

# Mikrofräsen filigraner Strukturen in Formeinsätzen

Bearbeitungsparameter, Werkzeugverschleiß und Werkzeugabdrängung beeinflussen die Hartbearbeitung von filigranen Strukturen in Formeinsätzen. Untersuchungen zeigen, dass eine Optimierung der Bearbeitungsparameter den Werkzeugverschleiß verringert und die Prozesssicherheit erhöht.

DIRK BIERMANN UND PHILIP KAHNIS

Die Mikrosystemtechnologie gilt als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts und ist inzwischen aus vielen Branchen nicht mehr wegzudenken. Der anhaltende Trend zur Verkleinerung technischer Produkte und Konsumgüter erfordert die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung vorhandener Technologien zur Herstellung mikrotechnischer Bauteile. Zur Fertigung dieser Bauteile in hohen Stückzahlen besitzen vor allem die ur- und umformenden Fertigungsverfahren eine besondere Bedeutung. Zur Herstellung der dafür benötigten mikrostrukturierten Formeinsätze kommen üblicherweise die

Verfahren Mikrosenkerosion, Laserablation und Mikrofräsen zum Einsatz.

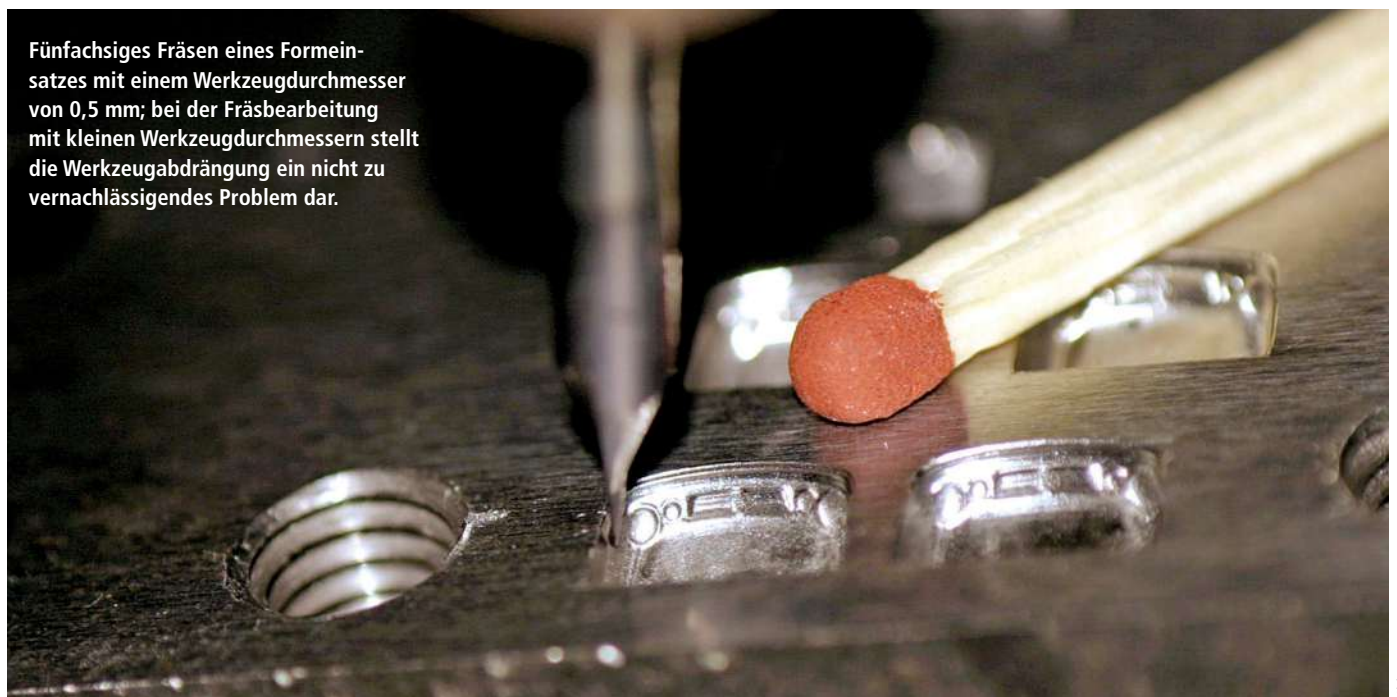
Die Senkerosion zeichnet sich dadurch aus, dass hohe Aspektverhältnisse in elektrisch leitenden Materialien unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs mit hoher Prozesssicherheit hergestellt werden können.

## Senkerosion ermöglicht das Herstellen hoher Aspektverhältnisse

Der Vorteil der Laserbearbeitung liegt vor allem in der Möglichkeit, im Vergleich zum Fräsen und Erodieren geringere Strukturgrößen zu bearbeiten. Das Mikrofräsen zeichnet

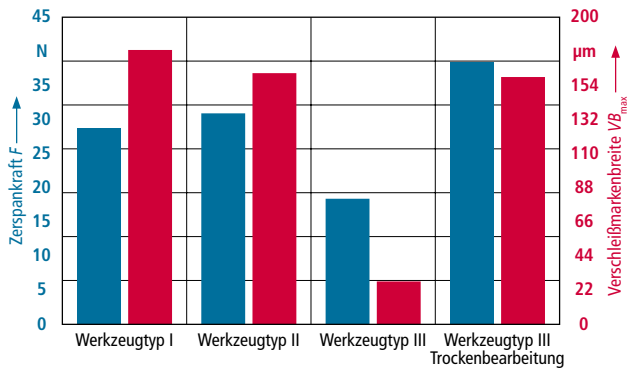
sich gegenüber diesen beiden Verfahren insbesondere durch eine höhere Geometriefreiheit, eine höhere Abtragsrate und bessere Oberflächenqualität aus. Im Vergleich zur Senkerosion ergibt sich darüber hinaus durch die Einsparung der Zeit zur Herstel-

Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann ist Leiter des Instituts für Spanende Fertigung (ISF) der TU Dortmund; Dr.-Ing. Philip Kahnis ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut. Die vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des Teilprojekts B2 des SFB/TR 73 entstanden, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Weitere Informationen: Philip Kahnis, 44227 Dortmund, Tel. (02 31) 7 55-43 90, kahnis@isf.de



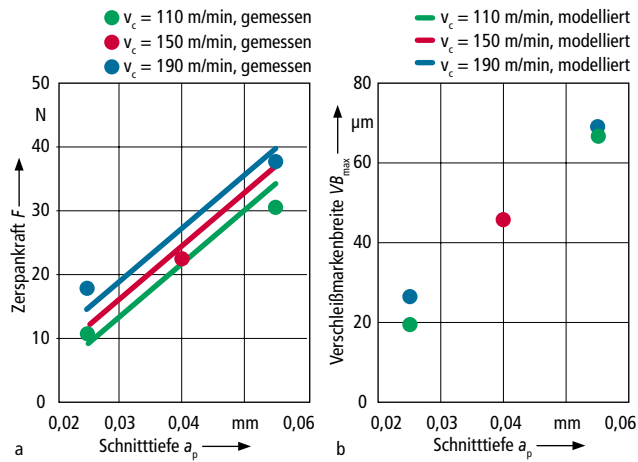
Fünfsichtiges Fräsen eines Formeinsatzes mit einem Werkzeugdurchmesser von 0,5 mm; bei der Fräsbearbeitung mit kleinen Werkzeugdurchmessern stellt die Werkzeugabdrängung ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar.

Bild: ISF



**Bild 1: Einfluss von Werkzeugtyp und Kühlschmierstoff-Konzept auf Zerspankraft und Verschleißmarkenbreite.**

Werkzeug: Schaftfräser,  $d = 1$  mm, Schneidstoff HC, Zähnezahl  $z = 2$ , Werkstoff: HS6-5-2C (63 HRC), Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 150$  m/min, Schnitttiefe  $a_p = 0,04$  mm, Eingriffsbreite  $a_e = 0,4$  mm, Vorschub  $f = 0,04$  mm, Strategie: Gleichlauf, Minimalmengen Kühlschmierung, Fräsweg  $l_f = 1,5$  m



**Bild 2: Zerspankraft (a) und Verschleißmarkenbreite (b) in Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit und -tiefe.**

Werkzeug: Schaftfräser,  $d = 1$  mm, Schneidstoff HC, Werkstoff: HS6-5-2C (63 HRC), Eingriffsbreite  $a_e = 0,4$  mm, Vorschub  $f = 0,04$  mm, Strategie: Gleichlauf, Minimalmengen Kühlschmierung, Fräsweg  $l_f = 1,5$  m

lung der Elektrode eine Verkürzung der Prozesskette. Als nachteilig bei diesem Verfahren wirkt sich im Wesentlichen die geringere Prozesssicherheit bedingt durch Werkzeugverschleiß und die Gefahr des Werkzeugbruchs aus [1 und 2].

**Die Miniaturisierung des konventionellen Fräsens weist nach wie vor offene Probleme auf**

Für das Spritzgießen und vor allem für die Massivumformung ist der Einsatz verschleißbeständiger Formwerkzeuge aus Stahl erforderlich. Dabei kommen gehärtete Warm- oder Kaltarbeitsstähle zum Einsatz. Zur Sicherstellung einer kurzen Prozesskette und zur Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen müssen die Formen in gehärtetem Zustand bearbeitet werden, was insbesondere bei kleinen Werkzeugdurchmessern aufgrund des hohen Werkzeugverschleißes und der Werkzeugabdrängung eine große Herausforderung bedeutet.

Insgesamt stellt das Mikrofräsen ein geeignetes Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile aus Stahl dar. Die Miniaturisierung des konventionellen Fräsprozesses wirft jedoch zahlreiche, nach wie vor offene Probleme auf, die zu berücksichtigen sind.

sichtigen sind. Beispielsweise können der zunehmende Einfluss des Schneidkantenradius bei einer Verringerung von Werkzeugdurchmesser und Spanungsdicke sowie die abnehmende Werkzeugsteifigkeit nicht vernachlässigt werden. Das Ergebnis des Bearbeitungsprozesses wird neben der eingesetzten Maschine, den Werkzeugen und dem Werkstoff vor allem auch durch die Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Zahnvorschub beeinflusst. Dieser Artikel fokussiert sich auf zwei wesentliche Aspekte bei der Herstellung von Formwerkzeugen mit filigranen Strukturen, die Bearbeitungsparameter und die Werkzeugabdrängung.

Zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile ist häufig die Verwendung kleiner Werkzeugdurchmesser ( $d < 1 \text{ mm}$ ) erforderlich. Herstellungsbedingt kann die Schneidkante dieser Werkzeuge nicht beliebig scharf gestaltet werden. Unabhängig vom Werkzeugdurchmesser liegt der Radius der Schneidkante für beschichtete Werkzeuge zwischen 2 und 6  $\mu\text{m}$ . Um eine unzulässig hohe Belastung der Schneide zu verhindern, werden insbesondere für sehr kleine Werkzeugdurchmesser ( $d < 0,5 \text{ mm}$ ) oft so geringe Spanungsdicken verwendet, dass diese nur unwesentlich größer als der Schneidkantenradius sind. Bei einem großen Verhältnis von Schneidkantenradius  $r_p$  zur Spanungsdicke  $h$  besteht die Gefahr des Auftretens von Ploughing-Effekten, das heißt Teile des Materials werden unter plastischer Verformung zwischen Schneide und Material hindurchgequetscht. Darüber hinaus kann es insbesondere bei der Bearbeitung von gehärtetem

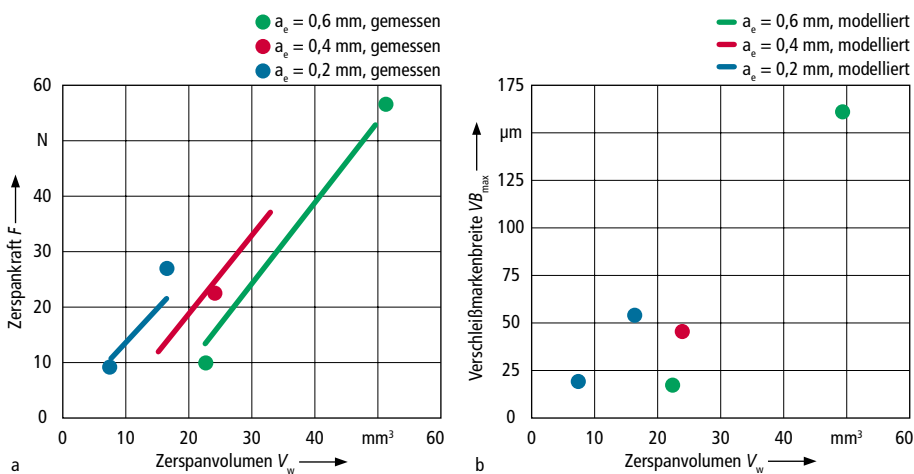
Material zu erheblichen verschleißbedingten Veränderungen an der Schneidkante kommen, die ebenfalls das Entstehen von Ploughing-Effekten begünstigen und die Bearbeitungsqualität verringern [3].

### Werkzeugwechsel während der Bearbeitung vermeiden

Im Rahmen eines Forschungsprojektes sollen Formwerkzeuge mit filigranen Strukturen für ein neu zu entwickelndes Umformverfahren gefertigt werden. Es ist erforderlich, die Formwerkzeuge aus einem Schnellarbeitsstahl und einem Kaltarbeitsstahl mit hoher Härte ( $> 60 \text{ HRC}$ ) herzustellen. Um eine möglichst hohe Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte zu erreichen, müssen Werkzeugwechsel während eines Bearbeitungsschrittes vermieden werden, da diese sichtbare Spuren auf der Oberfläche des Bauteils hinterlassen und die Genauigkeit verringern. Daraus leitet sich die Forderung nach einer entsprechend hohen Werkzeugstandzeit ab. In den im Folgenden vorgestellten ersten Untersuchungen wurde die Bearbeitung des Schnellarbeitsstahls HS6-5-2C (63 HRC) analysiert. Es wurden ebene Bahnen mit einem Werkzeugdurchmesser  $d = 1 \text{ mm}$  gefräst. Dabei wurden zunächst verschiedene Werkzeugtypen sowie die Kühlschmierstoffkonzepte Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung miteinander verglichen. Für einen Werkzeugtyp wurden darüber hinaus die Einflüsse verschiedener Bearbeitungsparameter auf den Werkzeugverschleiß, die Zerspankraft und die resultierende Oberflächengüte untersucht.

In Bild 1 sind die durchschnittliche maximale Zerspankraft und die maximale Verschleißmarkenbreite an der Nebenschneide nach einem Fräsweg von 1,5 m für die eingesetzten Werkzeuge dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein Standardwerkzeug (Typ I) sowie zwei Werkzeuge, die von den Herstellern speziell für die Bearbeitung gehärteter Materialien vorgesehen sind (Typ II und III). Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Zerspankräfte als auch der Verschleiß beim Werkzeugtyp III am geringsten sind und somit dieses Werkzeug bei den verwendeten Bearbeitungsparametern am besten für die Zerspannung des Schnellarbeitsstahls geeignet ist. Erwartungsgemäß ergibt sich bei der Verwendung einer Minimalmengenschmierung (MMKS) ein deutlich besseres Ergebnis hinsichtlich der Zerspankraft und des Werkzeugverschleißes als bei einer Trockenbearbeitung. Für die Untersuchung unterschiedlicher Bearbeitungsparameter wurde aufgrund dieser Ergebnisse der Werkzeugtyp I unter Verwendung einer MMKS ausgewählt. Der Zahnvorschub  $f_z$  und die Schnitttiefe  $a_p$  wurden zwischen 0,04 und 0,055 mm, die Eingriffsbreite  $a_e$  zwischen 0,2 und 0,4 mm und die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  zwischen 110 und 190 m/min variiert. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche wurde mittels statistischer Versuchsplanung mit anschließender Modellbildung reduziert.

In Bild 2 sind beispielhaft die Zerspankraft und der Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit von Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit dargestellt. Eine größere Schnitttiefe führt aufgrund des höheren Spanungsquerschnitts erwartungsgemäß auch zu einer höheren Zerspankraft und ebenfalls zu einer höheren Verschleißmarkenbreite. Die Schnittgeschwindigkeit übt nur einen geringen Einfluss auf die Zerspankraft und den Werkzeugverschleiß aus. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit führt zu geringfügig größeren Kräften und höherem Verschleiß. Grundsätzlich ist das Ziel der Untersuchungen die Ermittlung von Schnittparameterkombinationen, mit denen ein hohes Zerspanvolumen bei möglichst geringem Verschleiß erreicht werden kann. Das Zerspanvolumen berechnet sich aus dem Produkt der Schnitttiefe, der seitlichen Eingriffsbreite und des Fräswegs. In Bild 3 ist deshalb der Einfluss des Zerspanvolumens auf die Zerspankraft und den Werkzeugverschleiß bei unterschiedlichen seitlichen Eingriffsbreiten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei größerer seitlicher Eingriffsbreite ein höheres Zerspanvolumen bei etwa gleichen



**Bild 3: Zerspankraft und Verschleißmarkenbreite in Abhängigkeit vom Zerspanvolumen und der seitlichen Eingriffsbreite.**

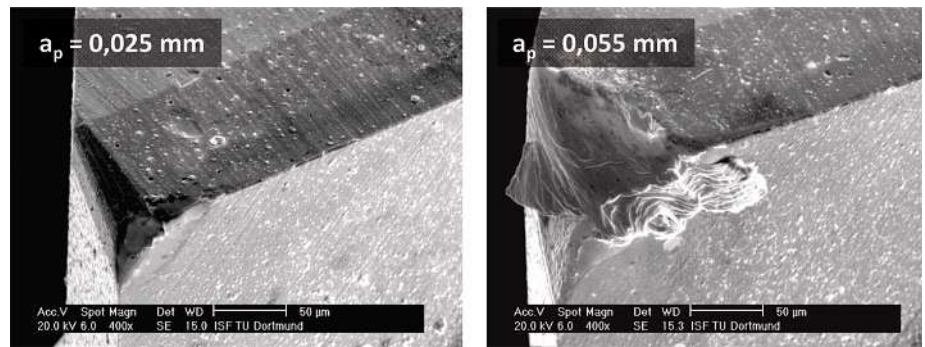
Werkzeug: Schaftfräser,  $d = 1 \text{ mm}$ , Schneidstoff HC, Werkstoff: HS6-5-2C (63 HRC), Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 150 \text{ m/min}$ , Vorschub  $f = 0,025 \text{ mm}$ , Strategie: Gleichlauf, Minimalmengenschmierung, Fräsweg  $l_f = 1,5 \text{ m}$

Zerspankräften erreichen lässt. Insofern ist es in diesem Fall sinnvoll, ein höheres Zerspanvolumen durch eine Erhöhung der seitlichen Eingriffsbreite und nicht über eine Erhöhung der Schnitttiefe zu erreichen.

In Bild 4 sind exemplarisch zwei Werkzeugschneiden nach einem Fräsweg von 1,5 m dargestellt. Bezüglich des Werkzeugverschleißes zeigt sich, dass insbesondere mit der Prozessparameterkombination  $v_c = 150$  m/min,  $f_z = 0,04$  mm,  $a_p = 0,025$  mm und  $a_e = 0,6$  mm ein sehr gutes Verschleißverhalten erreicht werden kann, wogegen die gleichen Schnittparameter bei einer Erhöhung der Schnitttiefe auf  $a_p = 0,055$  mm zu einem erheblich höheren Werkzeugverschleiß führt.

Bei der Fräsbearbeitung mit kleinen Werkzeugdurchmessern stellt die Werkzeugabdrängung ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar, das sich bei der Bearbeitung von harten Werkstoffen, wie sie für den Formenbau eingesetzt werden, aufgrund der höheren Zerspankräfte noch verschärft. Die hohen Genauigkeiten der Mikrofräsbearbeitung erfordern eine Vermeidung beziehungsweise Verringerung der durch Werkzeugabdrängung hervorgerufenen Maßabweichungen.

Grundsätzlich kann die Werkzeugabdrängung nicht nur als statischer Prozess betrachtet werden. Durch die Kräfte, die im unterbrochenen Schnitt auf die verschiedenen Schneiden wirken, bewegt sich die Werkzeugschneide während des Fräsprozesses dynamisch in der Bearbeitungsebene. Diese Bewegung erfolgt im Allgemeinen um einen



**Bild 4: Verschleiß bei unterschiedlichen Bearbeitungsparametern.**

a Schnitttiefe  $a_p = 0,025$  mm, b  $a_p = 0,055$  mm, Werkzeug: Schafffräser,  $d = 1$  mm, Schneidstoff HC, Werkstoff: HS6-5-2C (63 HRC), Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 150$  m/min, Eingriffsbreite  $a_e = 0,6$  mm, Vorschub  $f = 0,04$  mm, Strategie: Gleichlauf, Minimalmengenkühlschmierung, Fräsweg  $l_f = 1,5$  m

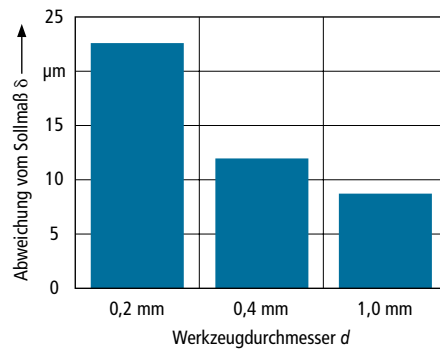
statischen Auslenkungsanteil. Zur Vereinfachung wurde in den dargestellten Untersuchungen dieser statische Anteil verwendet, um die Werkzeugabdrängung zu charakterisieren [3].

#### Werkzeugabdrängung beim Fräsen wurde untersucht

Die Untersuchung der Werkzeugabdrängung wurde an einfach zu vermessenden Geometrien durchgeführt. Dafür wurden Stege mit einer Breite von 1 mm und einer Höhe von 0,5 mm verwendet. Diese können mit hoher Genauigkeit in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) vermessen werden. Dazu werden bestimmte Bereiche aus den Stegen oder Nuten durch Erodieren herausgetrennt. Von diesen Bereichen werden dann Querschliffe angefertigt, die im REM vermessen werden können. Um den Einfluss des Werk-

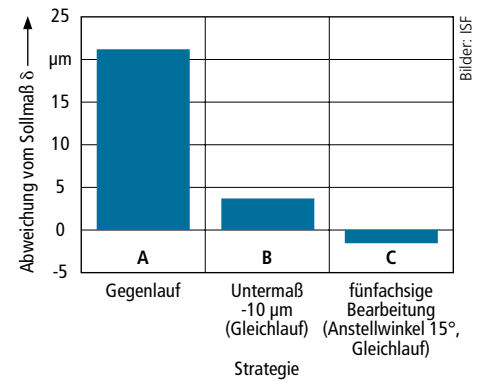
zeugdurchmessers auf die Werkzeugabdrängung zu bestimmen, wurden Versuche mit Werkzeugen der Durchmesser  $d = 0,2, 0,4$  und 1 mm bei gleichbleibenden Schnittparameterwerten durchgeführt. In Bild 5 ist die durch die Werkzeugabdrängung hervorgerufene Abweichung der Stegbreite  $d$  vom gewünschten Maß in Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser dargestellt. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der Werkzeugdurchmesser einen wesentlichen Faktor hinsichtlich der Genauigkeit des Fräsprozesses darstellt.

Um bei vorgegebenem Werkzeugdurchmesser eine Reduzierung der Werkzeugabdrängung zu erreichen, sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Zum einen können durch die Wahl günstiger Schnittparameter niedrige Zerspankräfte und damit eine Verringerung der Werkzeugabdrängung erreicht



**Bild 5: Einfluss des Werkzeugdurchmessers auf die Werkzeugabdrängung.**

Werkzeug: Schafffräser Typ A, Schneidstoff Hartmetall, Werkstoff: 40CrMnMo7, Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 50$  m/min, Zustellung  $a_p = a_e = 0,016$  mm, Vorschub  $f = 0,004$  mm, Strategie: Gleichlauf, Stegabmessungen  $b = 1$  mm,  $h = 0,5$  mm



**Bild 6: Einfluss unterschiedlicher Bearbeitungsstrategien auf die Konturabweichung**

Werkzeugdurchmesser  $d = 0,4$  mm, Schneidstoff Hartmetall, Werkstoff: 40CrMnMo7, Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 50$  m/min, Zustellung  $a_p = a_e = 0,016$  mm, Vorschub  $f = 0,004$  mm

werden. Außer den Schnittparametern, die oft, beispielsweise aus Gründen des Werkzeugverschleißes, nicht beliebig gewählt werden können, kann die Werkzeugabdrängung auch durch die Wahl der Frässtrategie beeinflusst werden.

Eine Möglichkeit, die Auswirkung der Fräserabdrängung zu verringern, ist das Fräsen mit einer zusätzlichen seitlichen Zustellung, das heißt die Stegbreite wird etwas geringer als die eigentliche Sollbreite gefertigt. Dadurch wird zwar nicht die Werkzeugabdrängung verringert, aber durch die zusätzliche Zustellung wird die durch die Abdrängung hervorgerufene Konturabweichung zumindest teilweise kompensiert. Dazu wurde jeweils ein zusätzlicher Schlichtgang mit einer seitlichen Eingriffstiefe von  $5 \mu\text{m}$ , was einem Untermaß von  $10 \mu\text{m}$  entspricht, durchgeführt.

### Anstellung des Werkzeuges reduziert die Belastung

Durch die Anstellung des Werkzeuges wird ein technologisch günstiger Winkel zwischen Werkzeug und Werkstückoberfläche (geringerer Hebelarm) in den zu zerspanenden Bereichen eingestellt und damit die Belastung auf das Werkzeug und somit auch der Betrag der Abdrängung verringert. Darüber hinaus wird durch die fünfsichtige Bearbeitung auch der Einsatz kürzerer Werkzeuge ermöglicht, was ebenfalls eine Verringerung der Fräserabdrängung bewirkt.

In Bild 6 sind drei verschiedene Varianten dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangssituation (Bild 5) zeigt sich, dass sowohl eine Vorverzerrung der Bahnen als auch die Bearbeitung mit angestelltem Werkzeug die Abweichungen von der Sollkontur deutlich

verringern können. Die Bearbeitung im Gegenlauf zeigt jedoch ein deutlich schlechteres Ergebnis als die im Gleichlauf.

Diese Untersuchungen verdeutlichen, dass zu einer erfolgreichen Hartbearbeitung von Formen mit filigranen Strukturen sowohl die Themenfelder der Bearbeitungsparameter und des Werkzeugverschleißes als auch die Werkzeugabdrängung beachtet werden müssen. Erste Ergebnisse zur Optimierung der Bearbeitungsparameter zeigen das Potenzial einer Verringerung des Werkzeugverschleißes und somit einer Verbesserung der Prozesssicherheit. Das Ziel weitergehender Untersuchungen ist es, die Bearbeitungsparameter weiter zu optimieren, um letztendlich das Mikrofräsen dieser hochharten Werkstoffe prozesssicherer zu gestalten und den Werkzeugverschleiß zu minimieren. Dazu sollen auch kleinere Werkzeugdurchmesser bis herab zu  $d = 0,2$  mm untersucht sowie der Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Oberflächenqualität analysiert werden. Darüber hinaus ist der Einsatz der in einfachen Bearbeitungssituationen erfolgreichen Strategien zur Verringerung der Werkzeugabdrängung auch für komplexere Bearbeitungsfälle mit wechselnden Eingriffsbreiten und für Freiformflächen zu untersuchen.



### Literatur:

- [1] Fleischer, J. und andere: Fertigungsverfahren in der Mikrotechnik. wt Werkstattstechnik online 12/2007, S. 847-851.
- [2] Klocke, F. und andere: Von der Makro- zur Mikrowelt. wt Werkstattstechnik online 12/2007, S. 842-846.
- [3] Kahnis, P.: Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich. Dissertation Technische Universität Dortmund 2008.