

Werkzeugschwingungen beeinflussen Standzeitverhalten von PKD-Fräsern

Vor rund zehn Jahren erfolgte mit dem polykristallinen Diamant (PKD) der Einzug eines neuen Schneidwerkstoffes in den Holzbearbeitungsbereich. Im Vergleich zu den bis dahin leistungsfähigsten hartmetallbestückten Werkzeugen konnten durch diesen neuen Schneidstoff erhebliche Verbesserungen beim Standzeitverhalten erreicht werden. Je nach Anwendungsfall erreichen PKD-Werkzeuge eine 200fache oder noch höhere Lebensdauer als HM-Werkzeuge [1]. Trotz ihrer hohen Fertigungskosten errechnen sich somit bei deren Einsatz in vielen Fällen geringere Werkzeugkosten [2]. In Zusammenarbeit mit einer Anwenderfirma hat das Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart Untersuchungen durchgeführt, inwieweit sich diese Eigenschaften zur Steigerung der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten und damit zur Reduzierung der Bearbeitungszeiten ausnutzen lassen. Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Edmund Weiss ¹⁾.

Einsatz einer Schnellauf-Motor-spindel zur Verkürzung der Bearbeitungszeit

Zunehmender Wettbewerbsdruck zwingt insbesondere auch holzbe- und verarbeitende Betriebe zu einer kostengünstigeren Fertigung, um weiterhin konkurrenzfähig bleiben zu können. Von daher werden höhere Schnittge-

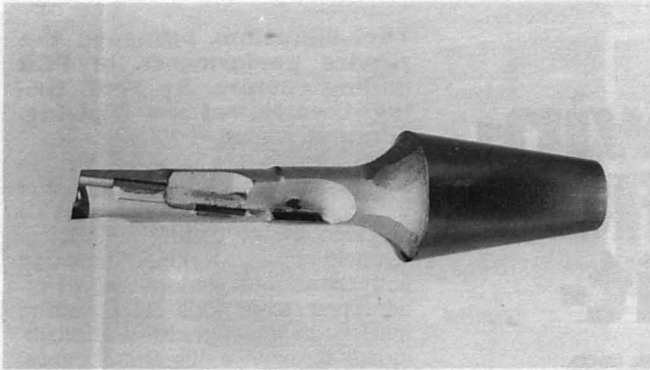
Tool vibrations influence the service performance of PCD milling cutters. By Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel and Dipl.-Ing. Edmund Weiss.

Around ten years ago, the arrival of the polycrystalline diamond (PCD) provided a new cutting material in the field of woodworking. Compared with the highest performance carbide-tipped tools, this new cutting material enable significant improvements in service life performance. Depending on the application, the service life of PCD tools is 200 X or even more than that of carbide tools [1]. This means that despite their higher production costs, they use results in lower tools costs in many cases [2]. In conjunction with a user company, the University of Stuttgart Institute of Machine Tools (IfW) have carried out investigations to determine to what extent these properties of PCD tools can be used in slot milling chipboard to increase cutting speeds and speed feeds and thereby reduce machining times.

schwindigkeiten und Vorschubgeschwindigkeiten zur Reduzierung der Fertigungszeiten angestrebt. Aufgrund ihres hervorragenden Verschleißverhaltens bietet sich hier für PKD-Werkzeuge ein weites Einsatzfeld an [3]. In dem hier vorliegenden Anwendungsfall werden 62 mm dicke, hochverdichtete und beidseitig beschichtete Spanplatten bearbeitet. Zum Fräsen von Nuten bzw. Langlöchern auf einer CNC-Oberfräse wird derzeit ein Motor-Spindel-System mit einer Drehzal von $n = 18000 \text{ min}^{-1}$ eingesetzt. In Verbindung mit einem PKD-Fräser mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ ergibt sich eine Schnittgeschwindigkeit von $18,9 \text{ m/s}$. Unter diesen Randbedingungen und der vorhandenen Motorleistung läßt sich im praktischen Betrieb eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 4,5 \text{ m/min}$ realisieren. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten verbieten sich deswegen, da die Lagerlebensdauer dadurch drastisch reduziert wird.

Um bei der Vorschubgeschwindigkeit

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. U. Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, Dipl.-Ing. E. Weiss ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung für Holzbearbeitungsmaschinen desselben Institutes. Die Durchführung der Schwingungsmessungen erfolgten unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Wilm-Henner Niemeyer, früherer Mitarbeiter am selben Institut.



▲ Abb. 1: PKD-Schaftfräser

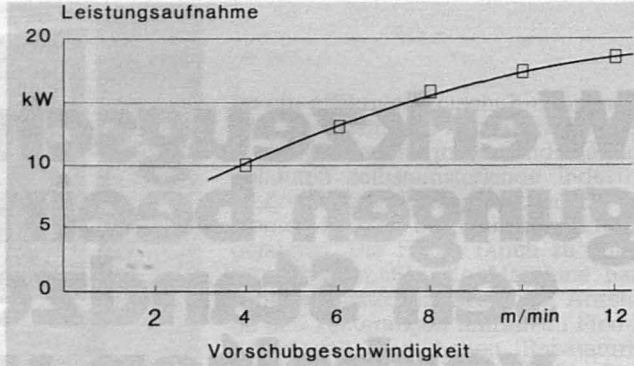


Abb. 2: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Leistungsaufnahme einer Schnellauf-Motorspindel

eine angestrebte Steigerung um den Faktor 2 bis 3 zu erreichen, wurde zu Versuchszwecken eine Schnellauf-Motorspindel mit einer Drehzahl von $n = 30000 \text{ min}^{-1}$ und höherer Motorleistung in die CNC-Oberfräse eingebaut. Die Schnittgeschwindigkeit erhöht sich damit auf $31,4 \text{ m/s}$. Als Werkzeug kam ein einzahniger PKD-Schaftfräser mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ zum Einsatz, wobei die PKD-Schneidplatten in zwei Reihen versetzt zueinander angeordnet sind (Abb. 1). Weiterhin sind die Schneiden um den Neigungswinkel $\lambda_s = 10^\circ$ schräggestellt. Diese Konstellation ermöglicht Vorschubgeschwindigkeiten bis zu $v_f = 12 \text{ m/min}$.

Leistungsmessungen an der Schnellauf-Motorspindel ergeben mit steigender Vorschubgeschwindigkeit eine nichtlineare, degressive Zunahme der Schnittleistung (Abb. 2). Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der Mittelwerte aus den Einzelmessungen und einer mit der Formel basierend auf der Ähnlichkeitstheorie beim Leistungsbedarf nach Ertelt [4] berechneten Kurve:

$$F_{C2} = F_{C1} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,75} \left(\frac{V_{f2}}{V_{f1}} \right)^{0,5} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{0,5}$$

F_c = Schnittkraft

d = Werkzeugdurchmesser

v_f = Vorschubgeschwindigkeit

n = Werkzeughrehzahl

Standzeitverhalten der PKD-Schneiden

Beim nachfolgenden Einsatz der Schnellauf-Motorspindel im Fertigungsbetrieb stellte sich bei der Drehzahl $n = 30000 \text{ min}^{-1}$ ein unerwartet schneller Verschleiß der PKD-Schneidplatten ein. Bei einer Vorschubge-

schwindigkeit von $v_f = 10 \text{ m/min}$ betrug der durchschnittliche Vorschubstandweg 800 m , wobei das Erreichen der maximal zulässigen Stromaufnahme der Schnellauf-Motorspindel als Kriterium für das Standzeitende galt. Eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit auf $v_f = 7 \text{ m/min}$ ergab eine Steigerung des Vorschubstandweges auf durchschnittlich 1450 m . Auffällig hierbei war zum einen die große Streubreite bei den Standzeiten der einzelnen Fräser von bis zu 100% , zum anderen der Umstand, daß an den PKD-Schneiden praktisch keine sichtbaren Ausbrüche festzustellen waren, welche typischerweise das Ende des Standweges von PKD-Schneiden bestimmen.

Demgegenüber konnte mit dem bislang eingesetzten Motor-Spindel-System ($n = 18000 \text{ min}^{-1}$, $v_f = 4,5 \text{ m/min}$) und identischem PKD-Fräser ein Vorschubstandweg von 4000 m erreicht werden. Berücksichtigt man die höhere Drehzahl der Schnellauf-Motorspindel und den daraus resultierenden größeren Schnittweg bei gleichem Vorschubweg des Fräasers, so reduziert sich dennoch die Standzeit bezogen auf den Schnittweg um rund 40% .

Um den Einfluß des Antriebskonzeptes - herkömmliches Motor-Spindel-System und Schnellauf-Motorspindel - zu ermitteln, wurde letztere ebenfalls mit $n = 18000 \text{ min}^{-1}$ und $v_f = 4,5 \text{ m/min}$ betrieben. Unter diesen identischen Betriebsbedingungen hatte sich nach einem Vorschubweg von 4000 m die

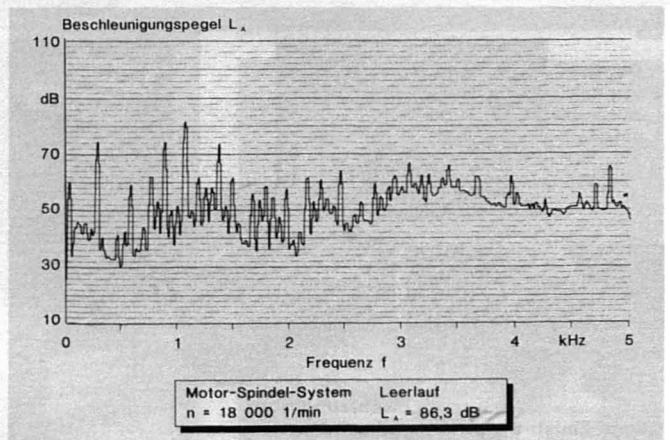
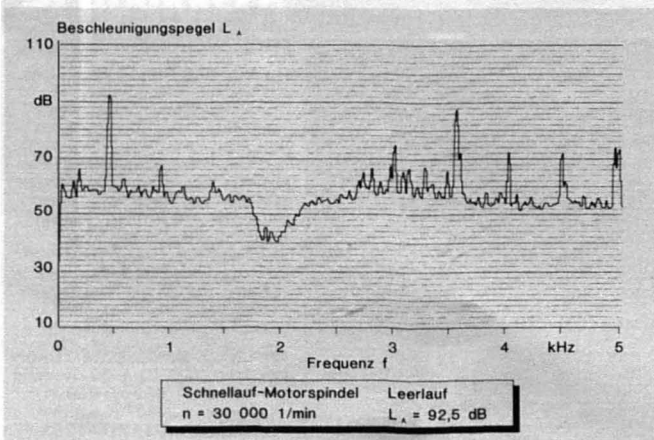
Stromaufnahme erst um ein Drittel des zulässigen Wertes erhöht. Der PKD-Fräser wies zu diesem Zeitpunkt einige kleinere Ausbrüche auf, wie sie für diesen Schneidstoff typisch sind [5]. Die Bearbeitungsqualität wird jedoch durch diese kleinen Ausbrüche in keinsten Weise beeinträchtigt, so daß aufgrund des weitgehend linearen Stromanstieges mit zunehmender Einsatzdauer mit einem etwa dreifachen Vorschubstandweg gegenüber dem Motor-Spindel-System gerechnet werden kann.

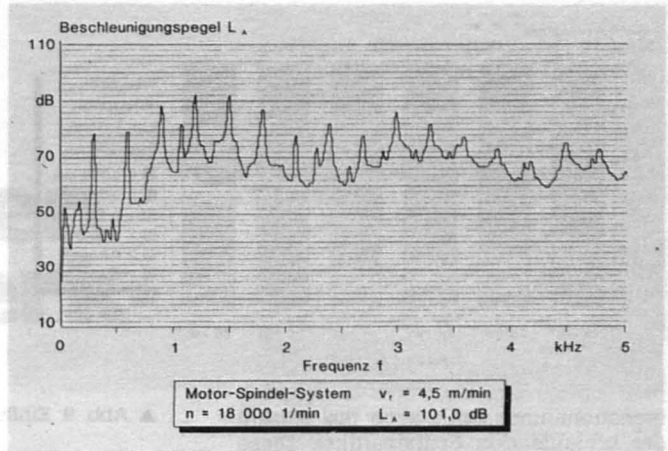
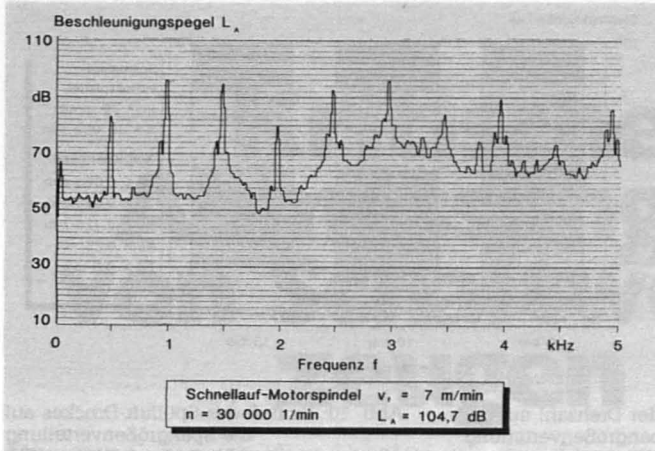
Schwingungsverhalten der Spindel beeinflusst Werkzeugstandzeit

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Schnittgeschwindigkeit das Standzeitverhalten von PKD-Schneiden beeinflusst [5]. Im Gegensatz zu HM-Schneiden nimmt allerdings bei PKD-Schneiden der Schneiderversatz mit steigender Schnittgeschwindigkeit in nur geringem Umfang zu. Die sich hier ergebenden deutlichen Standweg-Differenzen lassen sich somit nicht allein auf die unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten zurückführen. Da Vibrationen ebenfalls als Erklärung für dieses Werkzeugstandverhalten dienen könnten, wurden Schwingungsmessungen an den Spindeln durchgeführt. Für diese Messungen wurde an der Spindelhülse in Höhe der Werkzeugaufnahme beim Spindellager ein Beschleunigungsaufnehmer befestigt, dessen Signale mittels Pegelstatistik- und Mitt-

Abb. 3: Beschleunigungspegel-Spektrum einer Schnellauf-Motorspindel im Leerlauf

Abb. 4: Beschleunigungspegel-Spektrum eines Motor-Spindel-Systems im Leerlauf





lungsgesamt sowie Schmalbandanalysator ausgewertet wurden.

Bei der Schmalbandanalyse der Schnellauf-Motorspindel im Leerlauf ist bei 500 Hz, der Spindeldrehzahl, ein deutlicher Peak zu erkennen (Abb. 3). Oberhalb 3,5 kHz sind weitere, vereinzelte Spitzen zu erkennen, welche auf die Lagerung – Überrollfrequenzen der Rollkörper – zurückzuführen sind. Ansonsten ergibt sich jedoch ein relativ gleichmäßiges Signal. Ein sehr viel stärker inhomogeneres Frequenzspektrum erzeugt das Motor-Spindel-System im Leerlauf (Abb. 4): Neben dem Peak bei 300 Hz, der Spindeldrehzahl, sind eine Vielzahl weiterer Frequenzspitzen zu erkennen, welche auf Ungenauigkeiten im gesamten System schließen lassen, beispielsweise bei der Ankopplung der Spindel an den Motor sowie den Lagerungen. Bei Bearbeitung dominieren in beiden Fällen die der Spindeldrehzahl entsprechenden Frequenz sowie die Zahneingriffsfrequenz des Schaftfräasers (Abb. 5, 6). Diese Zahneingriffsfrequenz berechnet sich zum Produkt aus Fräserdrehzahl und Schneidenzahl bzw. Zahnreihenzahl. In den vorliegenden Fällen liegt sie folglich bei der doppelten, der Spindeldrehzahl entsprechenden Frequenz. Weiterhin sind über den gesamten Frequenzbereich bis 5 kHz die Oberschwingungen dieser Frequenzen sehr stark ausgeprägt.

Für den Beschleunigungspegel L_A bei Bearbeitung ergibt sich bei der Schnellauf-Motorspindel eine Zunahme sowohl mit steigender Vorschubgeschwindigkeit v_f , insbesondere jedoch mit steigen-

▲ Abb. 5: Beschleunigungspegel-Spektrum einer Schnellauf-Motorspindel bei Bearbeitung

der Spindeldrehzahl n (Abb. 7). Bei der Gegenüberstellung der gemessenen Werte (Tafel 1) wird ein deutlicher Zusammenhang zwischen Standzeit und Beschleunigungspegel sichtbar, wobei sich die Größe des Beschleunigungspegels überproportional auf die erreichbare Standzeit auswirkt. Für den Konstrukteur bedeutet dies, daß bei Holzbearbeitungsmaschinen für den Einsatz von PKD-Werkzeugen und den mit ihnen möglichen hohen Schnittgeschwindigkeiten bzw. Werkzeugdrehzahlen deren Schwingungsverhalten wesentlich stärker zu beachten ist als beim Einsatz von HM- oder HSS-Werkzeugen [6].

Doppelzerspanung beeinträchtigt den Zerspanungsprozess

Bei vorangegangenen Untersuchungen des IfW konnte beim Fräsen von Vollholz auf Kehlmaschinen ein Zusammenhang zwischen den Bearbeitungspara-

Abb. 6: Beschleunigungspegel-Spektrum eines Motor-Spindel-Systems bei Bearbeitung

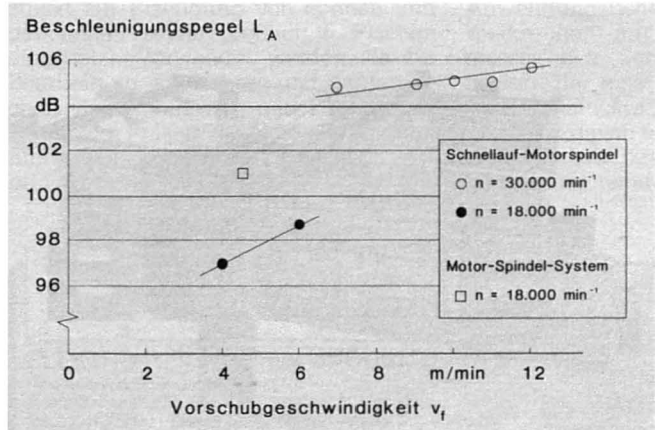
metern Vorschubgeschwindigkeit bzw. Schnittgeschwindigkeit und der Spangrößenverteilung des dabei entstehenden Staub-/Spänegemisches nachgewiesen werden [7]. Erwartungsgemäß konnten diese Aussagen hier bestätigt werden (Abb. 8, 9). Eine Fraktionierung der zerspanten Holzmenge mittels Siebanalyse ergab mit steigender Vorschubgeschwindigkeit bzw. abnehmender Werkzeugdrehzahl, also jeweils zunehmendem Zahnvorschub, einen Anstieg des prozentualen Anteils der gröberen Späneartikel.

Das Problem der umlaufenden Späne, die in dem vom rotierenden Fräser verursachten Strömungsfeld mitgenommen werden, und die daraus resultierende Doppelzerspanung tritt im vorliegenden Fall des Langlochfräsens wegen der ungünstigen Möglichkeit des Spänetransports im tiefen Spänekanal besonders stark auf. Infolge der Drehzahlsteigerung erhöht sich der durch den Schaftfräser erzeugte rotierende Volu-

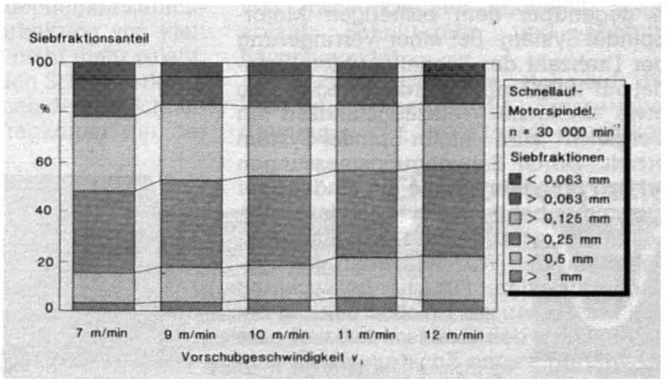
Tafel 1: Meßwerte

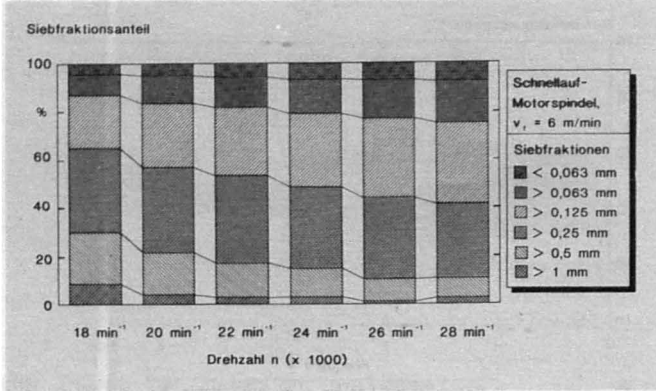
	n [min^{-1}]	v_f [m/min]	L_A [dB]	s_f [m]
Schnellauf-Motorspindel	30.000	10,0	105,0	800
	30.000	7,0	104,7	1.450
	18.000	4,5	97,3	12.000
Motor-Spindel-System	18.000	4,5	101,0	4.000

Abb. 7: Beschleunigungspegel in Abhängigkeit von Antriebssystem, Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit



▼ Abb. 8: Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf die Spangrößenverteilung





▲ Abb. 9: Einfluß der Drehzahl auf die Spangrößenverteilung

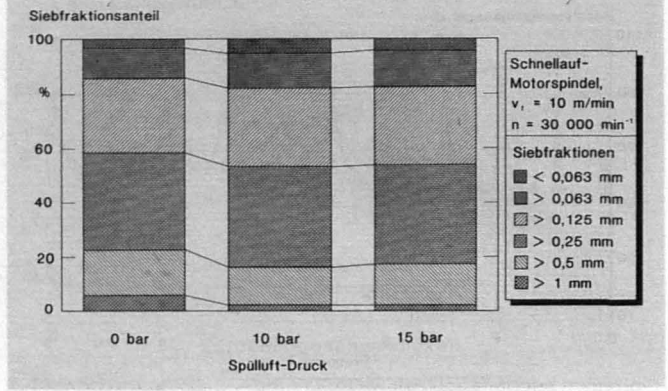


Abb. 10: Einfluß des Spülluft-Druckes auf die Spangrößenverteilung (Bildnachweis: Abb. 1, Leit; übrige IfW)

menstrom und somit auch die Anzahl der umlaufenden Spänepartikel. Diese Doppelzerspanung wirkt sich in mehrfacher Hinsicht negativ auf den Zerspanprozeß aus. Neben einem erhöhten Energiebedarf sind vor allem eine schlechtere Oberflächenqualität sowie ein verstärkter Werkzeugverschleiß zu nennen. Um den Späneabtransport zu verbessern, wurden im Fräser Spülluftbohrungen angebracht, durch welche Druckluft tangential in die Spanräume ausströmen kann. Bezüglich der Spangrößenverteilung (Abb. 10) führten die Spülluftbohrungen bei einem Luftdruck von 10 bar bzw. 15 bar zu keiner Verbesserung, zumindest nicht in der vorliegenden Ausführung. Die Laufruhe sowie der Leistungsbedarf der Schnellauf-Motorspindel wurde durch die Beaufschlagung des Fräasers mit Spülluft nicht beeinträchtigt. Hier sind jedoch noch weitgehende Untersuchungen erforderlich, um eine endgültige Aussage über die Wirksamkeit von Spülluftbohrungen hinsichtlich eines besseren Späneabtransportes treffen zu können.

Zusammenfassung

Um beim Langlochfräsen von hochverdichteten, doppelseitig beschichteten Spanplatten zu kürzeren Fertigungszeiten zu kommen, wurde für Versuchszwecke anstelle des bisherigen Motor-Spindel-Systems mit einer Drehzahl von 18000 min^{-1} eine Schnellauf-Motorspindel mit einer Drehzahl von 30000 min^{-1} und höherer Motorleistung in eine CNC-Oberfräsmaschine eingebaut, um dadurch zu größeren Vorschubgeschwindigkeiten zu gelangen. Die Erhöhung der Werkzeugdrehzahl bewirkte eine deutliche Reduzierung der erreichbaren Standzeiten der PKD-Fräser um über 40 % gegenüber dem bisherigen Motor-Spindel-System. Bei einer Verringerung der Drehzahl der Schnellauf-Motorspindel auf 18000 min^{-1} wurde dagegen eine etwa dreifache Werkzeugstandzeit im Vergleich zum Motor-Spindel-System erzielt. Durch Schwingungsmessungen an den Spindeln konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Beschleunigungspegel und dem Standzeitverhalten der PKD-Schneiden nachgewiesen werden. Für die Entwicklung von Maschinen zur Holzbearbeitung bedeutet dies, daß insbesondere auf eine schwingungsarme Konstruktion zu achten ist. Nur bei einer entsprechenden

Auslegung von Spindel- bzw. Motorwelle, Werkzeugaufnahme, Verstellrichtungen und Maschinengestell sowie einer genauen Analyse deren Schwingungsverhaltens ist es möglich, die Vorteile des PKD-Schneidstoffes voll und wirtschaftlich auszunützen.

Literatur

- [1] N.N.: Gut Holz mit Diamant. In: Diamant-Information M 41, De Beers Industrie-Diamanten GmbH, S. 3.
- [2] Prewinkel, H.: Polykristalline Diamantwerkzeuge in der Holzbearbeitung. In: Diamant-Information M 41, De Beers Industrie-Diamanten GmbH, S. 12-15.
- [3] Lach, H.: PKD, ein wirtschaftlicher Hochleistungsschneidstoff für die Holz- und Kunststoffbearbeitung. In: Diamant-Information M 41, De Beers Industrie-Diamanten GmbH, S. 16-18.
- [4] Ettelt, B.: Sägen, Fräsen, Bohren. Stuttgart: DRW-Verlag 1987.
- [5] Heimbrand, E.: Holzwerkstoffbearbeitung mit PKD-Werkzeugen. In: IDR 3/90, S. 136-139 und HOB 10/90, S. 42-46.
- [6] Mutschler, W.: Konstruktive Voraussetzungen für den Einsatz von PKD in der Holzbearbeitung. In: IDR 3/90, S. 174-180 und HOB 10/90, S. 48-54.
- [7] Heisel, U.; Weiss, E.: Einfluß von Schneidengeometrie und Bearbeitungsparameter auf die Staubentwicklung bei Kehlmaschinen. In:

HOB - Die Holzbearbeitung 36 (1989), Nr. 12, S. 23-29.

- [8] Heisel, U.; Niemeyer, W.-H.: Schnellauf-Motorspindeln für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. In: HOB Spezial 89, S. 34-47.