Von der Oberfläche zur Maschinenbeurteilung beim Umfangsplanfräsen

Die Oberflächenqualität wird durch das dynamische Verhalten der Maschine beim Umfangsplanfräsen wesentlich beeinflußt. Beim Fräsvorgang entstehen durch den Zahneingriff auf der Werkstückoberfläche Zykloidenbewegungen in Form von spitzen Wellenbergen und runden Wellentälern. Schwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug führen zu Ungleichförmigkeiten in der Oberflächenstruktur. Zur Bestimmung von Maschinenschwingungen während der Bearbeitung wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem sich die störenden Schwingungsinformationen durch Einsatz eines codierten Werkzeugs auf der Werkstückoberfläche vollständig abbilden. Nach der Bearbeitung können die Relativschwingungen aus den erzeugten Werkstückoberflächen bestimmt werden. Am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart werden mit Betriebsschwingungs- und Modalanalysen Konstruktionsänderungen auch im Hinblick auf Oberflächenqualität in der Holzbearbeitung durchgeführt. In einer dreiteiligen Serie, begonnen mit HOB 4/92, zur Oberflächenqualität beim Umfangsplanfräsen werden die Möglichkeiten beschrieben, die aus der Auswertung von Oberflächenprofilen zur Maschinenoptimierung entstehen. – Von Prof. Dr.-Ing. U. Heisel und Dipl.-Ing. A. Fischer[1]).

[1]) Prof. Dr.-Ing. U. Heisel ist Institutsleiter am Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart mit dem Versuchsfeld für Holzbearbeitungsmaschinen. Dipl.-Ing. A. Fischer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Arbeitsgruppe Maschinendynamik am IfW.

Einleitung

Im ersten Teil [1] der Serie Oberflächenqualität beim Umfangsplanfräsen wurden herkömmliche Hilfsmittel und Möglichkeiten zur Beschreibung des dynamischen Maschinenverhaltens im Hinblick auf Maschinenoptimierungen vorgestellt. Mit Nachgiebigkeitsfrequenzgängen wurde beschrieben, wie das System, die Maschine, auf künstlich eingeleitete Kräfte in Form von Schwingungen reagiert. Durch die experimentelle Modalanalyse können dann die in den verschiedenen Frequenzbereichen auftretenden elementaren Schwingungsformen als Maschinendeformation dargestellt werden. Im zweiten Teil der Serie [2] wurde der Frage nachgegangen, inwieweit sich Relativschwingungen auf die erzeugte Werkstückoberfläche auswirken. Zur Beurteilung von Oberflächen wurde dazu ein am IfW in Stuttgart entwickeltes Software-Programm vorgestellt, mit dem sowohl der kinematisch reine Prozeß als auch der durch das dynamische Verhalten der Maschine gestörte Prozeß dargestellt werden kann.

Bei der im ersten Teil vorgestellten Vorgehensweise zur Maschinenoptimierung blieb bislang folgender Problempunkt ungeklärt:

Weder die anregenden Kräfte, noch die sich einstellenden Schwingungen während der Bearbeitung können bisher mit vertretbarem Meßaufwand genügend genau beschrieben werden. Anstelle der direkten Messung zwischen Werkstück und Werkzeug wird oft eine an den Prozeßbewegungen nicht beteiligte Ersatzstelle im Bereich der Spindellagerung verwendet. Je nach Frequenz können die dort ermittelten Schwingungen nahezu beliebig große Abweichungen aufweisen. Eine Maschinenbeurteilung in bezug auf die Wirkstelle ist somit praktisch nicht möglich.

Das in dem vorliegenden Beitrag vorgestellte Verfahren eignet sich zur Bestimmung der störenden Relativschwingungen und stellt somit einen wichtigen Beitrag zur Maschinenbeurteilung dar. Die Frequenzinformationen können in Zusammenhang mit einer durchgeführten Modalanalyse als Ausgangsbasis für eine Maschinenoptimierung dienen.

Bestimmung von Relativschwingungen aus codierten Oberflächen

Zur Überprüfung des Verfahrens wurde ein spezieller Versuchsaufbau gewählt,

Abb. 1: Versuchsaufbau für das Umfangsplanfräsen mit Schwingungsüberlagerung

mit dem durch Vorgabe von Schwingungsfrequenz und Amplitudenhöhe gezielt Relativschwingungen in den Bearbeitungsprozeß eingeleitet werden können. Durch die Versuchsanordnung können die Schwingungen auch mit herkömmlichen Beschleunigungsaufnehmern mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden, so daß das Verfahren auch auf diesem Wege überprüft werden kann.

Versuchsaufbau und Prozeßdaten

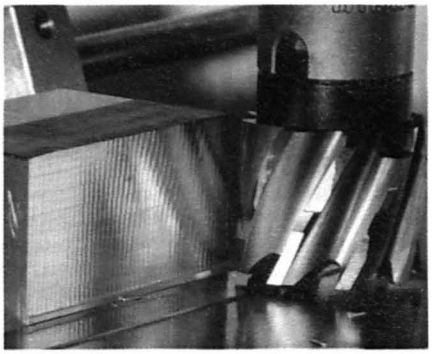
Die Versuche wurden an einer Konsolfräsmaschine durchgeführt (Abb. 1). Links in der Abbildung ist der für die Versuche verwendete elektrodynamische Absoluterreger dargestellt. Der Schwingerreger wird durch Kranbänder gehalten und ist biegeweich zur Krafteinleitungsstelle positioniert. Die Einleitung der Schwingungsenergie erfolgt an der Werkstückrückseite. Die während der Bearbeitung auftretenden Schwingungen werden sowohl werkstück- als auch werkzeugseitig über dreiachsige Beschleunigungsaufnehmer aufgezeichnet. Durch zweimalige Integration der Signale mit anschließender Differenzbildung kann eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug bestimmt werden. Der gewählte Versuchsaufbau hat gegenüber der eigentlichen Anwendung für die Massivholzbearbeitung folgende Vorteile:

- keine Vorschubbewegung des Werkstücks und
- eine geringe Werkzeugmasse, welche eine Werkzeug/Spindeleigenfrequenz weit oberhalb des im Versuch betrachteten Frequenzbereichs zur Folge hat.

Durch diese Vereinfachungen sind die Relativbewegungen mit herkömmlichen Mitteln nachprüfbar. Die zur Rekonstruktion von Werkzeuglagen während der Schnittbildung notwendigen Werkstückoberflächenmessungen sind mit dem homogenen Werkstoff Aluminium wesentlich genauer durchführbar. Das Verfahren kann deshalb sicherer beurteilt werden. Die Zerspanprozeßparameter wurden so gewählt, daß der sichtbare Zahnvorschub einen Wert zwischen 1 und 2 mm annimmt, ein Wert, wie er üblicherweise in der Massivholzbearbeitung angestrebt wird. Gewählte Prozeßdaten:
$n = 900\ min^{-1}$, $v_f = 1{,}35$ m/min,
D = 40 mm.
Werkstück und Werkzeug sind in Abb. 2 vergrößert dargestellt. Dabei erkennt man die Codierung des Werkzeugs mit der typischen Spurenbildung am Werkstück, welche im folgenden näher erläutert wird.

Werkzeugcodierung

Das Verfahren zur Bestimmung der Schwingungen aus Oberflächenmessungen setzt voraus, daß die Informationen auch in der Oberfläche enthalten sind. Hierzu muß eine besondere Werkzeuggestaltung gewählt werden. Im vorangehenden Beitrag [2] wurde festgestellt, daß eine Bearbeitungsrille, bedingt durch die hohe Schnittgeschwindigkeit, in einer so kurzen Zeitspanne entsteht, daß sich Werkzeug- und Werkstücklage in dieser Zeit praktisch nicht ändern. Eine Bearbeitungsrille liefert damit über ihr Höhenniveau nur die Lage zwischen Werkzeug und Werkstück für einen Zeitpunkt. Um eine Sinusbewegung vollständig zu beschreiben, sind mehr als zwei Lageinformationen während ihrer Schwingungsdauer notwendig (Abtasttheorem nach Shannon). Will man Schwingungen bis zu einer Grenzfrequenz f_{gr} erfassen, so ergibt sich eine



▲ Abb. 2: Versuchswerkstück und Codierwerkzeug

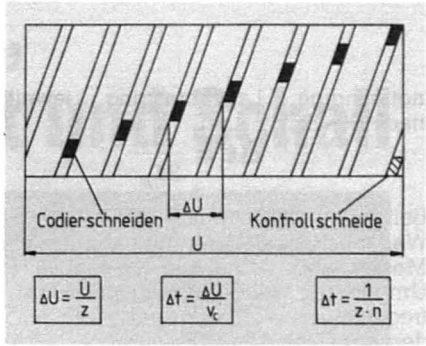


Abb. 3: Abwicklung des Codierwerkzeugs über den Umfang

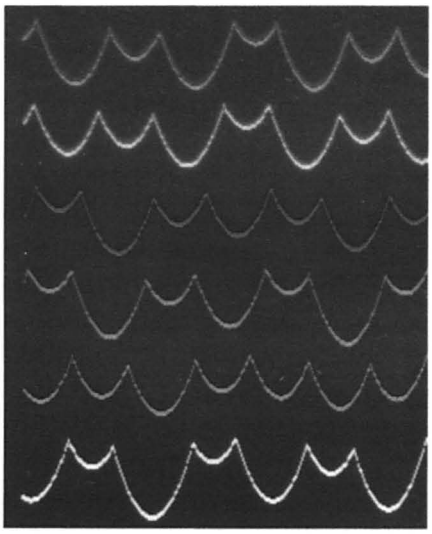


Abb. 4: Auswirkung der Codiermesseranordnung auf die Oberflächenentstehung ◀

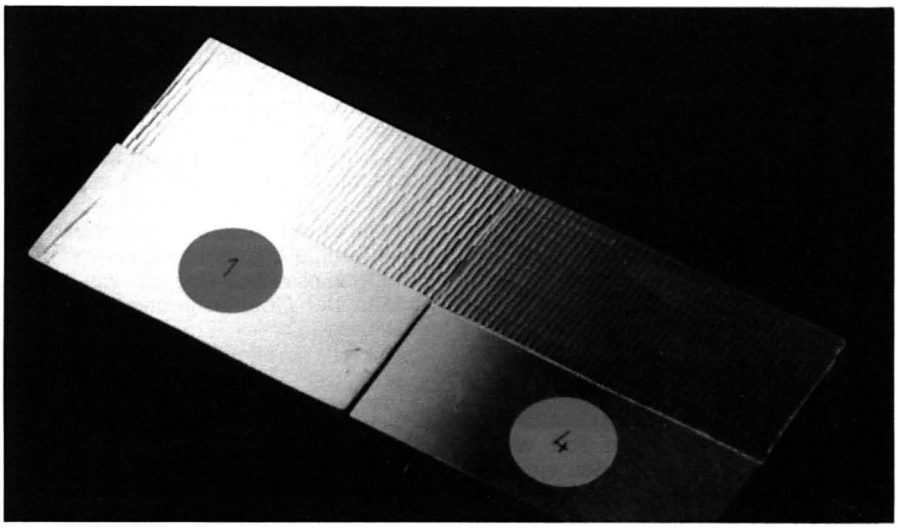
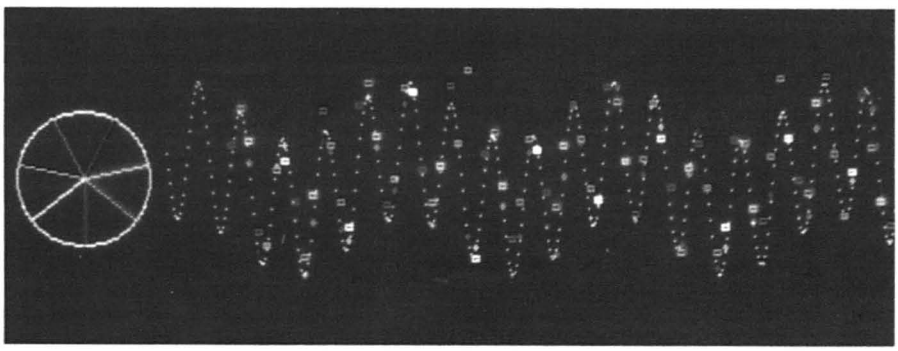


Abb. 5: Codierte Werkstücke mit (1) und ohne (4) zusätzliche Schwingungsüberlagerung

Abb. 6: Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, zusammengesetzt aus sieben Codierspuren ▼



notwendige Lageabtastung jeweils nach der Zeit

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{gr}}$$

Beim Einmesserfinish entsteht die Werkstückoberfläche nur durch ein Messer und damit nur eine Rille je Umdrehung. Bei der vorliegenden Drehfrequenz des Werkzeugs von 15 Hz würden demnach alle Schwingungen oberhalb von f_{gr} = 7,5 Hz fälschlicherweise als niederfrequente Schwingungen unterhalb von 7,5 Hz identifiziert. Handelsübliche Frequenzanalysatoren begegnen einem solchen unerwünschten, weil zu Fehlinterpretationen führenden, Rückfaltungseffekt durch vorherige Frequenzfilterung (Anti-Aliasing-Filter). Dies ist hier nicht möglich. Im vorliegenden Falle muß deshalb die Abtastfrequenz erhöht werden, bzw. es müssen so viele Rillen während einer Umdrehung gebildet werden, daß alle sich abbildenden Störfrequenzen nach obiger Formel erfaßt werden. Praktisch umgesetzt wurde dies durch die Verwendung eines Codierwerkzeugs. Die Abwicklung des Werkzeugs in Abb. 3 zeigt eine Schneidenanordnung, bei der jeweils eine Codierschneide eine eindeutige Oberflächenspur erzeugen wird. Jeweils nach der Zeit Δt schneidet eine andere Codierschneide eine Bearbeitungsrille in ihre Werkstückspur (Codierspur). Im vorliegenden Fall können nach der Formel mit den sieben Codierschneiden Schwingungen bis zur 3,5fachen Drehfrequenz bestimmt werden. In Abb. 4 sind exemplarisch sieben Werkstückspuren aufgrund einer Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug dargestellt.

Versuchsdurchführung

Es wurden nun zwei Werkstücke hergestellt (Abb. 5). Bei Werkstück 1 wurde durch den Schwingerreger eine Frequenz von 22,5 Hz mit einer Amplitude von 7 μm eingeleitet. Auf der Werkstückoberfläche entstehen die von der Massivholzbearbeitung her bekannten typischen Ungleichförmigkeiten in der Rillenabfolge. Im zweiten Fall wurde keine Schwingung von außen eingeleitet. Die entstandene Oberfläche enthält praktisch keine sichtbaren Unregelmäßigkeiten (Abb. 5 - Werkstück 4). Aus den 7 Oberflächenspuren wurden nun die unterschiedlichen Rillenniveaus meßtechnisch bestimmt, so daß die in Abb. 6 dargestellte Abtastung der Relativbewegung rekonstruiert wurde. Die Meßwerte sind darin durch die Farbe der jeweiligen Quadrate den einzelnen Codierschneiden zugeordnet. Eine Frequenzanalyse dieser äquidistanten Zeitabtastung liefert im wesentlichen eine Schwingungsfrequenz von 22,8 Hz mit einer Amplitude von 7 μm und eine zweite Frequenz von 4,35 Hz mit einer Amplitude von 3 μm. Durch Überlagerung dieser beiden Frequenzen erhält man die in Abb. 6 eingezeichnete Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, wobei die identifizierten Phasenlagen bereits berücksichtigt wurden. Mit dem in [2] vorgestellten Simulationsprogramm läßt sich die Oberfläche für eine Werkzeugschneide unter Annahme der identifizierten Relativschwingungen berechnen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlich gemessenen Oberflächenprofil (Abb. 8) für die betreffende Codierschneide.

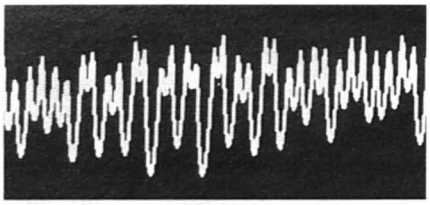
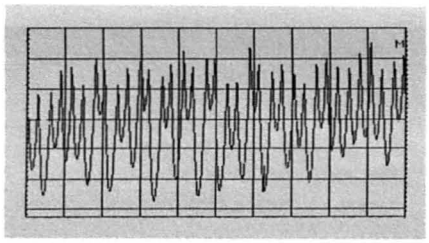


Abb. 7: Simulation einer Codierspur unter Berücksichtigung der identifizierten Relativschwingung zwischen Werkstück und Werkzeug

Abb. 8: Realer ungefilterter Oberflächenmeßschrieb zu der in Abb. 7 simulierten Codierspur (Bildnachweis: IfW)



Anmerkung: Die nicht eingeleitete Frequenz von 4,35 Hz konnte auf die Vorschubbewegung zurückgeführt werden. Sie wurde auch im ungestörten Bearbeitungsfall bei Werkstück 4 mit gleicher Amplitude identifiziert. Bei der Messung der Schwingung mittels Beschleunigungsaufnehmer geht diese Frequenz fast im Meßrauschen unter und ist dadurch kaum erkennbar. Die im Beschleunigungsspektrum außerdem gemessene Frequenz von 15 Hz war in der Oberflächenmessung nicht enthalten. Dieses Ergebnis entspricht den in [2] veröffentlichten Simulationsergebnissen, wonach sich Vielfache der Schneideneingriffsfrequenz nicht auf der Werkstückoberfläche abbilden.

Anwendungsmöglichkeiten

Durch ein vergleichsweise schmales Codierwerkzeug (ca. 15 mm Breite) als Aufsatzwerkzeug zu den üblicherweise sehr breiten Fräsköpfen in der Massivholzbearbeitung wird gewährleistet, daß die Prozeßkräfte und das Maschinenverhalten praktisch nur durch den eigentlichen Fräskopf bestimmt werden. Eine mögliche veränderte Unwucht wirkt sich für den Hauptanwendungsfall „Einmesserfinish" (liegt meist bei mehrschneidigen Werkzeugen vor) nicht auf die Oberflächenentstehung aus. So aufbereitet können mit dem Verfahren folgende Arbeiten angegangen werden:

Maschinenbeurteilung:

Ergebnis sind die sich tatsächlich auf die Werkstückoberfläche störend abbildenden Relativbewegungen in Frequenz- oder Zeitdarstellung (nur Zeitdarstellung für instationäre Vorgänge wie Astlöcher, Ein- und Auslauf). Über die Qualitätskennzahl (Rillenungleichförmigkeitsgrad δ_s) lassen sich auch „was wäre wenn -Aussagen" bezüglich der Oberflächenqualität simulieren.

Standzeitverhalten:

In der Literatur wird oftmals versucht, einen Zusammenhang zwischen Schwingungen und Standzeit zu finden. In [2] konnte jedoch gezeigt werden, daß sich die Hauptschwingungsenergie oftmals in solchen Frequenzen befindet, die nicht zu einer Veränderung der Rillenstruktur führen. Schwingungen müssen im Zusammenhang mit der Oberflächenstruktur differenziert betrachtet werden. Der Vorteil des Verfahrens ist, daß nur diejenigen Frequenzen gefunden werden, die zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur führen. Das Verfahren filtert damit automatisch die nicht relevanten Schwingungen heraus. In Verbindung mit dem in [2] vorgestellten Simulationsprogramm können die tatsächlichen Spanungsdicken theoretisch aus den zugrunde liegenden Relativschwingungen bestimmt werden. Dies ist ein wesentlicher Schritt zur Beurteilung von Standzeitproblemen und sollte größeren Untersuchungen vorausgehen, um die notwendige Anzahl von Versuchen in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten.

Schlußbetrachtung

In diesem letzten Beitrag der dreiteiligen Serie zum Umfangsplanfräsen unter Berücksichtigung von Schwingungsüberlagerungen wurde vorgestellt, wie die die Oberflächenungleichmäßigkeiten verursachenden Relativschwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug aus der Oberfläche selbst ermittelt werden können. In Verbindung mit der im zweiten Teil vorgestellten Qualitätskennzahl und den Möglichkeiten, die sich aus der rechnerischen Behandlung der Problematik mittels Simulationssoftware ergeben, wird die Bewertung von Schwingungen und damit die Bewertung des Maschinenverhaltens möglich. Vor dem Hintergrund der stetig steigenden Nachfrage nach höherer Dynamik, bzw. besserer Qualität oder gleicher Qualität bei kürzeren Durchlaufzeiten gewinnen grundlegende Betrachtungen von Zerspanprozessen, insbesondere in Verbindung mit der Oberflächenentstehung und der Qualitätsbildung, zunehmend an Bedeutung.

Diese Serie soll als erster Schritt einer neuen Betrachtungsweise gesehen werden, in der die Oberfläche nicht durch isolierte Kennwerte wie Rauhigkeiten

(Weiter auf Seite 34)

Wirtschaftliche Maschinenintegration in CIM-Konzepte

Die immer häufiger werdenden Anwendertagungen und -berichte über die CIM-Realität stellen immer wieder das gleiche Problem in den Vordergrund: Die fehlende Offenheit von vorhandenen Steuerungssystemen begrenzt deren Ausbaufähigkeit und zwingt den Anwender zu Investitionen (Gatewayrechner, Softwareschnittstellen), die die Kosten nach oben treiben und damit die Amortisierung des CIM-Systems verzögern.

Der Begriff Offenheit war schon vor zehn Jahren in dem Kurzzeichen OSI (Open System Interconnection) vorhanden und wird für den heutigen Planer von Bedeutung. Der Schlüssel für die Offenheit ist die Verwendung von herstellerunabhängige Industriestandards sowohl für die Hardware als auch für die Software.

Hardwaremäßig basiert die Homatic-Steuerung auf dem standardisierten und deshalb weltweit eingesetzten VME-Bus. Ein Rechner, eine SPS und eine CNC sind die drei Hauptkomponenten der Homatic 2000 und können beliebig kombiniert werden. Das System kann auch um weitere VME-Bus-Karten wie z. B. eine Netzwerk oder eine Grafik-Karte erweitert werden.

Bei dem integrierten Bedienrechner handelt es sich um einen Industrierechner mit 50 MBytes-Festplatte und Floppy-Laufwerk zur Archivierung, der von der Maschine benötigten großen Datenmengen.

Das implementierte multiuser, multitasking Betriebssystem OS9 erlaubt es, diese Datenverwaltung, aber auch die Programmierung oder die Diagnose, während der Produktion durchzuführen.

Auf die Platine können je nach Anwendung verschiedene Module gesteckt werden, um den Rechner noch leistungsfähiger zu machen. So kann dem System mit einer Netzwerk-Karte die notwendige Ausbaufähigkeit gegeben werden. Damit kann eine Maschine an einem Netzwerk direkt als Workstation angeschlossen werden. Verschiedene Netzwerke sind möglich: ARCNet mit „token passing", EtherNet und CheaperNet-Netzwerk mit TCP/IP Protokoll.

Das Netzwerk File System (OS9-NFS) ermöglicht eine Kommunikation zwischen Rechnersysteme unteschiedlicher Art mit einer vollen Transparenz der Datenstruktur. Das gesamte Netzwerk kann als ein einziges Filesystem betrachtet werden. Jede Station kann Zugriff auf die Daten anderer Rechner haben. Hiermit kann die Integration in einem vorhandenen CIM-Konzept ohne zusätzliche Installationskosten realisiert werden (Abb.).

Auf der Basis des OS9-Industrierechners sind komfortable und universelle Bedieneroberflächen zur Steuerung der Homag-Maschinen entwickelt worden. Mit der Verwendung von standardisierten Datenformaten hat man erreicht, daß die bereits vorhandene Hardware und das Know-how weiter verwendet werden können.

Mit der werkstattorientierten Programmierungssoftware Woodwop können ohne CNC-Kenntnisse alle Holzbearbeitungen programmiert werden. Die menügeführte Konturzugprogrammierung erlaubt eine einfache Eingabe der Werkstückgeometrie.

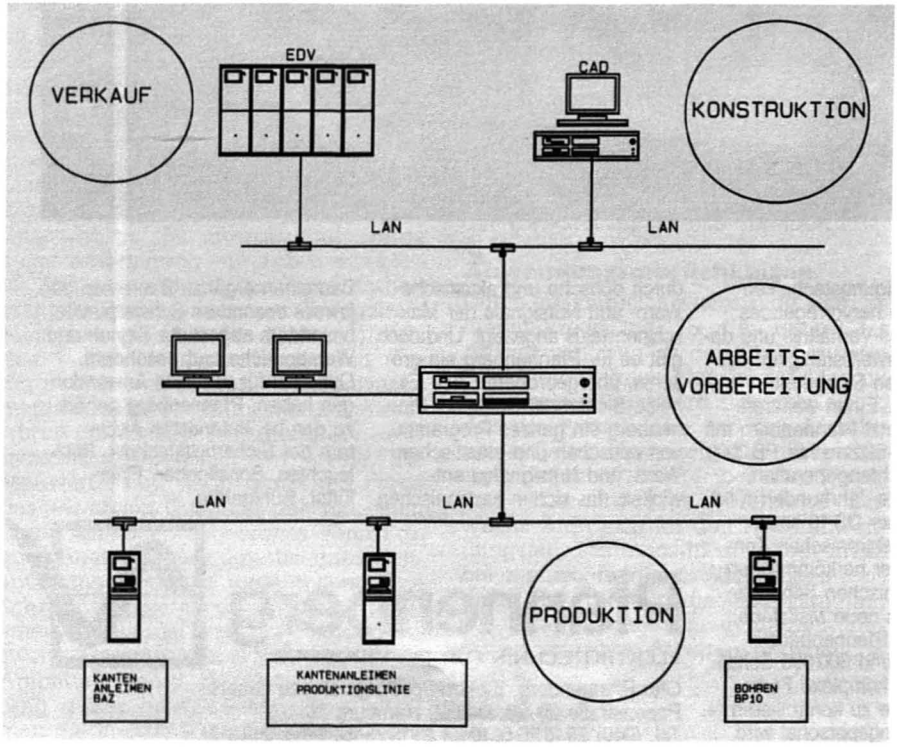
Alternativ zur Konturzugprogrammierung können Zeichnungen vom CAD-System im DXF-Format übernommen werden, so daß bereits vorhandene Hard- und Software weiter verwendet werden können. Nach der Geometrie-Programmierung oder Übernahme werden dann im Dialog die einzelnen Bearbeitungen programmiert. Dabei kann man mit Woodwop nicht nur einfache Bearbeitungen wie Lochreihe Bohren oder Fräsen, sondern auch das Kantenanleimen, das Bündigfräsen sicher und einfach programmieren.

Die Maßeingabe erfolgt absolut oder über Variablen zur einfachen Erzeugung von Varianten. Letztendlich wird anhand der aktuellen Werkzeugbelegung der Maschine ein CNC-Programm generiert. Die Bearbeitungsreihenfolge der programmierten Makros wird nach minimaler Produktionszeit automatisch optimiert.

Das Programm ist intern in der konventionellen NC-Sprache DIN 66025 abgelegt, so daß ein manueller Eingriff jederzeit möglich bleibt. Für die Generierung einer Variante dieses Programmes, müssen nur die Variablen geändert werden.

Mit der Homatic 2000 können die Maschinen der Homag-Gruppe wirtschaftlich in CIM-Konzepte integriert werden. Der Wunsch nach einem reibungslosen Datenfluß zwischen allen Workstations, CAD-Arbeitsplatz oder Maschine läßt sich auch in der Praxis verwirklichen.

HOB-KENNZIFFER **51**



(Fortsetzung von Seite 32)

und Welligkeiten ohne Bezugnahme auf ihre Entstehungsursachen beschrieben wird, sondern es werden die in der Oberfläche steckenden Informationen zur Beurteilung von Maschinenstruktur, Qualität, Standzeit usw. verwendet.

Literatur

[1] Heisel, U.; Fischer, A.: Bessere Oberflächenqualität durch Optimierung des dynamischen Maschinenverhaltens, HOB 4 (1992).

[2] Heisel, U.; Fischer, A.; Maier, V.: Beurteilung von Oberflächen durch Prozeßsimulation, HOB 5 (1992).

HOB-KENNZIFFER **52**