

Jürgen Deissler, Günter Danz, Bernhard Köhler und Michael Kaufeld

Mit In-Process-Auswuchten die volle Drehzahl nutzen



HOFMANN
Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG

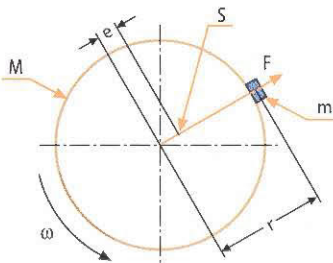


Mit In-Process-Auswuchten die volle Drehzahl nutzen

Unwuchten im rotierenden System aus Spindel und Werkzeug begrenzen die Leistungsentfaltung in der Zerspanung. Je enger die Maß- und Oberflächentoleranzen sind, desto deutlicher wird die Drehzahl reduziert. Abhilfe schafft das In-Process-Auswuchten. Es ermöglicht selbst bei lang auskragenden Werkzeugen höhere Drehzahlen – ein Rationalisierungsfaktor bei der Hauptzeit in der Größenordnung 2 ist realistisch. Zudem nimmt die dynamische Belastung des Spindelsystems ab, und es kommt seltener zu unerwünschten Resonanzüberhöhungen. Da sich die Werkzeugschneide definierter bewegt, steigt die Maßhaltigkeit spürbar.

JÜRGEN DEISSLER, GÜNTER DANZ,
BERNHARD KÖHLER UND MICHAEL KAUFELD

■ Die High-Speed-Cutting-Bearbeitung (HSC) ist eine relativ neue Technologie mit viel versprechenden Leistungsmerkmalen und Vorteilen für die Luftfahrt- und Automobilindustrie. Maschinen-



1 Die in der Auswuchttechnik definierten Größen: M = Rotormasse, S = Schwerpunkt, e = Schwerpunktexzentrizität, m = Unwuchtmasse, r = Abstand des Schwerpunkts von m zur Drehachse, Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2 \times \pi \times n / 60$, Unwucht $U = M \times e = m \times r$, Fliehkraft $F = U \times \omega^2$

spindeldrehzahlen von $12\,000\text{ min}^{-1}$ bis zu mehr als $50\,000\text{ min}^{-1}$ ergeben Bearbeitungsgeschwindigkeiten, die eine signifikante Steigerung des Materialabtrags erlauben. Diese Produktivitätszunahme eröffnet neue, Kosten sparende Herstellungsmethoden.

Mit steigenden Spindeldrehzahlen erhöhen sich zwangsläufig in quadratischer Abhängigkeit die Fliehkräfte, die durch Massenunsymmetrien (Unwuchten) generiert werden. Diese Kräfte führen zu

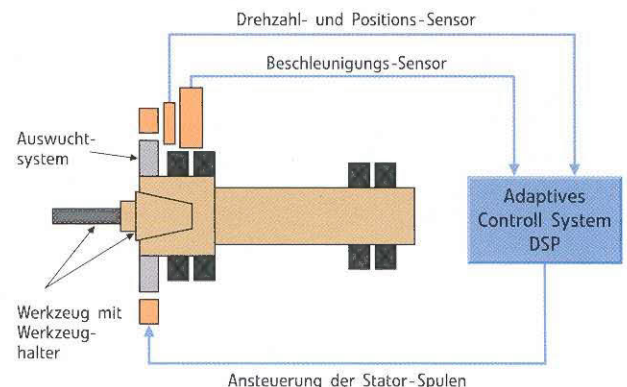
einer schlechteren Werkstückoberfläche und, wenn die Fliehkräfte zulässige Grenzwerte überschreiten, zur Beschädigung der Spindel.

Die rotierende Unwucht (Bild 1) ist daher ein bestimmender Faktor in der Frage, wie schnell eine Spindel im jeweiligen Bearbeitungsfall drehen darf. Unwucht am rotierenden System (Spindel, Werkzeug) verursachen:

- Auswuchtgrenze und Restunwucht ausgewuchteter Werkzeuge,
- ungewuchtete Werkzeuge,
- Unsymmetrien von Massen bei verstellbaren Werkzeugen,
- radiale Spann-Üngenauigkeiten in der Spindel-Werkzeug-Trennebene,
- Verschleiß und Rundlauffehler der Spindel,
- Verlagerungen des Spannsystems (Zugstange, Tellerfederpaket),
- Partikelablagerungen auf dem Werkzeug und in der Spindelaufnahme,
- Kühlmiteleinfluss.

Diese Faktoren machen sich bei den in der Serienfertigung genutzten Drehzahlen deutlich bemerkbar. Heute ermöglichen

fast alle Bearbeitungszentren Drehzahlen zwischen $15\,000$ und $24\,000\text{ min}^{-1}$. Um jedoch die engen Bauteiltoleranzen einhalten zu können, wird gerade bei der Feinbearbeitung mit reduzierten Drehzahlen gearbeitet. Das Leistungspotenzial



2 Funktionsschema des adaptiven Auswuchtsystems

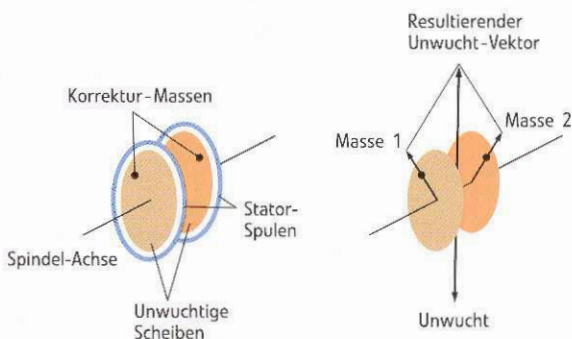
der Maschinen wird nicht ausgenutzt. Besonders deutlich wird dies bei lang auskragenden Werkzeugen, die zum Beispiel beim Ausspindeln von Lagergassen, bei der Bearbeitung von Ventilsitzen oder beim Eintauchen in tiefe Gravuren verwendet werden. Solche Werkzeuge erreichen schnell Auskraglängen von mehr als 300 mm und ein Gewicht von 5 kg .

Um die Unwuchtproblematik derartiger Bearbeitungssituationen in den Griff zu bekommen, ist zur Kompensation des dynamischen Rundlauffehlers (Taubeln) ein Auswuchten in zwei Ebenen er- ►►

►►► forderlich. Die hier beschriebenen Versuchsergebnisse verdeutlichen den Einfluss einer solchen Zwei-Ebenen-Auswuchtung beim Arbeiten mit lang auskragenden Werkzeugen. Dabei befindet sich eine Auswuchtebene am Ende der Hauptspindel, die zweite Auswuchtebene ist auf dem Werkzeug selbst angeordnet. Ziel ist es, die Drehzahlreserven von Bearbeitungszentren beim Einsatz solcher Werkzeuge unter Berücksichtigung der erreichbaren Werkstückqualität trotz zusätzlichem Zeitaufwand für das Wuchten zu mobilisieren.

Die zulässige Restunwucht wird mit dem Werkzeuggewicht größer

Die Restunwucht eines Werkzeugs, die erreicht werden kann, ist durch die Messgrenzen und Messfähigkeit von Auswuchtmaschinen limitiert. Die im Richtlinien-Entwurf [1] erarbeiteten »Auswuchtgrenzen für rotierende Werkzeuge zur spanenden Fertigung mit definierter Schneide« geben den Grenzwert für die maximal erreichbare Auswuchtgüte mit 2 µm Restexzentrizität an.



3 Arbeitsprinzip des Auswuchtsystems

Die erreichbare Restunwucht mit heute auf dem Markt erhältlichen »Tool Balancern« liegt bei etwa 1 bis 2 gmm. Bei den für Werkzeuge üblichen Gütestufen von G 2,5 gemäß DIN ISO 1940-1 ergeben sich bei unterschiedlichen Werkzeuggewichten und Arbeitsdrehzahlbereichen folgende Zahlenwerte für die zulässige Restunwucht: Für eine Gütestufe G 2,5 kommt es bei einer Betriebs-

drehzahl n von 20 000 min^{-1} zu einer Winkelgeschwindigkeit $\omega = n \times 2 \pi / 60 = 2094,3 \text{ s}^{-1}$ ($\omega \approx n/10$). Die Schwerpunktsexzentrizität $e = G / \omega$ errechnet sich zu $e = 2,5 / 2094,3 = 0,0011 \text{ mm}$. Bei einem Werkzeuggewicht von 1,5 kg ergibt sich damit die zulässige Restunwucht $U = 1500 \text{ g} \times 0,0011 \text{ mm} = 1,79 \text{ gmm}$. Die Tabelle zeigt dies für unterschiedliche Werkzeugaufnahmen.

BEISPIELE VON GEFORDERTEN RESTUNWUCHTEN BEI G 2,5

Schnittstelle	Werkzeuggewicht [kg]	zulässige Unwucht [gmm] bei Drehzahl [min^{-1}]				
		15 000	20 000	25 000	35 000	45 000
HSK 63	1,5	2,3	1,79	1,4		
HSK 63	2	3,1	2,3	1,9		
HSK 63	5	7,9	5,9	4,7		
HSK 32	0,5	0,7	0,5	0,47	0,3	0,26
HSK 25	0,2	0,31	0,23	0,19	0,13	0,1

Die zulässige Restunwucht vergrößert sich mit zunehmendem Werkzeuggewicht

Es fällt auf, dass die zulässige Restunwucht bei konstanter Drehzahl mit zunehmenden Werkzeuggewichten immer größer wird. Mit anderen Worten: Je größer die Masse eines Werkzeugs, umso unkritischer die Auswuchtanforderung.

Spann-ungenauigkeiten lassen sich nicht präventiv korrigieren

Die Spann-ungenauigkeiten, die beim Fügen des Werkzeugs in die Spindel entstehen und im Bereich von bis zu 5 µm liegen, erzeugen im Vergleich zu den Werten der Tabelle deutlich größere Unwuchten. Mit verstellbaren Werkzeugen und zunehmender Anzahl der Trennstellen nehmen diese Unwuchten weiter zu. Dazu ein Beispiel für ein Werkzeug mit einem Gewicht von 1 kg bei einem Spannfehler von 5 µm: Es ergibt sich eine Restunwucht $U = 1000 \text{ g} \times 0,005 \text{ mm} = 5 \text{ gmm}$.

Die bisherigen Betrachtungen sind von der Exzentrizität als Systemeigenschaft ausgegangen, das heißt, sie wurde als eine von der Drehzahl unabhängige Größe angesehen. Untersuchungen mit Spannmitteln in schnell laufenden Motorspindeln haben jedoch gezeigt, dass eine deutliche Abhängigkeit des gemessenen Rundlauffehlers von der Drehfrequenz vorliegt. Die Ursache für diesen Zusammenhang liegt in der Fliehkraft, die durch die Ausgangsexzentrizität von Futter, Werkzeug et cetera deren Massenschwerpunkt zur Rotationsachse noch weiter verschiebt. Es kommt dadurch zu

einer dynamischen Erregung des gesamten rotierenden Systems.

Die Konsequenz aus den vorgenannten Sachverhalten ist, dass im Bereich der Präzisionsbearbeitung bei hohen Drehzahlen ein Auswuchtvorgang nach jedem Werkzeugwechsel erforderlich ist. Die durch Spann-ungenauigkeiten, verstellbare Werkzeuge, Zugstangen-Tellerfeder-Verlagerungen und durch Rundlauffeh-

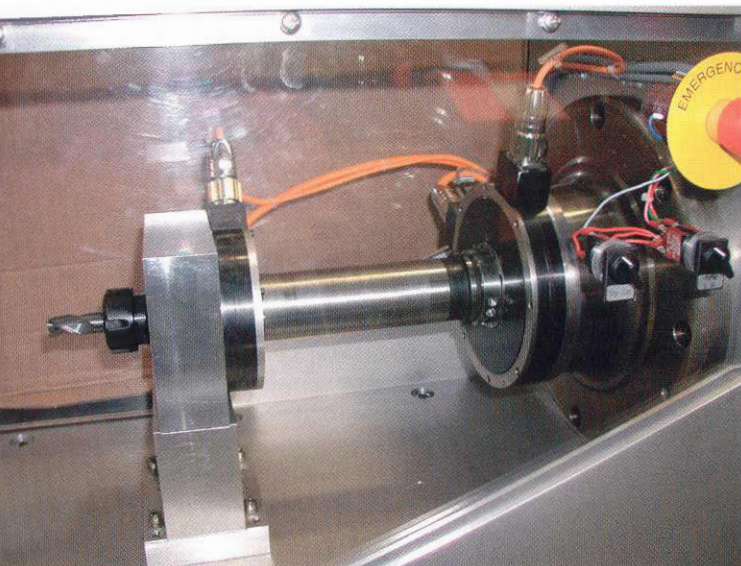
ler der Spindel verursachten Unwuchten sowie das stochastische Auftreten von weiteren Unwuchten (Kühlmitteleinfluss, Temperatur) sind nicht präventiv korrigierbar. Das erfordert ein spindelintegriertes automatisches Auswuchtsystem zur Kompensation dieser Störgrößen.

Ein automatisches Wuchtsystem für den geforderten Anwendungsfall muss eine Reihe von Randbedingungen erfüllen:

- Das System muss die Unwucht nach jedem Werkzeugwechsel automatisch in kürzester Zeit korrigieren.
- Ein »Trial and error«-Prinzip für die Steuerung des Auswuchtprozesses, wie bei heutigen marktgängigen Systemen üblich, ist nicht verwendbar. Es muss daher mit einer Methode der direkten Berechnung der Unwuchtgröße und -position gearbeitet werden, um die Unwucht gezielt zu korrigieren.
- Das System muss im Drehzahlbereich bis 50 000 min^{-1} und darüber zuverlässig einsetzbar sein.
- Der erforderliche Bauraum für das Auswuchtsystem für die Integration in Spindelssysteme muss klein sein.

Das Ringauswuchtsystem korrigiert automatisch in kürzester Zeit

Ein System, das diese Anforderungen erfüllt, wird im Folgenden vorgestellt. Für die Versuche mit lang auskragenden Werkzeugen und hohen Geschwindigkeiten muss das System ein Auswuchten in zwei Ebenen ermöglichen: an der Spindel und an der Werkzeugspitze oder in der vorderen und hinteren Lagerebene der Spindel. ►►►



4 2-Ebenen-Auswuchtsystem, integriert in Werkzeugaufnahme und Motorspindel (links: Ringauswuchtsystem Wuchtebene 1 am Werkzeug, rechts: Wuchtebene 2 an der Spindel); Werkzeug: lange Werkzeugaufnahme HSK 63 mit Spannzangenaufnahme, Vollhartmetallfräser $\varnothing 10$ mm

►► Für die Kompensation der Unwucht an der Hauptspindel (Auswuchtebene 2) wurde in der Nähe der vorderen Lager-ebene ein Hochgeschwindigkeits-Aus-

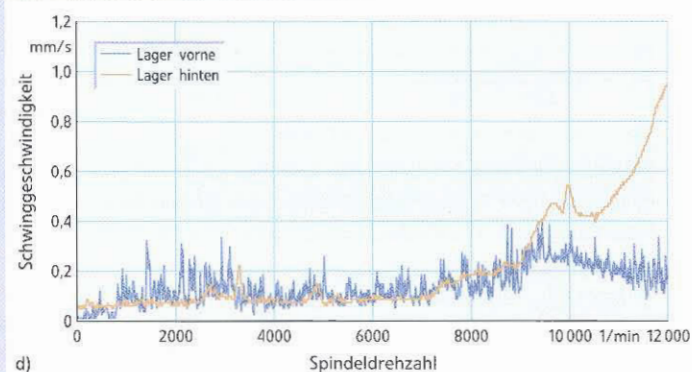
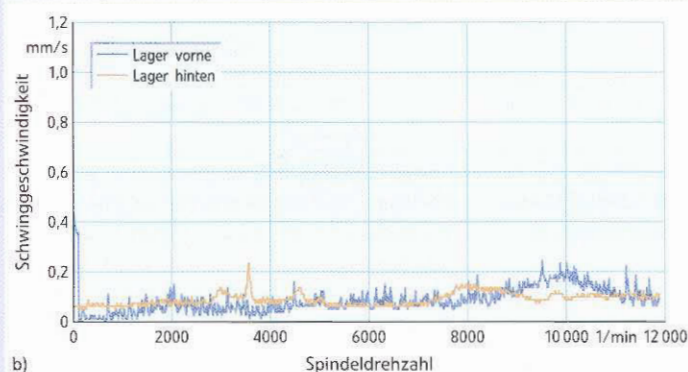
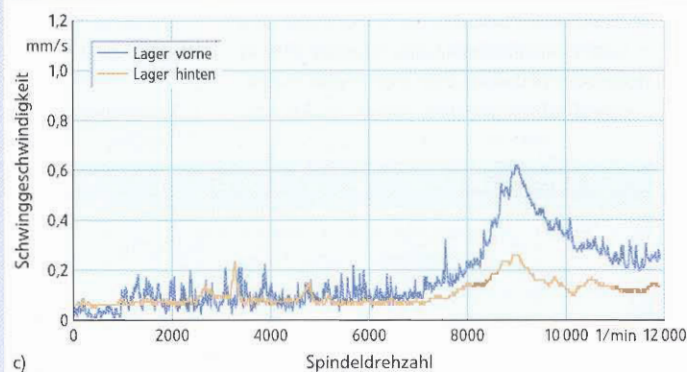
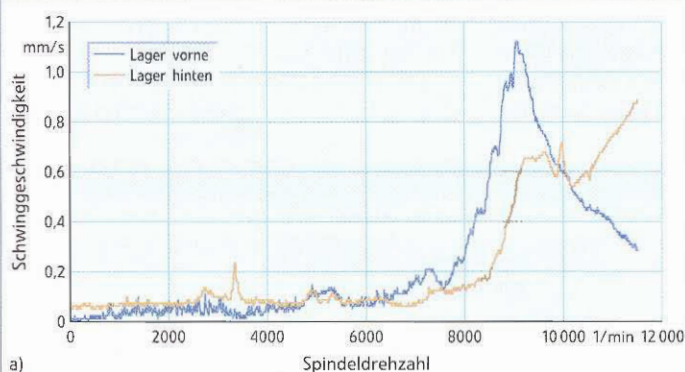
Die Funktionsweise des Ringauswuchtsystems: Zwei ungewichtete Scheiben sind über spezielle Wälzlager frei drehbar auf der Spindelachse montiert (Bild 3). Den

wuchtsystem integriert (120 gmm Auswuchtkapazität). Es setzt sich zusammen aus einem »Ringauswuchtsystem«, das in die vorhandene Spindel integriert ist, einem Beschleunigungssensor, der an dem Spindelgehäuse befestigt ist, sowie Sensoren für die Spindeldrehzahl und die Positionen der ungewichteten Scheiben des Ringauswuchtsystems (Bild 2). Eine schnelle, mit adaptiven Algorithmen arbeitende Elektronik mit digitalem Signalprozessor komplettiert das System.

beiden Scheiben stehen zwei stationäre Wicklungen (Statorspulen) gegenüber. Ein schneller, intelligenter Controller erfasst über Sensoren die Unwuchtwirkung an der Spindel und berechnet und steuert die beiden Scheiben in die optimale Position zur Kompensation der Unwucht. Die beiden Scheiben werden elektromagnetisch durch die Statoren sehr schnell in die berechnete Position verstellt (Spreizwinkelmethode) und minimieren die durch Unwuchten erzeugten Vibrationen innerhalb weniger Sekunden. Mit Hilfe von schnellen, adaptiven Regelalgorithmen lernt das System bei jedem Auswuchtvorgang, optimiert den Auswuchtprozess und passt sich damit automatisch an jede neue Situation optimal an.

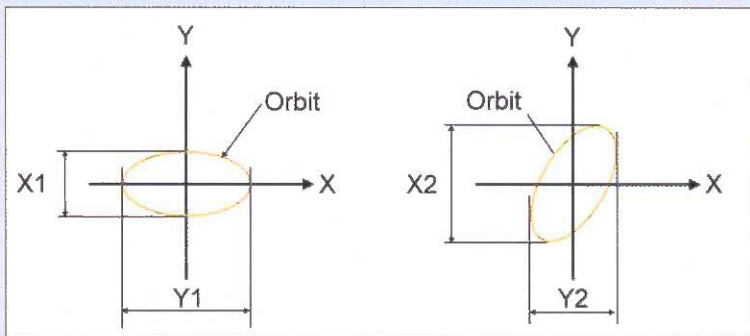
Das zweite System (Auswuchtkapazität 400 gmm, Auswuchtebene 1) wurde für die Versuche auf die jeweilige Werkzeugspitze montiert. Der zu dieser Ebene gehörende Beschleunigungsaufnehmer befindet sich im Bereich der hinteren Lagerebene der Hauptspindel, wo sich die Schwingungen in der Werkzeugebene über die Hebelwirkung in gedämpfter Form widerspiegeln. ►►

DYNAMIK DES SPINDEL-WERKZEUG-SYSTEMS



5 Spindelhochlauf mit Werkzeug im nicht ausgewuchteten Zustand (links oben), ausgewuchtet bei 12 000 min⁻¹ in zwei Ebenen (links unten), ausgewuchtet bei 12 000 min⁻¹ nur in der Werkzeugebene – Auswuchtebene 1 – (rechts oben) und ausgewuchtet bei 12 000 min⁻¹ nur in der Spindelebene – Auswuchtebene 2 – (rechts unten)

WINKELLAG DER ORBITS



6 Lage der Orbits an der Werkzeugspitze zu den Maschinenachsen – beim Fräsen in Y-Richtung erzeugt ein Werkzeugverhalten gemäß dem linken Orbit eine breitere Nut

duzierung der Schwingung auch nur in der vorderen Lagerebene erzielt werden. Die Schwingungen in der hinteren Lagerebene bleiben nahezu unbeeinflusst.

Fazit: Die Schwingungen in den Lagerebenen lassen sich nur durch das Auswuchten in zwei Ebenen insgesamt reduzieren. Die Spindelhochläufe zeigen außerdem, dass ein Auswuchten bei Maximaldrehzahl ausreicht, um eine effiziente Reduzierung der

Die Statorspulen für die Betätigung der unwuchtigen Scheiben in Auswuchtebene 2 sind fest montiert. In Ebene 1 ist dies maschinenbedingt in diesen Versuchen nicht möglich. Daher werden die entsprechenden Statorspulen an einer günstigen Stelle im Maschinenraum angeordnet. Zum 2-Ebenen-Auswuchten vor dem Bearbeitungsprozess muss das an der Werkzeugspitze montierte Ringauswuchtsystem nun in diese Statorspulen eintauchen (Bild 4).

Nur Auswuchten in zwei Ebenen hält die Schwingungen in Schach

Das 5500 g schwere Werkzeug (Bild 4) wurde wahlweise mit unterschiedlichen Schaftfräsern beziehungsweise mit einem Bohrkopf bestückt. Die eigentliche Werkzeugaufnahme von Vorsatzteil und Werk-

ze sowie $0,13 \mu\text{m}$ als untere Grenze (Ende des Auswuchtvorgangs) eingestellt.

Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens des Spindel-Werkzeug-Systems wurden zunächst Spindelhochläufe bei unterschiedlichen Unwuchtzuständen von 0 bis $12\,000 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt. Dabei wurde die Schwinggeschwindigkeit in der vorderen und hinteren Lagerebene der Hauptspindel gemessen (Bild 5).

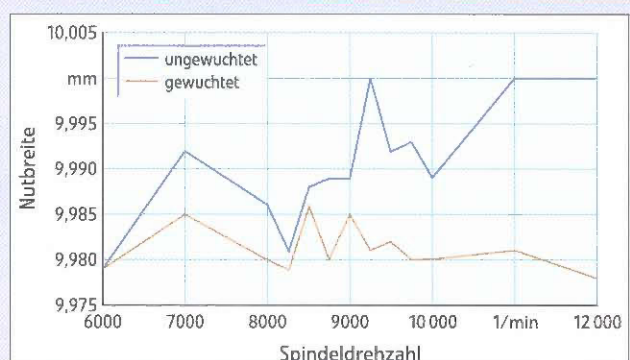
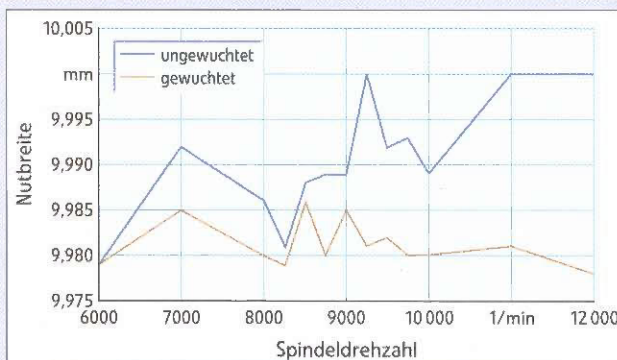
Ein Auswuchten in beiden Ebenen reduziert deutlich die Schwingungen in den Lagerebenen. Dies trifft auch für die Überhöhung in der Resonanz bei circa 9000 min^{-1} zu. Über den gesamten Drehzahlbereich ist die messbare Schwinggeschwindigkeit jetzt kleiner als $0,2 \text{ mm/s}$. Wird hingegen nur in der Werkzeugebene ausgewuchtet, werden zwar die Resonanzamplituden verringert, sie sind aber immer noch deutlich mit einer Schwing-

Schwingungen im gesamten Drehzahlbereich zu erhalten. Auf Grund seiner Schnelligkeit wäre das eingesetzte Auswuchtsystem in der Lage, bereits während des Hochlaufs auszuwuchten.

Weil das dynamische Verhalten der Werkzeugspitze auch einen erheblichen Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit ausübt, wurden zusätzlich deren Ortskurven (Orbits – geometrische Bereiche, in denen sich die Werkzeugspitze zeitvariabel bewegt) bei unterschiedlichen Auswuchtzuständen ermittelt. Es ist dabei von entscheidender Bedeutung, wie die Winkellage der Orbits zu den Maschinenachsen ausgerichtet ist. Je nach Orientierung ergeben sich zum Beispiel beim Nutfräsen unterschiedliche Nutbreiten (Bild 6).

Die größten Taumelbewegungen für den nicht ausgewuchteten Zustand sind

NUTBREITE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SPINDELDREHZAH



7 Deutliche Unterschiede treten zwischen ausgewuchtem und unausgewuchtem Werkzeug zutage (ausgewuchtet in zwei Ebenen bei der jeweiligen Spindeldrehzahl, gefräst mit langem Werkzeug; oben: VHM-Fräser $\varnothing 10 \text{ mm}$, $z = 2$ – unten: VHM-Fräser $\varnothing 10 \text{ mm}$, $z = 4$)

zeug wurde einmalig vorab feingewuchtet. Die Auskraglänge liegt bei 350 mm , die Auswuchtgüte beträgt mit einem $10\text{-mm-Vollhartmetallfräser}$ bei $15\,000 \text{ min}^{-1}$ G 4,5 (Unwucht $15,7 \text{ gmm}$). Als Grenzwerte für das Auswuchten (Aktivierung des Systems) wurden eine Schwerpunktexzentrizität e von $0,8 \mu\text{m}$ als obere Gren-

geschwindigkeit von $0,6 \text{ mm/s}$ feststellbar. Die hintere Lagerebene wurde um den Faktor 4 beruhigt, was auf die Anordnung des Sensors für die werkzeugseitige Auswuchtebene 1 im Bereich der hinteren Lagerebene der Spindel zurückzuführen ist. Bei einem Auswuchten allein in der Spindelebene kann eine Re-

im Bereich der hinteren Lagerstelle der Hauptspindel und an der Werkzeugspitze festzustellen, mit einer Amplitude bis zu $\pm 25 \mu\text{m}$. Wird allerdings in zwei Ebenen ausgewuchtet, reduzieren sich die Bewegungen in der hinteren Lagerebene um den Faktor 12 und an der Werkzeugspitze um den Faktor 1,3. Deutlich wird da-

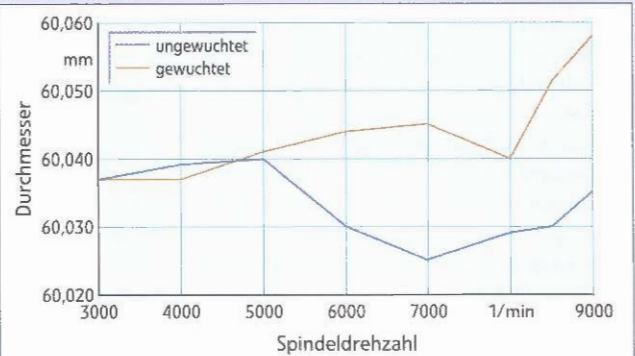
mit auch die Schonung eines Spindelsystems im Bereich der nach hinten auskragenden Spindelkomponenten wie zum Beispiel LÖseeinheit und Drehdurchführung. Wird nur in der Werkzeugebene ausgewuchtet, ist ein positiver Einfluss ausschließlich in der Werkzeugebene und in der hinteren Lagerebene feststellbar. Bei einem Auswuchten in der Spindelsebene lässt sich nur der Orbit in der vorderen Lagerebene signifikant verkleinern.

Um die Wirksamkeit des Ringauswuchtsystems im Zerspanungsprozess zu testen, wurden mit einem Schaftfräser Nuten in eine Aluminiumknetlegierung gefräst und hinsichtlich ihrer Breite vermessen. Dabei wurden die Nuten derart vorgefräst, dass an jeder Nutflanke ein Aufmaß von 0,5 mm vorhanden war. Dies stellte sicher, dass keine Werkzeugdeformationen auf Grund der auftretenden Zerspanungskräfte erfolgen konnten. Bild 7 zeigt die gemessenen Nutbreiten für unterschiedliche Spindeldrehzahlen im nicht ausgewuchten und ausge-

und nahezu kreisförmige Ausdehnung des Orbits anzustreben.

Darüber hinaus wurden Bohrversuche vorgenommen. Die Bearbeitung erfolgte mit einem einschneidigen Ausspindelwerkzeug. Dabei bei der Unwucht des Aufsteckkopfs zu groß war, reichten die 400 gmm Auswuchtkapazität des werkzeugeitigen Auswuchtsystems nicht aus. Ein nachträgliches Auswuchten der Aufnahme selbst sollte nicht erfolgen. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf einen zweischneidigen Aufsatz-Bohrkopf. Die Aufgabe bestand darin, bei konstanten Zerspanungsbedingungen in ei-

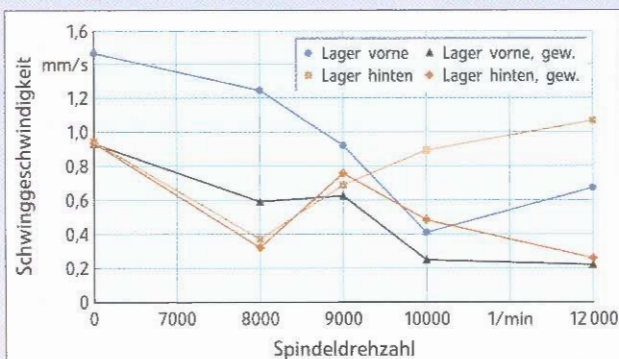
BOHRVERSUCHE MIT ZWESCHNEIDIGEM BOHRKOPF



8 Einfluss des Auswuchtzustands (ausgewuchtet in zwei Ebenen) auf den Durchmesser ausgespindelter Kreistaschen (links) mit einem zweischneidigen Bohrkopf

tung in der vorderen Lagerebene der Hauptspindel statt. Erst oberhalb von 9000 min⁻¹ lässt sich eine signifikante Reduzierung in der hinteren Lagerebene feststellen.

LAGERSCHWINGWERTE



9 Schwinggeschwindigkeiten in den Lagerebenen während des Nutfräsens mit langer Aufnahme, ausgewuchtet in zwei Ebenen bei jeweiliger Spindeldrehzahl, VHM-Fräser ø 16 mm, z = 3

wuchten Zustand (ausgewuchtet wurde jeweils in der Bearbeitungsdrehzahl, konstanter Zahnvorschub von 0,125 mm).

Dank Auswuchten verbessert sich die Werkstückqualität

Deutlich wird der Unterschied zwischen nicht ausgewuchtem und ausgewuchtem Werkzeug. Ab der Resonanzstelle des Systems bei etwa 9300 min⁻¹ wird die Nut im nicht ausgewuchten Zustand wesentlich breiter. Es ergibt sich eine Differenz in den Nutbreiten bei maximaler Drehzahl von 22 bis 43 µm. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass sich bei unterschiedlichen Drehzahlen die Winkellage der Orbits an der Werkzeugspitze verändern kann, was gemäß Bild 6 einen zusätzlichen Einfluss auf die Nutbreiten hat. Somit ist generell eine möglichst kleine

ne Aluminiumknetlegierung vorgefräste Bohrungen mit einem Durchmesser von 59 mm auf 60 mm bei unterschiedlichen Drehzahlen (die wiederum auch der jeweiligen Auswuchtdrehzahl entsprachen) aufzubohren. Die Darstellung in Bild 8 zeigt deutlich, dass ab einer Drehzahl von 5000 min⁻¹ ein signifikanter Unterschied zwischen ungewuchtem und gewuchtem System besteht.

Vergleicht man im Fräsprozess die Schwinggeschwindigkeiten in den Lagerebenen im ausgewuchten mit denen im nicht ausgewuchten Zustand, so lässt sich feststellen, dass es im ausgewuchten Zustand zu einer geringeren Belastung kommt (Bild 9), was eine verbesserte Lagerlebensdauer erwarten lässt. Bis zur Resonanzstelle, die bei einer Drehzahl von etwa 9000 min⁻¹ liegt, findet eine deutliche Reduzierung der Schwingbelas-

LITERATUR

- 1 Deißler, Jürgen: Inprocess-Wuchten lang auskragender Werkzeuge in der HSC-Zerspanung, Diplomarbeit an der FH Ulm, Juli 2003
- 2 Dyer, Stephen W.: In-Process active balancing SAE Paper 1997
- 3 Rondé, Uwe: Untersuchungen von Systemen zum Spannen von Zylinderschaftwerkzeugen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Eignung für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Darmstädter Forschungsberichte, Dissertation, Hanser-Verlag, München, Wien 1994
- 4 Schulz, Herbert: Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nicht metallischer Werkstoffe, Darmstädter Forschungsberichte, Hanser-Verlag, München, Wien 1989
- 5 Zelinski, Peter: High Speed Machining, Modern Machine Shop, August 1997

Dipl.-Ing (FH) Jürgen Deißler beendete im Juli 2003 sein Studium der Mechatronik an der University of Applied Sciences in Ulm mit einer Diplomarbeit zum Thema des In-Process-Auswuchtens

Dipl.-Ing. Günter Danz ist Vertriebsleiter Geräte bei Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG in Pfungstadt
Danz@auswuchttechnik.de

Dipl.-Ing. Bernhard Köhler ist Geschäftsführer der Weiss Spindeltechnologie GmbH in Schweinfurt

Prof. Dr.-Ing. Michael Kaufeld ist Professor an der University of Applied Sciences in Ulm und im Fachbereich Mechatronik verantwortlich für das Fachgebiet Fertigungstechnik;
Dr.Michael.Kaufeld@t-online.de