

Ressourceneffizientes Nachschleifen von Vollhartmetall- Fräswerkzeugen

IGF-Nr.: 19121 N

Forschungseinrichtung

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

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Tel.: 0511 762 – 19333

denkena@ifw.uni-hannover.de

An der Universität 2

30823 Garbsen

M. Sc. Mirko Theuer

Tel.: 0511 762 – 18283

theuer@ifw.uni-hannover.de

An der Universität 2

30823 Garbsen



Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen

Danksagung:

Das IGF-Vorhaben 19121 N (Ressourceneffizientes Nachschleifen von Vollhartmetall-Fräswerkzeugen) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. 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. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes. Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Einleitung

Vor allem in der Luftfahrtindustrie steigt der Anteil an Titanstrukturbauteilen rapide an. Bei der Herstellung dieser Bauteile ergibt sich eine hohe thermische sowie mechanische Belastung an der Schneidkante der verwendeten Vollhartmetallfräser. Die daraus resultierenden Standzeiten von 30 bis 60 Minuten in Verbindung mit den hohen Kosten eines Neuwerkzeugs führen in der Folge zu sehr hohen Werkzeugkosten pro Bauteil. Deshalb wird der Lebenszyklus eines Vollhartmetallfräsworkzeugs häufig durch eine Werkzeugregeneration in Form von Nachschleifprozessen verlängert (Bild 1). Die Bewertung des nachzuschleifenden Aufmaßes findet in der Regel jedoch auf Grundlage des optisch sichtbaren Verschleißes individuell durch einen Werksmitarbeiter statt. Durch diese subjektive Bewertung variieren Qualität und Ressourceneffizienz des Prozesses stark in Abhängigkeit der Erfahrung des Mitarbeiters. Neben einer mangelnden Ressourceneffizienz wurde in der industriellen Praxis außerdem festgestellt, dass die Standzeiten der nachgeschliffenen Fräser um bis zu 70% von den Standzeiten vergleichbarer Neuwerkzeuge abweichen. Dies ist auf eine unzureichende Entfernung von Mikroschädigungen und ungeeignete Schleifparameter im Nachschleifprozess zurückzuführen. Die im AIF-Projekt „Ressourceneffizientes Nachschleifen von Vollhartmetfall-Fräsworkzeugen“ (Fördernummer IFG-19121 N) durchgeführten Arbeiten beschäftigten sich mit der Optimierung dieses Wiederaufbereitungsprozesses. Hierzu wurden zunächst verschiedene quantitative und in die industrielle Praxis übertragbare Messverfahren zur objektiven Verschleißbestimmung an Vollhartmetallfräsworkzeugen untersucht. Im Anschluss wurde eine Empfehlung zur passenden Auswahl eines auf der Verschleißgröße basierenden Schleifaufmaßes hergeleitet. Abschließend wurde der Nachschleifprozess in Bezug auf die Prozessstellgrößen und die Schleifwerkzeugspezifikationen optimiert, sodass die Standzeit der nachgeschliffenen Fräser erhöht wird.

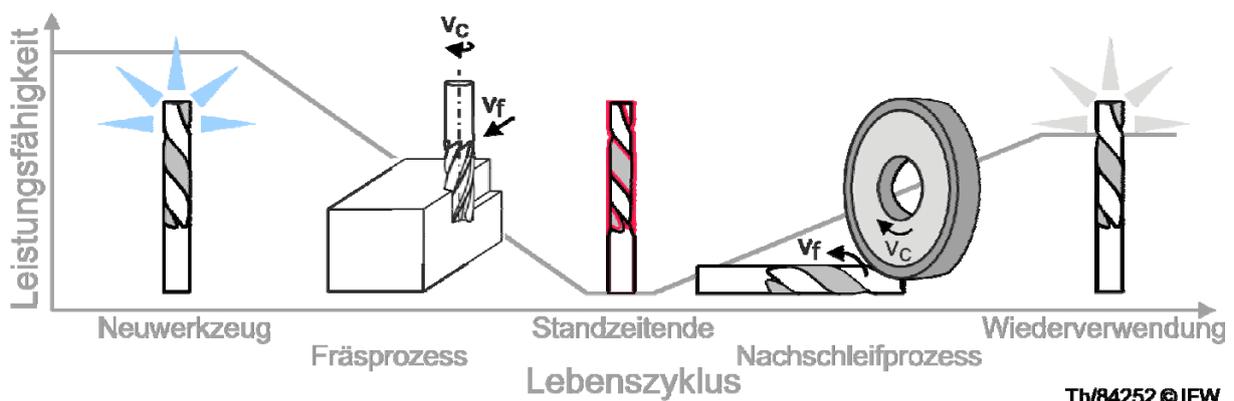


Bild 1. Lebenszyklus eines Fräsworkzeugs [DEN17a]

Verschleißmessung und Bestimmung des Schleifaufmaßes

Im Rahmen des Projekts wurde festgestellt, dass viele Messverfahren nicht für die industrielle Messung von Verschleißgrößen an Fräswerkzeugen in großer Stückzahl geeignet sind. Hierzu gehören beispielsweise Eigenspannungsmessungen oder laserbasierte Messverfahren, da diese entweder zu aufwendig sind oder aufgrund der komplizierten Schneidkantengeometrie ungenaue Ergebnisse liefern [DEN17a]. Insbesondere die laserbasierten Systeme neigen im schneidkantennahen Bereich zur Bildung optischer Artefakte, die eine quantitative Auswertung von Schädigungen unmöglich machen. Weitere Verfahren wie die Rauheitsmessung über ein Perthometer oder die Erstellung von Härtetiefenverläufen sind nicht zielführend, da diese nur unzureichend für die Bewertung von makroskopischen Schädigungen der Schneidkante geeignet sind. Zur Bestimmung makroskopischer Schädigungen in der industriellen Praxis wurden stattdessen zwei Geräte ausgewählt, die auf dem Messprinzip der Fokusvariation beziehungsweise der Streifenlichtprojektion basieren. Diese sind das Alicona Infinite Focus G5 sowie das Keyence VR 3000 Streifenlichtmikroskop. Das Infinite Focus G5 liefert hierbei durch das integrierte Softwaremodul zur Schneidkantenbewertung ausreichend Informationen zur Tiefe und Ausprägung oberflächlicher Schneidkantendefekte, sodass unmittelbar ein gezieltes Schleifaufmaß zur Entfernung der makroskopischen Ausbrüche bestimmt werden kann. Trotz des lokal begrenzten Aufnahmefelds des Mikroskops und der vergleichsweise langen Messdauer von 20 bis 30 Minuten bietet das Messsystem über dieses spezielle Auswertungsmodul mit dem Namen „Edge Master“ die Möglichkeit, Größe und Ausprägung von Schneidkantendefekte zu quantifizieren. Dabei wird der Defekt, wie in Bild 2 dargestellt, automatisch erkannt und als Messschrieb ausgegeben, indem u.a. das Defektvolumen, die Defektlänge entlang der Span- und Freifläche sowie andere defektbeschreibende Kennwerte ausgegeben werden.

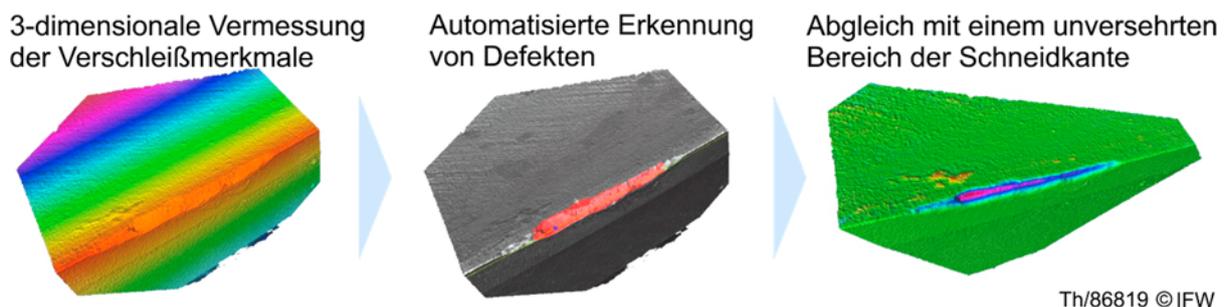


Bild 2: Messablauf und automatische Erkennung von Defekten mit dem Infinite Focus G5 [DEN17a]

Das ebenfalls untersuchte und auf dem Verfahren der Streifenlichtprojektion basierende Messgerät Keyence VR 3000 bietet mit Messzeiten unter einer Minute die Möglichkeit zur Erzeugung von dreidimensionalen Abbildern der Schneidkante. Das Messbild zeigt bei ungünstiger Positionierung des Fräswerkzeugs zwar teilweise Artefakte im Schneidkantenbereich. Aufgrund der kurzen Messzeiten kann die Messung jedoch auch in der industriellen Praxis kostengünstig und schnell wiederholt werden, bis ein artefaktfreies Bild erzeugt wurde. In das dreidimensionale Abbild des

Werkzeugs kann anschließend mit hoher Wiederholgenauigkeit eine Linie entlang der Schneidkante gelegt und ausgewertet werden. Durch einen Abgleich der Soll-Profillinie mit dem tatsächlich gemessenen Ist-Profil kann die maximale Schädigungstiefe entlang der Schneidkante ermittelt werden (Bild 3). Diese Messmethodik ist für die Auswertung von Defekttiefen sehr gut geeignet und kann zukünftig bei Bedarf durch Messgerätehersteller automatisiert werden, sodass eine manuelle Bedienung des Messgeräts nicht mehr erforderlich ist.

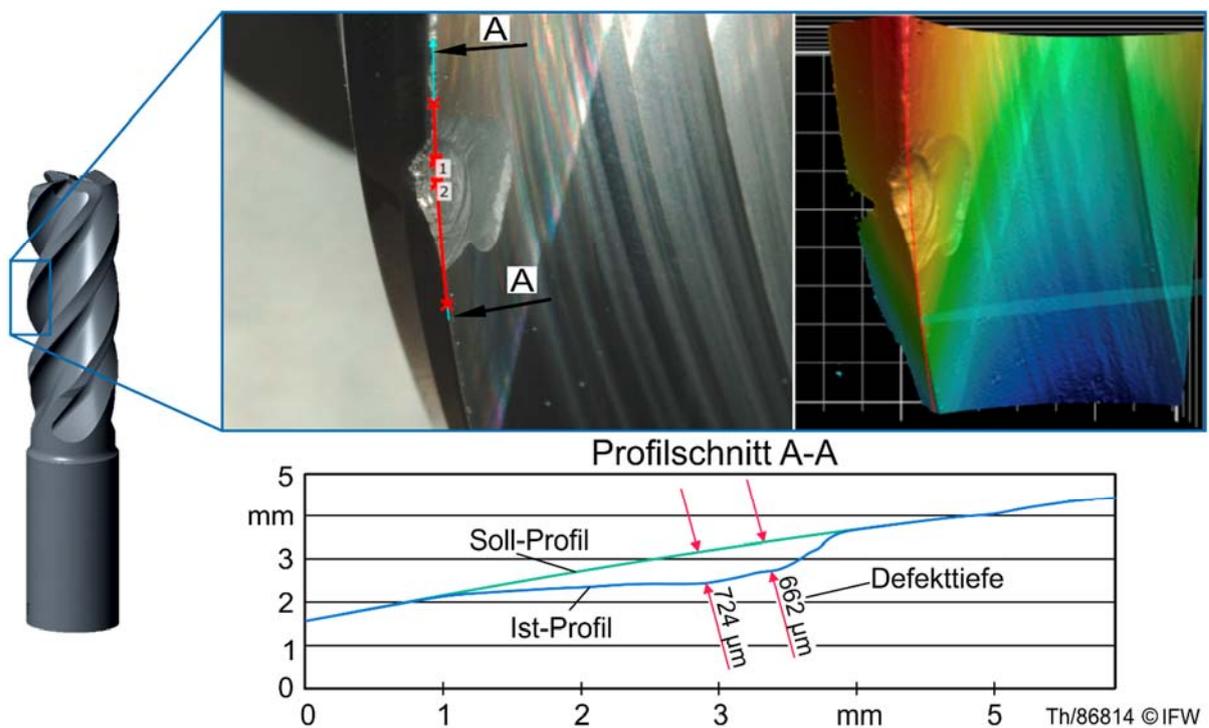


Bild 3: Messung und Auswertung von Schneidkantendefekten mit dem Keyence VR 3000 [DEN17b]

Zur Bestimmung eines geeigneten Schleifaufmaßes muss anschließend ein Zusammenhang zwischen der Defekttiefe an der Schneidkante und der Ausprägung der Defekte auf der Frei- und Spanfläche hergeleitet werden. Hierzu wurde die Schädigungsausprägung auf der Span- sowie Freifläche von 46 verschlissenen Fräswerkzeugen am Ort der jeweils größten Schädigung unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die hierbei ermittelten Kennwerte waren der im Fräserquerschnitt ermittelte Verschleiß entlang der Freifläche, der Verschleiß entlang der Spanfläche und die mit dem Keyence VR 3000 bestimmte, optisch gemessene Defekttiefe an der Schneidkante. Außerdem wurde die Länge von vorhandenen Mikrorissen sowie deren Abstand von der Frei- bzw. Spanfläche ausgewertet [DEN17b, DEN18a]. Das Auftreten dieser Risse mit Abmessungen von unter $0,5 \mu\text{m}$ war vorher nicht bekannt. Aufgrund mangelnder Entfernung dieser nicht sichtbaren Mikrorisse können jedoch die Standzeitschwankungen von in der industriellen Praxis nachgeschliffenen Werkzeugen erklärt werden. Bei der Auswertung der Mikrorisse hat sich gezeigt, dass das zur Entfernung der makroskopischen Ausbrüche notwendige und in Tabelle 1 dargestellte Schleifaufmaß

in der Regel groß genug ist, um alle auftretenden Mikrorisse prozesssicher zu entfernen. Somit ist das zur Entfernung der makroskopischen Schädigungen notwendige Schleifaufmaß als Bewertungsgröße hinreichend, solange ein Mindestaufmaß von 150 µm auf Span- und Freifläche eingehalten wird [DEN18a].

Tabelle 1: Empfohlenes Schleifaufmaß zur Entfernung von makroskopischen und mikroskopischen Schädigungen an Vollhartmetallwerkzeugen [DEN18a]

| Optisch gemessene Defekttiefe | Aufmaß Freifläche | Aufmaß Spanfläche |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| < 300 µm | 150 µm | 150 µm |
| > 300 µm | 50% von der Defekttiefe | 50% von der Defekttiefe |

Ressourceneffizienz des entwickelten Verfahrens

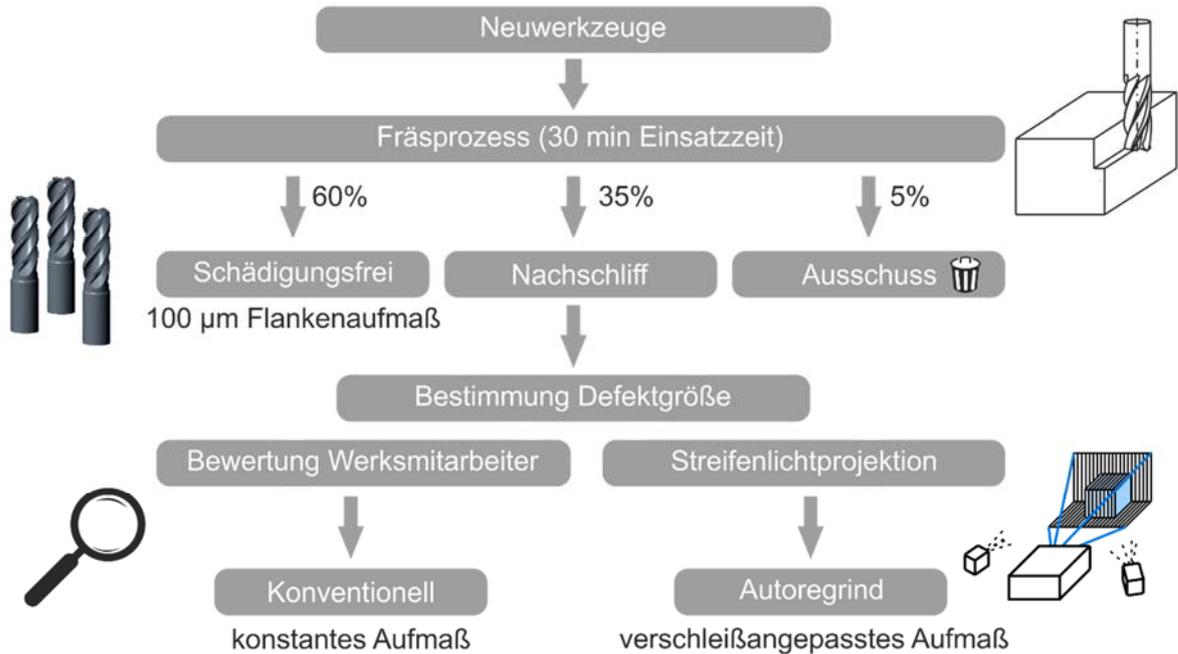
Um das Einsparpotential der neuen Aufmaßstrategie zu bewerten, wurden die verschlissenen Fräswerkzeuge jeweils mit der industriell üblichen Vorgehensweise durch einen Werksmitarbeiter eines Industriepartners bewertet und mit der neuen Methodik durch ein Keyence Streifenlichtmikroskop ausgewertet. Das mit der neuen Strategie hergeleitete Schleifaufmaß wurde folglich dem von einem Werksmitarbeiter ermittelten Aufmaß gegenübergestellt. Letzteres basiert auf dem Prinzip einer iterativen Vorgehensweise, bei der in Schritten von 500 µm die Spanfläche nachgeschliffen wird. Anschließend wird der Fräser erneut begutachtet und das Vorgehen solange wiederholt, bis sämtliche makroskopischen Schädigungen entfernt wurden. Somit werden Fräser bei Schädigungen mit einer Größe von über 500 µm mehrfach von einem Mitarbeiter geprüft und nachgeschliffen. Folglich wird die Bewertung mehrfach vorgenommen und das Schleifaufmaß nicht dynamisch angepasst, sodass die Kosten und die Wiederaufbereitungsdauer je Fräser ansteigen. Im Anschluss an die Entfernung der Schädigung erfolgt in der industriellen Praxis, zur Sicherstellung einer scharfen Schneidkante, ein zusätzlicher Nachschleifprozess mit jeweils 100 µm Aufmaß auf der Frei- und Spanfläche.

Hierbei hat sich gezeigt, dass bei ca. 63% der untersuchten Werkzeuge der spanflächenseitige Materialabtrag der industriellen Strategie deutlich höher ausfällt als bei der neu entwickelten Methodik, sodass ein höherer Ressourcenverlust resultiert. Zudem wurden zwei der von den Werksmitarbeitern untersuchten Werkzeuge als Ausschuss eingestuft, obwohl diese mit einem beidseitigen Aufmaß auf Span- und Freifläche noch innerhalb der Toleranz hätten nachgeschliffen werden können. Abschließend wurde festgestellt, dass bei der industriellen Strategie Mikrorisse im Hartmetall verbleiben können, wenn die Defekte größer als 600 µm sind. Dies ist auf das unabhängig von der Defektgröße nur sehr geringe Freiflächenaufmaß von 100 µm zurückzuführen. Dieses Aufmaß ist kleiner als das in den vorhergegangenen Untersuchungen zur Entfernung der Mikrorisse notwendige Mindestaufmaß [DEN18a]. Somit verbleiben bei Schädigungen mit einer Größe von über 500 µm möglicherweise Mikrorisse im schneidkantennahen Bereich, die im ungünstigsten Fall die Standzeit

der nachgeschliffenen Fräswerkzeuge reduzieren oder zum Werkzeugversagen führen.

Durch das gezielt an die vorliegende Schädigung angepasste Schleifaufmaß können bei Schädigungen bis zu einer Größe von 500 µm deutliche Ressourceneinsparungen durch die entwickelte Schleifstrategie erzielt werden. Hierbei wird so wenig Hartmetall wie möglich abgetragen und gleichzeitig sichergestellt, dass keine Schädigungen am Fräswerkzeug verbleiben. Zudem ist zu beachten, dass bei der konventionellen Strategie durch das hohe Spanflächenaufmaß der Zahn des Fräasers stärker geschwächt wird, sodass die Standzeiten der geschliffenen Fräser gegebenenfalls weiter reduziert werden. Im Gegensatz hierzu basiert die neu entwickelte Nachschleifmethodik auf einem symmetrischen Materialabtrag von Span- und Freifläche. Hierdurch verringert sich der Durchmesser des Fräasers stärker, jedoch wird die Zahndicke in geringerem Maße reduziert.

Innerhalb der untersuchten Stichprobe an verschlissenen Fräsern wiesen ca. zwei Drittel der Werkzeuge Schädigungen mit einer Defekttiefe von unter 500 µm und nur ein Drittel größere Beschädigungen auf. Diese statistische Größenverteilung wurde anschließend theoretisch auf einen industriellen Nachschleifprozess mit ca. 10.000 Fräsworkzeugen extrapoliert. Dabei wurde der in Bild 4 dargestellte Lebenszyklus mit den ebenfalls dargestellten Wahrscheinlichkeiten für Werkzeugausfall und Werkzeugnachschliff berechnet. Demnach werden 35 % der verschlissenen Fräsworkzeuge mit einem Aufmaß von mehr als 100 µm nachgeschliffen. Innerhalb dieser Gruppe wurde eine Schädigungsgrößenverteilung angenommen, die der Stichprobe an industriell verschlissenen Fräsworkzeugen entspricht. Auf Grundlage der Extrapolation wurde dabei festgestellt, dass bei einer vorgegebenen Durchmessererringerung von maximal 2 mm unter Verwendung der neu entwickelten Mess- und Bewertungsmethodik ca. 30% mehr Nachschleifoperationen im Vergleich zur konventionellen Nachschleifstrategie durchgeführt werden können.



Th/90423 © IFW

Bild 4: Lebenszyklus eines Vollhartmetallfräswerkzeugs in einem beispielhaften Industrieunternehmen und Änderung des Lebenszyklus durch das Projekt „Autoregrind“

Optimierung des Nachschleifprozesses

Der Schleifprozess selbst bietet ebenfalls ein großes Potential zur Optimierung, da in der industriellen Praxis Standzeitschwankungen von nachgeschliffenen Werkzeugen festgestellt wurden. Diese Schwankungen der Standzeiten liegen im Bereich von 30% bis 130% im Vergleich zu Neuwerkzeugen. Sie werden entweder durch verbleibende Mikroschädigungen am Fräswerkzeug oder durch ungeeignete Prozessstellgrößen beim Schleifen hervorgerufen, sodass ungünstige Zugeigenspannungen eingebracht werden. Deswegen wurde im Rahmen des Projekts weiterhin der Einfluss unterschiedlicher Stellgrößen beim Nachschleifen, wie z.B. die Schleifscheibenspezifikation und die Prozessstellgrößen, untersucht und optimiert. Abschließend wurden Fräsversuche durchgeführt, anhand derer die Standzeiten unterschiedlich nachgeschliffener Fräser ermittelt wurden. Dabei werden die industriell nachgeschliffenen Werkzeuge mit Neuwerkzeugen sowie mit solchen Werkzeugen gegenübergestellt, die mit den neu ermittelten, optimierten Stellgrößen des Schleifprozesses nachgeschliffen wurden. Somit wird der Einfluss des Nachschleifprozesses auf die Fräswerkzeugstandzeiten ermittelt und die Güte der unterschiedlichen Schleifverfahren bewertet.

Zunächst wurde der Einfluss unterschiedlicher Bindungstypen auf das Schleifergebnis beim Längs-Umfangs-Planschleifen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zusammenfassend in Bild 5 dargestellt. Die sehr hohen Werkstückrauheiten ($R_z > 5 \mu\text{m}$) bei der keramischen Bindung und die schlechten

Dämpfungseigenschaften der Metallbindung haben dabei zum Ausschluss dieser beiden Bindungskonzepte geführt. Die Hybrid- und Kunstharzbindung wurden aufgrund ihrer Vorteile hinsichtlich Rauheit und eingebrachten Druckeigenspannungen im Folgenden weitergehend untersucht. Die verschleißfestere Hybridbindung wird hierbei für den Nutentiefschliff eingesetzt, während die Kunstharzbindungen für die Umfangs- und Stirnbearbeitung eingesetzt wird.

| | Bindungstyp | | | |
|--------------|-------------|-----------|--------|------------|
| | Keramisch | Kunstharz | Hybrid | Metallisch |
| Rauheit | ↗ | → | ↘ | → |
| Schleifkraft | ↘ | ↗ | ↘ | ↗ |
| Verschleiß | → | ↗ | → | ↘ |
| Druck-ESp | → | → | ↗ | ↗ |

| | | | |
|---|--|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Rauheit | <input checked="" type="checkbox"/> + Rauheit + Dämpfung + Druck-ESp - Verschleiß - Kräfte | <input checked="" type="checkbox"/> ++ Rauheit ++ Schleifkraft + Verschleiß + Druck-ESp - Ratterneigung | <input checked="" type="checkbox"/> Dämpfung Abrichtbarkeit |
|---|--|---|--|

Th/86872 © IFW

Bild 5: Einfluss unterschiedlicher Bindungsarten auf den Schleifprozess

Für beide Bindungen wurde der Einfluss der Schleifscheibenspezifikation in Bezug auf Korngröße und -konzentration untersucht. Die hieraus resultierenden Ergebnisse sind zusammenfassend in Bild 6 dargestellt und zeigen auf, dass sehr kleine Körner sowie niedrige Kornkonzentrationen beim Werkzeugschleifen zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß des Schleifwerkzeugs führen. Dies liegt in einer hohen lokalen Bindungsbelastung begründet, die aus dem geringeren Spanraum und der höheren globalen Belastung der Werkzeuge resultiert. Dieser Verschleiß ruft wiederum Abweichungen in Bezug auf die geschliffene Geometrie der Fräser hervor. Um den Einfluss dieser Verschleißeffekte bei den weiteren Untersuchungen zu reduzieren, wurde Werkzeugsatz 3 mit den Korngrößen D76 bzw. D64 für die weiteren Untersuchungen verwendet [DEN18b].

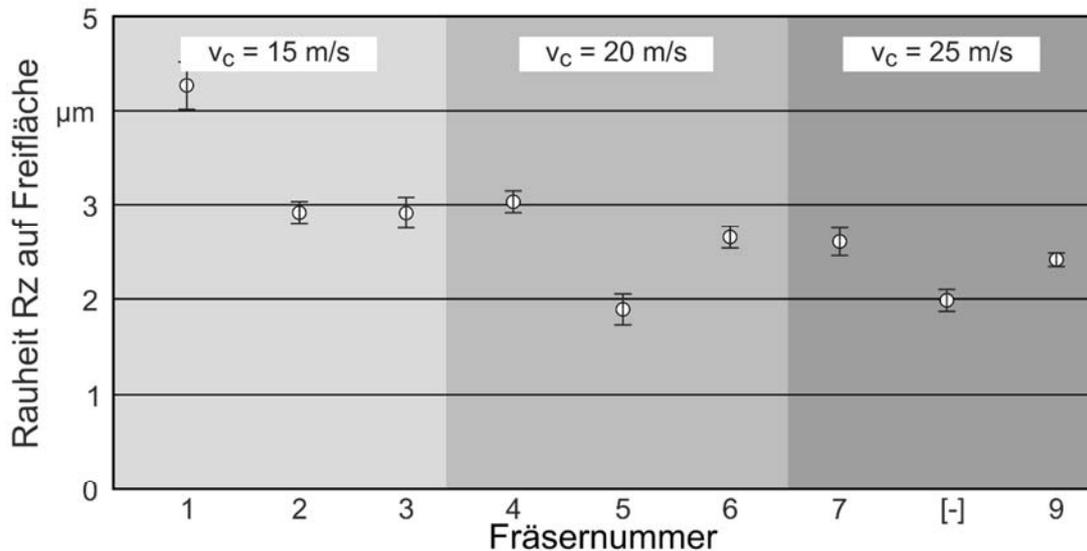
| | Schleifscheibe | | | |
|--------------|-----------------|----------|-----------------|---------|
| | D35/D46 C100 | D54 C100 | D76/D64 C100 | D54 C50 |
| Rauheit | ↓ | → | → | ↑ |
| Präzision | ↓ | ↗ | ↑ | ↓ |
| Verschleiß | ↑ | → | ↓ | ↘ |
| Schartigkeit | ↗ | ↗ | ↘ | → |

| | | | |
|---|---|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Verschleiß Präzision | <input checked="" type="checkbox"/> + Präzision - Verschleiß | <input checked="" type="checkbox"/> + Schartigkeit + Präzision + Verschleiß | <input checked="" type="checkbox"/> Präzision Verschleiß Rauheit |
|---|---|---|--|

Th/90450 © IFW

Bild 6: Einfluss der Schleifscheibenkörnung auf das Schleifergebnis

Unter Verwendung dieser Schleifwerkzeuge wurden die Prozessstellgrößen in Form von Hubzustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit variiert. Durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit kann hierbei die Einzelkornspannungsdicke beim Schleifen unmittelbar beeinflusst beziehungsweise verringert werden. In der Folge sinkt die mechanische Belastung an den Diamantkörnern und die Bindung wird lokal niedriger belastet. Durch die höhere Drehzahl der Schleifwerkzeuge befinden sich die Schleifkörner dabei jedoch ebenfalls häufiger im Eingriff, sodass die Rauheiten auf der Freifläche aufgrund der Einebnung von Rauheitsspitzen sinken (Bild 7) und die globale Werkzeugbelastung steigt. Dieser Anstieg der globalen Bearbeitungskräfte wurde ebenfalls in den prozessbegleitend gemessenen Schleifmomenten erkenntlich und kann zu einer erhöhten Abdrängung der Fräser im Schleifprozess führen. Aufgrund der geringen Zustelltiefen beim Nachschleifen von Fräsworkzeugen wurde eine zunehmende geometrische Ungenauigkeit durch diese Abdrängungseffekte jedoch nicht festgestellt.



Prozessstellgrößen:

v_c = var.
 v_f = 90 mm/min
 a_e , Umfang = 300 μm

Werkzeug:

Kornart = Diamant D64/D76
 Bindung = Hybrid / Kunstharz
 Form = 1V1 / 11V9 / 12V9



Th/90455 © IFW

Bild 7: Erzeugte Oberflächenrauheit auf den Freiflächen in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses von Hubzustellung und Vorschubgeschwindigkeit bei gleichbleibender Produktivität wurde die Nachschleifstrategie mehrstufig variiert. In der industriellen Praxis werden häufig wirtschaftlich vorgegebene Bearbeitungszeiten und ein pauschales Schleifaufmaß für den Nachschliff eines Werkzeugs genutzt. Diese können auf der Werkzeugmaschine durch unterschiedliche Strategien realisiert werden. Entweder wird das Gesamtaufmaß in einem einzelnen Hub und mit sehr niedriger Vorschubgeschwindigkeit abgenommen, oder das Gesamtaufmaß wird in mehrere Hübe aufgeteilt und mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit entfernt, sodass die Prozesszeit insgesamt konstant bleibt (Bild 8). Diese beiden Strategien wurden um drei Zwischenstufen ergänzt und es wurden drei Fräser je Stufe mit einer Hubzahl zwischen 1 und 5 geschliffen.

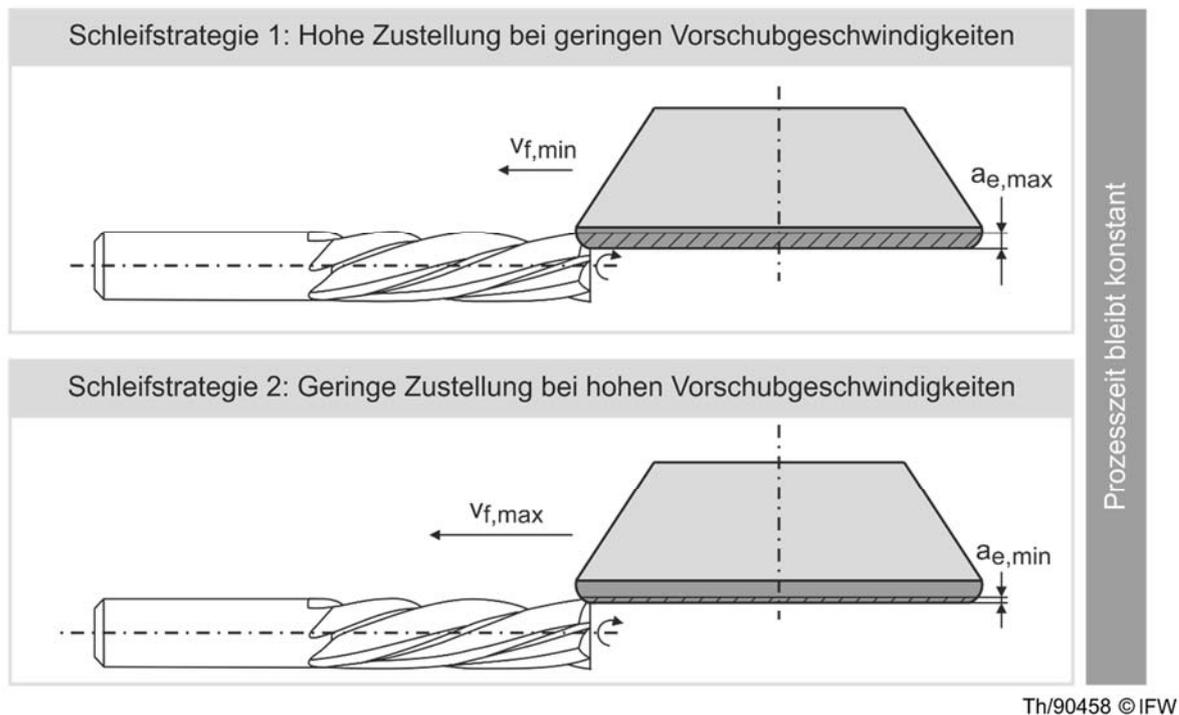
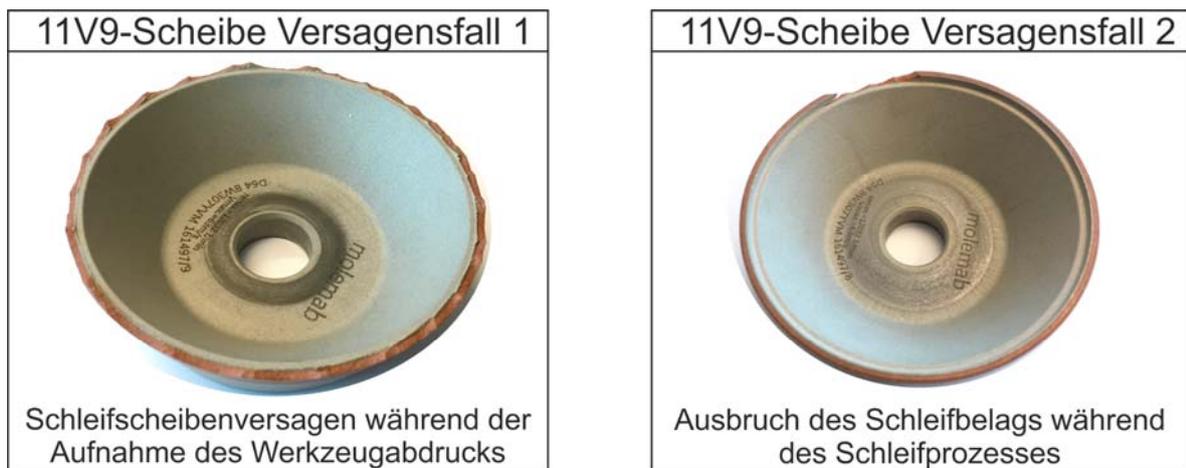


Bild 8: Unterschiedliche Strategien zum Nachschleifen von Fräsworkzeugen

Bei der Auswertung der geschliffenen Fräser wird deutlich, dass die Schleifstrategie einen deutlichen Einfluss auf die geschliffenen Werkzeuge und insbesondere deren Schärfe beziehungsweise Schartigkeit hat. Eine geringere Hubzahl und die daraus resultierenden niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten beim Erzeugen der Schneidkante reduzieren deren Schartigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Erzeugung der Schneidkante immer der letzte oberflächenerzeugende Hub des Schleifprozesses entscheidend ist. Wenn dieser, wie bei der 1-Hub Strategie geschehen, mit geringeren Vorschüben durchgeführt wird, greifen die Körner öfter in das Werkstück ein und die Einzelkornspannungsdicke sinkt. Dies führt zu einer besseren Reduzierung der Rauheit und zu weniger Mikroausbrüchen an der Schneide, sodass die Schneidkantenschartigkeit sinkt.

Neben der Erzeugung geringerer Schartigkeiten hat eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit positive Auswirkungen auf die mechanische Belastung der verwendeten Schleifscheiben. Die hohen Vorschubgeschwindigkeiten, kombiniert mit niedrigen Zustellungen, führen zu einem gesteigerten Materialabtrag auf einer kleineren Teilfläche der Schleifscheibe. Der Eingriffsbereich der Schleifscheibe ist somit in radialer Richtung deutlich stärker belastet. Dieser hohen Belastung in radialer Richtung des Werkzeugs halten die Topfschleifscheiben nur begrenzt stand, sodass nach jeweils 3 Fräsern bei den Strategien mit 5 und 4 Hübten ein Schleifwerkzeugversagen hervorgerufen wird (Bild 9). Die erste Topfschleifscheibe mit der Korngröße D64 wurde durch die hohe mechanische Belastung im Prozess mit 5 Hübten so stark geschwächt, dass der Schleifbelag beim Schleifen eines Konturabdrucks in einem Modellwerkstoff auf dem gesamten Umfang ausgebrochen ist (Bild 9 links). Deshalb wurde für die Schleifstrategie mit 4 Hübten auf eine baugleiche

Topfschleifscheibe mit Korngröße D54 ausgewichen. Diese unterlag bereits nach dem ersten Fräser einem großen Kantenverschleiß, sodass der Durchmesser des zweiten geschliffenen Fräasers bereits außerhalb der Toleranz über dem Sollmaß von 19,4 mm lag. Beim Schleifen des letzten Fräasers unter Verwendung dieser Strategie wurde dieser Effekt weiter verstärkt und es kam analog zu der Schleifstrategie mit 5 Hüben zu einem Versagen der Schleifscheibe. Dieser äußerte sich durch den Ausbruch von Teilen des Schleifbelags (Bild 9 rechts). Der hohe lokale Verschleiß der Schleifscheiben bei der Verwendung sehr hoher Vorschubgeschwindigkeiten hat außerdem zu einer starken Streuung des Bearbeitungsergebnisses in Form einer Streuung der gemessenen Schartigkeiten geführt.



Th/90461 ©IFW

Bild 9: Schleifscheibenversagen der Topfschleifscheiben aufgrund zu hoher mechanischer Belastung bei der 5-Hub (links) und 4-Hubstrategie (rechts)

Standzeituntersuchung der nachgeschliffenen Fräswerkzeuge

Abschließend wurde die hergeleitete Methodik verifiziert. Hierzu wurde untersucht, ob die Fräswerkzeuge, die mit der weiterentwickelten Methodik nachgeschliffen wurden, zu Neuwerkzeugen vergleichbare Standzeiten aufweisen. Zu diesem Zweck hat ein Industriepartner vier Fräswerkzeuge mit den üblicherweise von ihm verwendeten Prozessstellgrößen und Schleifscheiben nachgeschliffen. Vier weitere Fräswerkzeuge wurden ebenfalls von dem Industriepartner mit den im Projekt Autoregrind ermittelten Prozessstellgrößen und Schleifwerkzeugen nachgeschliffen. Alle Fräser wurden im Anschluss in Bezug auf ihre geometrischen Merkmale und die vorliegenden Schartigkeiten gemessen und mit vier Neuwerkzeugen verglichen. Zwischen den unterschiedlich nachgeschliffenen Fräsern bestanden hierbei nur vernachlässigbare Unterschiede in der geometrischen Ausprägung der Span- und Freiwinkel sowie Außendurchmesser. Die Neuwerkzeuge wiesen hingegen, aufgrund einer kurzfristigen Zeichnungsänderung des Fräswerkzeugzulieferers, die bei den nachgeschliffenen Fräsern noch nicht berücksichtigt wurde, leicht geänderte Freiwinkel auf. Außerdem liegen die Durchmesser der Neuwerkzeuge mit 25 mm deutlich über den Durchmessern der nachgeschliffenen Fräswerkzeuge (22,5 mm). Damit dieser Durchmesserunterschied keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen beim Fräsen hat, wurden die Spindeldrehzahlen beim

Fräsen individuell angepasst und somit eine konstante Schnittgeschwindigkeit von 63 m/min sowie ein konstanter Zahnvorschub von 0,1 mm eingestellt.

Die Fräser wurden vor ihrem Einsatz unter einem Keyence Digitalmikroskop optisch inspiziert und auf Vorschädigungen untersucht. Daraufhin wurden die Fräser zur Zerspaltung von Ti6Al4V eingesetzt und nach der ersten Bahn auf Initialverschleiß sowie nach vier, acht und zwölf Minuten Einsatzzeit hinsichtlich der Größe unterschiedlicher Verschleißmerkmale untersucht (siehe Bild 210). Insbesondere wurden hierbei der Eckenradius des Fräsers und der umfangsseitige Übergangspunkt von sich im Eingriff befindlicher zu unbelasteter Schneide untersucht. An diesen beiden Punkten tritt üblicherweise die höchste Belastung des Werkzeugs und somit in der Regel die größte Schädigung in Form von Freiflächenverschleiß und Ausbrüchen auf. Als Kriterien für das Standzeitende der Fräser wurde eine Verschleißmarkenbreite VB von 200 μm oder eine Ausbruchsgröße CH von 60 μm definiert.

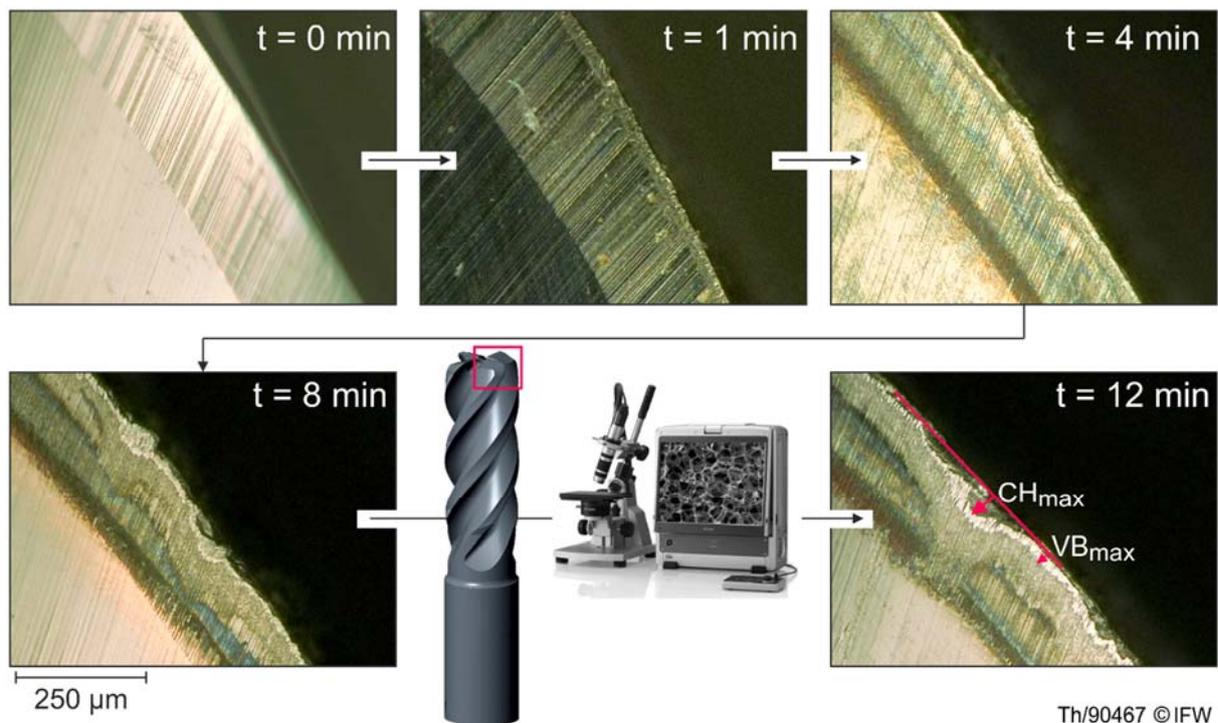
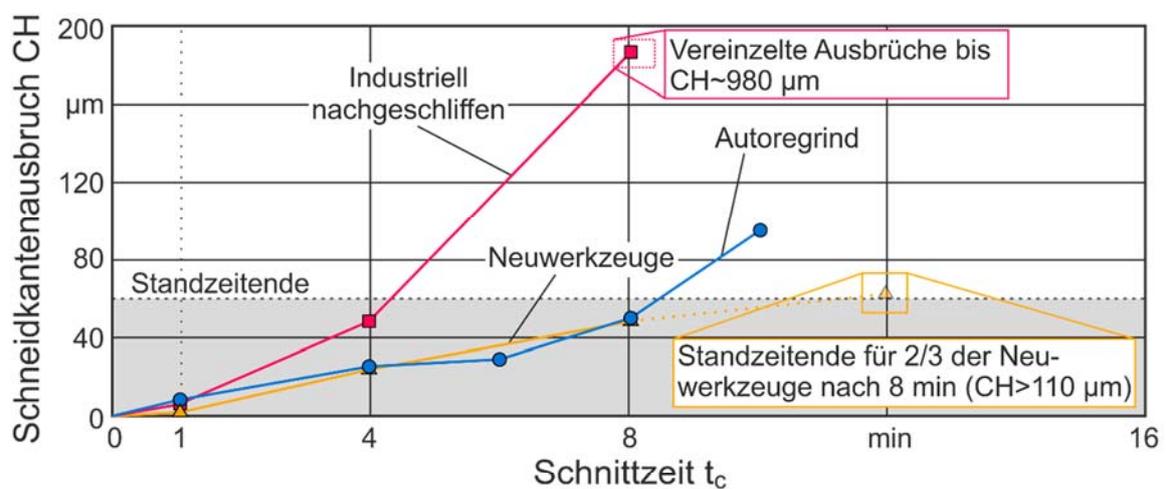


Bild 20: Bilder der Schneidkante im Eckenradius vor dem Einsatz des Fräsers und nach einer definierten Schnittzeit

Der Verlauf des Fräswerkzeugverschleißes in Bezug auf die unterschiedlichen geschliffenen Fräser ist für die Größe der Schneidkantenausbrüche in Bild 11 dargestellt. Bei industriell nachgeschliffenen Werkzeugen wurde eine Standzeit von ca. 4,5 min bis zur Erfüllung des Standzeitkriteriums erreicht. Bei einer weiteren Erhöhung der Schnittzeit wurden Schneidkantenausbrüche bis zu einer Größe von 980 μm festgestellt, die das Werkzeug unbrauchbar machen. Im Gegensatz dazu hielten die mit der neu entwickelten Methodik nachgeschliffenen Fräser der Belastung im Durchschnitt 8,5 min stand. Dies entspricht einer Standzeiterhöhung im Vergleich zur konventionellen Nachschleifstrategie um bis zu 88%. Diese resultiert vermutlich aus erhöhten Druckeigenspannungen an der Schneidkante, die aufgrund der

geometrischen Bedingungen an der Schneidkante jedoch nicht durch Messungen verifiziert werden konnten. Das Standzeitkriterium für einen Freiflächenverschleiß von $VB_{\max} > 200 \mu\text{m}$ wurde bei keinem der untersuchten Fräser erreicht. Für die Neuwerkzeuge galt, dass zwei der drei untersuchten Neuwerkzeuge nach 8 min aufgrund von Ausbrüchen mit einer Größe von über $110 \mu\text{m}$ ihr Standzeitende erreicht hatten. Das dritte untersuchte Neuwerkzeug hat sein Standzeitende erst nach 12 min erreicht. Da sich die industriellen Standzeitbewertungen von Fräs Werkzeugen in der Regel jedoch an der Prozesssicherheit orientiert, wird die minimale Standzeit, die von allen Werkzeugen erreicht wird, als Bewertung der Standzeit herangezogen. Diese beträgt im vorliegenden Fall 8 min. Durch eine Optimierung der Schleifwerkzeuge und der Prozessstellgrößen kann somit die Standzeit von nachgeschliffenen Fräsern um bis zu 88% verlängert und auf das Niveau von Neuwerkzeugen angehoben werden.



| Prozess | Werkzeug | Prozessstellgrößen | Kühlung |
|---|--|--|-----------------------------|
| Stirnumfangsfräsen im Teilnutenschnitt | VHM-Schafffräser $d = 22,5 / 25 \text{ mm}$ | $v_c = 63 \text{ m/min}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$ | 6%-Emulsion Innenkühlung |
| Werkstoff Ti-6Al-4V | $z = 4$ | $a_p = 10 \text{ mm}$ $a_e = 8 \text{ mm}$ | 80 bar KSS-Druck |
| | | | Th/90469 © IFW |

Bild 11: Verlauf der Schneidkantenausbrüche in Abhängigkeit der Schnittzeit für unterschiedlich geschliffene Fräs Werkzeugen

Zusammenfassung

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 19121 N zum Thema „Ressourceneffizientes Nachschleifen von Vollhartmetallfräs Werkzeugen“ wurde erfolgreich eine Methodik hergeleitet, die eine quantitative Messung von verschlissenen Vollhartmetallfräs Werkzeugen erlaubt. Dabei wurden sämtliche industriellen Anforderungen bezogen auf Messdauer und Messgenauigkeit berücksichtigt und eingehalten. Ferner wurde ein statistisch abgesichertes Aufmaß zur Entfernung von makroskopischen und mikroskopischen Schädigungen hergeleitet, sodass auch äußerlich nicht sichtbare Schädigungen in Form von Mikrorissen prozesssicher entfernt werden. Die Standzeiten der nachgeschliffenen Fräs Werkzeugen werden

dadurch erhöht. Durch eine Extrapolation der Schädigungen von einer aus einem industriellen Prozess entnommenen Stichprobe an Fräswerkzeugen konnte aufgezeigt werden, dass die Fräser mit der neu entwickelten Methodik bei identischer Durchmesser verringering bis zu 30% häufiger nachgeschliffen werden können. Im Anschluss wurde der Nachschleifprozess in Bezug auf den Einfluss von Schleifscheibenspezifikation und Prozessstellgrößen auf das Schleifergebnis untersucht. Auf Grundlage dieser Untersuchung konnte die am besten geeignete Kombination aus Schleifwerkzeugzusammensetzung und Prozessstellgrößen zum Nachschleifen aufgezeigt werden. In abschließenden Fräsuntersuchungen wurde die Standzeit von konventionell nachgeschliffenen Fräsern mit den Standzeiten von in diesem Projekt nachgeschliffenen Fräsern und Neuwerkzeugen verglichen. Dabei wurde durch die neu entwickelte Methodik eine Standzeiterhöhung in Höhe von 88% verglichen mit den konventionell nachgeschliffenen Werkzeugen erreicht. Die Standzeiten der im Rahmen dieses Projekts nachgeschliffenen Fräswerkzeuge lag somit auf einem vergleichbaren Niveau mit dem von Neuwerkzeugen. Entsprechend wurde die zu Projektbeginn von den industriellen Partnern adressierte Problem, dass die Standzeit nachgeschliffener Werkzeuge niedriger als die Standzeit entsprechender Neuwerkzeuge ist und stark streut, ebenfalls behoben.

Literaturquellen

[DEN17a] Denkena, B.; Grove, T.; Theuer, M.: Ressourceneffizient Nachschleifen – Quantitative Verschleißmessung an Vollhartmetall-Fräswerkzeugen, VDI-Z 159, Nr. 3 (März), S.43-45, 2017

[DEN17b] Denkena, B.; Grove, T.; Theuer, M.: Mikrorisserkennung an verschlissenen Vollhartmetallfräswerkzeugen, dihw 9 – 3, S. 24-29, 2017

[DEN18a] Denkena, B.; Grove, T.; Theuer, M.: Micro Crack Formation in Hardmetal Milling Tools, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 17, S. 210-214, 2018

[DEN18b] Denkena, B.; Grove, T.; Theuer, M.; Liu, Y.: Resource Efficient Regrinding of Cemented Carbide Milling Tools; Procedia CIRP Vol. 69, S. 882-887, 2018.