

Titel

Schartigkeit von Fräsern

IGF-Nr.: 20456 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)



Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner beim Institut:

Dipl.-Ing. Sascha Beblein
0511 / 762 18262
beblein@ifw.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20456 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Industrielle
Gemeinschaftsforschung



ALLIANZ
INDUSTRIE
FORSCHUNG



Ausgangssituation

Die Qualität von Zerspanwerkzeugen und deren Schneidkanten beeinflusst wesentlich ihre Leistungsfähigkeit im Einsatz. Die Qualität ist dabei das Resultat aus den Einzelschritten der Prozesskette für die Werkzeugherstellung. Dazu gehören in der Regel das Sintern bzw. Pressen der Rohlinge, das Schleifen, die Schneidkantenpräparation und die Beschichtung der Werkzeuge. Bereits nach dem Sintern oder dem Schleifen weisen die Schneidkanten der Werkzeuge häufig Mikrodefekte wie Ausbrüche oder Grate auf [TIK09]. Diese destabilisieren den Schneidkeil und es resultieren eine verminderte Standzeit, Werkstückqualität und Prozesssicherheit [TIK09]. Hieraus folgen steigende Werkzeugkosten und Fertigungszeiten. Zurückzuführen ist dies auf die erhöhte Wahrscheinlichkeit sporadischer Schneidkantenausbrüche durch lokal auftretende Spannungsspitzen an der Schneidkante. Die Schneidkante von Zerspanwerkzeugen wurde von [HEI51] für ideal scharfe Werkzeuge als die Verbindungslinie von Span- und Freifläche definiert. Für verrundete Werkzeuge wird derjenige Bereich als Schneidkante angesehen, in dem effektiver Span- und Freiwinkel, γ_{eff} und α_{eff} , von den nominellen Winkeln, γ und α , abweichen [DEN14]. Unter der Schartigkeit versteht man bei Zerspanwerkzeugen die Ungleichmäßigkeit entlang der Schneidkante. Sie stellt somit ein Maß für Mikro-abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie der Schneidkante dar und bewertet die Topographie der Schneidkante. Formabweichungen der Schneidkante werden nicht zur Schartigkeit gezählt. Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung der Kantenschartigkeit nach Heiß, die auf eine ideal scharfe Schneidkante bezogen ist [HEI51].

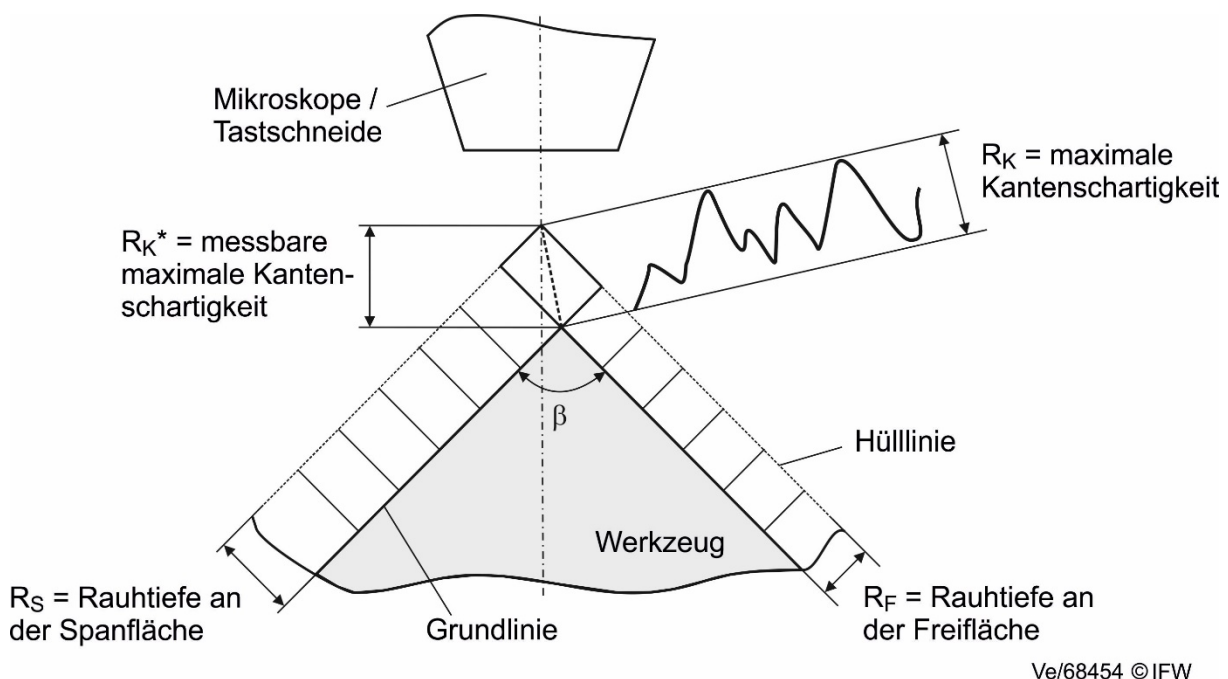


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schartigkeit [HEI15]

Nach dem Verrunden ist die ursprüngliche Definition der Schartigkeit nach [HEI51] nicht mehr anwendbar, da keine definierte Verbindungslinie zwischen Span- und Freifläche

mehr vorliegt, sodass Linienparameter nur eingeschränkt zur Beschreibung der Topographie der Schneidkante anwendbar sind. Daher wird im Folgenden die Schartigkeit als Begriff für die Abweichung der Topographie der realen von der idealen Schneidkantenmikrogeometrie aufgefasst.

Die Eignung der bisher verfügbaren Schartigkeitskennwerte ist unklar. Zudem ist der Einfluss der Schneidkantenschartigkeit in Wechselwirkung mit der Mikro- und Makrogeometrie der Werkzeuge auf das Einsatzverhalten bei der Zerspanung nicht hinreichend bekannt. Dabei sind sowohl das Verschleißverhalten als auch die resultierende Oberflächenqualität von der Schneidkantenschartigkeit abhängig.

Das Aufstellen eines Kennwertes, der eine prozess- und materialspezifische Bewertung der Schartigkeit vornimmt, ermöglicht eine gezielte Optimierung der Zerspanwerkzeuge. Ferner wird die Schartigkeit von Zerspanwerkzeugen heute zumeist am Ende der Prozesskette bewertet. Hierdurch bleiben die Entstehung der Schartigkeit und die Auswirkungen dieser auf den jeweiligen Folgeprozess in der Prozesskette ungeklärt. Eine Optimierung der einzelnen Prozessschritte auf Basis von prozess- und materialspezifischen Schartigkeitsgrenzwerten erfolgt in der Industrie in der Regel nicht. Daher sind Potentiale zur Verbesserung der Herstellungsprozesse und der Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen vorhanden. Der Kenntnissgewinn über den Einfluss der Schartigkeit auf das Zerspanergebnis und Einsatzverhalten der Werkzeuge, die Festlegung von prozess- und materialspezifischen Grenzwerten der Schartigkeit und die gezielte Optimierung der Prozesskette der Werkzeugherstellung sind damit von hohem industriellem und wissenschaftlichem Interesse.

Forschungsziel

Auf Basis des Stands der Technik sowie der Voruntersuchungen wird die Arbeitshypothese aufgestellt, dass *die Bewertung und Auslegung der Schneidkantenschartigkeit von Fräswerkzeugen eine Kenngröße erfordert, welche für das Verschleißverhalten des Werkzeugs charakteristische Merkmale der Schartigkeit berücksichtigt. Die Festlegung und Begrenzung der Schartigkeit einer derartigen Kenngröße erhöht die Leistungsfähigkeit und die Prozesssicherheit von Fräswerkzeugen.*

Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Kenntnis des Einflusses der Fräserherstellung auf die Schartigkeit und die Entwicklung einer Kenngröße, welche die Wirkung dieser auf das Einsatzverhalten beschreibt. Zur Erreichung des Hauptziels wurden die folgenden Teilziele definiert:

- Kenntnis des Einflusses der Prozesskette zur Herstellung von Fräswerkzeugen auf die Schartigkeit
- Kenntnis des Einflusses der Schartigkeit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Fräsen

- Entwicklung eines Kennwerts, welcher auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen das Einsatzverhalten in Abhängigkeit charakteristischer Merkmale der Schartigkeit abbildet
- Erstellung eines Leitfadens für die Industrie

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Einfluss der Fräserherstellung auf die Schneidkantenschartigkeit

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden als wesentliche Prozessschritte der Werkzeugherstellung das Schleifen, die Schneidkantenpräparation und der Beschichtungsprozess sowie die Schichtnachbehandlung hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Schartigkeit und die Mikrogeometrie der Schneidkante untersucht. Dabei wurden die Fräswerkzeuge jeweils vor und nach den entsprechenden Prozessschritten analysiert.

Zur Messung der Form und Rauheit der Schneidkante kam das optische Form- und Rauheitsmessgerät Alicona Infinite Focus G5 zum Einsatz. Das Messgerät nutzt das optische Messprinzip der Fokusvariation und eignet sich daher insbesondere zur messtechnischen Erfassung komplexer Werkzeuggeometrien. Aufgrund der höheren geometrischen Auflösung wurden für ausgewählte Werkzeuge zusätzlich mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) vom Typ REM Zeiss EVO 60 REM-Analysen der Schneidkanten durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde der Einfluss der Prozesseinstellgrößen beim Fräterschleifen untersucht. Hierfür wurden rundgeschliffene Hartmetall-Rohlinge der Fa. Mapal Dr. Kress KG vom Typ HP920 mit einem Kobaltgehalt von 9 % und einem Durchmesser von $D = 12 \text{ mm}$ verwendet. Für die Schleifuntersuchungen kam eine 5-Achs-Werkzeugschleifmaschine vom Typ HELITRONIC VISION 400 L der Fa. Walter zum Einsatz. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Diamant-Schleifwerkzeuge mit einer Kornkonzentration von C100 ($4,4 \text{ Karat/cm}^3$) mit den Korngrößen D30 und D76 (FEPA Standard) eingesetzt. Für das Schleifen der Spannut wurden kunstharzgebundene und für die Stirn- und Umfangsbearbeitung hybridgebundene Schleifwerkzeuge verwendet. Zur Untersuchung des Einflusses der Prozesseinstellgrößen beim Schleifen wurden die Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit in je drei Stufen und die Korngröße des Schleifmittels in zwei Stufen basierend auf einem vollfaktoriellen Versuchsplan variiert. Zusätzlich wurde für eine ausgewählte Prozessparameterkombination der Einfluss der Schleifkinematik bei der Nut- und Umfangsbearbeitung untersucht. Da die Schartigkeit in der Regel einer stochastischen Verteilung entlang der Schneide unterliegt, wurden zur Quantifizierung der Mikrotopographie insgesamt vier Wiederholversuche durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Einfluss von Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit beim Schleifen auf den arithmetischen Mittenrauwert R_a entlang der Schneidkante unter Variation der Korngröße auf zwei Stufen. Die dargestellten Konturplots wurden mittels lokaler linearer Regression (LOWESS) erstellt und weisen RSME-Werte (engl. Root

Mean Square Error) von $0.01\text{ }\mu\text{m}$ auf. Eine der Haupteinflussgrößen auf die Qualität der Schneidkante stellt die Korngröße des Schleifmittels dar. Dabei führt eine Erhöhung der Korngröße von D30 auf D76 zu einem signifikanten Anstieg des Mittenrauheits um durchschnittlich 25 %. Hinsichtlich der Prozesseinstellgrößen ist lediglich ein untergeordneter Effekt auf die Rauheit zu verzeichnen.

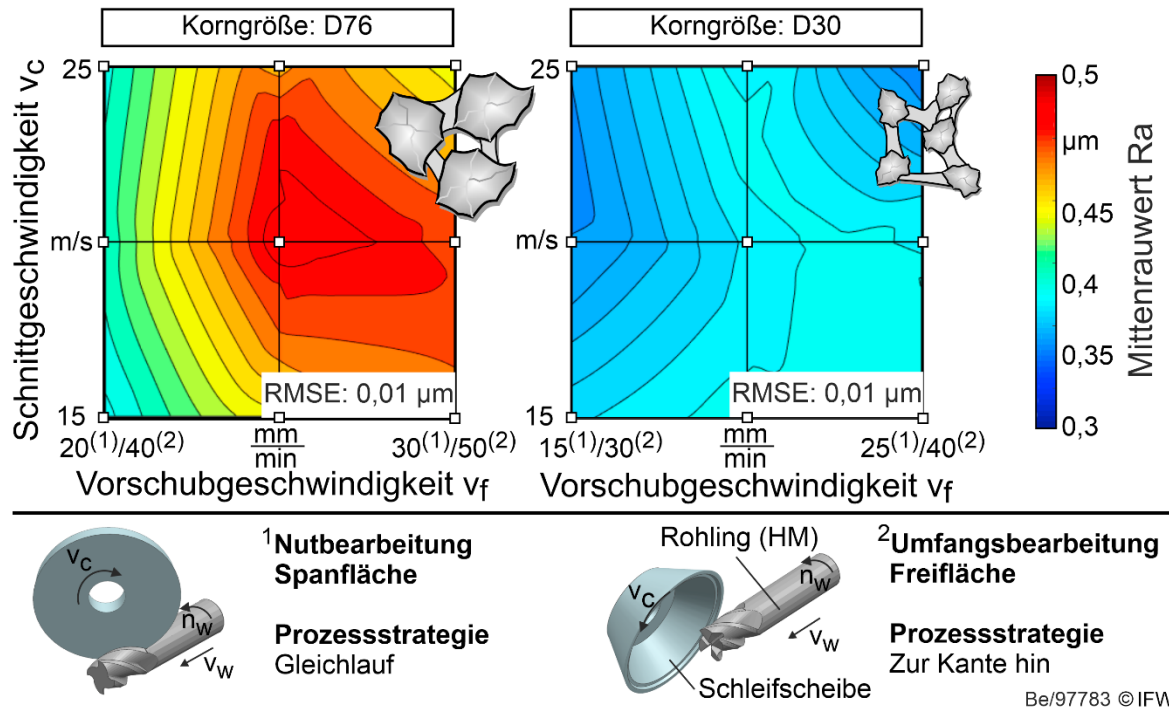


Abbildung 2: Einfluss der Prozessstellgrößen und der Korngröße beim Fräterschleifen

Die Prozessstrategie hinsichtlich der Kinematik der Schleifscheiben hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die betrachteten Rauheitsparameter (Abbildung 3). Im Folgenden wird die Kombination aus Gleichlaufschleifen bei der Nutbearbeitung und einer Trajektorie in Richtung der Kante bei der Umfangsbearbeitung als Strategie 1 und der umgekehrte Fall als Strategie 2 bezeichnet. Dabei zeigt die Orientierung des Schnittvektors beim Schleifen der Umfangsfreifläche einen erheblichen Einfluss auf die Ausprägung der mikrogeometrischen Schneidkantengestalt. So ist eine Trajektorie des Schleifkorns, welches an der Schneidkante in das Substrat eindringt, für die Kantenrauheit günstig. Das schneidkantennahe Material erfährt dabei eine Stützwirkung und ist Druckspannungen ausgesetzt, die der Rissinitiierung entgegenwirken. Demgegenüber bewirkt eine umgekehrte Trajektorie, ausgehend von der Freifläche in Richtung Schneidkante, eine Reduzierung der Oberflächenqualität. Darüber hinaus besitzt Hartmetall herstellungsbedingt eine geringe Zugfestigkeit, sodass die beim Kornaustritt induzierten Zugspannungen die Bildung von Spannungsrissen begünstigen. Der Einfluss der Freiflächenbearbeitung überwiegt dabei dem Einfluss der Nutbearbeitung. So war bei Änderung von Gleich- zu Gegenlaufschleifen lediglich eine geringe Erhöhung der Kantenrauheit zu beobachten.

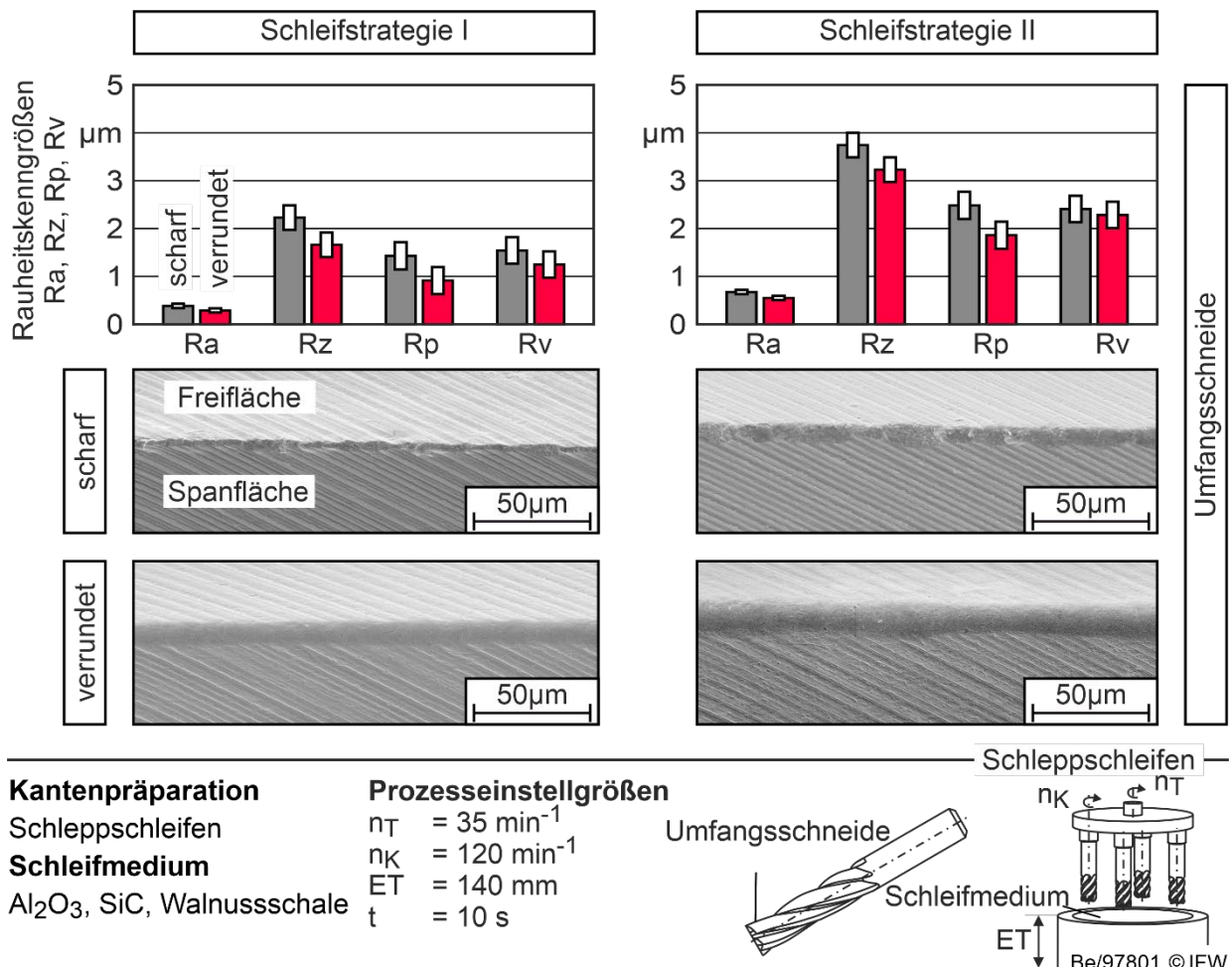


Abbildung 3: Einfluss der Schleifstrategie und der Kantenpräparation auf die Rauheit entlang der Schneidkante

Im zweiten Schritt wurden der Einfluss des Ausgangszustands der Werkzeuge nach dem Schleifen sowie der Einfluss der Schneidkantenpräparation auf die Schartigkeit untersucht. Das Verrunden der Schneidkanten erfolgte dabei mittels Schleppscheifen bei der Fa. Surcoatec Deutschland GmbH. Hierzu wurden auf Basis der bisherigen Erkenntnisse gezielt Werkzeuge mit unterschiedlicher Schartigkeit geschliffen und anschließend unter Variation der Prozessdauer (30 s, 60 s) beim Schleppscheifen präpariert. Es ist festzuhalten, dass neben dem Schleifen ebenfalls die Kantenpräparation durch Schleppscheifen die Kantenrauheit signifikant beeinflusst. Dabei werden die Werte der Rauheitskenngrößen um bis zu 25 % verringert (Abbildung 3).

Die Kantenrauheit wird dabei unabhängig von der Ausgangsrauheit reduziert. Allerdings wird die Rauheit entlang der Schneidkante durch den Zustand der Schneidkante vor dem Schleppscheifen beeinflusst. Diesbezüglich konnte gezeigt werden, dass eine unterschiedliche Anfangsrauheit durch diese Art der Kantenpräparation mit den gewählten Prozessparametern nicht zu egalisieren ist und nach der Kantenpräparation weiterhin Unterschiede in den Rauheitskenngrößen vorliegen.

Um den Einfluss des Präparationsverfahrens auf die Schartigkeit zu analysieren, wurden darüber hinaus Fräswerkzeuge mit einem am IFW entwickelten Verfahren verrundet. Dabei erfolgte die Präparation mithilfe nachgiebiger Polierwerkzeuge auf einer 5-Achs-Bearbeitungsmaschine vom Typ Ultrasonic 10 der Firma Sauer. Mithilfe des Polierverfahrens als Alternative zum Schleppscheifen kann die Kantenrauheit bei vergleichbaren initialen Rauheiten ($R_a = 0,29 - 0,32 \mu\text{m}$) in Abhängigkeit der Prozesseinstellgrößen um 17 – 30 % bzgl. des arithmetischen Mittenrauheitswerts reduziert werden. Somit zeigen beide Verfahren Potential zur Erhöhung der Schneidkantenqualität. Allerdings ist bei den polierten Werkzeugen eine periodische Riefenbildung entlang der Schneidkante und eine höhere Rauheit zu verzeichnen, die auf die Prozesskinematik zurückzuführen ist, dargestellt in Abbildung 4.

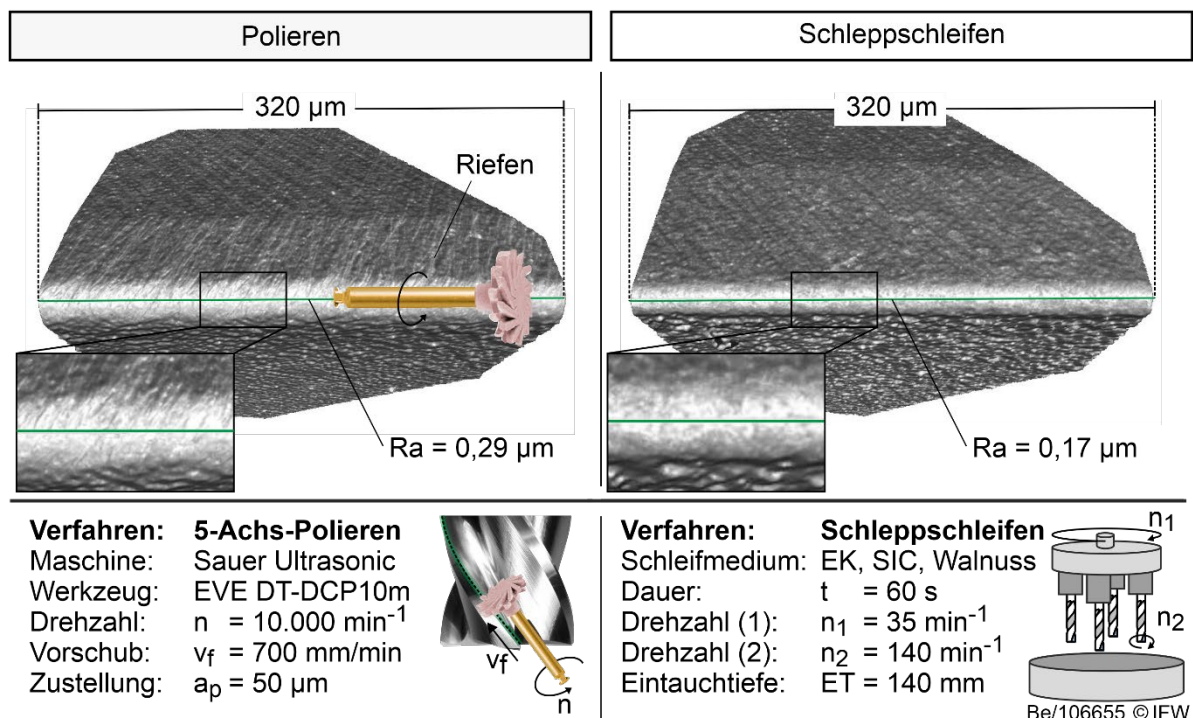


Abbildung 4: Einfluss der Präparationsverfahren auf die Mikrotopografie entlang der Schneidkante

Es wurde bereits gezeigt, dass eine unterschiedliche initiale Rauheit durch das Schleifen mit den gewählten Prozessparametern nicht ausgeglichen werden kann und dass Unterschiede in den Rauheitsparametern auch nach der Kantenpräparation bestehen bleiben. Dieser Effekt wurde ebenfalls bei Erhöhung der Prozessdauer des Schleppscheifens von $t = 10 \text{ s}$ auf $t = 30 \text{ s}$ und $t = 60 \text{ s}$ beobachtet (Abbildung 5). Darüber hinaus hat die initiale Schneidkantenrauheit einen signifikanten Einfluss auf die Schneidkantenverrundung. Die resultierende Schneidkantenverrundung betrug $25 \pm 3 \mu\text{m}$ bei Schleifstrategie 2 (hohe Rauheit) und $18 \pm 3 \mu\text{m}$ bei Schleifstrategie 1 (niedrige Rauheit). Im Gegensatz dazu zeigte die Prozessdauer beim Schleppscheifen nur einen geringen Einfluss auf die Größe der Schneidkantenverrundung.

Bei Betrachtung der gesamten Prozesskette wird die Mikrotopografie sowie die Größe und Form der Schneidkante am stärksten durch die Schneidkantenpräparation mittels Schleppscheiben beeinflusst (Abbildung 5).

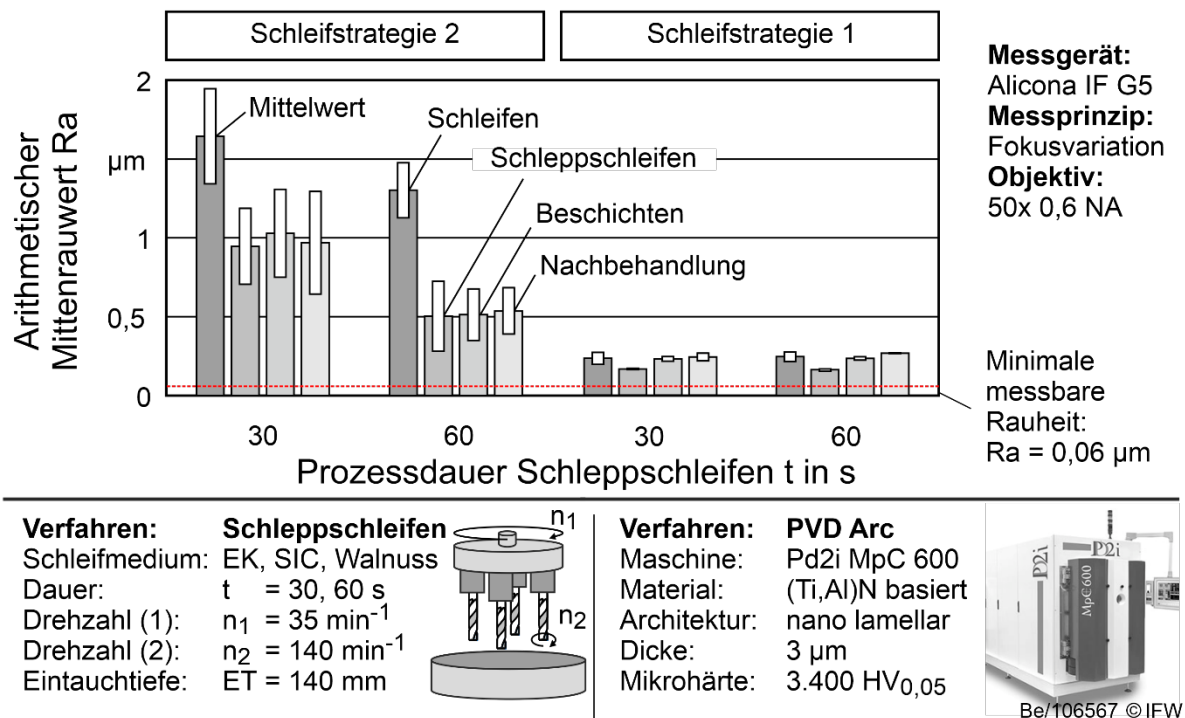


Abbildung 5: Einfluss der untersuchten Prozessschritte beim Fräuserschleifen auf den arithmetischen Mittenrauwert Ra

Analog zu den Ergebnissen in Abbildung 3 ist dabei ebenfalls eine signifikante Reduzierung der Kantenrauheit zu verzeichnen. Der Grad der Reduzierung ist dabei von der initialen Kantenrauheit und der Prozessdauer des Schleppscheifens abhängig. Bei einer Dauer von 30 s ist ein Absinken des arithmetischen Mittenrauwerts bei Ra > 1 µm (nach Schleifen) um durchschnittlich 42 % und bei Ra < 0,5 µm (nach Schleifen) um durchschnittlich 29 % zu verzeichnen. Bei Erhöhung der Prozessdauer steigt der Reduzierungsgrad auf 33 % (nach Schleifen: Ra < 0,5 µm), bzw. 61 % (nach Schleifen: Ra > 1 µm). Folglich liegt bei hohen Kantenrauheiten ein höheres Potential zu Verbesserung der Schneidkantenmikrotopografie vor. Dies ist auf den vorliegenden Skaleneffekt bzgl. der beim Schleifen eingebrachten Unregelmäßigkeiten und der Größe des Abrasivmediums zurückzuführen. Beispielsweise resultieren beim Schleifen im Gegenlauf Gestaltabweichungen höherer Ordnung, die beim Schleppscheifen mithilfe des Schleifmediums nivelliert werden. Allerdings existiert ebenfalls, aufgrund der Größe des eingesetzten Abrasivmediums, eine technologische Prozessgrenze von Ra = 0,16 µm hinsichtlich der erreichbaren Mindestrauheit.

Abschließend wurde der Einfluss des Beschichtungsprozesses und der Schichtnachbehandlung untersucht. Hierzu wurde eine marktverfügbare nanolaminare (Ti,Al)N-Beschichtung mittels des PVD-Arc Verfahren synthetisiert. Die Schichtnachbehandlung erfolgte erneut mittels Schleppscheiben. Die Prozesseinstellgrößen bei der Beschichtung und Nachbehandlung wurden konstant gehalten. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der nachfolgenden Prozessschritte abhängig von der Schleifstrategie und der

erzeugten Kantenrauheit ist. Bei hohen Kantenrauheiten von $R_a > 1 \mu\text{m}$ (nach dem Schleifen) bzw. $R_a > 0,5 \mu\text{m}$ (nach dem Schlepps Schleifen) haben die Beschichtung und die Beschichtungsnachbehandlung durch Schlepps Schleifen nur einen geringen Einfluss auf die Kantenrauheiten. Im Gegensatz dazu kommt es bei niedrigen Kantenrauheiten von $R_a < 0,5 \mu\text{m}$ zu einer deutlichen Erhöhung der Kantenrauheiten durch den Beschichtungsprozess. Dies führt zu Rauheitswerten, die betragsmäßig dem Rauheitsniveau nach dem Schleifen entsprechen. Die Ursache für diesen Unterschied konnte bei den Untersuchungen nicht schlüssig identifiziert werden.

Einfluss der Schneidkantenschartigkeit auf den Werkzeugverschleiß

Zur Analyse des Einflusses der Schartigkeit auf den resultierenden Werkzeugverschleiß wurden sechs Fräswerkzeuge mit geringer Kantenrauheit ($R_a = 0,19 - 0,28 \mu\text{m}$) und acht Fräswerkzeuge mit erhöhter Kantenrauheit ($R_a = 1,1 - 1,961 \mu\text{m}$) mittels Schleifen hergestellt, nachfolgend mittels Schlepps Schleifen verrundet und abschließend beschichtet.

Die Einsatzuntersuchungen wurden beim Stirn-Umfangsplanfräsen im Teilnutenschnitt (Gleichlauf) unter Verwendung von KSS (Blaser Vasco6000, 10 % Emulsion) auf dem 4-Achs Bearbeitungszentrum Heller MCi16 durchgeführt. Als Werkstoff wurde der Vergütungsstahl 42CrMo4-QT verwendet. Die Untersuchungen wurden mit konstanten Prozesseinstellgrößen ($v_c = 200 \text{ m/min}$, $f_z = 0.1 \text{ mm}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 7.5 \text{ mm}$) durchgeführt.

Die Analyse des Verschleißverhaltens erfolgte prozessintermittierend zu definierten Einsatzzeiten. Zur qualitativen Bewertung der Verschleißausprägung und zur Identifikation der Hauptverschleißbereiche wurden im ersten Schritt lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Aufgrund der vorliegenden Verschleißausprägung wurde als zielführende quantifizierbare Größe zur Analyse des Verschleißverhaltens das Verschleißvolumen gewählt. Für dessen Bestimmung erfolgte anschließend eine optische dreidimensionale Vermessung der verschleißbehafteten Bereiche mithilfe des Alicona Infinite Focus G5. Nachfolgend wurden unterschiedliche Auswertungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Bestimmung des Verschleißvolumens evaluiert. Ein Softwaremodul des verwendeten Messgeräts bietet die Möglichkeit einer sogenannten Differenzmessung, die einen quantitativen Vergleich zweier Messdatensätze auf Basis ihrer Volumendifferenzen ermöglicht. Die Software bestimmt sowohl ein Volumen oberhalb als auch unterhalb des Referenzprofils. Hierbei ist zunächst die Angabe eines Fehlerschwellenwerts durch den Bediener erforderlich, der allerdings in großem Maße das bestimmte Defektvolumen beeinflusst. Darüber hinaus ist die Auswertung mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Aufgrund dessen wurde eine alternative Methode zur Bestimmung des Verschleißvolumens entwickelt (Abbildung 6). Dabei wird das Mittelwertprofil der verschlissenen Schneidkante bestimmt und automatisiert am Referenzprofil der nicht verschlissenen Schneidkante ausgerichtet. Diese beiden Profile werden in Form von XY-Koordinatensätzen ausgegeben und zur automatisierten Bestimmung des Verschleißvolumens mithilfe der Software Matlab herangezogen. Diese Methode bietet neben einer präzisen Bestimmung des Verschleißvolumens einen hohen Automatisierungsgrad,

wodurch eine hohe Anzahl an Fräswerkzeugen in kleinen Intervallen der Einsatzzeit betrachtet werden können.

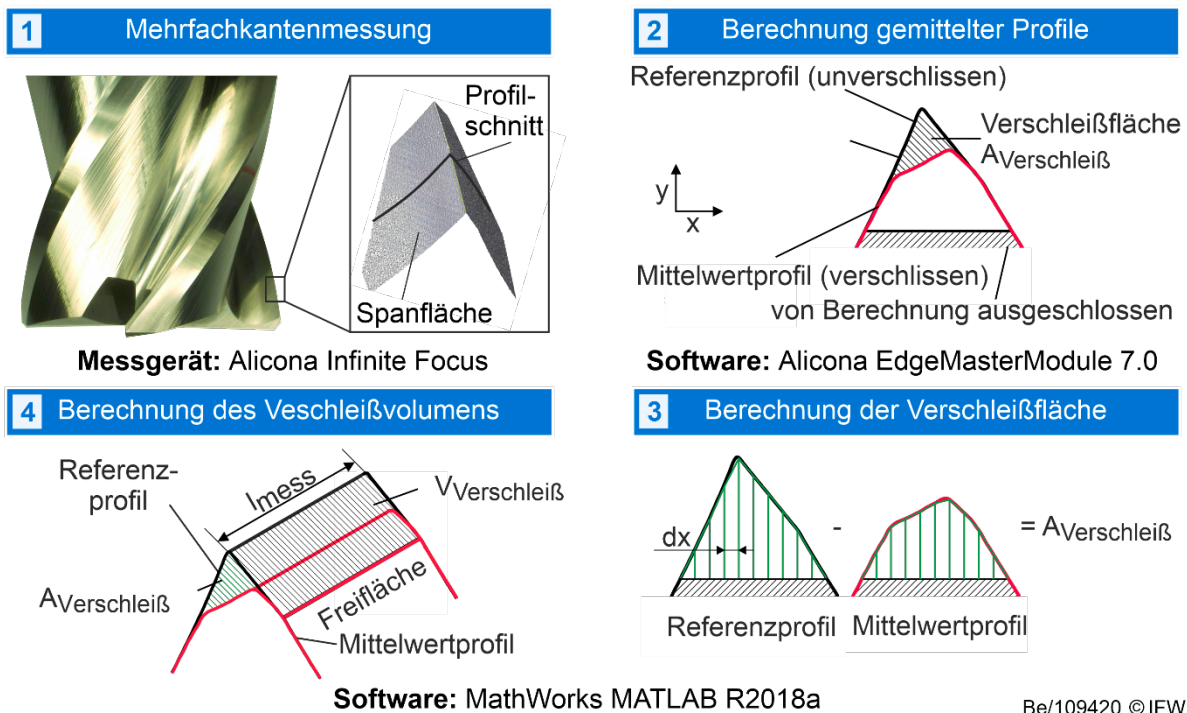


Abbildung 6: Methode zur Ermittlung des Verschleißvolumens

In Abbildung 7 ist das Verschleißverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge in Abhängigkeit des mittleren Schneidkantenabschnitts sowie des arithmetischen Mittenrauheits dargestellt. Anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen ist ersichtlich, dass der zugrundeliegende Verschleißmechanismus maßgeblich von der Schneidkantenverrundung beeinflusst wird. Die Schneidkantenverrundung bestimmt dabei die Stabilität der Schneidkante und somit den Widerstand gegenüber Schneidkantenausbrüchen. Bei Erhöhung der Schneidkantenverrundung von $18 \mu\text{m}$ auf $36 \mu\text{m}$ nimmt die Wahrscheinlichkeit sporadischer Schneidkantenausbrüche deutlich ab. So ist bei Einsatz mittlerer Schneidkantenverrundungen von $\bar{S} > 20 \mu\text{m}$ primär kontinuierlicher Verschleiß im Bereich der Schneidkantenverrundung zu verzeichnen. Bei Einsatz von Werkzeugen mit $\bar{S} > 20 \mu\text{m}$ wird der Verschleiß zusätzlich durch die Beschaffenheit der Schneidkante beeinflusst. Dabei lassen sich bereits durch eine simplifizierte Charakterisierung der Schartigkeit mithilfe des arithmetischen Mittenrauheits erste Aussagen über den zu erwartenden Verschleißmechanismus treffen. Grundsätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit eines diskontinuierlichen Werkzeugversagens durch Schneidkantenausbrüche bei Überschreitung des Grenzwerts $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ erheblich an. Allerdings ist eine exakte und statistisch abgesicherte Prognose des Verschleißvolumens anhand von amplitudenbasierten Rauheitskenngrößen, wie dem arithmetischen Mittenrauwert R_a nur bedingt möglich. Eine tiefergehende Analyse potentieller Kenngrößen zur Beschreibung der Schartigkeit erfolgt daher im nachfolgenden Kapitel.

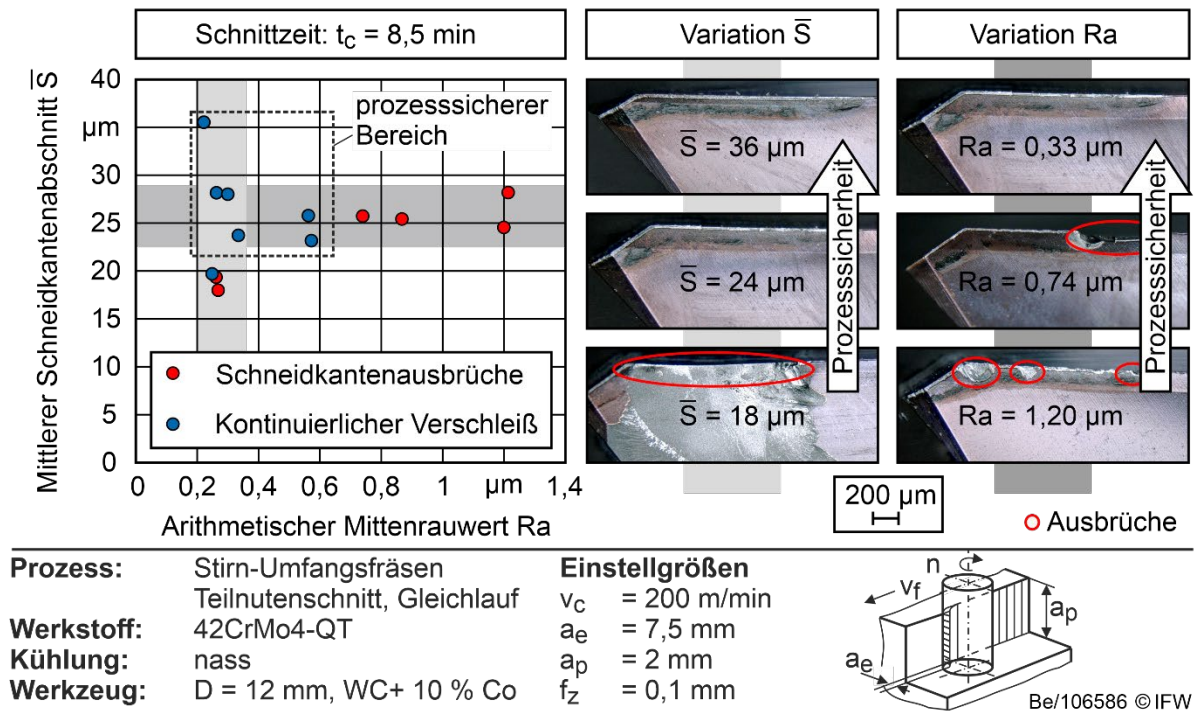


Abbildung 7: Verschleißverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge in Abhängigkeit des mittleren Schneidkantenabschnitts sowie des arithmetischen Mittenrauheits

Entwicklung eines Schartigkeitskennwerts

Die betrachteten Kenngrößen für die Schartigkeit sind in Abbildung 8 dargestellt.

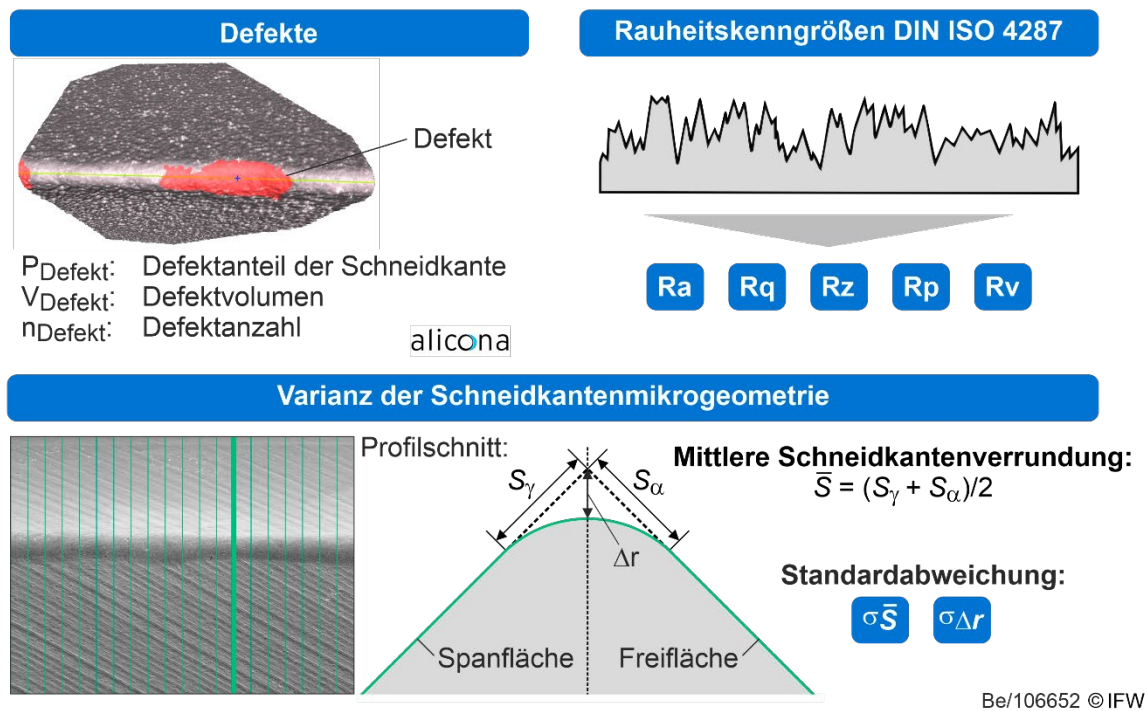
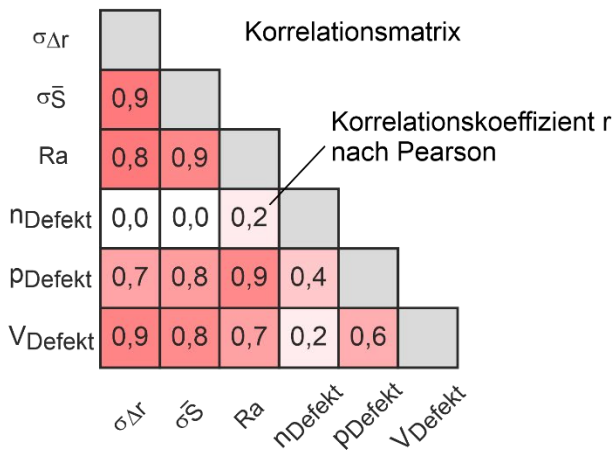


Abbildung 8: Übersicht potentieller Kenngrößen für die Schartigkeit

Zur Beschreibung der Schartigkeit wird grundsätzlich zwischen Rauheit und Defekten entlang der Schneidkante unterschieden. Defekte werden Fehlstellen verstanden, die bereits nach der Fräserherstellung vorliegen. Die Auswertung dieser Kennwerte erfolgte mit der zum EdgeMasterModule des Alicona Infinite Focus G5 gehörenden Softwareerweiterung EdgeQuality. EdgeQuality bietet eine vollautomatische Messung verschiedener Parameter zur Quantifizierung der Kantenqualität. Dabei werden neben zahlreichen Parametern zur Defektquantifizierung (Länge, Volumen, ...) auch die Rauheitskenngrößen nach DIN ISO 4287 ausgegeben. Als Schwellenwerte für die Defekterkennung wurde eine minimale Tiefe der zu erkennenden Defekte von $T_{\text{Defekt}} = 1 \mu\text{m}$ und ein minimaler Defektdurchmesser von $D_{\text{Defekt}} = 3 \mu\text{m}$ definiert. Wenn die Defekte nicht kreisförmig sind, was häufig der Fall ist, werden jene Fehlstellen, die flächenmäßig größer als ein Kreis mit dem definierten Defektdurchmesser sind, als Defekt erkannt. Zur Beschreibung der Schartigkeit wurden im Rahmen dieses Vorhabens das Defektvolumen V_{Defekt} , die Anzahl der Defekte entlang der Schneidkante n_{Defekt} und der Anteil des Schneidkeils P_{Defekt} , der Defekte aufweist, ausgewertet.

Schneidkanten, die nach dem Schleifen durch hohe Rauheiten gekennzeichnet sind, können nach der Schneidkantenpräparation signifikante Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Mikrogeometrie aufweisen. Diese betreffen die Größe der Schneidkantenverrundung sowie den Abstand Δr . Daher wurde zusätzlich die Varianz der Schneidkantenmikrogeometrie ermittelt. Hierzu wurden 100 Profilschnitte orthogonal zur Schneidkante erstellt. Die Charakterisierung der Schneidkantenmikrogeometrie erfolgte anschließend auf Basis des am IFW entwickelten K-Faktor-Modells. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden ausschließlich symmetrische Schneidkantenverrundungen betrachtet. Daher wurde die mittlere Schneidkantenverrundung $\bar{S}$ herangezogen. Als Maß für die Unregelmäßigkeit der Schneidkantenmikrogeometrie wurden abschließend die Standardabweichung der mittleren Schneidkantenverrundung $\sigma_{\bar{S}}$ und die Standardabweichung $\sigma_{\Delta r}$ abgeleitet.

Zur Ableitung eines zielführenden Schartigkeitskennwerts wurden die Messwerte der Einsatzuntersuchungen mittels statistischer Methoden ausgewertet. Hierfür wurden im ersten Schritt Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen den Rauheitskenngrößen und dem Verschleißvolumen berechnet. Der Wert der Pearson-Koeffizienten ist ein Maß für die Ausprägung eines linearen Zusammenhangs zwischen Messwerten. Für die Koeffizienten gilt $-1 \leq r \leq 1$. Bei $r = 0$ ist kein linearer Zusammenhang und für $r = 1$ ist ein perfekter linearer Zusammenhang zwischen den jeweiligen Größen festzustellen. Abbildung 9 zeigt die Korrelation zwischen den untersuchten Kenngrößen zur Beschreibung der Schartigkeit. Dabei ist ersichtlich, dass die Kenngrößen zur Defektquantifizierung V_{Defekt} und p_{Defekt} eine hohe Korrelation mit der Rauheit und der Varianz der Schneidkantenmikrogeometrie aufweisen.

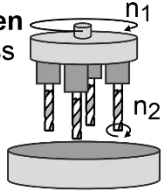


Messgerät:
Alicona IF G5
Messprinzip:
Fokusvariation
Objektiv:
50x 0,6 NA

Schwellenwerte für Defekterkennung:
Defektdurchmesser: 3 μm
Defekttiefe: 1 μm

Lateraler Messbereich:
0,32 mm

Verfahren: Schleppscheifen
Schleifmedium: EK, SIC, Walnuss
Dauer: t = 30, 60 s
Drehzahl (1): $n_1 = 35 \text{ min}^{-1}$
Drehzahl (2): $n_2 = 140 \text{ min}^{-1}$
Eintauchtiefe: ET = 140 mm

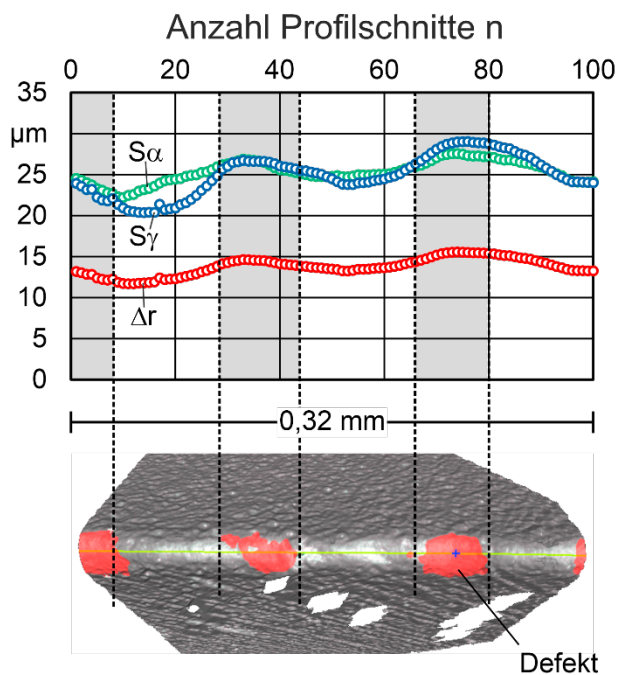


Verfahren: PVD Arc
Maschine: Pd2i MpC 600
Material: (Ti,Al)N basiert
Architektur: nano lamellar
Dicke: 3 μm
Mikrohärte: 3.400 HV_{0,05}



Abbildung 9: Korrelation potentieller Kenngrößen zur Beschreibung der Schartigkeit

Zur Erklärung dieses Sachverhalts werden in Abbildung 10 die Kenngrößen S_α , S_γ und Δr über die Anzahl der Profilschnitte aufgetragen und mit dem Ergebnis der automatischen Defekterkennung verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass die jeweiligen Minima und Maxima der Werte S_α , S_γ und Δr übereinstimmen. Zudem ist ersichtlich, dass jene Bereiche als Defekt identifiziert werden, die durch größere Schneidkantenverrundungen gekennzeichnet sind.



Messgerät:
Alicona IF G5
Messprinzip:
Fokusvariation
Objektiv:
50x 0,6 NA

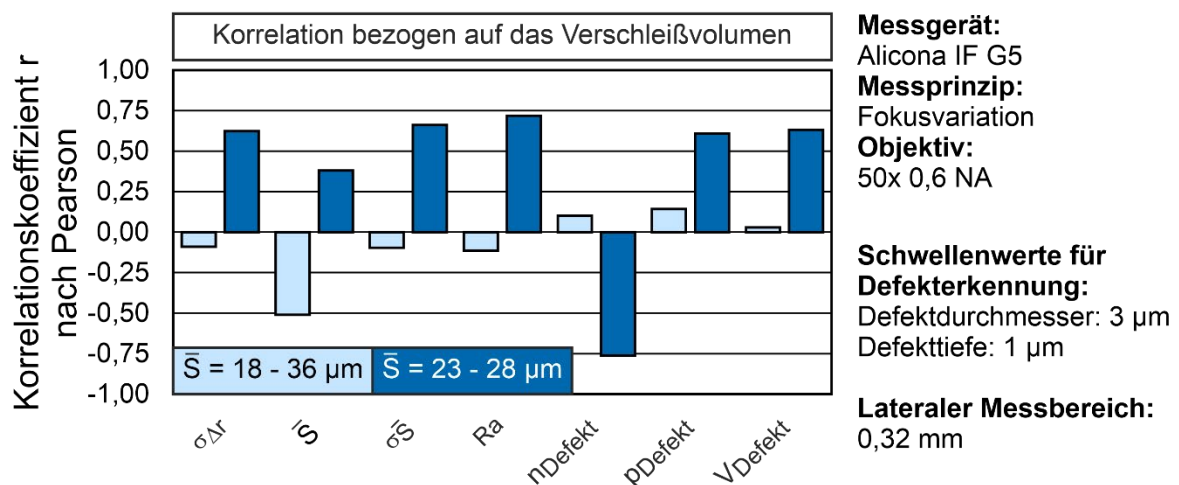
Schwellenwerte für Defekterkennung:
Defektdurchmesser: 3 μm
Defekttiefe: 1 μm

Lateraler Messbereich:
0,32 mm

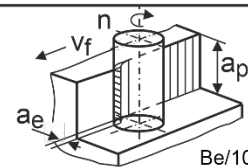
abgeleitete Kennwerte:
1. Standardabweichung $\sigma_{\bar{S}}$
2. Standardabweichung $\sigma_{\Delta r}$

Abbildung 10: Korrelation zwischen den Kenngrößen zur Charakterisierung der Schneidkantenverrundung und den defektbehafteten Bereichen entlang der Schneidkante

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die berechneten Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Schartigkeitskennwerten und dem mittleren Verschleißvolumen in Abhängigkeit des betrachteten Parameterbereichs der Schneidkantenverrundung. Hierbei ist ersichtlich, dass bei Eingrenzung des Parameterbereichs von $\bar{S} = 18 - 36 \mu\text{m}$ auf $\bar{S} = 23 - 28 \mu\text{m}$ insgesamt deutlich höhere Korrelationen berechnet werden, als bei Betrachtung des gesamten untersuchten Parameterbereichs. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Unterschreitung einer Mindestgröße der Verrundung von $\bar{S} = 20 \mu\text{m}$ die Schneidkantenstabilität, auch bei kleinstmöglicher Schartigkeit, deutlich absinkt und makroskopische Schneidkantenausbrüche resultieren. Dies belegt den dominanten Einfluss der Schneidkantenverrundung gegenüber der Schartigkeit.



Prozess:	Stirn-Umfräsen	Einstellgrößen
Werkstoff:	Teilnutenschnitt, Gleichlauf	$v_c = 200 \text{ m/min}$
Kühlung:	nass	$a_e = 7,5 \text{ mm}$
Werkzeug:	D = 12 mm, WC+ 10 % Co	$a_p = 2 \text{ mm}$
		$f_z = 0,1 \text{ mm}$



Be/106638 © IFW

Abbildung 11: Korrelation zwischen den Schartigkeitskenngrößen und dem Verschleißvolumen

Um einen geeigneten Parameter für die Schneidkantenausbrüche zu ermitteln, wurden für Werkzeuge mit Schneidkantenverrundungen von $\bar{S} = 23 - 28 \mu\text{m}$ funktionale Beziehungen zwischen dem Verschleißvolumen und den betrachteten Parametern abgeleitet. Zur Beurteilung der Anpassungsgüte wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet. Dies ist ein dimensionsloses Maß, das den Anteil der Variabilität in den Messwerten der abhängigen Variable (hier Verschleißvolumen) ausdrückt, der durch die unabhängigen Variablen vorhersagbar ist. In allen Fällen (außer bei der Fehleranzahl) kann der Zusammenhang zwischen den Schneidkantenausbrüchen und dem Verschleißvolumen durch eine logarithmische Funktion angenähert werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 12 (rechts) für das Defektvolumen dargestellt. Unter der Annahme eines logarithmischen Zusammenhangs wurde für das Defektvolumen die höchste Anpassungsgüte mit $R^2 = 0,77$ ermittelt, dargestellt in Abbildung 12 (links). Unter Ausschluss des in Abbildung 12 (rechts) markierten möglichen Ausreißers, zeigen die Datensätze ein eher lineares Verhalten. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße zeigen in diesem Fall ähnliche

Werte und Tendenzen, wie sie für einen logarithmischen Zusammenhang ermittelt wurden. Zur Charakterisierung der Schartigkeit wird daher das Defektvolumen empfohlen. Zur Vorhersage des Werkzeugverschleißes muss jedoch neben der Schartigkeit auch die Größe und Form der Schneidkantenverrundung berücksichtigt werden.

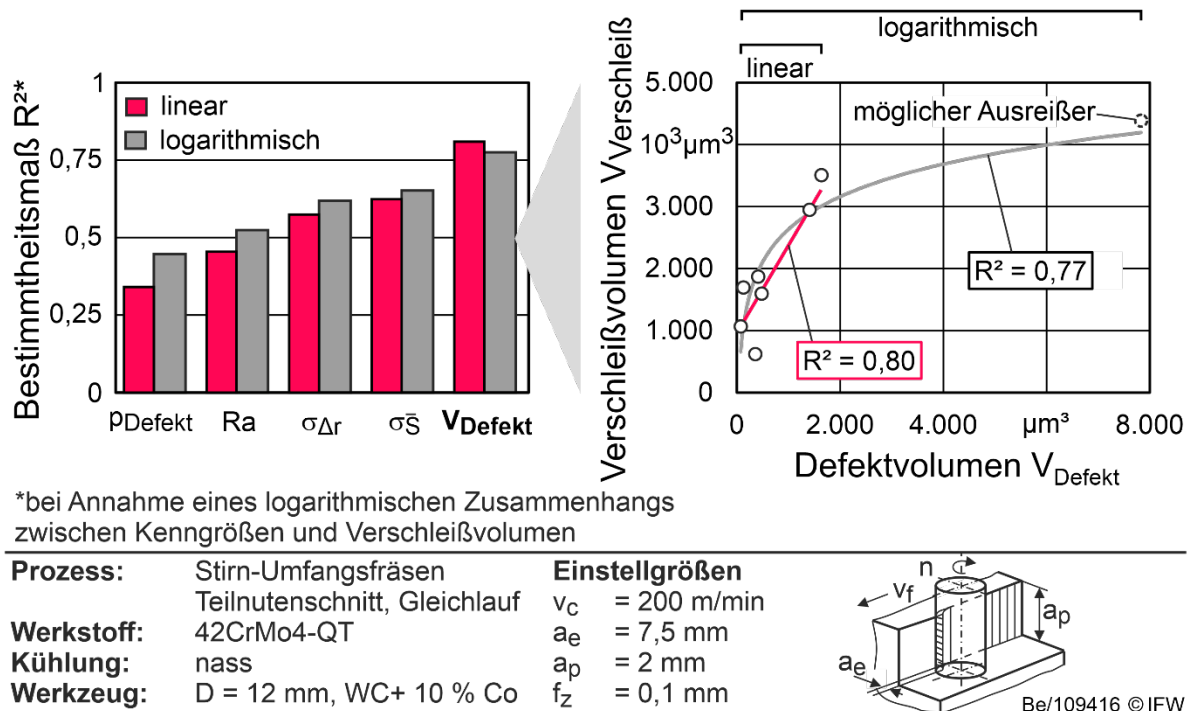


Abbildung 12: Bestimmtheitsmaße der abgeleiteten Zusammenhänge zwischen den potentiellen Schartigkeitskennwerten und dem Verschleißvolumen.

Der kombinierte Einfluss der Schartigkeit und der Schneidkantenmikrogeometrie auf das Verschleißvolumen ist in Abbildung 13 dargestellt. Zur Charakterisierung der Schartigkeit wurde das Defektvolumen herangezogen. Die Ausprägung der Defekte entlang der Schneidkante ist für ausgewählte Werkzeuge an den Eckpunkten des betrachteten Parameterbereichs in Abbildung 13 (rechts) dargestellt. Hierbei sind die Defekte rot markiert.

In Abbildung 13 (links) ist der Einfluss der Schneidkantenverrundung und des Defektvolumens auf das Verschleißvolumen als farblich codierte Antwortfläche dargestellt. Letztere wurde mithilfe kubischer Interpolation mit Stützpunkten auf Basis der Zerspanuntersuchungen erstellt. Hierbei ist ersichtlich, dass der Werkzeugschleiß bei Verringerung der Schneidkantenverrundung unter $\bar{S} = 20 \mu\text{m}$ oder bei Erhöhung des Defektvolumens deutlich ansteigt. Im Rahmen der Zerspanuntersuchungen wurde die höchste Verschleißresistenz bei einem Werkzeug mit minimalem Defektvolumen und einer Schneidkantenverrundung mit $\bar{S} = 24 \mu\text{m}$ festgestellt. Bei weiterer Erhöhung der

Schneidkantenverrundung war ein geringfügiger Anstieg des schneidkantennahen Verschleißes festzustellen, der auf die zunehmenden Ploughing-Effekte zurückzuführen ist.

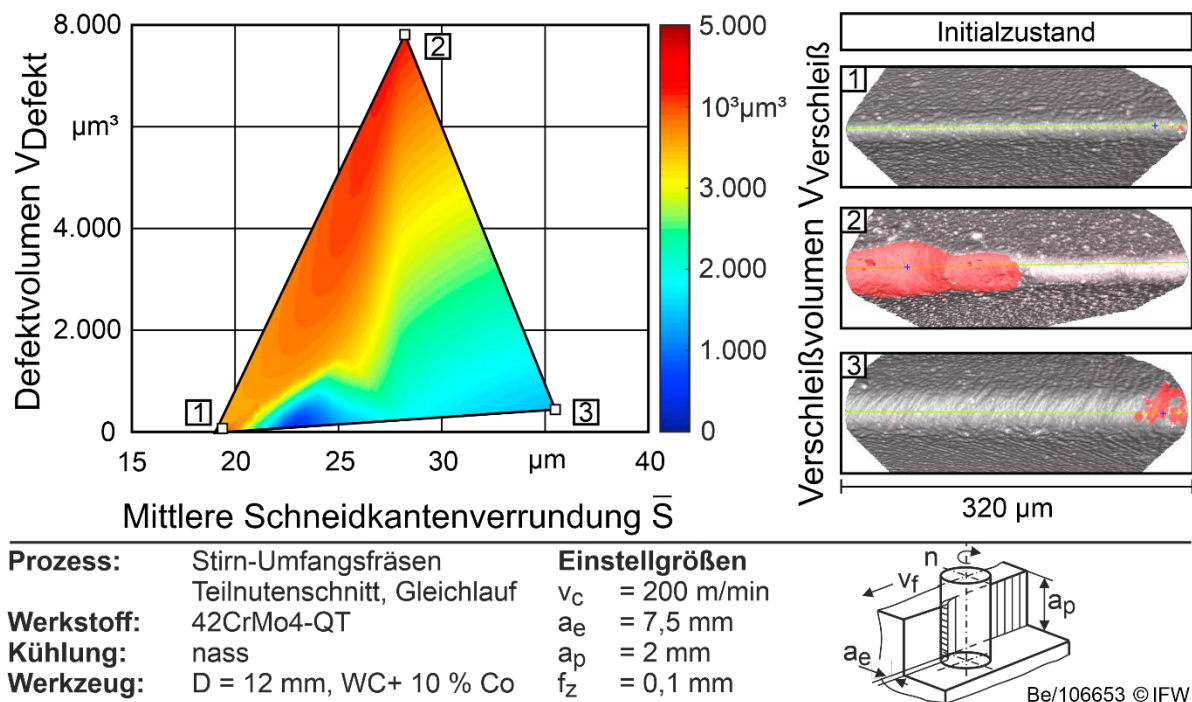


Abbildung 13: Verschleißvolumen in Abhängigkeit des Defektvolumens und der Schneidkantenverrundung

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde der Einfluss des Herstellungsprozesses von Schaftfräsern auf die Schartigkeit analysiert und ein Kennwert entwickelt, der die Auswirkung dieser auf das Einsatzverhalten beschreibt. Im ersten Schritt wurden die Prozessschritte der Werkzeugherstellung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Schartigkeit und die Mikrogeometrie der Schneidkante untersucht. Die Fräswerkzeuge wurden vor und nach den entsprechenden Prozessschritten vermessen. Beim Schleifen wurden als Haupteinflussgrößen die Korngröße des Schleifmittels und die Schleifstrategie identifiziert. Dagegen ist der Einfluss der Prozessparameter im untersuchten Parameterbereich von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub vernachlässigbar. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Rauheit entlang der Schneidkante durch die Schneidkantenpräparation um bis zu 61 % reduziert werden kann. Dieser Effekt wurde sowohl beim Schleppsleifen als auch beim Einsatz von nachgiebigen Polierwerkzeugen nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen allerdings ebenso, dass der Grad der Rauheitsreduzierung vom Ausgangszustand der Schneidkante abhängt. Gegenüber dem Schleifen und der Schneidkantenpräparation haben die Beschichtung und die Beschichtungsnachbehandlung durch Schleppsleifen nur einen geringen Einfluss auf die Schneidkantenqualität.

Basierend auf den Erkenntnissen zum Einfluss der Prozesskette wurden anschließend Fräswerkzeuge mit unterschiedlichen Schneidkantenqualitäten hergestellt und in Zerspanversuchen eingesetzt, um den Einfluss der Schartigkeit auf das Einsatzverhalten zu untersuchen. Hierbei wurde festgestellt, dass der Verschleißmechanismus, die Verschleißform und das Verschleißvolumen vor allem durch die Schneidkantenverrundung beeinflusst werden. Bei Verwendung von Schneidkantenverrundungen, die aufgrund ihrer Größe eine ausreichend hohe Stabilität aufweisen, wird der Verschleiß in hohem Maße durch die Schartigkeit beeinflusst. Dabei war erhöhte Neigung zu Ausbrüchen entlang der Schneidkante und damit eine signifikante Reduzierung der Prozesssicherheit zu beobachten.

Anschließend wurde die experimentelle Datenbasis mittels statistischer Methoden ausgewertet, um einen zielführenden Kennwert für die Schartigkeit abzuleiten. Dabei zeigte das initiale Defektvolumen die höchste Korrelation mit dem Verschleißvolumen. Das Defektvolumen wird daher als Kenngröße zur Charakterisierung der Schartigkeit empfohlen. Allerdings konnte ferner gezeigt werden, dass die Größe der Schneidenverrundung eine entscheidende Einflussgröße ist und für die Verschleißvorhersage ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei

Herrn Dipl.-Ing. Sascha Beblein, 0511 / 762 18262, beblein@ifw.uni-hannover.de

oder

Herrn Dr.-Ing. Alexander Krödel, 0511 / 762 2563, kroedel@ifw.uni-hannover.de

Literatur:

- [DEN14] Denkena, B., Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 63, Nr. 2, 2014, S. 631 – 653
- [HEI51] Heiß, A.: Schartigkeit von Werkzeugschneiden. Theorie und Messung derselben mittels Saphir-Messschneide. Werkstattstechnik und Maschinenbau 41, 1951, S. 233 – 238
- [TIK09] Tikal, F.; Bienemann, R.; Heckmann, L.: Schneidkantenpräparation - Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Universität Kassel, 2009