

D. Biermann, M. Wolf, S. Schumann, F. Hojati, R. Aßmuth

# Modellierung des Nassstrahlspanprozesses zur Präparation von Zerspanungswerkzeugen

## KURZFASSUNG

Die Einrichtung von Nassstrahlspanprozessen zur Präparation von Schneidkanten erfordert ein hohes Maß an Prozesswissen und kommt aufgrund der komplexen Prozesssteuerung nicht ohne die Durchführung von Einrichtungsversuchen aus. Durch die Simulation des Nassstrahlspanens soll der Einrichtungsaufwand deutlich reduziert werden.

Der folgende Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz vor, bei dem der Materialabtrag beim Nassstrahlspanen zur Schneidkantenpräparation modelliert und die resultierende Schneidkantengestalt in Abhängigkeit der Strahldauer simuliert werden kann.

## 1. Einleitung

Die Schneidkantenpräparation ist ein wichtiger Prozessbaustein in der Herstellungskette von Zerspanungswerkzeugen. Durch eine belastungsangepasste Schneidkantengestalt kann die Leistungsfähigkeit von Zerspanungswerkzeugen deutlich erhöht werden [1–3]. Diese Schneidkantengestalten sind in ihrer Form jedoch häufig komplex und können nur mithilfe eines Präparationsprozesses hergestellt werden, der eine ausreichende Flexibilität besitzt. Das robotergeführte Nassstrahlspanen kann diese Anforderungen erfüllen und bietet die Möglichkeit, auch an komplexen Werkzeugen asymmetrische oder gradierte Schneidkantengestalten zu erzeugen. Deren Herstellung erfordert allerdings ein erhebliches Maß an Prozesswissen, und bei Neuanläufen ist häufig ein aufwändiges Einrichten des Präparationsprozesses erforderlich, bis die erwünschte Schneidkantengestalt erzeugt werden kann. Mit der vorliegenden Arbeit soll an dieser Stelle angeknüpft werden. Basierend auf der Belastungssituation durch den Strahlprozess soll ein Simulationstool erstellt werden, mit dem die resultierende Schneidkantengestalt am Zerspanungswerkzeug in Abhängigkeit der Strahldauer vorhergesagt werden kann. Die Auslegung des Präparationsprozesses wird hierbei deutlich vereinfacht.

## 2. Nassstrahlspanen

Beim Nassstrahlspanen erfolgt der Materialabtrag durch das Auftreffen der Abrasivpartikel auf die zu strahlende Oberfläche. Als Abrasivpartikel werden häufig keramische Werkstoffe wie Korund oder Siliziumkarbid eingesetzt. Das Wasser, welches als Trägermedium für die Abrasivpartikel dient, sorgt beim Aufprall der Körner für einen zusätzlichen Dämpfungseffekt [4]. Einige Untersuchungen belegen bereits die Eignung des Verfahrens zur Präparation von Schneidkanten [5–7]. Am Institut für Spanende Fertigung erfolgt die prozessseitige Umsetzung durch eine prototypische Injektorstrahlanlage (Bild 1).

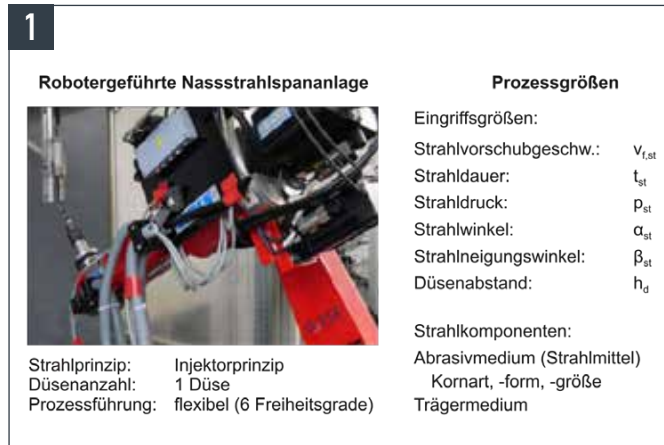
Beim Injektorstrahlen werden Abrasiv- und Trägermedium separat einer Mischkammer zugeführt, welche sich unmittelbar vor der Strahldüse befindet. Das Trägermedium befindet sich hierbei in einem Kreislauf. Das Abrasivmedium hingegen wird nach einmaliger Verwendung entsorgt, um einen Einfluss von verschlissenen Strahlkörnern auf das Präparationsergebnis zu vermeiden. Sämtliche Relativbewegungen zwischen der Strahldüse und dem zu präparierenden Werkzeug werden durch einen Vertikal-Knickarmroboter ausgeführt, welcher das Zerspanungswerk-

zeug auf einer definierten Bahn unter der ortsfesten Strahldüse führt. Dieses flexible Anlagenkonzept erlaubt die Präparation anspruchsvoller Werkzeugformen sowie auch die Erzeugung komplexer Schneidkantengestalten, da das Werkzeug frei unterhalb der Düse bewegt werden kann. Der Materialabtrag am Werkstück kann durch die relevanten Parameter, wie u.a. Strahldruck und Strahldauer bzw. Strahlvorschubgeschwindigkeit, gesteuert werden. Asymmetrische Schneidkantenverrundungen können durch eine Anstellung des Werkzeugs relativ zur Düse erzeugt werden. Aufgrund der Vielzahl an Einstellgrößen ist der robotergeführte Nassstrahlspanprozess in der Steuerung äußerst komplex und stellt hohe Herausforderungen an die Prozessauslegung und -umsetzung.

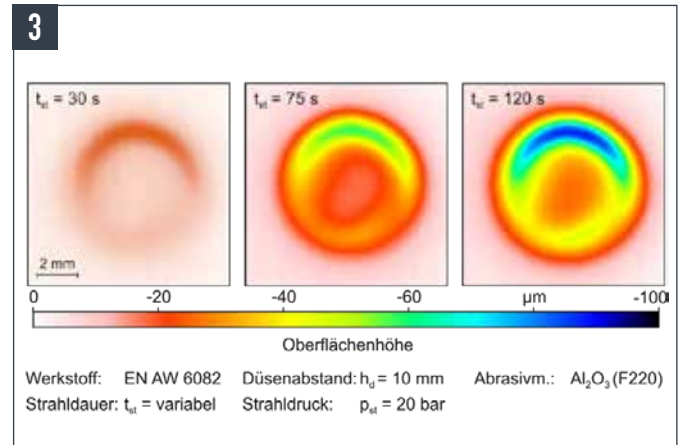
### 2.1 Modellierung des Materialabtrags beim abrasiven Nassstrahlspanen

Bei der hier vorgestellten Modellierung des Materialabtrags wird nur der Parameter Strahlzeit berücksichtigt. Bei geführten Prozessen, in denen mit definierter Strahlvorschubgeschwindigkeit gearbeitet wird, entspricht die Einwirkzeit des Abrasivmediums auf das jeweilige Schneidensegment ( $t_{st,eff}$ ) der Strahlzeit  $t_{st}$ . Untersuchungen zeigen, dass die Größe der mittleren Schneidkantenverrundung ( $\bar{r}$ ), die einen hohen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges im Einsatz hat, durch eine Variation der Strahl- bzw. Einwirkzeit bei entsprechender Prozesskenntnis definiert eingestellt werden kann [7].

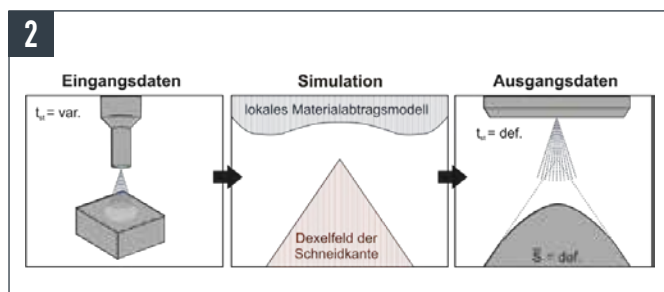
Innerhalb des vorgestellten simulativen Ansatzes wird die Schneidkante durch ein eindimensionales Daxelfeld modelliert. Hierbei kann ein Daxel als ein numerisches Element mit einem Anfangspunkt und einem Richtungsvektor und einer Länge verstanden werden [8]. Durch die Anordnung einzelner Daxel mit einem äquidistanten Abstand kann ein Profil diskret modelliert werden. Das Zeitspanvolumen, welches die Interaktion des Abrasivstrahls und der Schneidkante beschreibt, wird durch ein lokales Materialabtragsmodell mit den gleichen Diskretisierungsabständen bzw. Abmessungen der entsprechenden Schneidkante in der Simulation berücksichtigt. Für jeden Zeitschritt werden die Daxelhöhen der Schneidkante entsprechend der geometrischen Abmessungen in Abhängigkeit der modellierten Belastung durch den Strahlprozess gekürzt. Die Eingangsdaten für dieses Materialabtragsmodell werden über experimentelle Untersuchungen ermittelt. Als Ergebnis der Simulation kann für unterschiedliche Strahlzeiten die resultierende Schneidkantengestalt zweidimensional bestimmt werden. Die beschriebene Vorgehens- und Funktionsweise des simulativen Ansatzes ist in Bild 2 verdeutlicht.



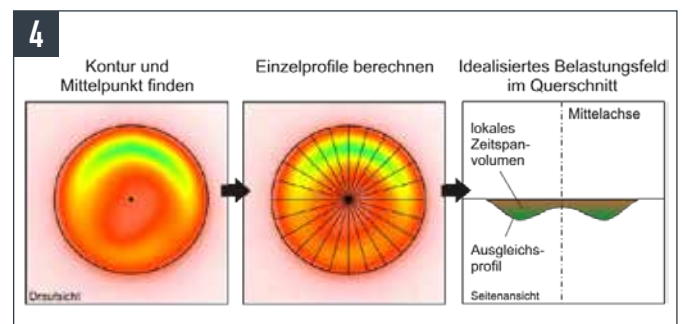
**Bild 1** • Anlagenkonzeption und Prozessgrößen beim roboterführten Nassstrahlspanen (nach [6])



**Bild 3** • Ermittlung der Verteilung des Materialabtrags in Abhängigkeit der Strahldauer



**Bild 2** • Vorgehensweise zur Modellierung des Materialabtrags beim Nassstrahlspanen



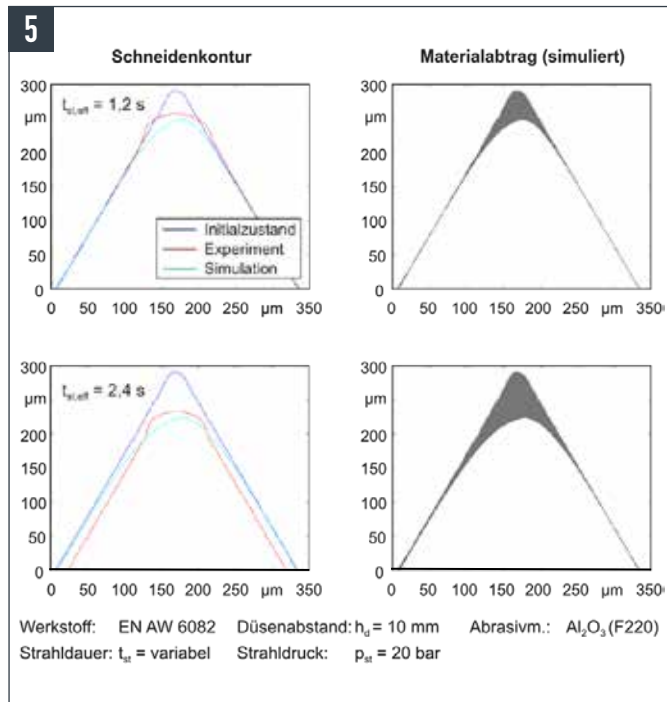
**Bild 4** • Bestimmung des idealisierten Ausgleichsprofils für die Simulation

Die Kalibrierung des Materialabtragsmodells erfolgt an einer ebenen Probengestalt mit einem senkrecht auf die Probe einfallenden Strahl. Dies hat Vorteile gegenüber der Bestimmung des Materialabtrags ausschließlich durch Strahlversuche an einer Kante, da die Intensitätsverteilung des Abrasivstrahls räumlich aufgenommen werden kann. Im vorliegenden Fall weist die Strahldüse einen Öffnungsdurchmesser von  $d_{\text{öff}} = 5\text{ mm}$  auf. Um den Materialabtrag beim abrasiven Nassstrahlspanen in Abhängigkeit der Strahldauer zu quantifizieren, ist die Aluminiumlegierung EN AW 6082 eingesetzt worden. Die Proben wurden vor den Strahlversuchen flachgeschliffen und nach der Versuchsdurchführung mithilfe eines konfokalen Weißlichtmikroskops der NanoFocus AG vermessen. Das in Bild 3 dargestellte farbcodierte Höhenbild lässt die Intensität des Materialabtrags klar erkennen.

Der Einflussbereich des Strahls auf der Probe ist klar begrenzt. Aufgrund der Aufweitung des Strahls ist der Durchmesser des erkennbaren Einflussbereiches größer als der der Düsenöffnung. Infolge der Erhöhung der Strahldauer nimmt der Materialabtrag zu. Ausgehend vom Randbereich der gestrahlten Fläche steigt der Materialabtrag in radialer Richtung zunächst an und nimmt zum Mittelpunkt des Strahls wieder ab. Auffällig ist, dass die Intensität des Materialabtrags nicht über den kompletten Einflussbereich identisch ist, sondern bei allen gestrahlten Werkstücken ein lokales Maximum des Materialabtrags im bearbeiteten

Bereich erkennbar ist. Dies lässt den Schluss zu, dass entweder das Abrasivmedium nicht gleichmäßig über den Strahldurchmesser verteilt ist oder dieser Effekt durch turbulente Strömungen auftritt. Für die Modellierung des numerischen Strahls wird als Vereinfachung eine axial-symmetrische Verteilung des Materialabtrags entlang des Durchmessers angenommen. Hierzu wurde ein idealisiertes Profil nach der in Bild 4 dargestellten Methodik verwendet.

Zunächst ist der Mittelpunkt des Strahlbilds sowie dessen Kontur für jede Probe bestimmt worden. Im Anschluss ist eine Anzahl an Profilen zwischen der Umrisskontur und dem Mittelpunkt aus der Messung ausgegeben worden. Die Einzelprofile werden zu einem Ausgleichsprofil entlang des Radius verrechnet. Durch eine Spiegelung dieses Profils in der Mittelachse (vgl. Bild 4, rechts) entsteht ein idealisiertes Ausgleichsprofil. Dieses wird um die Mittelachse rotiert, wodurch ein idealisiertes Belastungsfeld entsteht. Das idealisierte Belastungsfeld beschreibt die Intensitätsverteilung des Strahls in Abhängigkeit von der x- und y-Koordinate. Über die Strahldauer kann das jeweils vorliegende lokale Zeitspanvolumen für das Materialabtragsmodell der Simulation bestimmt werden. Innerhalb der Simulation wird zu jedem diskreten Zeitschritt das aktuelle, lokale Zeitspanvolumen aus dem Belastungsfeld entnommen und die Daxelhöhe der Schneidkante um den entsprechenden Materialabtrag beschritten. Letztgenannte Größe wird über die Zeit-



**Bild 5** • Vergleich der experimentell erzeugten und simulierten Schneidkantenkontur in Abhängigkeit der Strahldauer

schrittweise in Verbindung mit dem lokalen Zeitspanvolumen und den geometrischen Abmessungen der Dixel der Schneidkante berechnet. Bei einer Erweiterung der Simulation um weitere Strahlparameter wäre es erforderlich, für jede Parameterkombination das charakteristische Ausgleichsprofil für den resultierenden Materialabtrag zu ermitteln.

### 2.1.1 Validierung

Um die Simulation zu validieren, sind Strahlversuche an zwei Aluminiumkanten durchgeführt worden. Der Abrasivstrahl wurde hierbei lotrecht einfallend der Winkelhalbierenden der Schneidkante zugeführt. Die Präparation erfolgte mit einer gleichbleibenden Strahlvorschubgeschwindigkeit von  $v_{f,st} = 10 \text{ mm/s}$ , aber einer unterschiedlichen Anzahl an Überläufen, sodass sich verschiedene Einwirkzeiten des Abrasivmediums ( $t_{st,eff}$ ) ergeben. Die Kanten wurden so gestrahlt, dass die Höhenveränderung des Profils infolge der Präparation im Verhältnis zur geschliffenen Ausgangsgestalt quantifiziert werden konnte. Die Messungen wurden an einem InfiniteFocus G5 der Alicona Imaging GmbH durchgeführt und sind zusammen mit den Simulationsergebnissen in Bild 5 aufgeführt.

In der Simulation ist ein Kantenstabilitätsfaktor eingeführt wurden. Auf Basis der Höhenwerte der angrenzenden Dixel wird die Intensität des Materialabtrages für jeden Dixel angepasst. Exponierte Bereiche erfahren hierdurch einen höheren Materialabtrag als flache oder konkave Stellen.

Es ist erkennbar, dass sowohl experimentell als auch simulativ ein hoher Versatz der Profilhöhe der Schneidkante auf Basis des Nassstrahlprozesses erfolgt. Bei kurzer Strahldauer ( $t_{st,eff} = 1,2 \text{ s}$ ) ist eine Annäherung

der simulierten zur experimentell erzeugten Schneidkantengestalt zu erkennen. Dies gilt insbesondere für die Höhendifferenz zwischen den Schneidenscheitelpunkten im Vergleich zur Ausgangsgestalt. Aufgrund des duktilen Materialverhaltens des Aluminiums kommt es im Bereich der Kante zu einer plastischen Deformation, die in der Simulation nicht berücksichtigt wird und an Schneidkanten aus Hartmetall aufgrund des sprödharten Materialverhaltens nicht zu erwarten ist. Auch bei längerer Strahldauer ist bei der Profilabflachung zwischen simulierter und experimentell erzeugter Schneidkantengestalt eine Übereinstimmung zu erkennen. Bei der Aluminiumkante ist darüber hinaus jedoch auch ein Einfluss auf die Flanken zu erkennen. Durch das abfließende Medium an den Kanten kommt es am realen Bauteil zu einem Materialabtrag, welcher die Flanken zurücksetzt. In der Simulation ist ebenfalls ein Materialabtrag an den Flanken zu erkennen, dieser ist jedoch deutlich geringer ausgeprägt und ist damit dem Materialabtragsverhalten beim abrasiven Nassstrahlspanen von Hartmetall deutlich ähnlicher. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass der Nassstrahlspanprozess zur Kantenpräparation simulativ abbildbar ist. Für einen realen Anwendungsfall der Hartmetallpräparation müsste demzufolge das simulierte Zeitspanvolumen und der lokal an der Schneidkante stattfindende Materialabtrag in weiteren Untersuchungen fokussiert werden.

## 3. Zusammenfassung und Ausblick

Der abrasive Nassstrahlspanprozess ist aufgrund seiner Möglichkeiten der flexiblen Prozessführung zur Präparation anspruchsvoll gestalteter Zerspanungswerkzeuge und Erzeugung komplexer Schneidkantengestalten geeignet. Da bei der Prozesseinrichtung ein erhebliches Bedienerwissen erforderlich ist, wäre ein Simulationstool wünschenswert, bei dem der Strahlprozess bereits im Vorfeld ausgelegt werden könnte. In der Folge können Einrichtungsversuche zur Schneidkantenpräparation deutlich reduziert werden. Der hier vorgestellte zweidimensionale Simulationsansatz zeigt, dass der Materialabtrag beim Nassstrahlspanen simuliert und die resultierende Mikrogestalt grundlegend vorhergesagt werden kann. Dabei wird die Interaktion von Schneidkante und Abrasivstrahl in einem Materialabtragsmodell durch das lokale Zeitspanvolumen nachgebildet und auf ein eindimensionales Dixelfeld aufgebracht. Das charakteristische Strahlbild und somit die Strahlintensitätsverteilung, welche sich in Abhängigkeit der Prozessparameter ändert, wird als Profil in der Simulation berücksichtigt. Generell ist eine grundlegende Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit dem Messergebnis an präparierten Kanten zu erkennen, welche sich insbesondere durch den Abstand der Schneidenspitzen zum Ausgangsprofil darstellt. Der Unterschied in der Kantengestalt, betreffend des Verrundungsprofils und des Flankenrücksatzes, kann auf das duktile Materialverhalten des Aluminiums zurückgeführt werden. Für die Übertragung der vorgestellten Ergebnisse auf den realen Anwendungsfall, der Präparation von Hartmetall-Zerspanungswerkzeugen, sind weitere experimentelle Untersuchungen sowie Entwicklungen und Modifikationen der Simulationsmethodik notwendig. So fehlt derzeit wesentliches Wissen in Bezug auf die Wirkung der Strahlintensitätsverteilung unter Variation der Strahlparameter sowie die resultierende Wechselwirkung zwischen dem abrasiven Strahl und dem Zeitspanvolumen an sprödhartem Hartmetall. Letzteres

bezieht sich dabei auch auf die Höhe des Materialabtrags und die Ausprägung der Kantengestalt, welche durch die Entwicklung geeigneter Kalibrierungsparameter in der Simulation untersucht werden muss. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die zeitliche Änderung der Schneidkante zu jedem Zeitpunkt von großem Interesse, um das Prozessergebnis in Form der Schneidkantengestalt grundlegend nachzuvollziehen. Dies ist in experimentellen Untersuchungen zum derzeitigen Stand der Technik nur durch sehr hohen Aufwand umzusetzen und zudem durch prozessseitige Zeitintervalle der Strahlzuführung begrenzt möglich.

#### Literatur

- [1] **Denkena, B., Biermann, D.:** Cutting edge geometries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **63** (2014) [2] 631–653, DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009
- [2] **Bassett, E., Kohler, J., Denkena, B.:** On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of manufacturing science and Technology* **5** (2012) [2] 108–126
- [3] **Wyen, C.-F.:** Rounded cutting edges and their influence in machining titanium, Dissertation, ETH Zürich, Zürich (2011)
- [4] **Horowitz, I.:** Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln. Handbuch über Strahltechnik und Strahlanlagen. Band 1: Grundlagen der Strahltechnik. Vulkan Verlag, Essen (1981)
- [5] **Biermann, D., Aßmuth, R., Schumann, S., Rieger, M., Kuhlenkötter, B.:** Wet abrasive jet machining to prepare and design the cutting edge micro shape. *Procedia CIRP* **45** (2016) 195–198, DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.071
- [6] **Biermann, D., Wolf, M., Aßmuth, R., Beer, N., Hartmann, H., Metzger, M., Kipp, M.:** Aktuelle Trends in der Schneidstoff- und Werkzeugentwicklung – Herausforderungen und Lösungen. In: Pulvermetallurgie: Effiziente Prozesse – besondere Eigenschaften, 2015, Kolaska, H., Danning, H., Gestrich, T. (Hrsg.), Heimdall-Verlag, Rheine, S. 85–110, ISBN: 978-3-939935-92-6
- [7] **Terwey, I.:** Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen (2011), ISBN: 978-3-8027-8766-9
- [8] **Altintas, Y., Kersting, P., Biermann, D., Budak, E., Denkena, B., Lazoglu, I.:** Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **63** (2014) 585–605