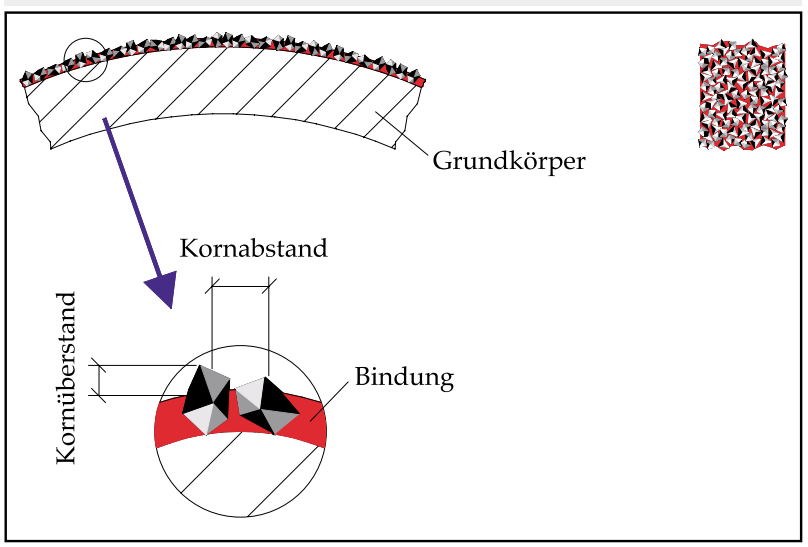
Spanen mit definiert angeordneten Diamant- oder cBN-Körnern

G. Burkhard; B. Zigerlig; M. Boretius

Das ungeordnete Aufbringen bei einschichtig mit Hartstoffkörnern belegten galvanischen oder gelöteten Werkzeugen geht mit einer zufälligen Verteilung der Freiräume und den damit verbundenen Nachteilen einher. Deshalb ist es erforderlich, ein Verfahren zu entwickeln mit dem nicht nur ein definiertes Aufbringen wirtschaftlich möglich ist, sondern auch die Kornausrichtung beeinflusst werden kann.

Im Bereich von Schleifwerkzeugen hat die Vergangenheit deutlich gezeigt, dass sich Sparen an der Qualität von Schleifscheiben nicht rechnet. Trotz höherer Investitionskosten sind hochqualitative Schleifwerkzeuge aufgrund der Reduzierung von Bearbeitungskosten und der Verbesserung der Bauteilqualität den minderwertigen Werkzeugen wirtschaftlich überlegen. Das trifft natürlich auch auf die einschichtig belegten Abrasivwerkzeuge zu. Auch hier müssen weitere Überlegungen angestellt werden, um die Werkzeugqualität zu steigern. Deshalb wurde an der ETH Zürich das Projekt „Optimierung von einschichtigen Abrasivwerkzeugen“ ins Leben gerufen. Dieses Forschungsprojekt wurde dankenswerterweise durch die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie (BBT) der schweizerischen Eidgenossenschaft und durch mehrere Industrieunternehmen aus der Schweiz und Liechtenstein finanziell unterstützt.

1 Bei heutigen Abrasivbelägen sind die Hartstoffkörner zufällig in der Bindung angeordnet

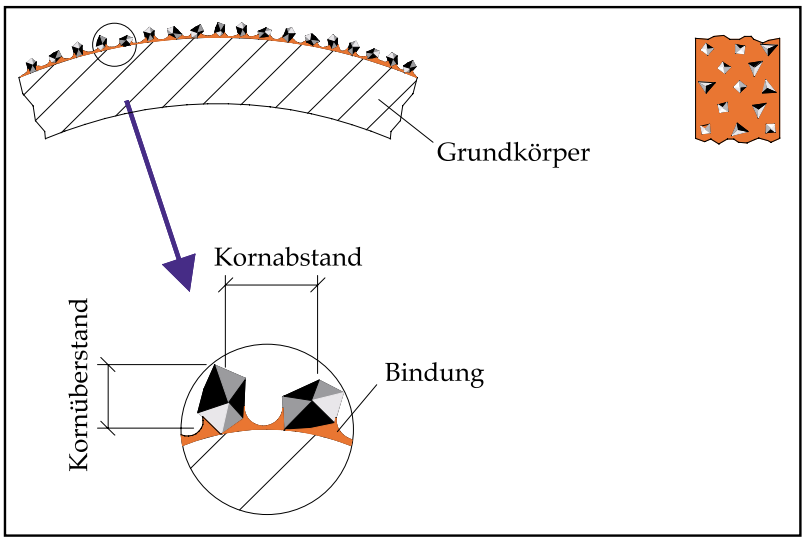


Stand der Technik

Einschichtig mit Diamant oder cBN belegte Schleifwerkzeuge werden heute entweder galvanisch, sintertechnisch oder durch verschiedene Lötverfahren hergestellt.

Galvanisch einschichtig belegte Schleifwerkzeuge bestehen aus einem metallischen Grundkörper (meistens Stahl oder Aluminium) mit dem darauf abgeschiedenen Schleifbelag, der von den Hartstoffkörnern (cBN oder Diamant) und einer Nickel- oder Nickellegierungsbindung gebildet wird. Die Hartstoffkörner sind mechanisch geklemmt und weisen einen Kornüberstand von 40 bis 50 % des mittleren Korndurchmessers auf. Als nachteilig erweist sich hierbei, dass die Körner zufällig angeordnet sind. Das bedeutet, auch die Größe des Freiraumes zwischen den Körnern, der dem Abtransport der Späne und dem Transport von Kühlschmierstoff dient, ist nicht definiert (*Bild 1*). Daher kann es beim Bearbeitungsprozess sehr leicht zum Zusetzen der Freiräume kommen, was im schlimmsten Fall zu Schleifbrand am Werkstück, also zu Ausschuss führt. Um das Zusetzen der Freiräume zu verhindern, wird mit verschiedenen Methoden und Mitteln versucht, die Korndichte zu verringern und die Körner regelmäßiger anzuordnen. Aber die Idealstruktur (*Bild 2*) wird bei galvanisch gebundenen Werkzeugen nicht erreicht. Vorteile dieser Idealstruktur mit möglichst großen Kornüberständen ergeben sich durch die großen Freiräume, die den Span- und Kühlschmierstofftransport erheblich verbessern und so zu hohen Abtragsleistungen und Standzeiten beitragen. Außerdem gewährleisten reproduzierbare Abrasivbeläge eine deutlich höhere Prozesssicherheit.

Mit einer Aktivlotbindung erzielt man neben höheren Bindungskräften (durch die zusätzliche chemische Bindung) größere Freiräume als bei den galvanisch gebundenen Werkzeugen, da der Kornüberstand



2 Regelmäßigere Freiräume durch definiert aufgebrachte Hartstoffkörner

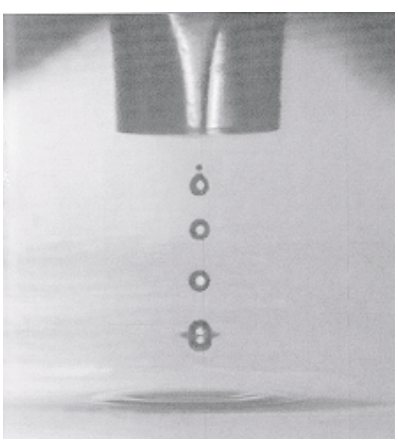
etwa 80 bis 100 % des mittleren Korndurchmessers beträgt. Aber auch hier sind alle bekannten Verfahren, mit denen sich die Anordnung der Hartstoffkörner in der Bindung definiert beeinflussen lässt äußerst zeitaufwendig und/oder unzureichend.

So kann durch die Zumischung sogenannter Abstandshalter (Glasperlen oder Körner geringerer Festigkeit) zwar eine Verringerung der Korndichte erzielt werden, so dass größere Freiräume zwischen den Abrasivkörnern entstehen. Aber die Position der Freiräume kann mit diesem Verfahren nicht festgelegt werden.

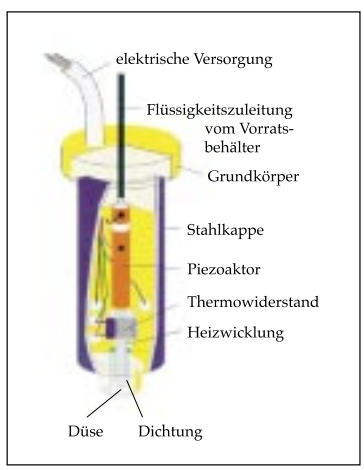
Das insbesondere bei der Herstellung von hochgenauen Abrichtwerkzeugen angewandte Handsetzen der Körner (üblicherweise im Bereich von 0,6 bis 2 mm) hat seine Grenzen bei feinen Körnungen, die sich nicht mehr mit der Pinzette greifen lassen. Außerdem ist dieses Verfahren sehr zeitintensiv, was sich in deutlich höheren Werkzeugkosten niederschlägt. Versuche, die Körner mit Robotern zu setzen, scheitern wegen großer Probleme beim Greifen und Vereinzeln der Körner.

Auch mit den weiteren Verfahren wie Offenes Streuen, Fotoresist-Verfahren, Schablonen, Tampon- oder Siebdruck oder Strukturierte Grundkörper ist es nicht möglich, Korndichte, Kornverteilung und Kornabstände einfach, schnell, variabel, reproduzierbar und unabhängig von der Korngröße und der Grundkörpergeometrie zu beeinflussen. Trotzdem erscheint die Aufteilung zwischen Anheften mit Kleberpunkten und Verankern der Körner durch anschließendes Aktivlöten wie sie beim Tampondruck oder Siebdruck angewandt wird, das beste Vorgehen zu sein. Allerdings muss der Auftrag der Kleberpunkte unabhängig von einem Klischee oder Sieb erfolgen, um Flexibilität in der Gestaltung der Freiräume zu gewährleisten. Für eine Kornvereinzelung ist es zudem erforderlich, Klebetropfen zu generieren die kleiner als die Hartstoffkörner sind.

3 Mikrodosiereinrichtung zum Aufbringen des Klebers



Quelle: Firma microdop (D)

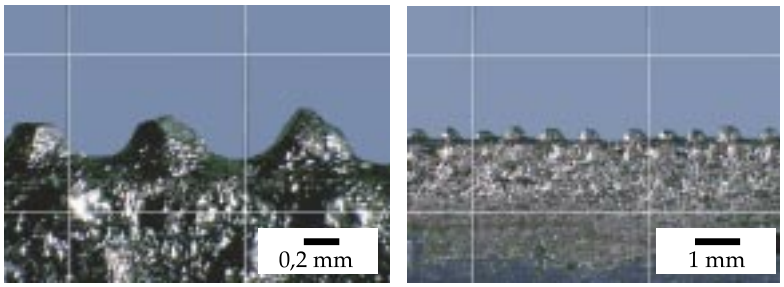


Mikrodosiervorrichtung ermöglicht das definierte Aufbringen der Hartstoffkörner

Bild 3 zeigt wie man dieses Problem lösen kann. Es handelt sich um eine Mikrodosiervorrichtung, wie sie zum Pipetieren in der Biomedizintechnik eingesetzt wird. Sie kann gleichmäßige Tröpfchen mit einem Durchmesser von bis zu 40 µm generieren. Der Dosierkopf besteht im Wesentlichen aus einer Glaskapillare als Düse, die über eine Zuleitung an den Vorratsbehälter des Klebers angeschlossenen ist. In ihrem Mittelteil ist sie von einem Piezoaktor umschlossen, der sich beim Anlegen eines Spannungsimpulses zusammenzieht und so einen Tropfen emittiert. Die maximale Emmisionsfrequenz liegt bei 2.000 Hz. Mit der Düsenheizung können auch höher viskose Flüssigkeiten dosiert werden.

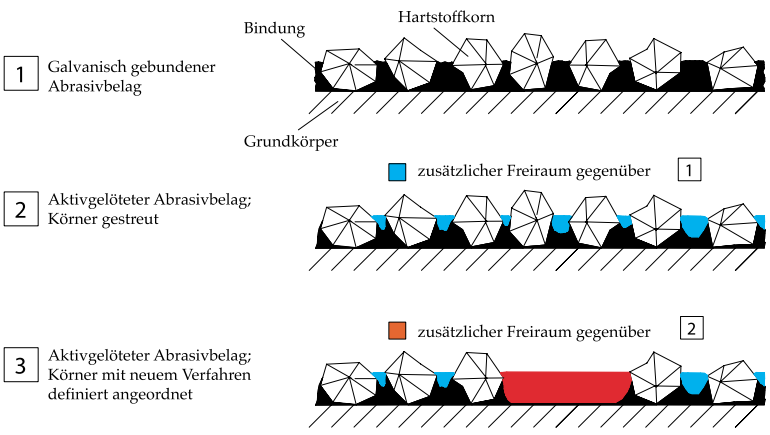
Bild 4 zeigt ein auf diese Art und Weise hergestelltes Abrasivwerkzeug mit cBN-Körnern der Korngröße B 427, auf dem neben der Vereinzelung der Körner auch die sehr gut ausgebildeten Lotkehlen deutlich zu erkennen sind. Zur Verdeutlichung der mit dem neuen Verfahren zusätzlich gewonnen Freiräume sind unterschiedliche einschichtige Abrasivbeläge in *Bild 5* schematisch dargestellt.

Auf dieser Basis wurden Kenngrößen und Modelle erarbeitet, mit



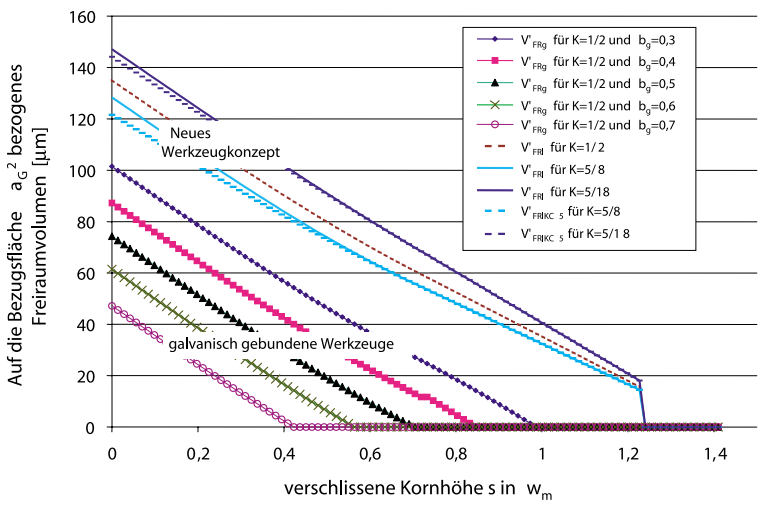
Körnung: B 427

4 Fertig gelötetes Abrasivwerkzeug



5 Freiräume bei unterschiedlichen Abrasivbelägen

6 Abhängigkeit des Freiraumvolumens von der verschlissenen Kornhöhe

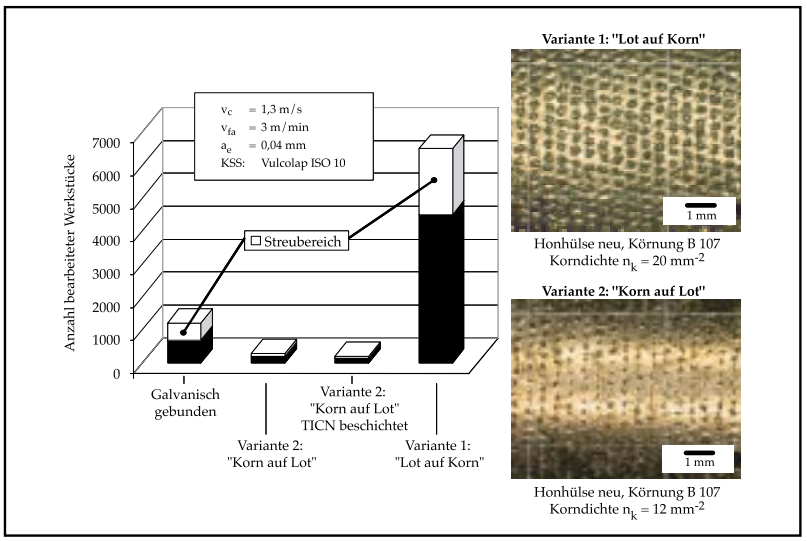


denen die bisher eingesetzten und die neuen Abrasivbeläge modellhaft miteinander verglichen und ausgelegt werden können. *Bild 6* zeigt die Ergebnisse eines sog. Abrasivbelagsmodells. Hier sind für verschiedene Abrasivbeläge die auf eine Bezugsfläche bezogenen Freiräume über der verschlissenen Kornhöhe s aufgetragen. Man erkennt, dass die Freiräume der galvanisch belegten Werkzeuge zu Beginn der Bearbeitung nur etwa halb so groß sind wie die der neu entwickelten Werkzeuge. Die Freiräume der galvanisch belegten Werkzeuge sind außerdem bereits nach Erreichen von etwa 40 bis 80 % der verschlissenen Kornhöhe aufgebraucht, Resultat des geringen Kornüberstandes dieser Werkzeuge.

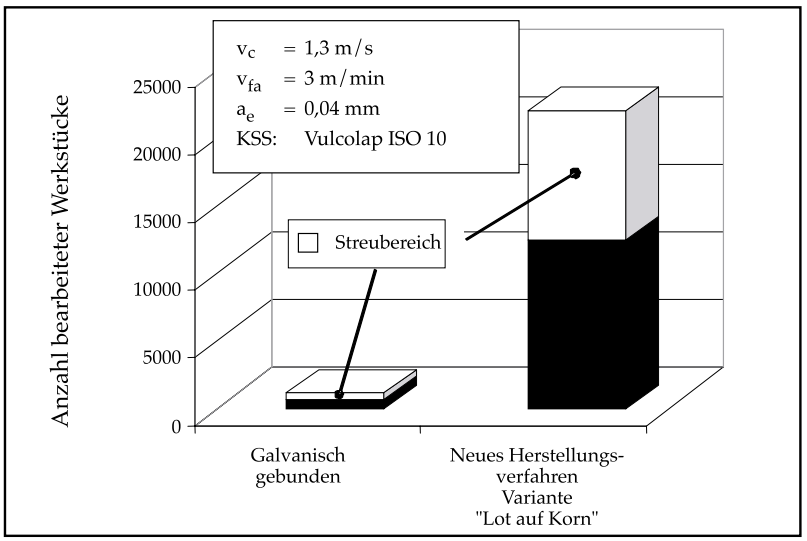
Hervorragende Standzeit und gute Bearbeitungsqualitäten

Zum Test und zur Optimierung des neuen Herstellungsverfahrens wurden Dornhonwerkzeuge, sog. Dornhonhülsen, mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 50 mm ausgewählt, weil hier ein konkreter Anwendungsfall mit großen Losgrößen gegeben war. Die Bearbeitungsaufgabe bestand darin, die unterbrochene Mittelbohrung eines Zahnrades aus 16MnCr5 mit einer Härte von HV10 740±80 auf das Fertigmaß Ø 12^{F7} zu honen. Die Arbeiten wurden auf einer Sunnen 1806-Honmaschine mit einer Dorndrehzahl von 2.000 min^{-1} und einer axialen Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min unter Zuführung von Honöl durchgeführt. Der Gesamtabtrag –bezogen auf den Durchmesser- betrug im Durchschnitt 0,09 mm. Mit galvanisch belegten Honwerkzeugen wurde diese Bearbeitungsaufgabe bisher in drei Schritten mit Zustellungen von 0,02 mm, 0,02 mm und 0,005 mm vorgenommen. Der letzte Stich mit dem geringeren Abtrag wird Kalibrierstrich genannt. Die mittlere Standzeit der galvanisch belegten Honhülsen lag bei 5.000 Hüben á 0,02 mm Zustellung.

Für die ersten neuen Werkzeuge wurde eine um 75 % geringere Korndichte als bei den bisher einge-

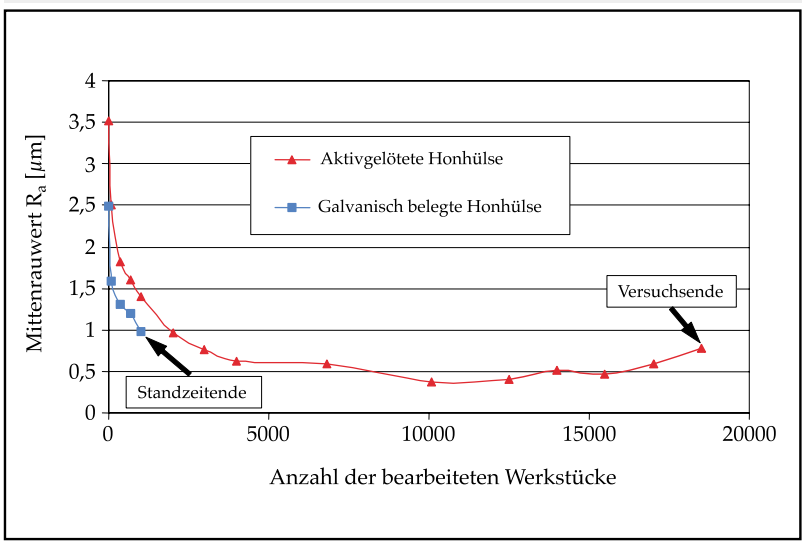


7 Standzeitvergleich der ersten Versuchsreihe



8 Standzeitvergleich mit den optimierten neuen Werkzeugen

9 Erzielte Bearbeitungsqualitäten



setzten galvanischen Werkzeugen angestrebt und hierfür wurde ein Kleberpunkteabstand (zwischen den Mittelpunkten gemessen) von 0,5 mm gewählt. Es wurden Werkzeuge nach zwei Varianten gefertigt:

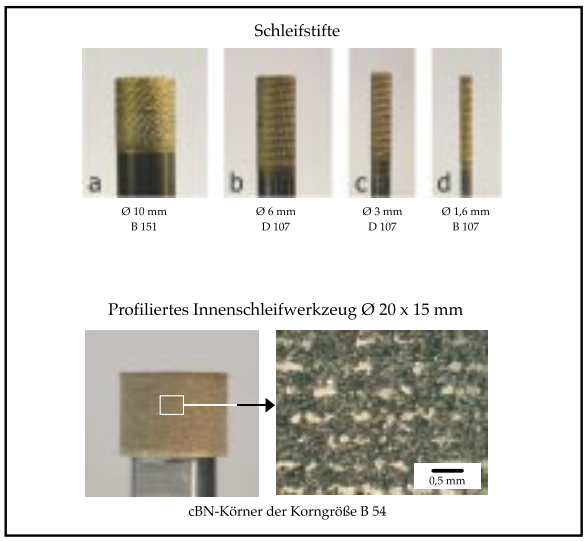
- Korn auf Lot (d. h. Aufbringen in folgender Reihenfolge Lotpaste – Kleber – Korn)
- Lot auf Korn (d. h. Aufbringen in folgender Reihenfolge Kleber – Korn – Lotpaste)

Die Zerspanungsversuche lieferten bei einer Zustellung von 0,04 mm (verdoppeltes Zeitspanvolumen) die in *Bild 7* dargestellten Standzeiten. Während mit den galvanisch belegten Werkzeugen maximal 1.000 Bohrungen bearbeitet werden konnten, betrug die Standzeit der nach der Variante Korn auf Lot hergestellten Werkzeuge nur 300 Werkstücke. Dies liegt einerseits an der geringen Korndichte der letztgenannten Werkzeuge, die eine große Einzelkornbelastung zur Folge hat, andererseits an den geringeren Kornhaltekräften, bedingt durch die schlechtere Benetzung der Körner. Ursächlich für die geringe Korndichte ist es, dass beim Auftrag der Klebepunkte auf die Lotpaste ein Teil des Klebers von der trockenen Paste aufgesaugt wird.

Am Besten verhielten sich die nach der Variante Lot auf Korn hergestellten Werkzeuge. Mit ihnen wurden Standzeiten von maximal 6.000 bearbeiteten Bohrungen erzielt, also eine Versechsfachung im Vergleich zu den galvanisch belegten Werkzeugen.

In einer Optimierungsphase der Werkzeuge wurden größere Körner und kleinere Kornabstände gewählt. Die geringeren Kornabstände führen zwar zu einer Verringerung des Freiraumes im Neuzustand, aber durch die größeren Körner wird auch die nutzbare Kornhöhe größer und somit wieder Freiraum gewonnen.

Die Standzeiten der optimierten Werkzeuge lagen 10- bis 20-mal höher als die der galvanisch belegten Werkzeuge (*Bild 8*). Dadurch, dass auch bei verdoppelter Zustellung die Standzeiten immer noch deutlich höher lagen als bei den gal-



10 Weitere nach dem neuen Verfahren hergestellte Werkzeuge

vanischen Werkzeugen, konnte die Leistungsfähigkeit dieses neuen Konzeptes unter Beweis gestellt werden.

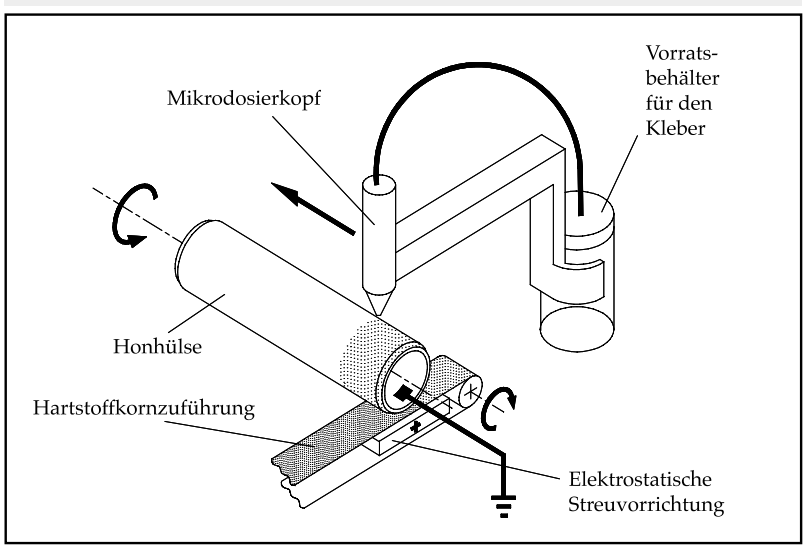
Des Weiteren wurden während dieser Arbeiten auch die Bearbeitungsqualitäten dokumentiert. *Bild 9* zeigt, dass die Mittenrauwerte R_a der neuen Werkzeuge zu Beginn der Bearbeitung um etwa 0,3 µm über denen von galvanisch belegten Werkzeugen lagen. Nach etwa 3.500 Werkstücken stellt sich ein Wert von R_a = 0,5 µm ein, der über 14.000 Teile nahezu konstant bleibt, so dass man sagen kann, die neuen Werkzeuge besitzen trotz ihres einschichtigen Belages nach dem Einlaufen ein quasistationäres Einsatzverhalten.

Weitere Einsatzmöglichkeiten und Ausblick

Aufgrund der guten Resultate mit den neuen Dornhonwerkzeugen wurden weitere Werkzeuge nach dem neuen Verfahren hergestellt. Allerdings konnten nicht alle Werkzeuge wegen fehlender konkreter Anwendungen optimiert werden, so dass zum Teil Prinzipversuche durchgeführt wurden, um eine generelle Aussage über ihre Eignung treffen zu können. Neben zylindrischen Schleifstiften wurden auch profilierte Innen- und Umfangsschleifscheiben sowie auch Sägeperlen für Seilsägen (*Bild 10*) hergestellt, wobei die Ergebnisse durchweg positiv ausfielen. Um allerdings Prozesssicherheit und Standzeit zu beurteilen, müssen weitere Versuche unter Produktionsbedingungen in Zusammenarbeit mit Anwendern erfolgen.

Zielrichtung für die Zukunft ist es aber, die Hartstoffkörner nicht nur definiert anzuordnen, sondern sie zudem gezielt auszurichten, um die Einlaufzeit der Werkzeuge zu verkürzen und eine weitere Erhöhung der Standzeit zu erreichen. Dafür wurde an der ETH Zürich ein patentiertes Verfahren entwickelt, das eine Kombination aus dem beschriebenen neuen Verfahren und einem elektrostatischen Streuen (*Bild 11*) darstellt. Da hierbei die Körner gegen die Schwerkraft aufgetragen werden, richten sie sich in Längsrichtung aus. Es ist geplant, diese Untersuchungen innerhalb eines EU-Projektes durchzuführen.

11 Verfahren zum definierten Anordnen der Körner mit Beeinflussung der Kornausrichtung



Literatur:

Burkhard G. Spanen mit definiert angeordneten Hartstoffkörnern, Fortschritt-Bericht, VDI Reihe 2 Nr. 591, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

Bildnachweis: Verfasser.

Dr. sc. techn., Dipl.-Ing. *Gregor Burkhard* ist Projektleiter Abrasivwerkzeuge am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) der ETH Zürich, Schweiz.
Dipl. Chemiker HTL *Benno Zigerlig* ist Leiter der Gruppe für angewandte Verfahren und Entwicklungen an der EMPA, Dübendorf, Schweiz.
Dr. Ing. *Manfred Boretius* ist Geschäftsführer der Werkstoff- und Wärmbehandlungstechnik Listemann (WWL) AG, Mauren, Liechtenstein.