

**A. Schubert, J. Schneider, S. Groß, S. Pinternagel, U. Eckert**

### **Höhere Prozesssicherheit beim Mikrofräsen von gehärtetem Stahl**

**Für die Bearbeitung von gehärtetem Stahl wurden Werkzeuge aus VHM und CBN untersucht. Für beide Schneidstoffe stellte sich heraus, dass sich sowohl die Standzeit als auch die erzeugten Oberflächengüten durch den Einsatz von Minimalmengenschmierung im Vergleich zur Trockenbearbeitung beträchtlich steigern lassen.**

Werkzeuge und Formeinsätze für die Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen werden aus unterschiedlichen Werkstoffen gefertigt. Dabei nehmen Stahlwerkstoffe, oftmals auch wärmebehandelt, eine dominierende Rolle ein. Bei der Fertigung von komplexen Werkzeugkonturen mit Maßen und Toleranzen bis in den Mikrometerbereich kommen bevorzugt spanende Fertigungstechniken zum Einsatz.

### **Mikrozerspanung hat noch Defizite bei Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit**

Die Verfahren der Mikrozerspanung weisen jedoch hinsichtlich ihrer industriellen Nutzbarkeit noch Entwicklungspotenzial auf. Gerade bei der Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit gibt es Defizite, die vor allem auf das Fehlen geeigneter Parameter (zum Beispiel Schnittwerte), aber auch die noch unzureichende Definition optimaler Bearbeitungsstrategien zurückzuführen sind [1]. Bei der Prozessgestaltung sind dabei insbesondere die geforderte Komplexität und Qualität der Strukturen und Oberflächen, die zu bearbeitenden Werkstoffe und deren Wärmebehandlungszustand zu berücksichtigen. Ungehärtete und gehärtete Stahlwerkstoffe werden gegenwärtig vor allem mit Hartmetallwerkzeugen bearbeitet. Dabei spricht man ab einer Werkstoffhärte von etwa 48 HRC von Hartbearbeitung. Beim Mikrofräsen mit Hochgeschwindigkeitsspindeln bei Drehzahlen bis 160.000 min<sup>-1</sup> werden Fräswerkzeuge mit einem minimalen Durchmesser von 50 µm eingesetzt. Die Aspektverhältnisse dieser Werkzeuge liegen dabei zwischen 1 und 5. Die große Empfindlichkeit der filigranen Werkzeuge kann jedoch bei geringsten Prozessstörungen zum Werkzeugbruch führen. Außerdem unterliegen diese Werkzeuge hohem Verschleiß, insbesondere bei der Bearbeitung gehärteter Werkstoffe [2].

### **Mikrofräsen mit Durchmessern kleiner 300 µm unter Laborbedingungen**

Daher wird das Mikrofräsen mit Werkzeugdurchmessern kleiner als 300 µm überwiegend in Forschungseinrichtungen angewendet. Unter Laborbedingungen können mit diesen Werkzeugen ebene Formeinsätze aus Stahl mit Rauheiten bis Ra = 0,05 µm und Strukturgrößen größer als 20 µm (Stege) mit einer Fertigungstoleranz bis 2 µm hergestellt werden [3]. Das Aufmacherbild zeigt ein Beispiel für ein spanend mikrostrukturiertes Formwerkzeug, dessen kleinstes Strukturdetail ein halbkreisförmiger Kanal mit Radius 25 µm ist. In verschiedenen Studien und in eigenen Arbeiten wird die industrielle Nachfrage von verschleiß- und wärmefesten Formen und deren prozesssichere Strukturierung unterstrichen. Der Handlungsbedarf zur Entwicklung der spanenden Mikrobearbeitung in hochfesten Werkstoffen wird dabei hervorgehoben. Werkzeugverschleiß, Oberflächenqualitäten, Prozessführung und Fertigungsgenauigkeiten sind die zu lösenden Problemfelder [1].

### **Forschungsbedarf bei Mikrofräsen von gehärteten Werkstoffen**

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Trennmechanismen stark materialabhängig und für eine Vielzahl von Hochleistungswerkstoffen unerforscht sind. Insbesondere über die Mikrofräsbearbeitung von gehärteten Werkstoffen sowie die konturnahe Bearbeitung von Freiformoberflächen liegen derzeit keine ausreichenden Erkenntnisse vor [2]. Gemeinsam mit Formen- und Werkzeugbauern wurde deshalb ein Anforderungsprofil für die Mikrostrukturierung gehärteter Formeinsätze zur Anwendung speziell im Kunststoff- und Keramik-Mikrospritzguss erarbeitet. Danach besteht insbesondere die Aufgabe der Erzeugung von 2½D- und 3D-Kavitäten im Toleranzbereich von ±0,01 mm bei Oberflächenrauheiten von Rz = 1 µm.

### **Gratfreiheit und minimale Verrundungen beim Mikrofräsen wichtig**

Typische Strukturelemente sind in der Regel vertiefte Strukturen wie Taschen, Kanäle und Bohrungen mit Strukturgrößen > 50 µm bei maximalen Aspektverhältnissen bis fünf. Besonderes Augenmerk ist dabei auf Gratfreiheit und minimale Verrundungen der Strukturkanten zu legen. Als Werkstoffe für diese Formeinsätze kommen Werkzeugstähle wie X45NiCrMo4, X153CrMoV12 und X37CrMoV5-1 mit Härten bis 62 HRC zum Einsatz. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden Lösungsstrategien zur spanenden Mikrostrukturierung gehärteter Werkstoffe erarbeitet. Dabei sind Untersuchungen zu alternativen Schneidwerkstoffen, Kühlschmierstrategien sowie zur Schnittwertoptimierung bei der Bearbeitung ausgewählter Werkstoffe durchgeführt worden. Als Werkzeuge kamen beschichtete Vollhartmetall-(VHM-) und CBN-Werkzeuge mit einem Durchmesser von 0,5 mm zum Einsatz (Bild 1 und 2). Mit verschiedenen Werkstoffen wurden Zerspanbarkeitsuntersuchungen durchgeführt, die unter Beweis stellten, dass die Mikrozerspanung ein großes Potenzial für die prozesssichere und reproduzierbare Mikrohartbearbeitung besitzt.

### **Schneidstoffe zum Mikrofräsen trocken und mit Aerosol verglichen**

Im Zusammenhang mit der Schneidstoffwahl wurden Untersuchungen für eine sinnvolle Kühlschmierstrategie beim Mikrohartfräsen an einer einfachen Testgeometrie durchgeführt. Die Bearbeitung mit beiden Schneidstoffen erfolgte jeweils trocken und mit Aerosol unter Nutzung eines Minimalmengen-Schmiersystems. Die Werkzeugstandzeit konnte durch den Einsatz des Aerosols bei beiden Schneidstoffen verbessert werden. Insgesamt war jedoch der Verschleiß der CBN-Fräser deutlich geringer. Mit Hartmetallwerkzeugen konnten in Vorschubrichtung bessere Rauheiten erzielt werden als mit CBN. Die Gründe dafür liegen insbesondere in der unterschiedlichen Schneidengestaltung. Quer zur Vorschubrichtung sind die erzielten Oberflächenqualitäten für CBN und VHM mit Ölnebel nahezu identisch und signifikant besser als VHM trocken (Bild 5 und 6). Abgeleitet aus diesen kombinierten Voruntersuchungen zur Kühlschmierstrategie und zur Schneidstoffwahl konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Vollhartmetallwerkzeuge eignen sich bei der Bearbeitung gehärteter Formeinsätze ausschließlich für das Schrumpfen. Nachteilig sind vor allem der hohe Werkzeugverschleiß und die damit einhergehende geringere Abbildungstreue. Jedoch sind diese Werkzeuge aufgrund ihrer hohen Zähigkeit vergleichsweise unempfindlich gegen wechselnde Eingriffsbedingungen, wie sie bei der Schrumpfbearbeitung häufig vorkommen. Ein weiterer Vorteil sind die geringen Werkzeugkosten.

### **CBN-Werkzeuge für das Schlichten von gehärteten Formen**

CBN-Werkzeuge sind insbesondere für die Schlichtbearbeitung gehärteter Formen und Werkzeuge geeignet. Sie zeichnen sich durch geringen Werkzeugverschleiß und hohe Abbildungstreue aus. Voraussetzung für den prozesssicheren Einsatz ist ein für die Schlichtbearbeitung typisches, konstantes Aufmaß, weil diese Werkzeuge zwar wesentlich härter als Hartmetallwerkzeuge sind, dabei jedoch auch spröder und bruchanfalliger bei Wechselbelastung. Als weiterer Nachteil für einen Einsatz auch bei der Vorbearbeitung erweisen sich die hohen Werkzeugkosten, welche ungefähr vier- bis sechsmal höher als bei vergleichbaren VHM-Werkzeugen sind.

### **Mikro-CBN-Fräser mit zwei Varianten an Schnittparametern untersucht**

Für die Untersuchungen zur Schnittwertoptimierung wurden zunächst kommerziell erhältliche Mikro-CBN-Fräser analysiert und Herstellerempfehlungen für Schnittwerte gegenübergestellt. Die Empfehlungen der Schnittparameter für CBN-Werkzeuge bei der Hartbearbeitung über 55 HRC liegen bei den Zahnvorschüben im Bereich von 8 bis 19  $\mu\text{m}$  und bei den Schnittgeschwindigkeiten zwischen 70 und 80 m/min. Darauf aufbauend erfolgten Untersuchungen mit zwei Varianten an Schnittparametern (Tabelle – siehe Bildergalerie). Diese wurden jeweils mit Werkzeugen verschiedener Hersteller getestet.

### **Unterschiedliche Schnittparameter beim Mikrofräsen ergeben unterschiedliches Spänebild**

Die Ergebnisse der Untersuchungen verdeutlichen, dass selbst CBN-Werkzeuge verschiedener Hersteller mit ihrer jeweils spezifischen Schneidengeometrie bei doppelten Zahnvorschüben und mit zehnfach geringerer Eingriffsbreite (Variante 1) qualitative Vorteile in Bezug auf die gemittelte Rauhtiefe im Vergleich zu Variante 2 erzielen. Die gemittelte Rauhtiefe  $R_z$  liegt für Variante 1 bei 0,5  $\mu\text{m}$  und für Variante 2 bei 0,74  $\mu\text{m}$ . Die beiden Schnittparametervariationen ergeben auch ein unterschiedliches Spänebild (Bild 5 und 6). Variante 1 erzeugt durchschnittlich 35  $\mu\text{m}$  große Späne, bei Variante 2 sind die entstehenden Späne mehr als doppelt so groß (79  $\mu\text{m}$ ). Dies ist ein Nachweis dafür, dass auch in der Mikrohartbearbeitung in einem engen Prozessfenster ein korrektes Schneiden des Werkstoffes erreicht wird und ein Quetschen und Verdrängen vermieden werden kann. Weiterhin ist dieses Schneidverhalten optimierbar, da ein Zusammenhang der Prozessparameter mit dem Spänebild (Bröckelspan oder Spiralspan- Bruchstücke) aufgezeigt werden konnte.

### **Unterschiedliche Schnittparameter für Vorschlichten und Finishbearbeitung**

Die Berechnung des Zeitspanvolumens zeigt dann allerdings auch, dass die höhere Qualität mit einer deutlich höheren Bearbeitungszeit einhergeht (0,35  $\text{mm}^3/\text{min}$  bei Variante 1 gegenüber 1,6  $\text{mm}^3/\text{min}$  bei Variante 2). Daraus folgt die Empfehlung, für das Vorschlichten Schnittparameter mit einem hohen Zeitspanvolumen und für die Finishbearbeitung Schnittparameter mit einem niedrigen Zeitspanvolumen zu wählen. Die in den bisher durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Herstellung eines zweiteiligen Spritzgusswerkzeug-Prototypen (Bild 7 bis 9) verwendet. Die Besonderheit dieses Formeinsatzes ist eine Tasche mit komplexer Wellengeometrie als Bundabschluss am oberen Rand. Auch die Dichtflächen beider Formteilhälften besitzen diese Freiformflächen, sodass hohe Formgenauigkeiten einzuhalten sind, um Gratbildung beim Kunststoffspritzen zu vermeiden. Die Abmessungen der Tasche liegen bei etwa 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  2 mm.

### **Formabweichung <10 $\mu\text{m}$ zum Computermodell beim Mikrofräsen erzielt**

An beiden Formteilhälften konnte eine Formabweichung <10  $\mu\text{m}$  zum Computermodell nachgewiesen werden (Bild 10 und 11). Das gesetzte Ziel einer Rauheit von  $R_z = 1 \mu\text{m}$  wurde ebenfalls erreicht. Die dabei gemessenen Rauheitswerte entsprachen mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 1,04 \mu\text{m}$  auf dem Wellenprofil,  $R_z = 0,6 \mu\text{m}$  auf der Flanke und  $R_z = 0,19 \mu\text{m}$  auf dem Taschenboden den Vorgaben oder

übertrafen diese deutlich. Der vorliegende Artikel zeigt die Untersuchungsergebnisse von Werkzeugen aus VHM und CBN zur Bearbeitung von gehärtetem Stahl für Anwendungen im Werkzeug- und Formenbau. Zunächst wurden die Werkzeuge hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens verglichen. Außerdem wurde der Einfluss von Ölnebelschmierung und modifizierten Schnittparametern auf das Bearbeitungsergebnis und den Werkzeugverschleiß für beide Schneidstoffe untersucht.

#### **Minimalmengenschmierung steigert Werkzeugstandzeit und Oberflächengüte**

Dabei konnte festgestellt werden, dass sich für beide Schneidstoffe sowohl die Standzeit als auch die erzeugten Oberflächengüten durch den Einsatz von MMS im Vergleich zur Trockenbearbeitung beträchtlich steigern lassen. Aufgrund des geringeren Verschleißes sind CBN-Werkzeuge hinsichtlich Formgenauigkeit jedoch vorteilhaft gegenüber VHM-Werkzeugen einsetzbar und erzielten bei der Anwendung hoher Zahnvorschübe in Verbindung mit geringen Schnitttiefen auch anforderungskonforme Ergebnisse in Bezug auf die geforderte Oberflächenqualität.

#### **Literatur**

- [1] Schubert, A., Schneider, J. und U. Eckert: Influence of special milling strategies on accuracy and surface quality of microstructured forms and prototypes. In: Proceedings of the 3rd International CIRP High Performance Cutting Conference, Volume I-II, Dublin 2008, S. 131-140.
- [2] Filiz, A., Schubert, A., Schneider, J. und U. Eckert: An investigation of micro-machining parameters for fabrication earimplants from titanium. In: The 5th International Conference on Micro Manufacturing 2010. Conference Proceedings: 5. bis 8. April 2010, Madison, Wisconsin, USA.
- [3] Brecher, C., Schmitt, R., Lange, S., Koerfer, F., Niehaus, F. und R. Widemann: Großflächige Mikrostrukturierung. Werkstatttechnik, Springer VDI Verlag, 5/2006, S. 276-280

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert ist Leiter der Abteilung Präzisions- und Mikrofertigung am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in 09126 Chemnitz und Leiter der Professur Mikrofertigungstechnik an der TU Chemnitz. Dipl.-Ing. Jörg Schneider, Dipl.-Ing. Stefan Groß und Dipl.-Ing. Udo Eckert sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fraunhofer-IWU. Dipl.-Ing. Stefan Pinternagel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Mikrofertigungstechnik der TU Chemnitz