

# Spanende Bearbeitung Hartpartikelverstärkter Werkstoffe

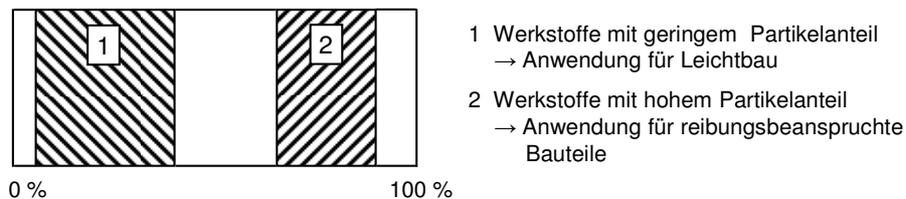
*Schubert, A.; Hochmuth, C.; Nestler, A.; Georgi, R.*

## **Abstract**

Partikelverstärkte Metallmatrix-Verbundwerkstoffe haben gegenüber konventionellen, weitgehend homogenen Materialien den Vorteil, dass sich ihre Eigenschaften durch die Auswahl der Komponenten und ihrer jeweiligen Anteile in einem breiten Bereich gezielt einstellen lassen. Die heterogene Werkstoffstruktur sowie die hohe Härte der Partikel führen jedoch zu einer problembehafteten spanenden Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide, die oftmals mit einem schnellen Werkzeugverschleiß verbunden ist. Auf der Basis von Grundlagenuntersuchungen zum Drehen von partikelverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen werden wesentliche Einflussgrößen auf den Zerspanungsprozess abgeleitet und Wege zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt. Versuche zur Nacharbeit von thermisch gespritzten Hartmetall-Schichten auf Umformwerkzeugen durch Fräsen qualifizieren dieses Verfahren als eine echte Alternative zu teureren sowie energieintensiven Schleif- und Erodierprozessen.

## **1 Einführung**

Partikelverstärkte Werkstoffe gehören zur Gruppe der Komposite und sie bestehen meist aus einer metallischen Matrix, in die kleine Teilchen hoher Härte und Festigkeit eingebettet sind. Alternative Formen der Verstärkungskomponente von Verbundwerkstoffen können Whisker, Kurzfasern sowie Filamente sein. Eine Partikelverstärkung bietet den Vorteil, dass sich durch unterschiedliche Herstellungsverfahren sowohl massive Körper als auch Schichten erzeugen lassen. Die Komposite können, wie in Bild 1 dargestellt, hinsichtlich ihres Partikelanteils in zwei Gruppen unterteilt werden. Für beide Werkstoffgruppen gilt grundsätzlich, dass die stark abrasive Wirkung der Partikel bei der spanenden Bearbeitung superharte Schneidstoffe erfordert, um den Werkzeugverschleiß zu begrenzen.



**Bild 1:** Einteilung der Metallmatrix-Verbundwerkstoffe nach dem Volumenanteil der Partikel

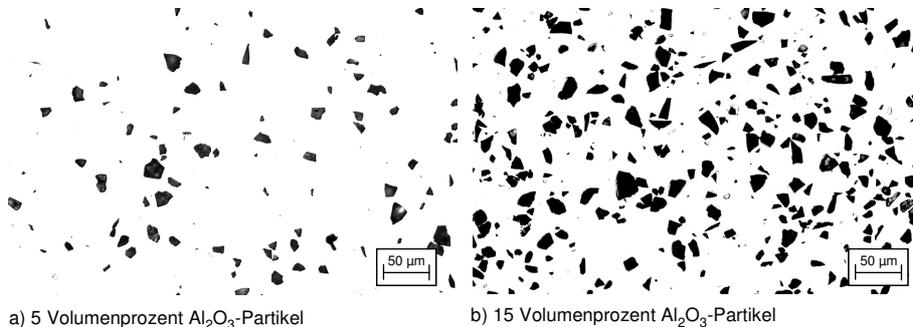
Bei den Materialien mit einem Volumenanteil der Verstärkungskomponente von 5 % bis 40 % handelt es sich meist um Leichtmetallmatrix-Verbundwerkstoffe. Dabei dient die Einlagerung von Partikeln zur Erhöhung der statischen und dynamischen Festigkeit sowie des E-Moduls. Des Weiteren lassen sich die Verschleiß-, Kriech- sowie Temperaturwechselbeständigkeit verbessern und die thermische Ausdehnung reduzieren. Als Matrixwerkstoffe werden überwiegend Aluminium-, vereinzelt aber auch Titan- und Magnesiumlegierungen eingesetzt. Die am häufigsten verwendeten Partikelarten sind  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und SiC mit mittleren Korngrößen im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 50  $\mu\text{m}$ . Leichtmetallmatrix-Verbundwerkstoffe kommen unter anderem in der Automobilindustrie (Antriebswellen, Bremsscheiben), im Schienenfahrzeugbau (Bremsscheiben), in der Luft- und Raumfahrt (Längsversteifungsträger (Stringer)) sowie in der Sportgerätetechnik (Golfschläger, Fahrradrahmen) zum Einsatz.

Die Verbundwerkstoffe mit einem Volumenanteil der Verstärkungskomponente von 63 % bis 90 % werden insbesondere für Anwendungen mit hoher abrasiver Beanspruchung eingesetzt. Die durchgeführten Zerspanungsuntersuchungen beschränken sich auf die Gruppe der Hartmetalle. Diese Verbundwerkstoffe bestehen typischerweise aus Wolframkarbid-Partikeln im Korngrößenbereich von 0,4  $\mu\text{m}$  (Ultrafeinstkorn) bis 20  $\mu\text{m}$  (Grobkorn) und einem Kobalt-, Nickel- oder Molybdänbinder. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass die Anteile der Hartmetalle im Gegensatz zu den Leichtmetallmatrix-Verbundwerkstoffen üblicherweise in Massenprozent angegeben werden. Ein Volumenanteil der Wolframkarbid-Körner von 65 % bis 90 % entspricht einem Massenanteil von etwa 75 % bis 94 %. Durch eine Erhöhung des WC-Anteils lässt sich die Verschleißfestigkeit verbessern, jedoch ist damit auch eine Verringerung der Zähigkeit verbunden. Die Einsatzgebiete der Hartmetalle sind äußerst vielfältig und reichen von allgemeinen reibungsbeanspruchten Konstruktionsbauteilen wie Auflagen, Führungen, Buchsen, Lagerschalen, Gleitringen oder Düsen über Zerspanungs-, Stanz- sowie Umformwerkzeuge bis hin zu Komponenten für den Textilmaschinenbau.

## 2 Drehen partikelverstärkter Aluminiumwerkstoffe

### 2.1 Werkstoffcharakterisierung und Versuchsdurchführung

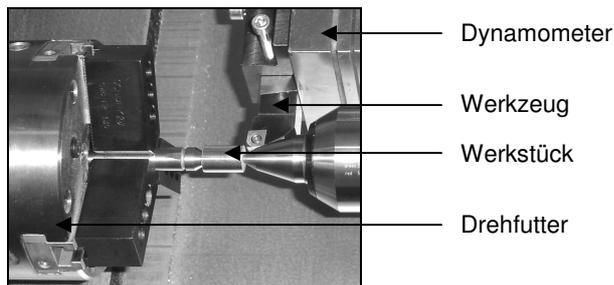
Der untersuchte Verbundwerkstoff besteht aus der Legierung AlCu3,9Mn0,6Mg0,7 und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Partikeln im Korngrößenbereich von 5 µm bis 25 µm mit einem Volumenanteil von 5 % beziehungsweise 15 %. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Mikrostruktur der Komposite und lässt die Größe, den Anteil, die Form sowie die Verteilung der keramischen Partikel erkennen. Die Herstellung der Verbundwerkstoffe erfolgt pulvermetallurgisch durch Mischen der Matrix- und Verstärkungskomponente sowie anschließendem kaltisostatischen Pressen. Die dabei entstehenden Grünlinge werden mittels Strangpressen zu Stangen mit einem Durchmesser von 17 mm umgeformt. Zur Einstellung hoher mechanischer Festigkeiten wird das Material der Wärmebehandlung T4 (Lösungsglühen, Abschrecken und Kaltauslagerung) unterzogen.



**Bild 2:** Mikrostruktur der Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe

Die durchgeführten Untersuchungen verfolgen die Zielstellung, hohe Oberflächenqualitäten bei der spanenden Bearbeitung von Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen zu erzielen. Der heterogene Aufbau dieser Komposite einschließlich der großen Härte der keramischen Partikel führt nicht nur zu einem hohen Werkzeugverschleiß, sondern es entstehen durch das Herausreißen oder Zertrümmern von Partikeln Poren an den Bauteiloberflächen, die unter dynamischer Belastung Ausgangspunkt für die Bildung von Rissen sein können.

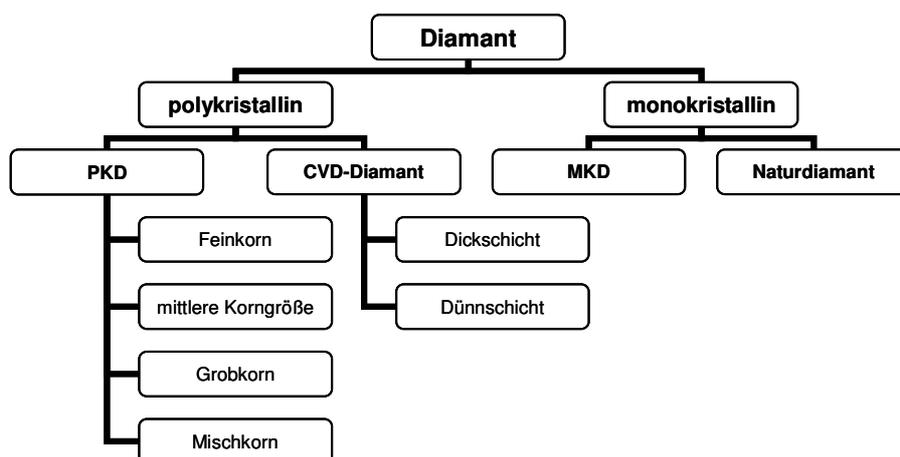
Zur Ermittlung des Einflusses der Bearbeitungsparameter, der Werkzeuggeometrie sowie des Schneidstoffs wurden Versuche zum Längsdrehen durchgeführt. Diese erfolgten auf einer Präzisionsdrehmaschine der Firma SPINNER mit integrierter Zerspankraftmesseinrichtung. Der Klemmhalter ist auf einem Dreikomponenten-Dynamometer befestigt, was an einer am Oberschlitten montierten Vorrichtung angebracht ist. Für die Untersuchungen wurden Proben mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Länge von etwa 20 mm hergestellt. Durch Zentrierbohrungen an den Stirnseiten konnten sie, wie in Bild 3 zu sehen, zwischen Spitzen gespannt werden. Aufgrund der Neigung des bearbeiteten Materials zur Bildung von Aufbauschneiden kam eine Kühlschmieremulsion zur Anwendung. Für jede Parameterkombination wurden jeweils drei Versuche unter Aufzeichnung der Schnitt-, Passiv- und Vorschubkraft vorgenommen. Anschließend wurde bei allen Proben die Rauheit gemessen und einige Oberflächen rasterelektronenmikroskopisch untersucht.



**Bild 3:** Versuchsanordnung

## 2.2 Werkzeugauswahl

Die heterogene Struktur von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen stellt hohe Anforderungen an das Werkzeug, die nur von wenigen Schneidstoffen erfüllt werden können. Während die hohe Härte der Partikel zu einem schnellen Werkzeugverschleiß an der Freifläche führt und folglich einen Schneidstoff mit ausgezeichneter Abrasionsbeständigkeit erfordert, zeigt die zähe Matrixlegierung eine deutliche Neigung zur Bildung von Aufbauschneiden. Als besonders geeignet zur Bearbeitung von Kompositen erweisen sich aufgrund ihrer hohen Härte Diamantwerkstoffe. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick zu den kommerziell erhältlichen Diamantschneidstoffen.

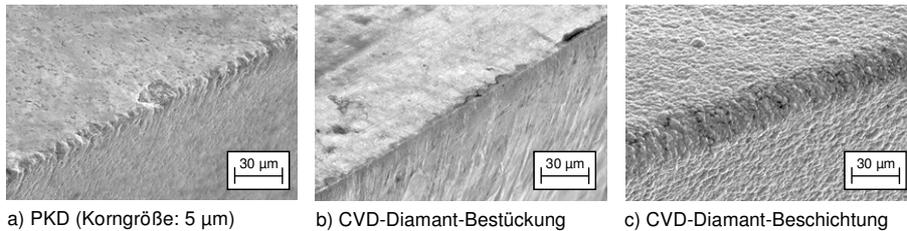


**Bild 4:** Übersicht zu Diamantschneidstoffen

PKD ist ein Verbundwerkstoff aus polykristallinen Diamantpartikeln mit einem Volumenanteil von etwa 90 bis 95 Prozent und Kobalt als Bindemittel. Die typischen mittleren Partikelgrößen liegen für das Feinkorn zwischen 2 µm und 4 µm, für die mittlere Korngröße bei 5 µm bis 15 µm und betragen für das Grobkorn meist 25 µm oder 30 µm. Der PKD mit Mischkorn enthält feine, mittelgroße und grobe Partikel. Mit der Verwendung von grobkörnigem PKD kann die höchste Abrieb- und Schlagfestigkeit erzielt werden; die damit verbundene größere Schneidenscharftigkeit führt aber zu einer schlechteren Oberflächengüte.

CVD-Diamant hat im Gegensatz zu PKD keinen Binderanteil, sondern besteht zu etwa 99,9 % aus Kohlenstoff. Folglich weist er eine höhere Härte und Festigkeit, jedoch eine geringere Zähigkeit als PKD auf. CVD steht für chemical vapour deposition (chemische Gasphasenabscheidung) und bezeichnet eine Gruppe von Beschichtungsverfahren. Dieser Diamant kann als direkte Werkzeugbeschichtung (Dünnschicht mit einer Dicke von einigen Mikrometern) oder als Bestückung (Erzeugung einer Dickschicht mit einer Dicke von etwa 0,5 mm bis 1 mm auf einem Trägermaterial) eingesetzt werden.

Monokristalliner Diamant wird sowohl aus der Natur gewonnen als auch synthetisch erzeugt. Er weist die höchste Härte und Festigkeit auf, die allerdings beide richtungsabhängig sind. Diese Anisotropie muss bei der Herstellung von Diamantwerkzeugen unbedingt beachtet werden. Ein weiterer Vorteil des monokristallinen Diamants besteht in der Möglichkeit, extrem scharfe Schneidkanten herzustellen.

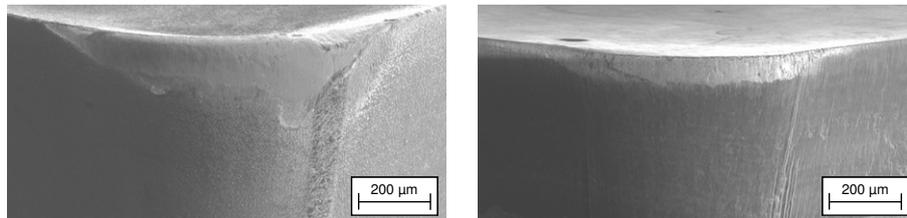


**Bild 5:** Schneidkanten von Diamant-Wendeschneidplatten

Die obige Abbildung zeigt die Schneidkanten von verschiedenen Diamant-Drehwerkzeugen. Die Wendeschneidplatten mit PKD-Bestückung wurden an der Freifläche geschliffen und anschließend gebürstet. Durch diese Art der Erzeugung einer Schneidkantenverrundung entstehen kleine Ausbrüche an der Schneidkante, die zu einer relativ großen Schartigkeit führen. Die Freiflächen der dargestellten CVD-Diamant-bestückten Werkzeuge wurden mittels Laserstrahlschneiden erzeugt, wodurch sich sehr scharfe Schneidkanten erzielen lassen. Bei einer direkten Werkzeugbeschichtung entsteht, wie im rechten Bild zu sehen, verfahrensbedingt immer eine Verrundung der Schneidkante. Während die Diamantbestückungen polierte Spanflächen zur Verhinderung einer Aufbauschneidenbildung haben, entstehen durch den CVD-Beschichtungsprozess vergleichsweise raue Oberflächen.

Für die Untersuchungen wurden überwiegend Wendeschneidplatten mit CVD-Diamant-Bestückung verwendet, da sie eine sehr hohe Verschleißfestigkeit sowie nahezu verrundungsfreie Schneidkanten aufweisen und deutlich preiswerter als Werkzeuge mit monokristallinem Diamant sind. Wie Bild 6 zeigt, führt die Bearbeitung dieser Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Schneidstoff zu unterschiedlichen Verschleißformen. Während bei den CVD-Diamant-bestückten Wendeschneidplatten ein relativ gleichmäßiger Freiflächenverschleiß auftritt, kam es bei den beschichteten Werkzeugen bereits nach kurzer Zeit zu großflächigen Schichtabplatzungen sowie Ausbrüchen an der Schneidkante. Die CVD-Diamant-beschichteten Werkzeuge sind folglich nicht geeignet zur Bearbeitung dieser Composite. Eine Verbesserung der Standzeit kann möglicherweise durch eine Erhöhung der Schichtdicke, die nur etwa 7 µm betrug, erreicht werden.

Es wurden rhombische Wendeschneidplatten der Form CC... 09T3... mit unterschiedlichen Eckengeometrien und Spanwinkeln ausgewählt. Durch den Eckenwinkel von 80° und den Freiwinkel von 7° wird eine hohe Kanten- und Eckenstabilität erzielt. In Kombination mit dem genutzten Klemmhalter ergibt sich ein Einstellwinkel von 95° für die Längs- und Plandrehbearbeitung.



a) CVD-Diamant-Beschichtung

b) CVD-Diamant-Bestückung

**Bild 6:** Verschleißformen von CVD-Diamant-Wendeschneidplatten ( $r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$ )

### 2.3 Auswahl und Einfluss von Prozessparametern

Unter der Zielstellung der Erzeugung hoher Oberflächengüten wurden die Schnittwerte in für die Endbearbeitung typischen Parameterbereichen variiert. Aufgrund des verhältnismäßig kleinen Probendurchmessers war die maximale Schnittgeschwindigkeit auf etwa 250 m/min begrenzt. Zur Ermittlung des Einflusses der Schnittwerte auf den Zerspanungsprozess wurden Versuche an dem beschriebenen Aluminiummatrix-Verbundwerkstoff mit einem Volumenanteil der Verstärkungskomponente von 15 % durchgeführt. Die dazu verwendeten PKD-bestückten Wendeschneidplatten haben einen Spanwinkel von  $0^\circ$  und einen Eckenradius von 0,8 mm. Die Verschleißmarkenbreite der Werkzeuge erhöhte sich im Verlauf der Versuche von 50  $\mu\text{m}$  beginnend bis auf etwa 200  $\mu\text{m}$ .

Im Bild 7 ist der Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Schnittkraft dargestellt. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit führte im untersuchten Parameterbereich nur zu einer geringfügigen Verringerung der Schnittkraft. Dieser Zusammenhang ist insbesondere bei einer Schnitttiefe von  $a_p = 1 \text{ mm}$  erkennbar. Aus dem Diagramm geht hervor, dass sich die Schnittkraft mit steigendem Vorschub und zunehmender Schnitttiefe deutlich erhöht. Die Ursache liegt in der geometrischen Abhängigkeit des Spanungsquerschnitts von diesen Größen, der in die Berechnung der Schnittkraft

$$F_c = A \cdot k_c = f \cdot a_p \cdot k_c \quad (1)$$

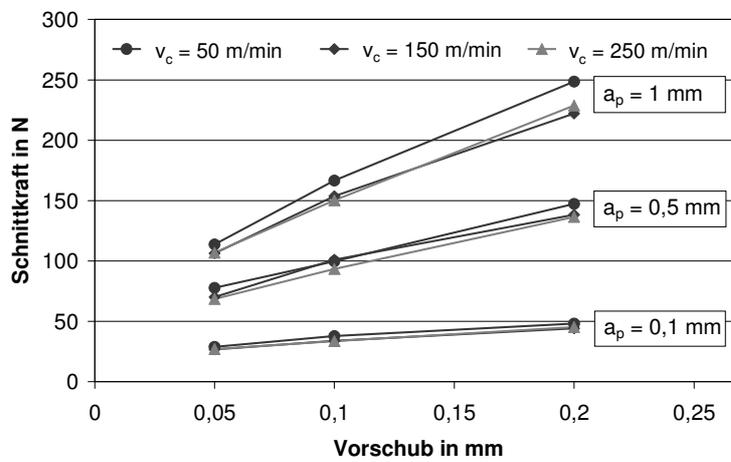
als Faktor eingeht.

Die in Bild 8 zusammengefassten Ergebnisse der Rauheitsmessungen zeigen, dass der arithmetische Mittenrauwert im Wesentlichen nur vom Vorschub abhängig ist.

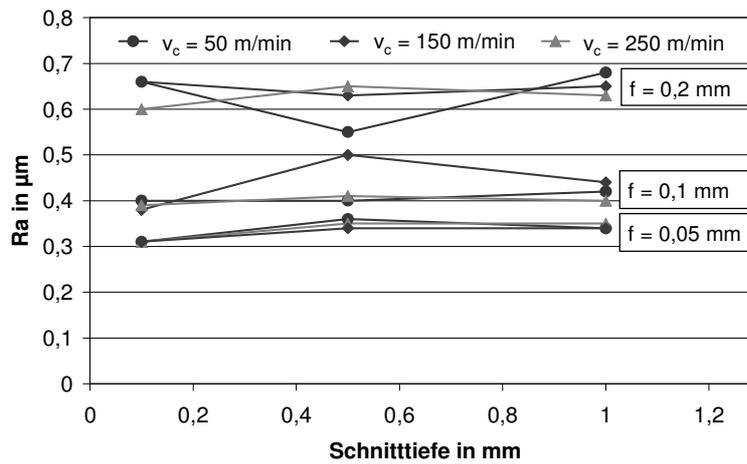
Dieses Ergebnis stimmt mit der geometrischen Beziehung

$$Ra_{\text{theoretisch}} \approx \frac{0,032 \cdot f^2}{r_\epsilon} \quad (2)$$

überein. Bei den weiteren Untersuchungen wurde deshalb der Schwerpunkt auf eine Variation der Schneidengeometrie in Abhängigkeit vom Vorschub gelegt.



**Bild 7:** Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Schnittkraft

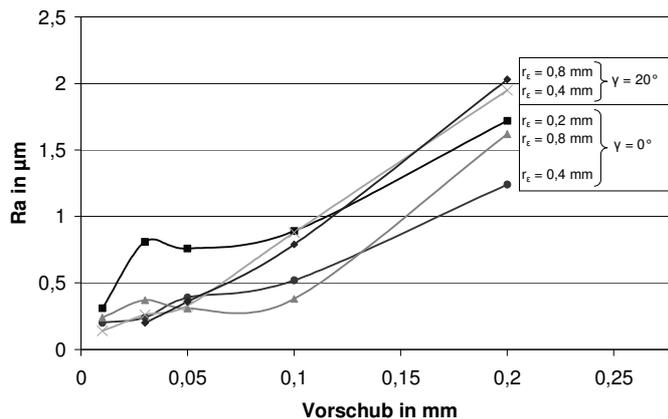


**Bild 8:** Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die Oberflächenrauheit

## 2.4 Einfluss der Schneidengeometrie

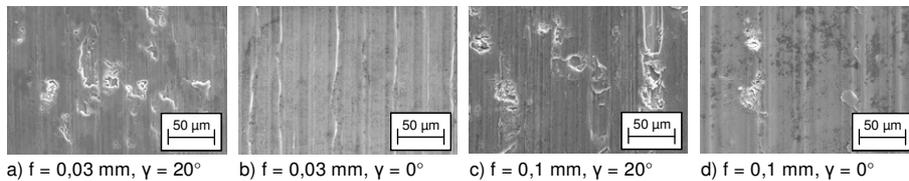
Zur Ermittlung des Einflusses der Schneidengeometrie auf den Zerspanungsprozess wurden Drehversuche an dem bereits beschriebenen Aluminiummatrix-Verbundwerkstoff mit einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil von 5 Volumenprozent bei verschiedenen Vorschüben durchgeführt. Dabei kamen sowohl CVD-Diamant-bestückte als auch -beschichtete Werkzeuge mit unterschiedlichen Spanwinkeln, Eckenradien und Schneideneckengeometrien zum Einsatz. Die Bearbeitung erfolgte bei einer konstanten Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min und einer Schnitttiefe von 0,5 mm.

In Bild 9 ist der Einfluss von Eckenradius und Spanwinkel auf die arithmetische Mittenrauheit dargestellt. Für diese Untersuchungen wurden zum einen CVD-Diamant-bestückte Werkzeuge mit einem Spanwinkel von  $0^\circ$  und zum anderen CVD-Diamant-beschichtete Wendeschneidplatten mit einem Spanwinkel von etwa  $20^\circ$  verwendet. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Oberflächenrauheit entsprechend Gleichung (2) mit steigendem Vorschub deutlich zunimmt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der Eckenradius im Bereich von 0,4 mm bis 0,8 mm für die untersuchten Parameter sowohl bei den beschichteten als auch den bestückten Werkzeugen nur einen geringen Einfluss auf die Rauheit hat. Eine Verbesserung der Rauheit mit einer Verdopplung des Eckenradius von 0,4 mm auf 0,8 mm, wie sie nach Gleichung (2) zu erwarten gewesen wäre, konnte nicht festgestellt werden. Dies ist wahrscheinlich auf den geringen Einstellwinkel der Nebenschneide von  $5^\circ$  zurückzuführen. Eine Verringerung des Eckenradius auf nur 0,2 mm war jedoch mit einem Anstieg der Rauheit verbunden.



**Bild 9:** Einfluss von Spanwinkel und Eckenradius auf die Oberflächenrauheit

Bei sehr kleinen Vorschüben wurden mit den beschichteten Werkzeugen die geringsten Rauheiten erzielt. Die stark positiven Spanwinkel erleichtern die Materialtrennung und es entstehen, wie in Bild 10 zu sehen, weniger Materialquetschungen. Bei größeren Vorschüben sind jedoch die Werkzeuge mit einem neutralen Spanwinkel günstiger, da deutlich weniger Partikel aus der Matrix gerissen werden.

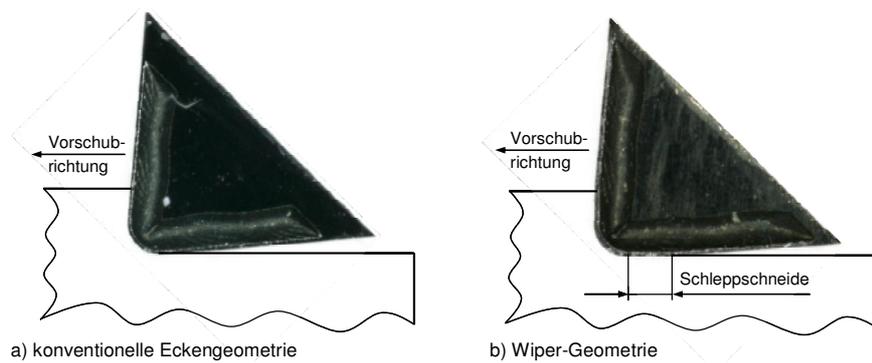


**Bild 10:** Probenoberflächen in Abhängigkeit vom Spanwinkel und Vorschub bei  $r_e = 0,4$  mm

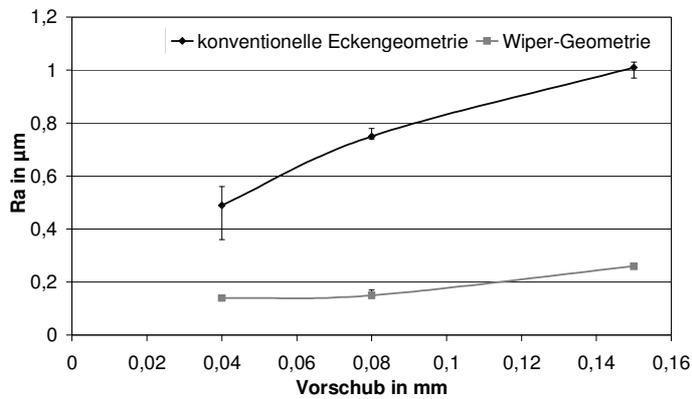
Da durch eine Erhöhung des Eckenradius von 0,4 mm auf 0,8 mm keine wesentliche Verbesserung der Rauheit erreicht werden konnte und große Eckenradien bei geringen Schnitttiefen zu vergleichsweise hohen Passivkräften führen, wurde die Eignung einer besonderen Gestaltung der Schneidenecke, der sogenannten Wiper-Geometrie, untersucht. In Bild 11 sind die Schneideneckenausprägungen von Wendeschneidplatten mit konventionellem Eckenradius und Wiper-Geometrie gegenübergestellt. Während die Nebenschneide bei der Standard-Eckengeometrie über die gesamte Länge einen Einstellwinkel von  $5^\circ$  aufweist, ist sie bei der Wiper-Geometrie unmittelbar am Eckenradius auf einer Länge von etwa 0,5 mm abgewinkelt, wodurch eine Schleppschnede mit einem Einstellwinkel von  $0^\circ$  entsteht. Beide Werkzeuge haben eine eingelaserte Spanleitstufe, wodurch die Spanbildung positiv beeinflusst werden kann.

Bild 12 zeigt die erreichten Oberflächenrauheiten für beide Geometrien mit einem Eckenradius von 0,4 mm. Durch Nutzung der Wendeschneidplatten mit Wiper-Geometrie konnte die Rauheit auf bis zu ein Fünftel reduziert werden. Es ist gut erkennbar, dass durch diese Eckengeometrie auch der Anstieg der Rauheit mit zunehmendem Vorschub sowie die Streuung der Messwerte kleiner sind. In Bild 13 sind REM-Aufnahmen der Probenoberflächen bei einem Vorschub von 0,04 mm dargestellt. Während bei den mit konventioneller Eckengeometrie gefertigten Proben leichte Materialquetschungen auftreten, entstehen bei Verwendung der Werkzeuge mit Wiper-Geometrie sehr glatte Oberflächen. Die Ursache dafür liegt in der Schleppschnede, die ähnlich wie bei den Fräswerkzeugen mit Breitschlichtschneide zu einer Glättung der Oberfläche führt. Beim Einsatz von Werkzeugen mit Wi-

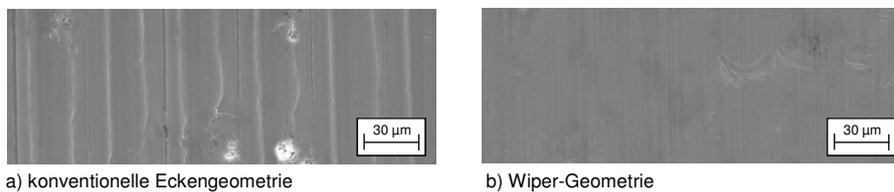
per-Geometrie muss jedoch beachtet werden, dass eine Verbesserung der Rauheit beim Plan- und Längsdrehen, nicht aber beim Formdrehen, erreicht werden kann.



**Bild 11:** Gegenüberstellung unterschiedlicher Schneideneckgeometrien



**Bild 12:** Einfluss der Schneideneckgestaltung auf die Rauheit



**Bild 13:** Probenoberflächen in Abhängigkeit von der Schneideneckgestaltung bei  $f = 0,04$  mm

### **3 Fräsen thermisch gespritzter Hartmetalle**

#### **3.1 Werkstoffcharakterisierung und Versuchsdurchführung**

Die Entwicklung und Applikation neuer Beschichtungslösungen für hochbelastete Bauteile sind Ziele eines Verbundprojektes (WISA LoadCoat) der Fraunhofer-Gesellschaft. Durch Kooperation mehrerer Institute steht die gesamte Prozesskette Beschichtungswerkstoff, Beschichtung, Finishbearbeitung sowie Simulation und Betriebsverhalten im Fokus der Untersuchung.

Hartmetalle zeichnen sich durch Eigenschaften wie hohe Härte, hohe Festigkeit und einer gewissen Zähigkeit aus und bilden somit die Grundlage für einen Werkstoff für extreme Beanspruchung. Bei großvolumigen Bauteilen hingegen ergeben sich durch dessen pulvermetallurgische Herstellung, die beträchtliche Dichte des Hartstoffes WC (Wolfram-Carbid) und dem hohen Preis der Komponenten enge Grenzen bezüglich der Einsatzmöglichkeiten. Der Ansatz, das Hartmetall nicht als massiven Körper, sondern gezielt nur im tribologischen Funktionsbereich eines Werkzeuges bzw. Bauteiles als Beschichtung einzusetzen, stellt sich daher für den Bereich des Werkzeug- und Formenbaus als geeigneter Kompromiss dar. Thermische Spritzverfahren nehmen hierbei einen besonderen Stellenwert ein. Das im Bild 14 dargestellte Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) überzeugt als Auftragsverfahren mit einer überdurchschnittlichen Haftverbindung, bei gleichzeitig sehr hoher Maßgenauigkeit und einer realisierbaren Porosität von unter 1 %.



**Bild 14:** Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF)

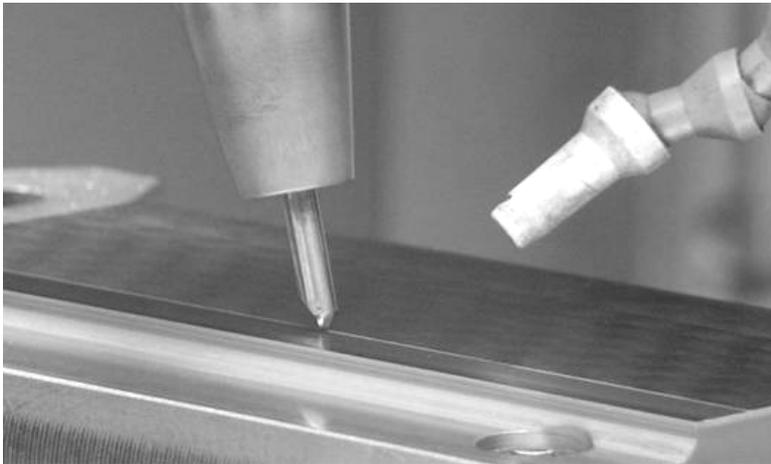
Dieses Beschichtungskonzept ermöglicht somit ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten, erfordert aber dennoch eine abschließende Finishbearbeitung. Hieraus ergibt sich die Forderung nach einer wirtschaftlichen und flexiblen Bearbeitungsmöglichkeit für Hartmetalle. Derzeit ist es nur möglich diese mittels Schleifen oder Funkenerosion zu bearbeiten. Beide Prozesse sind jedoch kostenintensiv und weisen ökologische, technologische und physikalische Nachteile auf. Um diesen entgegenzuwirken, wurden Grundlagenuntersuchungen zu einer Fräsbearbeitung durchgeführt. Für die Zerspanungsversuche wurde zunächst der Focus auf das Substrat WC-17%Co gelegt, für welches eine Härte von 1075 HV2 bestimmt werden konnte. Mit einer Schichtdicke von 1 mm erfolgte die Beschichtung der Versuchsproben, bestehend aus einem für Umformwerkzeuge typischen Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5.1). Wesentliche Hauptziele der Forschungsarbeit bestanden darin, einen geeigneten Schneidstoff für die spanende Bearbeitung von thermisch gespritzten Hartmetallen zu spezifizieren und entsprechend wirtschaftliche Prozessparameter zu ermitteln. Die Fräsbearbeitung erfolgte auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum der Firma DIGMA, wobei die Proben auf einem Dreikomponenten-Dynamometer aufgespannt wurden. Untersuchungsgegenstand waren hierbei unter anderem die wirkenden Prozesskräfte, der Werkzeugverschleiß und die erzeugten Oberflächenqualitäten.

### **3.2 Werkzeuge für die Hartmetallzerspanung**

Die bei der Hartmetallzerspanung im unterbrochenen Schnitt zum Einsatz kommenden Werkzeuge sind extremen Belastungen ausgesetzt. Hinsichtlich auftretender thermischer und dynamischer Belastungen werden Schneidstoffe benötigt, die den enormen Wechselbeanspruchungen gewachsen sind. Infolge der werkstoffbedingten hohen Härte, die die Grenze der konventionellen Hartbearbeitung deutlich überschreitet, resultieren zum Teil widersprüchliche Forderungen nach Druckfestigkeit und Zähigkeit. Abgestimmt auf die geforderte Bearbeitungsaufgabe, können die Werkzeuge jedoch nur über eine Kombination technologisch vereinbarter Eigenschaften verfügen. Das Hauptaugenmerk wurde somit auf vorzugsweise superharte Schneidstoffe wie CBN, PKD und CVD-Dickschichtdiamant gelegt. Die Ausführung der Werkzeuge erfolgte bereits im Hinblick auf eine folgende Konturbearbeitung. Zum Einsatz sind folglich ausschließlich Kugelfräser mit einem Durchmesser von  $D = 6$  mm gekommen. Um die gewonnenen Ergebnisse repräsentativ miteinander vergleichen zu können, fiel die Wahl auf einheitlich einschneidige Werkzeuge.

### 3.3 Optimierung von Prozessparametern

Aufgrund der geringen Formabweichung der aufgespritzten Hartmetallschicht ergibt sich für die direkt an den Beschichtungsprozess anschließende Finishbearbeitung mittels Fräsen lediglich eine erforderliche Schnitttiefe  $a_p$  von 0,1 bis maximal 0,2 mm. Die Werkzeuge wurden im Versuchsprogramm systematisch auf den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit, Zahnvorschub, Schnitttiefe und Eingriffsbreite untersucht [Bild 15]. Die Kühlung der Werkzeuge erfolgte in diesem Versuchsstadium ausschließlich unter Anwendung von Druckluft.

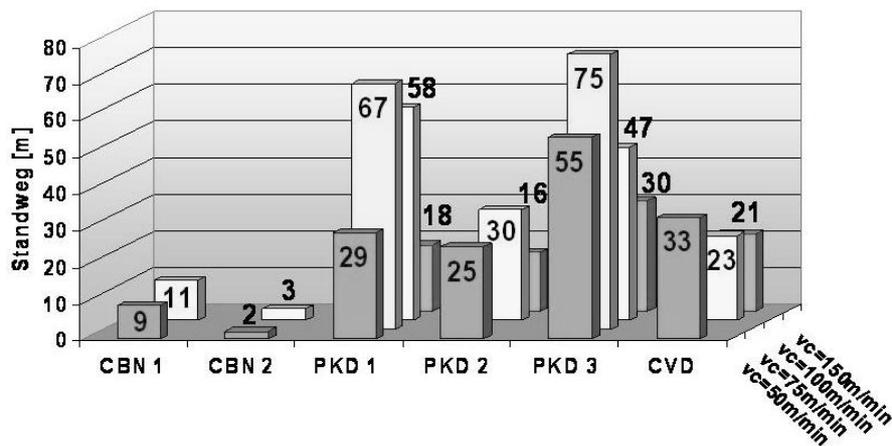


**Bild 15:** Fräsen von thermisch gespritztem Hartmetall

Für die Beurteilung der untersuchten Werkzeugkonzepte galt eine Obergrenze der zulässigen Verschleißmarkenbreite von  $VB_{\max} = 0,2$  mm als einheitliches Kriterium. Als maßgebenden Einflussfaktor wurde zunächst die Schnittgeschwindigkeit näher betrachtet. Hierfür wurde ein Voreilwinkel von  $\beta = 15^\circ$ , eine Schnitttiefe von  $a_p = 0,1$  mm, die Eingriffsbreite mit  $a_e = 0,2$  mm und der Zahnvorschub auf  $f_z = 0,05$  mm festgelegt.

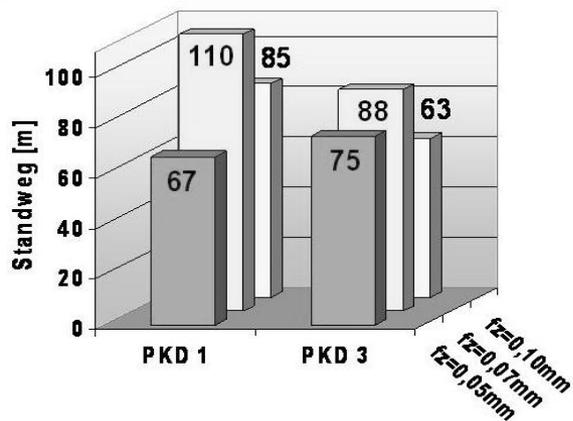
Im Ergebnis zeigte sich, dass PKD für die Zerspanung von Hartmetall die Forderungen nach notwendiger Härte und Zähigkeit für diese Bearbeitungsaufgabe im günstigsten Verhältnis in sich vereint. Die Untersuchungen verdeutlichten, dass CBN aufgrund der vergleichsweise geringeren Härte und Zähigkeit einen erhöhten Verschleiß zur Folge hat und somit nicht für diese Aufgabe geeignet ist. Mit einer

deutlich höheren Härte steht der CVD-Diamant dem PKD entgegen. Ab einem gewissen Grad der Schädigung kann die Schneidkante der schlagartigen Belastung im unterbrochenen Schnitt jedoch nicht ausreichend entgegenwirken und neigt verstärkt zum Ausbrechen. Zwei PKD-Sorten (PKD 1 und PKD 3) konnten mit einer optimalen Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 75 \text{ m/min}$  im Ergebnis besonders überzeugen und bildeten die Grundlage weiterführender Untersuchungen [Bild 16].



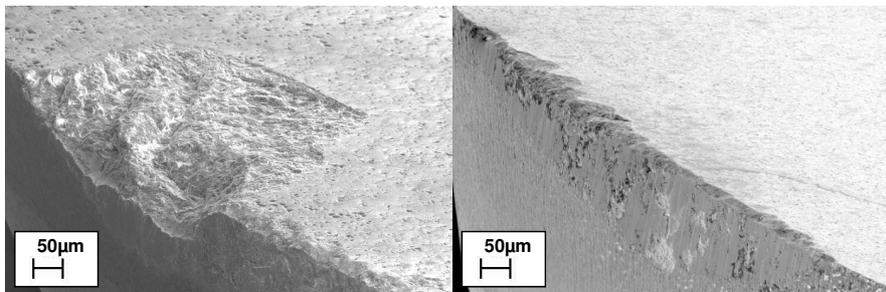
**Bild 16:** Standwege bei Variation der Schnittgeschwindigkeit

Durch die Variation des Zahnvorschubes auf  $f_z = 0,07 \text{ mm}$  wurde es ermöglicht, den Standweg für PKD auf 110 Meter zu erhöhen [Bild 17]. Dies entspricht bei einer Gesamtbearbeitungszeit von 197 Minuten einem abgetragenen Spanvolumen von  $2200 \text{ mm}^3$ . In diesem Fall betrug die effektive Standzeit der sich im Werkstoff befindlichen Schneide 23 Minuten, bis das Verschleißkriterium erreicht wurde.



**Bild 17:** Standwege bei Variation der Zahnvorsübe

Bei einer Überbelastung der Werkzeuge stellt sich der Werkzeugverschleiß bei den Diamantwerkzeugen überwiegend in Form von Ausbrüchen dar [Bild 18 links]. Für den ermittelten Bereich der optimierten Schnittbedingungen hingegen ist die Ausbruchneigung als minimal anzusehen und kann einem durch mechanischen Abrieb erzeugten Freiflächenverschleiß gleichgesetzt werden [Bild 18 rechts].



**Bild 18:** REM-Aufnahmen eines überlasteten sowie mit optimalen Schnittbedingungen eingesetzten Werkzeuges nach Erreichen des Verschleißkriteriums

Die wichtigste Komponente der Zerspankraft ist die Schnittkraft, wobei der Wert dieser Kraft maßgeblich durch die gewählten Schnittparameter, Schneidstoff und Schneidengeometrie beeinflusst wird. Der Kraftverlauf korreliert hierbei mit dem

Verschleißverhalten, welcher nach einem degressiven Anfangsverschleiß durch eine lineare Zunahme gekennzeichnet ist [Bild 19].

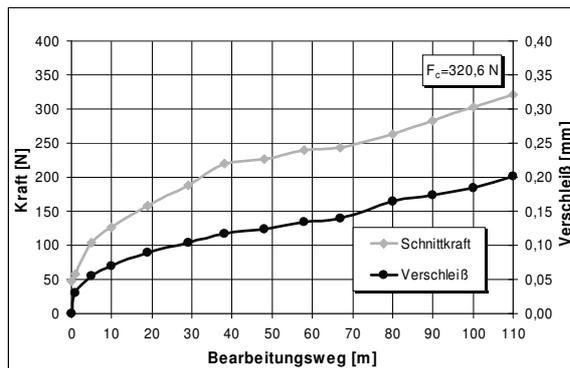
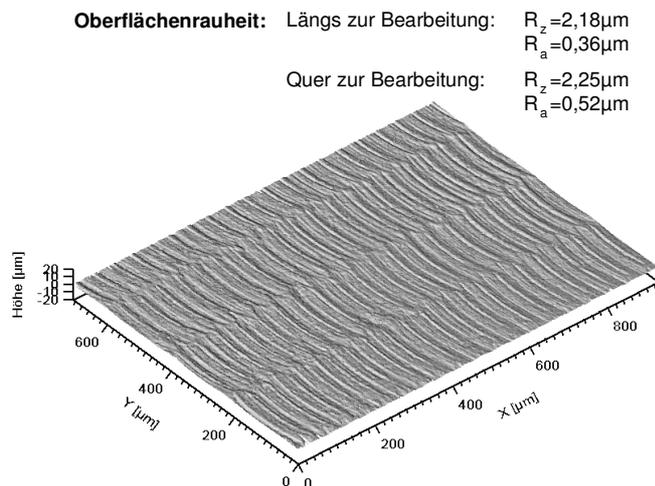


Bild 19: Schnittkraft und Verschleiß ( $VB_{max}$ ) in Abhängigkeit vom Bearbeitungsweg

### 3.4 Bewertung der Oberflächenqualität

Ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der bearbeiteten Flächen stellt die erreichbare Oberflächenrauheit dar. In Anbetracht der geringen Eingriffsbreiten wurde diese Messung mittels konfokaler Mikroskopie durchgeführt. Das berührungslose Messverfahren visualisiert Rauheitsprofile in 3-dimensionaler Darstellung [Bild 20]. Die Ergebnisse von durchschnittlich  $R_z = 3 \mu\text{m}$  und  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$  entsprechen hierbei in jeder Hinsicht den bestehenden Anforderungen des Werkzeug und Formenbaus. Über den gesamten Bearbeitungsweg des Werkzeuges ergab sich lediglich eine Erhöhung der gemittelten Rautiefen in der Größenordnung von  $1 \mu\text{m}$ . Den gestellten Qualitätszielen wird somit die Fräsbearbeitung von thermisch gespritztem Hartmetall in vollem Umfang gerecht.



**Bild 20:** Oberflächenrauheit bei der Bearbeitung von Hartmetall mit PKD-Werkzeug

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Polykristalline Diamantschneidstoffe sind sowohl für die Drehbearbeitung von partikelverstärkten Aluminiumwerkstoffen als auch für das Fräsen thermisch gespritzter Hartmetalle wirtschaftlich einsetzbar. Auf Grund der hohen Härte und Festigkeit ist der CVD-Schneidstoff bevorzugt beim Drehen einzusetzen und PKD durch die höhere Zähigkeit beim Fräsen die favorisierte Schneidstoffwahl.

Im Bereich des Werkzeug- und Formenbau bietet die gezielte Hartmetallbeschichtung das Potenzial eines erhöhten Verschleißschutzes, geringere Instandsetzungskosten und eine steigende Produktivität. Es kann festgestellt werden, dass die Bearbeitung dieser Schichten mittels geometrisch bestimmter Schneide im unterbrochenen Schnitt realisierbar ist und die technologischen Grenzen der Hartbearbeitung deutlich verschoben wurden. Eine wirtschaftlichere sowie flexibler einsetzbare Alternative zum konventionellen Schleifen und Erodieren von Hartmetall konnte somit geschaffen werden. Die Möglichkeiten einer effizienten Hartmetallbearbeitung sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch nicht restlos ausgeschöpft und benötigen deshalb weiterer Forschungsarbeit.

Sowohl beim Drehen als auch beim Fräsen werden Optimierungen der Mikro- und Makrogestalt Bestandteil weiterer Untersuchungen sein. Spanleitstufen sollen beim Drehen die Druckspannungen reduzieren und letztendlich zur Verbesserung der Oberflächengüte beitragen, Schneidkantenfasen können die Prozessstabilität beim Fräsen wesentlich steigern.

Des Weiteren steht die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die Bearbeitung anderer thermisch gespritzter Hartmetalle sowie auf gesinterte Werkstoffe im Mittelpunkt der Aktivitäten.

### ***Danksagung***

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des SFB 692.