgenauigkeit und des Ge-

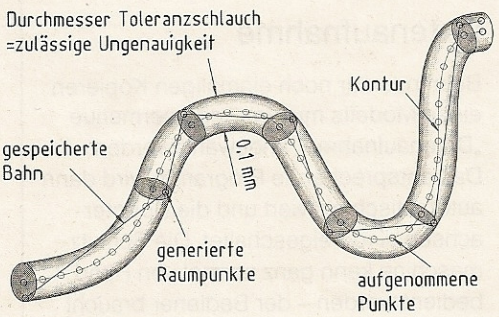


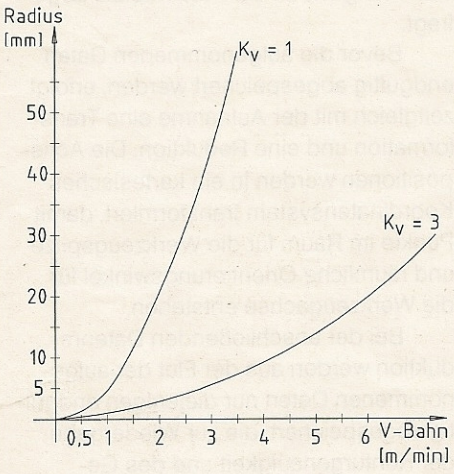
Abb. 10 Prinzip Datenreduktion (zur deutlicheren Darstellung überzeichnet)

schwindigkeitsprofils notwendig sind. Um dieses Optimum (hohe Genauigkeit, wenig Speicherplatz) zu erreichen, wird um die aufgenommene Kontur ein gedachter Toleranzschlauch entsprechend der zulässigen Konturabweichung gelegt und in diesen eine Fräsbahn aus möglichst langen Geradenstücken hineingeneriert (Abb. 10). Die zu speichernde Datenmenge verringert sich mit der Anzahl der Punkte.

Geschwindigkeitsoptimierung

Bei der Bedienung einer Schnitzmaschine wird die Bewegungsgeschwindigkeit beim Abtasten und Fräsen nie größer sein, als es die dynamischen Eigenschaften der Maschine (Steifheit, Eigenfrequenz) zulassen. Das sagt aber nicht,

Abb. 11 Abhängigkeit Vorschubgeschwindigkeit von Konturradius bei 0,1 mm zulässigem Fehler



daß der Bediener nicht an vielen Stellen langsamer ist, als es möglich wäre. Deshalb kann vor der automatischen Produktion das abgespeicherte Geschwindigkeitsprofil um einen frei zu wählenden Faktor erhöht werden.

Damit durch diese Geschwindigkeitserhöhung die zulässige Geschwindigkeit an keiner Stelle überschritten wird, wird durch eine automatische Dynamikanpassung die Geschwindigkeit an jeder Stelle auf das dort höchst zulässige Maß begrenzt. Diese Geschwindigkeitsgrenzen lassen sich für jede Stelle aus geforderter Konturgenauigkeit, Größe der Bahnkrümmung (Radius) und K_V-Faktor errechnen (Beispiele Abb. 11). Der Verstärkungsfaktor K_V [m/min : mm] wird immer bei der Inbetriebnahme einer NC-Maschine, abhängig von den dynamischen Eigenschaften der Lageregler, Antriebe und Mechanik, auf den höchst möglichen Wert optimiert.

Datenwiedergabe

Für die automatische Herstellung der geschnitzten Teile muß im Bedienermenue „Datenwiedergabe" angewählt werden. Das entsprechende Programm wird dann automatisch aktiviert, und von der Bedienerführung werden notwendige Eingaben angefordert. Dazu gehört z. B. auch der gewünschte Veränderungsfaktor für die Werkstückgröße. Die Fräserlänge kann bei der Wiedergabe eine andere sein als bei der Aufnahme, deshalb wird sie vor der Rückwärtstransformation der Werkzeugbahn aus dem kartesischen Koordinatensystem in die Achsenwege eingerechnet.

Bei der Datenwiedergabe mit höchstmöglicher Geschwindigkeit soll der Ablauf der generierten Geradenstükke nicht „unharmonisch hart" werden. Das wird durch „Verschleifen" der Bahnecken erreicht (Abb. 12). Beim Überschleifen gehen zwei aufeinanderfolgende Bahnbewegungen (-stücke) am Zwischenpunkt mit einer Krümmung ineinander über, wenn sie unterschiedliche Richtung haben. Der Krümmungsradius wird so errechnet, daß die geforderte Genauigkeit eingehalten wird.

Am Ende der Datenwiedergabe steht die qualitativ hochwertige Schnitzerei, der man ansieht, daß das Entwicklungskonzept aufgegangen ist (Abb. 13). In der Vergangenheit der NC-Technik

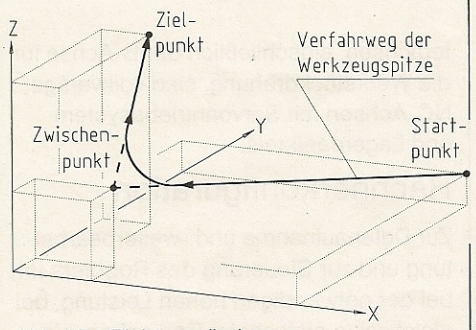


Abb. 12 Richtungsänderung mit Überschleifen

Abb. 13 Geschnitzte Figuren Originalgröße und mit Verkleinerungsfaktor 0,72

kam schon sehr früh die Erkenntnis, daß es zweckmäßiger ist, an die teuren Maschinen nicht Hilfskräfte, sondern qualifiziertes Personal zu stellen (Programmierung, Programme testen, Einrichten usw.). Daß dieser Weg auch wieder umkehrbar ist, kann man von dieser Neuentwicklung ableiten. Denn in der Praxis hat sich sehr schnell gezeigt, daß das Niveau der Steuerung so hoch gelegt werden konnte (mußte), bis der Umgang mit ihr keine Kenntnisse mehr erforderte. □