

Schnellauf- Motorspindeln für die Hochge- schwindigkeits- bearbeitung

Der Einsatz neuer Schneidwerkstoffe für die Holzbearbeitung wie beispielsweise polykristalliner Diamant ermöglicht eine erhebliche Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Zur Realisierung dieser Schnittgeschwindigkeiten sind Schnellauf-Motorspindelheiten entwickelt worden. Der folgende Beitrag stellt wesentliche Aspekte dieses Antriebskonzeptes vor und zeigt Einsatzmöglichkeiten für Holzbearbeitungsmaschinen auf. Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Wilm-Henner Niemeyer¹⁾.

High-frequency spindles permit high-speed working. By Dipl.-Ing. Wilm-Henner Niemeyer.

Using new cutting materials for woodworking, e. g. polycrystalline diamond, permits a major increase in working speeds. High-frequency motor spindle units have been developed in order to achieve these cutting speeds. The following article presents important aspects of this drive concept and illustrates the possible applications for woodworking machines.

Les broches à fréquence élevée autorisent des vitesses de travail élevées. De dipl. ing. Wilm-Henner Niemeyer.

Grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux de coupe tels par exemple le diamant polycristallin dans le travail du bois, il devient possible d'augmenter considérablement les vitesses de travail. Les unités de broches à fréquence élevée ont été mises au point pour atteindre ces vitesses de coupe élevées. Ce rapport présente les principaux aspects de cette technique d'entraînement et illustre les possibilités d'application sur les machines à bois.

I mandrini ad alta frequenza consentono lavorazioni ad alta velocità. A cura di Dipl.-Ing. Wilm-Henner Niemeyer.

L'impiego di nuovi materiali da taglio per la lavorazione del legno, quali per es. i diamanti policristallini, consentono di aumentare notevolmente le velocità di lavorazione. Per poter realizzare queste velocità medie sono stati progettati e costruiti mandrini a motore ad alta frequenza. Il presente articolo illustra gli aspetti peculiari di questo sistema di comando e descrive le possibilità d'impiego delle macchine per la lavorazione del legno.

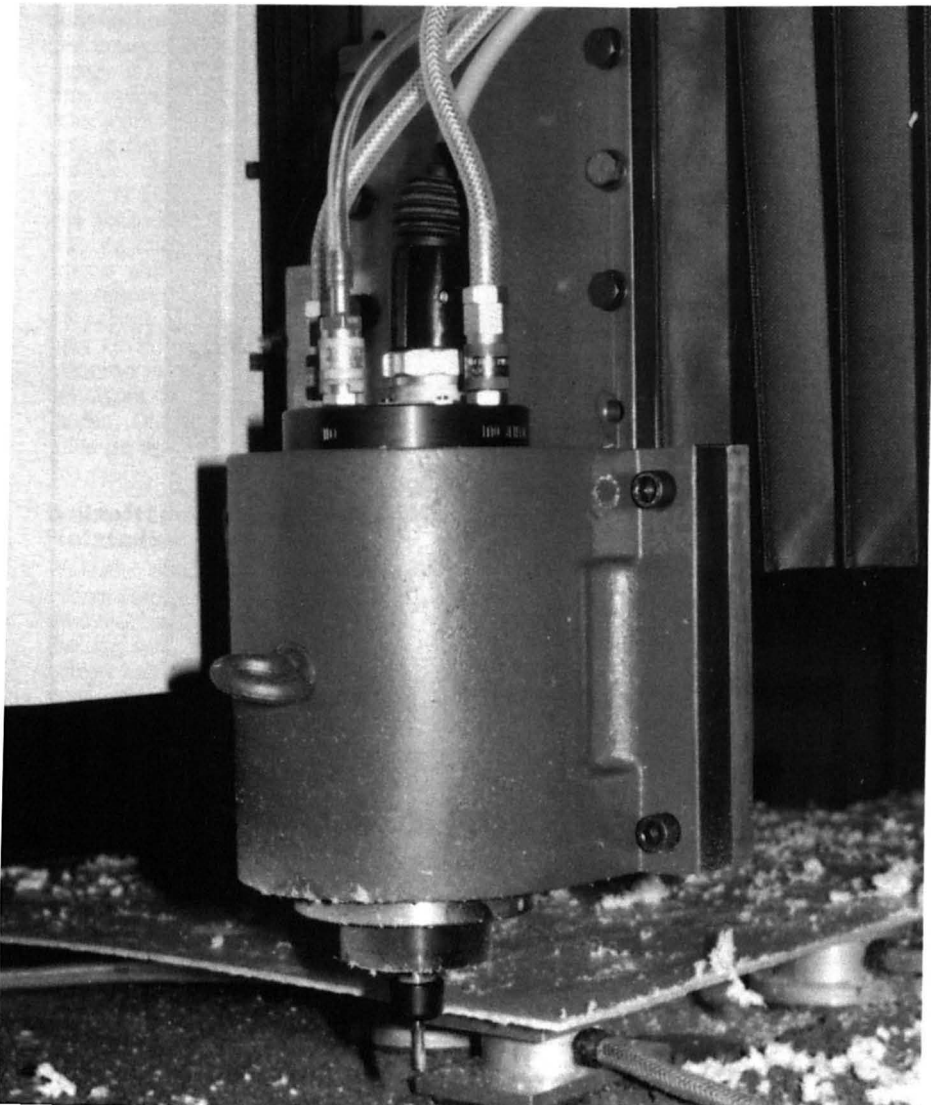
Reduzierung der Hauptzeiten ist wirtschaftliche Notwendigkeit

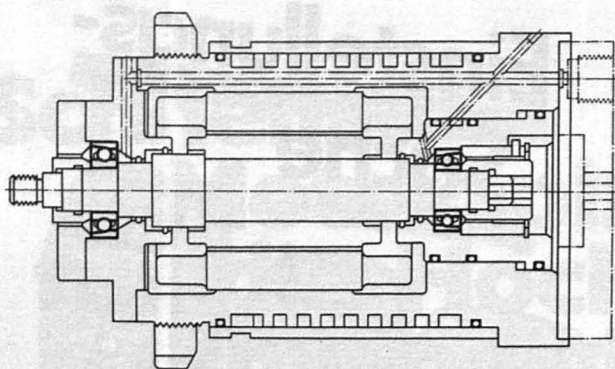
Die Individualisierung der Kundenwünsche zwingt die Hersteller von Möbelementen in zunehmendem Maße zur wirtschaftlichen Fertigung der Losgröße 1, beispielsweise durch Komplettbearbeitung auf Bearbeitungszentren. Wirtschaftlichkeit der stationären Komplettbearbeitung erfordert die Reduzierung von Haupt- und Nebenzeiten. Angestrebt wird daher während der Fräsoption eine möglichst hohe Vorschubgeschwindigkeit, um bei der Herstellung von Formteilen für Möbelfronten, in der Treppen- und Gestellmöbelfertigung mit großen Zeitspanvolumina den Fertigungsprozeß zu beschleunigen und damit die Durchlaufzeit der Teile zu verringern.

Hohe Vorschubgeschwindigkeiten können nur bei Einhaltung optimaler Schnittgeschwindigkeiten und – zur Vermeidung des Werkzeugbruchs bei den schlanken Schaftfräsern – mit vergleichsweise niedrigem Zahnvorschub gefahren werden. Fräswerkzeugdurchmesser von 10 mm bis 20 mm führen bei üblichen Spindeldrehzahlen von

Abb. 1: Schnellauf-Motorspindel bei der Kunststoffbearbeitung auf einer CNC-Oberfräsmaschine (Maka)

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. U. Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, Dipl.-Ing. W.-H. Niemeyer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart.

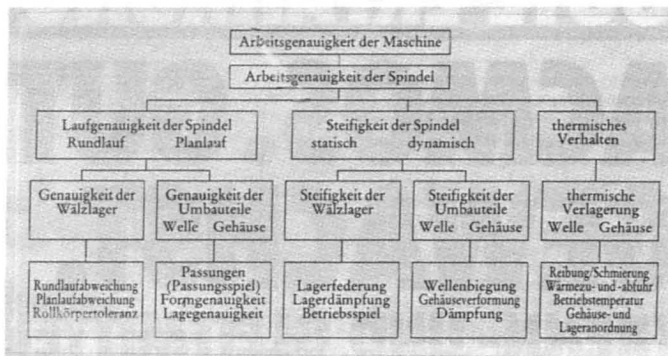




2



3



4

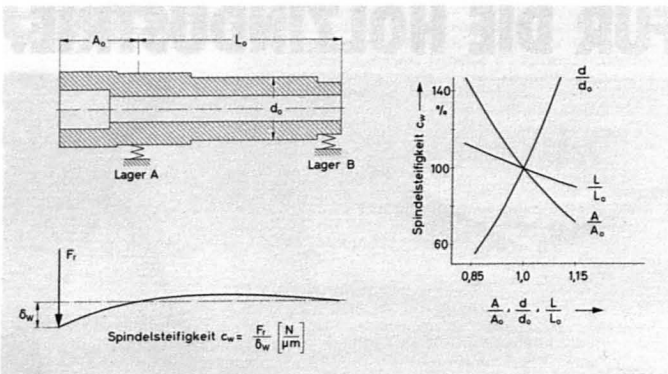


Abb. 2: Motorspindereinheit MSUH mit Ölnebelschmierung (SKF)
a) prinzipieller Aufbau
b) Realisierung

Abb. 3: Einfluß des Spindel-Lager-Systems auf die Arbeitsgenauigkeit der Maschine [5]

Abb. 4: Abhängigkeit der Spindelsteifigkeit von der bezogenen Kraglänge, dem Spindeldurchmesser und Lagerabstand [5]

18000 min⁻¹ zu Schnittgeschwindigkeiten von

$$v_c = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} = 9,5 \dots 19 \text{ m/s,}$$

die für die Holzbearbeitung als relativ niedrig anzusehen sind.

Mit PKD-Werkzeugen zu höheren Schnittgeschwindigkeiten

Hohe Schnittgeschwindigkeiten wirken sich bei HSS- und Hartmetall-Schneiden verschleißfördernd aus. Verschleißarme PKD-Werkzeuge mit hohen Standzeiten erlauben zur Erzielung eines optimalen Arbeitsergebnisses, also einer hohen Oberflächengüte des Werkstückes, mit den erforderlichen hohen Schnittgeschwindigkeiten zu arbeiten.

Steigende Qualitätsansprüche bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten setzen den Einsatz von Antrieben voraus. Oberfräsmaschinen mit hochtourigen Antrieben und Drehzahlen von 60000 min⁻¹ bis 120000 min⁻¹ gehören in der Kunststoffbearbeitung bereits zum Stand der Technik (Abb. 1). Diese Drehzahlbereiche ermöglichen beispielsweise das Schleifen und Fräsen engster Radien von Möbelfrontenprofilen.

Flugzeugbau initiiert Hochgeschwindigkeitsfräsen

Die Hochgeschwindigkeitszerspannung erfordert leistungsstarke, schwingungsarme und drehzahlsteuerbare Hauptantriebssysteme. Im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes „Hochgeschwindigkeitsfräsen“ wurden unter der Führung und Koordination des Instituts für Spanende Technologie und Werkzeugmaschinen der TH Darmstadt geeignete Antriebskonzepte erprobt und die Vorteile der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung an metallischen und nicht-metallischen Werkstoffen durch umfangreiche Zerspanungsversuche ermittelt [1-3].

Allerdings ist der Begriff der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, auch als HSC (High Speed Cutting) bezeichnet, nicht klar definiert. Beim Fräsen wird werkstoffabhängig ab einer Schnittgeschwindigkeit von etwa 300 m/min aufwärts von Hochgeschwindigkeitsbearbeitung gesprochen, bei Aluminium und faserverstärkten Kunststoffen liegt die Grenze zum Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSM) bei etwa 2000 m/min (33 m/s). Ein wesentlicher Vorteil der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, das Vermindern der Zerspankraft, insbesondere das der Passivkraft, erreicht bei einer Schnittgeschwindigkeit von ca. 15 m/s sein Optimum für die Stahlbearbeitung. Zur Erzielung einer hohen Formgenauigkeit wird dieser Effekt bei der Fertigung dünnwandiger Werkstücke aus Aluminium ausgenutzt [3].

Bedingt durch die niedrigen Spankräfte verbessert die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Aluminium bei Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 20 m/min gleichzeitig die Oberflächenqualität von Flugzeugintegralbauteilen. Für die Holzbearbeitung mit ähnlichen Vorschub- und Schnittge-

schwindigkeitsbereichen wie die der Hochgeschwindigkeitszerspannung metallischer Werkstoffe stehen somit Hochleistungsantriebssysteme zur Verfügung.

Höchste Dynamik bei kompakter Bauform

Die Anforderungen der Hochgeschwindigkeitszerspannung an das Antriebssystem wie

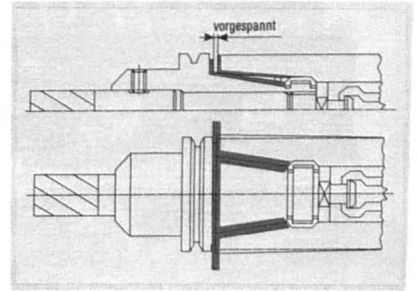
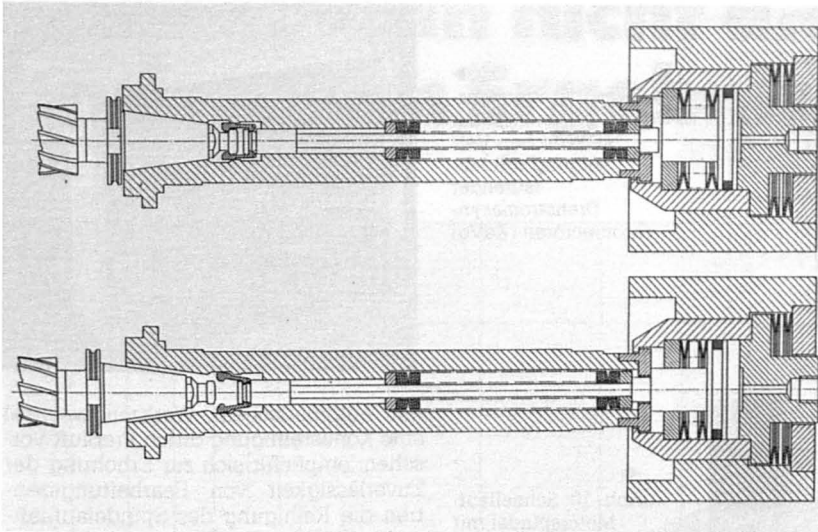
- hohe statische und dynamische Steifigkeit,
- hohe Dauergenauigkeit,
- großer Drehzahlbereich,
- Automatisierung des Werkzeugwechsels und

- Werkzeugzustandsüberwachung lassen sich nur durch Schnellauf-Motorspindeln mit integriertem Antrieb erfüllen (Abb. 2). Dazu sind die Motorelemente, bestehend aus Stator und Rotor eines mehrphasigen Asynchronmotors, zwischen den Lagerstellen der Spindereinheit angeordnet. Durch dieses Antriebssystem werden riemenseitige Lagerbelastungen ebenso vermieden wie der kupplungsbedingte, unruhige Lauf eines konventionellen Motor-Kupplungs-Spindel-Systems. Die Verringerung der rotierenden Massen erhöht die kritische Drehfrequenz der Arbeitsspindel, die Kompaktbauweise erleichtert die Montage dieses Antriebssystems. Die Versorgungsleitungen für elektrische und hydraulische Energie, Kühl- und Schmiermittel sind rückseitig plaziert (Abb. 2, 9, 10).

Mit Niederquerschnittslagern zu höchsten Drehzahlen

Die geforderte statische und dynamische Steifigkeit der Motorspindereinheit

Weiter auf Seite 43



▲ Abb. 6: Spindelkonusaufweitung zur Fliehkräftkompensation und Planablage des Werkzeuges (Ibag)

◀ Abb. 5: Automatischer Werkzeugwechsel durch hydraulisch betätigte Spannzangenöffnung (FAG)

Fortsetzung von Seite 38

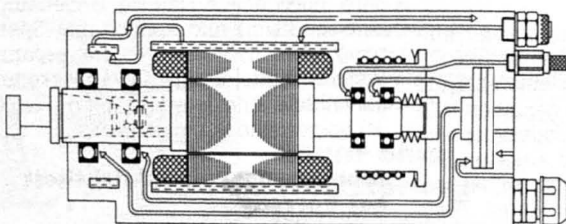
für die Hochgeschwindigkeitszerspannung wird wesentlich beeinflusst durch den Fortschritt der Wälzlager- und Schmierungstechnik (Abb. 3). Da die Spindeldurchbiegung von der vierten Potenz des Durchmessers abhängt, ist für eine hohe statische Spindelsteifigkeit vor allem ein großer Wellendurchmesser wünschenswert (Abb. 4).

Abb. 7: Schmierungstechnische Beurteilung der wesentlichen Schmierungsarten von Werkzeugmaschinen spindeln [7]

Ömangelschmierung	Einspritzschmierung	Fettschmierung
Vorteile: - keine Planscharbeit - Aufbau des EHD-Schmierfilms - keine Drehzahlgrenze Nachteile: - labiler Schmierzustand - unzureichende Dosierungsmöglichkeit - Ölnebel kann umweltbelastend sein	Vorteile: - Kühlmöglichkeit durch Mengenregulierung - Schmierfilmaufbau ist gewährleistet - konstruktiv lösbar - keine Umweltbelastung - keine Drehzahlgrenze Nachteile: - hohe Planschverluste - zusätzliche Ölkühlung	Vorteile: - keine Planscharbeit - Aufbau des optimalen Schmierfilms - keine Schmieranlage Nachteile: - Drehzahlgrenze - Nachschmierung erforderlich

Abb. 8: Optimaler Einsatzbereich (a) der Öl-Luft-Schmierung und Vorteile (b) dieser Minimalmengenschmierung (Vogel)

▼ Abb. 9: Gezielte Zuführung des Öl-Luft-Gemisches an die einzelnen Lager mit der neu entwickelten Schnellauf-Motorspindel mit größerer Steilkegelaufnahme (GMN)

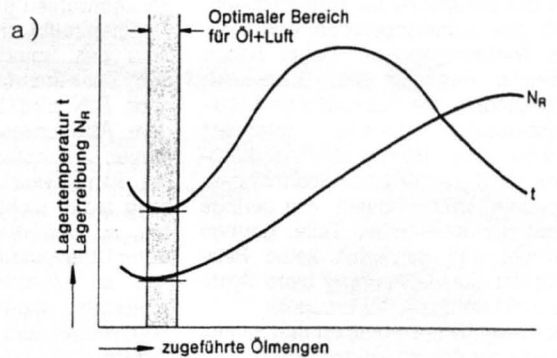


Große Spindeldurchmesser setzen aber bekanntlich die Drehzahlgrenze der Wälzlager herab. Den sich widersprechenden Anforderungen der hohen Steifigkeit und gleichzeitig hohen Drehzahl der Antriebsspindel haben die führenden Wälzlagerhersteller durch Entwicklung von Niederquerschnittslagern (Baureihe HS 719 und HS 70) Rechnung getragen und durch Verringerung der Stahlkugelmasse die Fliehkräfte und damit die mit Temperaturerhöhungen verbundenen Bohrrührungsanteile vermindert. Bei gleicher Wärmeentwicklung erlauben diese HS-Lager um etwa

30 Prozent höhere Grenzdrehzahlen. Damit wurde die Notwendigkeit umgangen, Keramiklager mit 10fach höheren Kosten einzusetzen [4].

Durch die Vergrößerung der Kugelanzahl wird zusätzlich die Steifigkeit, besonders in radialer Richtung erhöht, die Tragzahl ist jedoch reduziert – für den Anwendungsfall im Holzbearbeitungsmaschinenbau ist dies weniger bedeutsam.

Zur Erzielung einer hohen Arbeitsgenauigkeit, also einer geringen statischen Verlagerung und Schwingungsarmut der Spindel bzw. des Werkzeuges,



- b)
- Erreichen hoher Drehzahlkennwerte bei Wälzlagern (bis etwa $1500\,000\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
 - Stets frischer Schmierstoff an der Reibstelle
 - Geringer Schmierstoffverbrauch, ca. 10 % einer Ölnebel-Schmierung
 - Ölauswahl in einem weiten Viskositätsbereich
 - Einsatzmöglichkeit von Ölen mit EP- und Haftzusätzen
 - Wegfall der Fettnachschmierfrist
 - Vereinfachung der Lagerabdichtung
 - Schutz gegen von außen eindringende Verunreinigungen durch den von der Druckluft erzeugten Überdruck im Lager selbst
 - Umweltfreundlich, kein Ölnebel
 - Niedrige Lagertemperatur
 - Geringe Leistungsverluste
 - Versorgung jedes Lagers mit der jeweils erforderlichen Schmierstoffmenge

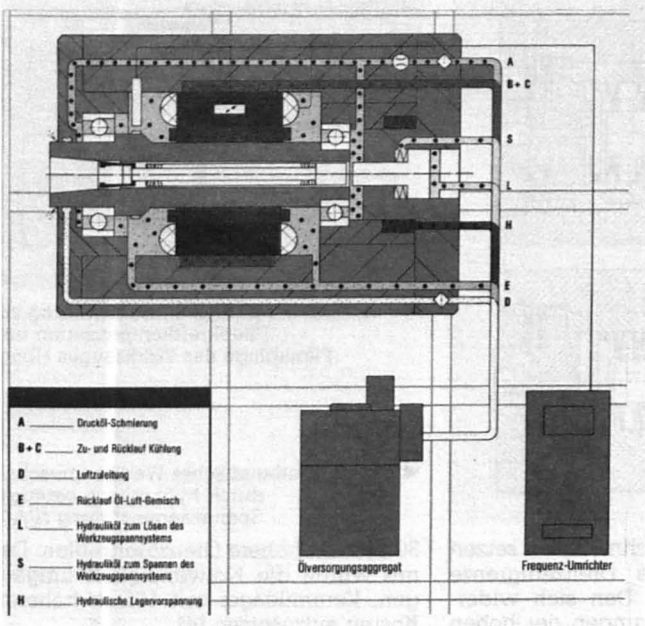


Abb. 11: Frequenz-Umrichter zur elektrischen Versorgung schnelllaufender Drehstromasynchronmotoren (KaVo)

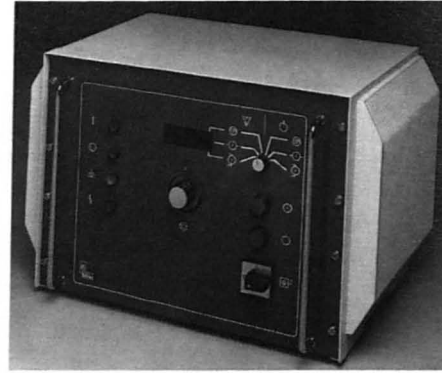


Abb. 10: Schnellauf-Motorspindel mit hydraulischer und elektrischer Versorgung (A: Einspritzschmierung) (Fortuna)

ist außerdem die Kragarmlänge zu minimieren (Abb. 4) [5, 6]: Größere Steifigkeit und verringerte Masse bewirken eine Erhöhung der kritischen Drehzahl.

Höhere Produktivität durch automatischen Werkzeugwechsel

Die Verringerung der Hauptzeiten durch die erhöhte Zerspanleistung bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung verkürzt die Zeitspanne bis zum nächsten, durch die Arbeitsoperation erforderlichen Werkzeugwechsel. Daher haben zahlreiche Hersteller von Schnellauf-Motorspindeln die automatische Werkzeugspannung bereits integriert (Abb. 5). Das Hochgeschwindigkeitsfräsen stellt auch an das Spannsystem besondere Anforderungen, wie geringe Masse der rotierenden Teile, geringe Unwucht und möglichst keine Belastung der Spindellagerung beim Spannen und Lösen des Werkzeuges.

Im wesentlichen kommen drei Spannsysteme zur Anwendung:

- Schraubspannsystem für Steilkegelwerkzeuge nach DIN 2080 und DIN 69871,
- Werkzeugspannsystem mit rotierendem Spannzylinder für Werkzeugkegel mit eingeschraubtem Anzugszapfen nach DIN 69872 und
- Zangenspannsystem mit Keilgetriebe.

Zangenspannsysteme mit Keilgetriebe als Haltekraftverstärker haben sich bei Schnellauf-Motorspindeln stark durchgesetzt. Durch ein Tellerfederpaket wird das Werkzeug am Anzugsbolzen über eine Zugstange vom Zangenhalter eingezogen (Abb. 5). Das Keilgetriebe im Spannkopf dient zur Verstärkung der Federkräfte um den Faktor 3 bis 3,5 und zur mechanischen Verriegelung gegen das Herausziehen des Werkzeuges. Der Spannkopf enthält außerdem die Einkanal-Drehdurchführung für den hydraulischen Lösedruck und die Löseeinheit, bestehend z.B. aus

einem axial schwimmenden Zylinder und einem doppelt beaufschlagbaren Hydraulikkolben zur Entriegelung der Keilgetriebe, ohne Reaktionskräfte auf die Spindellagerung auszuüben. Beim Einsatz von Preßluft wird mit einem hydropneumatischen Druckübersetzer die notwendige Ausstoßkraft erzeugt.

Schnittstelle Werkzeug – Spindel verbessert

Bei Drehzahlen über 15000 min⁻¹ führen die Fliehkräfte zu einer radialen Aufweitung des Spindelaufnahmekegels, so daß das Standard-Steilkegelwerkzeug nach DIN 69871 nachsetzt und nach dem Abbremsen nur durch erheblich höhere Ausstoßkräfte gewechselt werden kann. Gleichzeitig wird das Werkzeug radial nicht mehr spielfrei gehalten, so daß die Rundlaufgenauigkeit unter Umständen nicht mehr gewährleistet ist. Zusätzlich tritt eine unerwünschte axiale Verlagerung des Werkzeuges und damit auch an der im Stillstand vermessenen Schneide auf.

Deshalb haben die Hersteller von Werkzeugen für die Metallbearbeitung mit nicht genormten, alternativen Schnittstellenlösungen die statischen Nachgiebigkeiten des Werkzeug-Spindel-Systems auf etwa die Hälfte reduziert [11]. Entwickelt wurden modifizierte Steilkegel mit Plananlage (Abb. 6), Zylinderschaft mit Plananlage und Zentralspannung sowie mit radialer Klemmung. Mit doppelzylindrischen Konstruktionen wird bei den Ausführungen mit radialer Klemmung versucht, die Nachteile des Zylinders im Fügeverhalten gegenüber dem Kegel auszugleichen.

Bei der Holzbearbeitung kommt hinzu, daß aufgrund der hohen Staubbelastung im Spindelbereich eine absolute Sauberkeit der Fügeteile garantiert sein muß, um nicht durch Anlagefehler eine unzulässige Unwucht zu erreichen [8]. Hier ist der Steilkegel wegen seiner besseren Abreinigbarkeit im Vorteil. Wenn auch die Schnellauf-Motorspindel

mit automatischem Werkzeugwechsel eine Konusreinigung durch Preßluft vorsehen, empfiehlt sich zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Bearbeitungszentren die Reinigung des Spindelaufnahmekegels mit einem automatischen Kegelreiniger, wie ihn z.B. Kelch für Werkzeugwechsler anbietet.

Die Qualität der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist somit sehr stark abhängig von der Ausführung der Schnittstelle Werkzeug – Spindel. Kurzkegel und axial geschlitzte Steilkegel in Verbindung mit der Plananlage vermeiden das Entstehen von Spiel bei sehr hohen Drehzahlen und das Nachsetzen des Werkzeuges. Sie garantieren eine hohe statische und dynamische Steifigkeit und die Einhaltung der vorgesehenen Lösekraft. Beim Einziehen des Kegels wird der Konus zur Kompensation der Fliehkraftdeformation vorgespannt (Abb. 6). Zur Sicherstellung von Bearbeitungsqualität, Geräuscharmheit, hoher Werkzeugstandzeit und Lebensdauer der Spindellager sind die Werkzeuge auf Gütestufe Q1 auszuwuchten [8].

Hydraulische Dehnspannsysteme für manuellen Werkzeugwechsel

Im Standardprogramm vieler Hersteller von Schnellauf-Motorspindeln befinden sich für die Aufnahme von Werkzeugen mit zylindrischen Schäften Zangenaufnahmen, die manuell gespannt werden. Bei geringer Anzahl von Werkzeugwechseln pro Schicht stellt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des aufwendigen automatischen Werkzeugspannsystems. Kompaktbauende, manuell betätigte Spannsysteme sind darüber hinaus bei höchsten Drehzahlen im Vorteil, da die Lagerinnendurchmesser klein gehalten werden können. Zudem bleibt die Auskraglänge relativ klein.

Durch die Integration eines Dehnspannfutters in eine Schnellauf-Motorspindel werden diese genannten Vorteile ebenso genutzt wie die reproduzierbare, hochgenaue (radiale Ungenauigkeit < 3 µm) und komfortable Spannung eines hydraulischen Dehnspannsystems. Hertel und GMN entwickelten gemeinsam eine derartige, auf der EMO '89 vorgestellte Spindeleinheit.

Schmierung: Spindeldichtheit hat Vorrang

Höchste Drehzahlen erlauben die Spin-



◀ Abb. 12: Magnetgelagerte Hochleistungsspindel mit 40 kW Leistung bei 40000 min⁻¹ (Ibag)

dellager nur bei ausgereifter, auf den Anwendungsfall hin optimierter Schmieringstechnik. Die Aufgabe der Spindelschmierung besteht darin, durch gerade ausreichende Schmierstoffmenge und Zuführung zur Lagerstelle den elastohydrodynamischen Schmierfilm sicherzustellen. Überschmierung verbietet sich wegen der erhöhten Plantschverluste und der Probleme bei der Spindeldichtheit (Abb. 7). Die Fettschmierung ist für die hohen Spindeldrehzahlen bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung nicht geeignet. Beurteilungskenngröße für die ausreichende Versorgung der Lager ist der Kennwert $n \cdot d_m$, das Produkt aus Drehzahl und mittlerem Lagerdurchmesser. Sichere Betriebsbedingungen werden erzielt bei $n \cdot d_m$ [mm/min] mit der Schmierungsart:

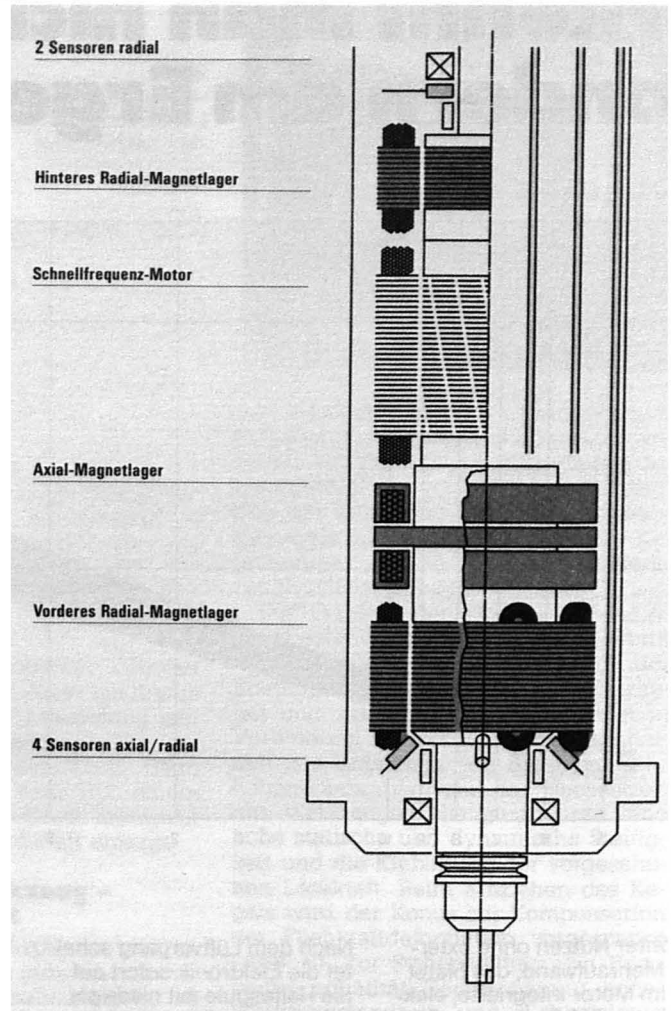
- < $0,8 \cdot 10^6$ Fettschmierung,
- < $1,5$ bis $1,8 \cdot 10^6$ Ölminimalschmierung,
- < $2,5 \cdot 10^6$ Öleinspritzschmierung.

Der vorwiegend vertikale Einbau der Frässpindeln in der Holzbearbeitung begünstigt das Beschädigen der Werkstückoberfläche durch Öltropfen, insbesondere bei Frässpindelstillstand. Selbst die Fortschritte der Dichtungstechnik in den letzten Jahren können eine 100prozentige Spindeldichtheit bei der Öleinspritzschmierung nicht gewährleisten [9]. Berührende Dichtungen scheiden von den genannten Drehzahlen aus. Durch Verschleiß sind sie nicht sicher dauer dicht. Daher muß auf die Vorteile der hohen Leistungsfähigkeit der Öleinspritzschmierung (Abb. 10) derzeit noch verzichtet werden. Die Öl-Luft-Schmierung in Form der Ölminimaleinspritzschmierung, bei der Öltropfen in eine Rohrleitung eingespritzt, im Luftstrom zerteilt und direkt zu den Lagerstellen transportiert werden (Abb. 2, 9), kommt wegen ihrer Vorteile (Abb. 8) überwiegend bei Schnellauf-Motorspindeln zum Einsatz. Als vorteilhaft sehen einige Hersteller von Frässpindeln zusätzliche Absaugungen an der Labyrinthdichtung vor. Die Sperrluft verhindert neben dem Ölnebelaustritt das Eindringen von Holzstaub.

Motorspindeln mit Sensoren für die automatisierte Fertigung

Sicherheitsaspekte bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung haben bewirkt, daß durch umfangreiche Maßnahmen zur Spindel- und Werkzeug-Zu-

▶ Abb. 13: Prinzipieller Aufbau der Magnetlager-Motorspindel (Ibag)



standsüberwachung und durch Schnittstellen zur CNC-Steuerung jederzeit die Kontrolle über die Fräsbearbeitung vorhanden ist. Im einzelnen werden eingesetzt:

- Kraftmeßlager für die Radialkraftüberwachung und Vorschubregelung,
- Schwingungsaufnehmer am Spindelkopf für die Überwachung der Unwucht des Werkzeuges und des Lagerzustandes,
- Motorstromüberwachung zur Abschätzung der Leistungsaufnahme und Erkennung des Werkzeugbruchs,
- Thermistoren zur Temperaturüberwachung von Lagern und Stator,
- Drehzahlgeber und Spindelpositioniereinrichtung für den automatischen Werkzeugwechsel,
- Regelkreis zur optimalen Einstellung der Lagervorspannung,
- Grenzwertvorgabe und Abschaltkreise und
- Kontrolle des Kühlkreislaufes.

Umfangreiche Peripherie erhöht Anschaffungskosten

Überwachungseinrichtungen sowie elektrische und hydraulische Versorgungseinheiten sind ein wesentlicher Kostenfaktor beim Einsatz von Schnellauf-Motorspindeln. Die Kosten für diese peripheren Einrichtungen liegen meist um ein Mehrfaches über den eigentlichen Spindelkosten. Zusätzlich zu dem

bereits angesprochenen Ölversorgungsaggregat ist für den Betrieb des Drehstrom-Asynchronantriebes einer Motorspindel ein Drehstromnetz mit entsprechender Frequenz erforderlich. Neben rotierenden Umformern haben sich in den letzten Jahren aufgrund der rasanten Entwicklung der Mikro- und Leistungselektronik statische Frequenzrichter für diesen Zweck bewährt. Der meist verwendete Umrichter arbeitet mit konstanter Zwischenkreisspannung und sinusbewerteter Pulsbreitenmodulation: Ein ungesteuerter Stromrichter richtet die dreiphasige 50/60-Hz-Eingangsspannung gleich, der anschließende Wechsellrichter erzeugt aus dieser Zwischenkreisspannung durch Pulsbreitenmodulation ein dreiphasiges Spannungssystem mit entsprechender Amplitude und Frequenz. Der Motor wird bis zu seiner Nennzahl mit konstantem Moment (konstanter Fluß) und darüber mit konstanter Leistung (konstante Spannung) betrieben.

Für den Leistungsteil des Wechselrichters stehen heute hochsperrende, abschaltbare Leistungshalbleiter in unterschiedlichen Technologien zur Verfügung. Aufgrund der hohen Ausgangsfrequenzen und der gewünschten Geräuscharmheit sind Taktfrequenzen über 16 kHz üblich, weshalb der Einsatz von schnellen Leistungshalbleitern unumgänglich ist. Bei relativ niedrigen Umrichterleistungen bis zu einigen kVA

lassen sich Leistungs-MOSFETs vorteilhaft einsetzen. Bei mittleren - für Schnellauf-Motorspindeln ausreichenden - Leistungen stellt der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) einen günstigen Kompromiß dar.

Für die Kommunikation mit übergeordneten Steuerungen sind moderne mikroprozessorgesteuerte Frequenzumrichter mit Standardschnittstellen (V 24, RS 232) ausgerüstet. Damit kann der Umrichter aus übergeordneten Systemen parametrisiert, gesteuert und überwacht werden.

Höchstleistungs-Schnellauf-Motorspindel mit Magnetlagerung

Werden sowohl hohe Drehzahlen als auch hohe Zerspanleistungen benötigt, d.h. der Drehzahlkennwert $n \cdot d_m$ überschreitet die Leistungsfähigkeit der Spindellager, bieten nur noch Magnetlagerungen eine ausreichende Standfestigkeit. Neben S2M [3] hat Ibag in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mechanik der ETH Zürich ein Magnetlagerspindel-System entwickelt (Abb. 12, 13), bei dem der Rotor allein durch elektromagnetische Kräfte in seiner zentralen Lage gehalten wird. Sensoren und digitale Lageregelkreise sorgen für die Stabilität und dynamische Steifig-

keit der Magnetlagerung (Abb. 13).

Den Vorteilen der hohen Leistungsabgabe von 40 kW bei 40000 min⁻¹ bzw. 20 kW bei 60000 min⁻¹ stehen sehr hohe Anschaffungskosten des Magnetlagerspindel-Systems von ca. DM 200000,- gegenüber, so daß diese Motorspindel derzeit wohl Sondereinsatzgebieten vorbehalten bleibt.

Literatur

- [1] Schulz, H.: Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe. München; Wien: Hanser, 1989.
- [2] Kaufeld, M.: Hochgeschwindigkeitsfräsen und Fertigungsgenauigkeit dünnwandiger Werkstücke aus Leichtmetallguß. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung) München; Wien; Hanser, 1988.
- [3] Schulz, H.; Scherer, J.: Bearbeiten bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. In: Werkstatt und Betrieb 122 (1989) Nr. 2, S. 133-141.
- [4] Weigand, R.: Keramik-Werkstoff für die Wälzlager von morgen? In: Wälzlagertechnik - Industrietechnik, Berichte aus der Firmengruppe FAG Kugelfischer, Heft 1, 1988.
- [5] Brändlein, J.: Eigenschaften von wälzgelagerten Werkzeugmaschi-

nenspindeln. FAG Publikation WL 02113 DA.

- [6] Thierfelder, A.: Beitrag zur Auslegung des Werkzeug-Spindel-Lager-Systems für asymmetrisch bestückte Hartmetall-Wendeplatten-Werkzeuge. Diss., Universität Stuttgart. Stuttgart 1988.
- [7] Weck, M.; Opey, L.: Entwicklung wälzgelagerter Hochgeschwindigkeitsspindeln für Werkzeugmaschinen. Vortrag zum 2. Darmstädter Fertigungstechnischen Symposium, TH Darmstadt, 12. und 13.3.1987.
- [8] Wehrfritz, H.: Einsatz von Spindeln zum Hochgeschwindigkeitsbearbeiten. In: Werkstoff und Betrieb 122 (1989) Nr. 4, S. 293-297.
- [9] Fritz, E.; Haas, W.; Müller, H.K.: Abdichtung von Werkzeugmaschinenspindeln. In: Konstruktion 41 (1989) S. 229-238.
- [10] Hörnung, W.; Voll, H.: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung scheidet nicht an den Wälzlager-Spindeleinheiten. In: die maschine (1987) Nr. 10, S. 37-44.
- [11] Weck, M.; Lembke, D.: Die Gestaltung der Schnittstelle zwischen Werkzeugmaschine und Werkzeug. In: die maschine 43 (1989) Nr. 6, S.56-60.