

Titel

Steigerung der Ressourcen- und Kosteneffizienz hochharter Schneidstoffe durch einen angepassten Nachschleifprozess

IGF-Nr.: 01IF22512N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: IFW - Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen - Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen



Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner beim IFW:

Lars Luthe
0511-762.18332
luthe@ifw.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Projekt „Steigerung der Ressourcen- und Kosteneffizienz hochharter Schneidstoffe durch einen angepassten Nachschleifprozess“ (01IF22512N) wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das 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

Ausgangssituation

Zur Bearbeitung von Werkstoffen wie gehärtetem Stahl oder Nickelbasislegierungen werden zunehmend Werkzeuge aus polykristallinem kubischen Bornitrid (PcBN) und Keramik eingesetzt. Die Schneidstoffe ermöglichen eine deutliche Steigerung des Zeitspanvolumens bei gleichzeitiger Sicherstellung der Prozesssicherheit, bedingt durch hohe Standzeiten. Der Anwendung dieser Werkzeuge stehen heute aber häufig noch die hohen Herstellkosten im Vergleich zu konventionellen Hartmetallwerkzeugen entgegen. Zudem wird bei diesen Schneidstoffen nur ein geringer Teil des vorhandenen Schneidstoffvolumens genutzt, da die Werkzeuge nach einer Anwendung entsorgt werden. Deswegen ist der Ansatz, den Einsatz von PcBN- und Keramikwerkzeugen durch einen angepassten Nachschleifprozess ressourcen- und kosteneffizienter zu gestalten. Hierdurch können die Ausnutzung des Schneidstoffes signifikant erhöht, die Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette verbessert und die werkzeuggebundenen Betriebskosten der Anwender reduziert werden.

Forschungsziel

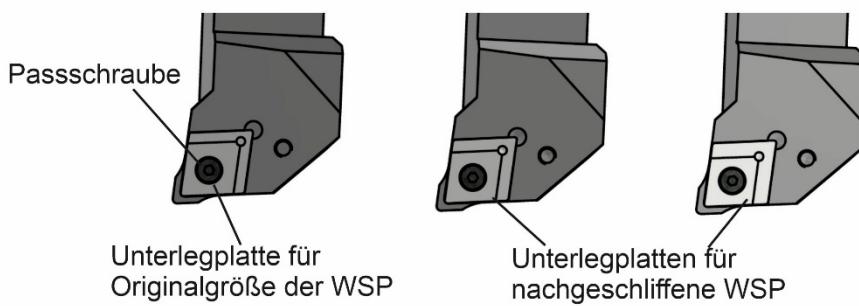
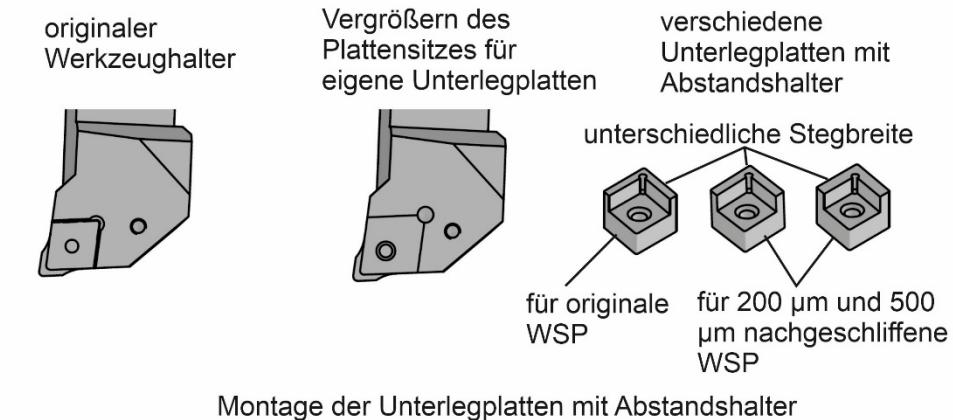
Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, die Ressourcen- und Kosteneffizienz beim Einsatz hochharter Schneidstoffe durch technologisches Verständnis tiefenwirksamer Verschleißmechanismen und angepasster Nachschleifprozesse unter Berücksichtigung industrieller Randbedingungen zu steigern.

Die Erreichung des Hauptzieles basiert auf sechs Teilzielen. Erstes Teilziel war die Entwicklung eines geometrisch flexiblen Werkzeugsystems für nachgeschliffene Wendeschneidplatten. Das zweite Teilziel war die Verfügbarkeit definierter Verschleißzustände zur Charakterisierung der Verschleißtiefenwirkung in verschiedenen Anwendungsfällen. Das dritte Teilziel war die Kenntnis über Schädigungstiefen in Abhängigkeit der Verschleißformen und -ausprägungen. Viertes Teilziel war die Verfügbarkeit eines optimierten Nachschleifprozesses zur Wiederherstellung der Schneidengeometrie. Das fünfte Teilziel war die Verfügbarkeit eines statistisch abgesicherten Nachschleifbetrags in Abhängigkeit der Verschleißform und –ausprägung. Sechstes Teilziel war die Verfügbarkeit eines wirtschaftlichen Nachschleifprozesses für die industrielle Praxis.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Um nachgeschliffene Wendeschneidplatten produktiv und prozesssicher einsetzen zu können, bedarf es der Konstruktion eines geometrisch flexiblen Werkzeugsystems, in dem Wendeschneidplatten verschiedener Größen gespannt werden können. Dies ist erforderlich, da sich durch das freiflächenseitige Nachschleifen der Werkzeuge die Größe der Platten ändert und ein gleichbleibender Plattensitz nicht weitergegeben ist. Aus diesem Grund wurde ein entsprechendes Werkzeugsystem entwickelt. In Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden industriell relevante Anforderungen für den Werkzeughalter erarbeitet. Wichtigste Punkte hierbei waren zum einen, dass das System über eine Hochdruckinnenkühlung, die ein gezieltes Kühlen der Span- und Freifläche ermöglicht, verfügt. Zum anderen ist es in der industriellen Praxis von großer Bedeutung, dass die Schneidenecke der Wendeschneidplatte, unabhängig von der Größe der Wendeschneidplatte, reproduzierbar positioniert werden kann. Dieses ist sowohl für die gezielte spanflächen- und freiflächenseitige Kühlung als auch für den Werkzeugwechsel von hoher Bedeutung. Auf dieser Basis wurden erste Lösungsansätze für einen Werkzeughalter zusammengestellt, bei denen das Spannen und Ausrichten der nachgeschliffenen Wendeschneidplatten durch Schrauben oder Federn realisiert wird. In Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde jedoch die Steifigkeit eines solchen flexiblen Werkzeughalters kritisch bewertet, sodass weitere Iterationen hinsichtlich der Konstruktion erfolgten.

Um eine Systemsteifigkeit wie bei industriell üblichen Haltern zu erreichen, erfolgt das Ausrichten der nachgeschliffenen Wendeschneidplatten durch modifizierte Unterlegplatten. Das Spannen der Werkzeuge wird somit mittels üblicher Spannpratzen realisiert. Da sich der Innenkreisdurchmesser (IC) bei freiflächenseitig nachgeschliffenen Wendeschneidplatten verringert, wurde eine spezielle Unterlegplatte für den Wendeschneidplattenhalter konstruiert. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, wurde hierfür zusätzlich der Plattensitz eines Werkzeughalters vergrößert. Dieses ist notwendig, damit die Stegbreite des Abstandhalters auch für gering nachgeschliffene Wendeschneidplatten gefertigt werden kann. Zusätzlich sind in der nachfolgenden Abbildung einzelne Unterlegplatten mit unterschiedlichen Abstandshaltern aufgezeigt.



Montage von Wendeschneidplatte und Spannpratze



Abbildung 1 Geometrisch flexibler Werkzeughalter für Wendeschneidplatten der CN-Geometrie

Im Anschluss an die Konstruktion eines Werkzeughalters für freiflächenseitig nachgeschliffene Wendeschneidplatten erfolgte die Analyse des Werkzeugeinsatzverhaltens und die Charakterisierung von innenliegenden Schädigungen bei Neuwerkzeugen. Aufgrund des Umfangs dieses Berichtes wird sich hierbei auf PcbN-Werkzeuge bei der Bearbeitung von gehärtetem Stahl konzentriert. Des Weiteren wurde die Zerspanung des Werkstoffes Inconel 718 sowie der Einsatz von Werkzeugen aus Keramik untersucht. Diese weiteren Kombinationen aus Schneidstoff und Werkstoff sind dem ausführlichen Schlussbericht zu entnehmen.

Die bei den Untersuchungen verwendete Prozessstellgrößenvariation wurde dafür genutzt, um ein Verständnis des Einflusses der Prozessstellgrößen auf die Verschleißausprägungen nach unterschiedlichen Schnittzeiten t_c zu generieren. Die Bearbeitung des gehärteten Werkstoffs ist aufgrund der hohen Zähigkeit und Härte und der damit verbundenen hohen Wärmebelastung für das Werkzeug herausfordernd. In Abbildung 2 sind fünf Verschleißzustände bei der Bearbeitung von gehärtetem 100Cr6 mit PcbN-Werkzeugen dargestellt.

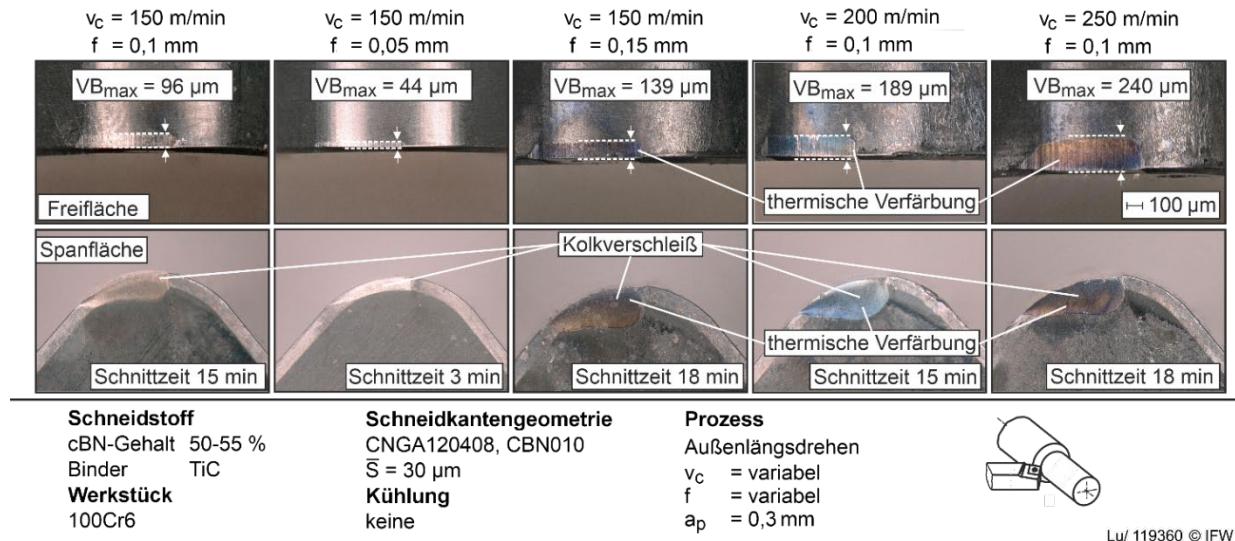


Abbildung 2 Verschleißbilder bei der Bearbeitung von gehärtetem 100Cr6 mit PcbN

Es zeigt sich, dass bei der Hartbearbeitung mit Werkzeugen aus PcbN der Kolkverschleiß auf der Spanfläche dominierend ist. Grund dafür sind die hohen Temperaturen während der Hartbearbeitung und die dadurch ausgelösten tribochemischen Reaktionen [Den20, Öze09]. Eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit führt zudem zu einer Erhöhung der thermischen Belastung, wodurch die Verschleißrate ansteigt. Hierdurch steigt die Verschleißmarkenbreite bei $v_c = 250 \text{ m/min}$ auf $VB_{\max} = 240 \mu\text{m}$ und der Kolkverschleiß auf eine Breite von $KB = 260 \mu\text{m}$.

Anschließend wurden innenliegende Schädigungen im Werkzeugsubstrat analysiert, die beim Nachschleifen entsprechend zu berücksichtigen sind. Dies erfolgt zunächst mittels Gleitschliffaufnahmen. Um die lichtmikroskopischen Aufnahmen von Querschliffen des Werkzeugs zu erstellen, wurde die Nebenfreifläche, auf der der Freiflächenverschleiß hauptsächlich auftritt, mittels Querseitenplanschleifen abgetragen. Anschließend wurden mit einem Lichtmikroskop Aufnahmen des Werkzeugsubstrats erstellt. Nachfolgend wurden zusätzlich noch Rasterelektronenmikroskopaufnahmen des freigelegten Werkzeugsubstrats zur genaueren Identifizierung der innenliegenden Schädigungen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt diese Aufnahmen exemplarisch für die bei der Hartbearbeitung eingesetzten PcbN-Werkzeuge mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 200$ m/min und einem Vorschub $f = 0,1$ mm.

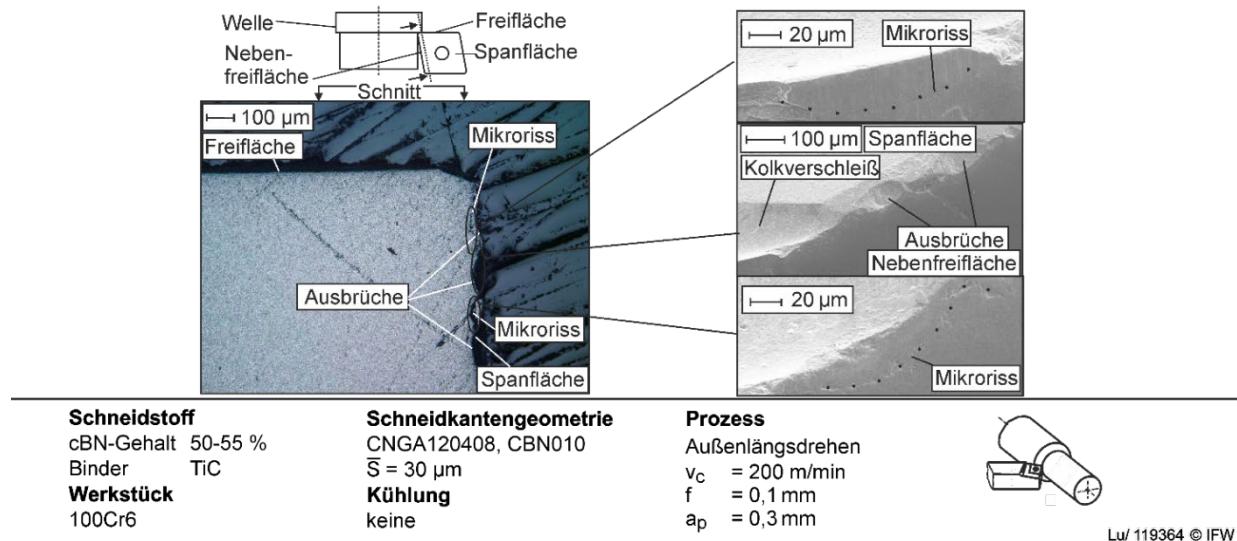


Abbildung 3 Innenliegende Schädigungen bei der Bearbeitung von gehärtetem 100Cr6

In den Aufnahmen dieses Werkzeugs sind Mikrorisse mit einer Länge von 120 µm bis 140 µm zu erkennen. Es zeigt sich jedoch, dass diese Schädigungen lokal begrenzt sind und in den Bereichen des Freiflächenverschleißes auftreten. Zudem wird anhand der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen deutlich, dass weitere kleine Ausbrüche entlang der Schneidkante auftreten, die jedoch auch kleiner als der Freiflächenverschleiß sind.

Somit ist festzuhalten, dass die aufgezeigten innenliegenden Schädigungen geringer sind, als der von außen sichtbare Verschleiß (Kolk- und Freiflächenverschleiß). Die weiterführenden Untersuchungen bei den anderen Kombinationen aus Schneidstoff und Werkstoff zeigen ein vergleichbares Ergebnis. Für ein Nachschleifen bedeutet dies, dass ein Schleifaufmaß von den äußeren Verschleißerscheinungen, wie der Verschleißmarkenbreite VB_{max} und der Kolkbreite KB , abgeleitet werden kann.

Im Anschluss an diese Untersuchungen erfolgte die Wiederaufbereitung der Werkzeuge. Die PcbN-Werkzeuge wurden nach dem Nachschleifen gebürstet, um die gleiche Werkzeugmikrogeometrie wie bei Neuwerkzeugen zu applizieren. Die Werkzeuge aus Keramik lagen auch im Neuzustand ungebürstet vor, sodass in diesem Fall auf das Bürsten verzichtet wurde. Für einen Überblick über den Einfluss von Prozessstellgrößen sowie Schleifscheibenkörnung beim Nachschleifen der unterschiedlichen Werkzeuge wird in diesem Fall auf den detaillierten Abschlussbericht verwiesen.

In den anschließenden Einsatzuntersuchungen beim Drehen von Inconel 718 und gehärtetem Stahl wurde die Standzeit von neuen und nachgeschliffen Werkzeugen miteinander verglichen.

Auf der linken Seite der Abbildung 4 sind die Standzeiten von neuen und nachgeschliffen Wendeschneidplatten bei der Bearbeitung von Inconel 718 dargestellt. Standzeitkriterium war in diesem Fall ein Überschreiten der Verschleißmarkenbreite von $VB_{max} = 100 \mu\text{m}$. Es wird deutlich, dass sich, unabhängig der Prozessstellgrößen, die Standzeiten von den Neuwerkzeugen und nachgeschliffenen Werkzeugen nur geringfügig unterscheiden. Des Weiteren ist festzuhalten, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200 \text{ m/min}$ und einem Vorschub von $f = 0,1 \text{ mm}$ die höchste Standzeit der eingesetzten Werkzeuge erreicht wird. Dies ist, im Vergleich zu den Standzeiten bei geringeren Schnittgeschwindigkeiten, auf die thermische Entfestigung des Werkstoffs bei der erhöhten Schnittgeschwindigkeit zurückzuführen. Zudem ist bei höherer Schnittgeschwindigkeit die Neigung zur Bildung von Adhäsionen geringer. Dies führt zu verringerteren Ausbrüchen an der Schneidkante und somit zu einer Steigerung der Standzeit. Schnittgeschwindigkeiten oberhalb von $v_c = 200 \text{ m/min}$ führen aufgrund der zunehmenden Temperaturen während des Zerspanprozesses zu einer Reduktion der Standzeit.

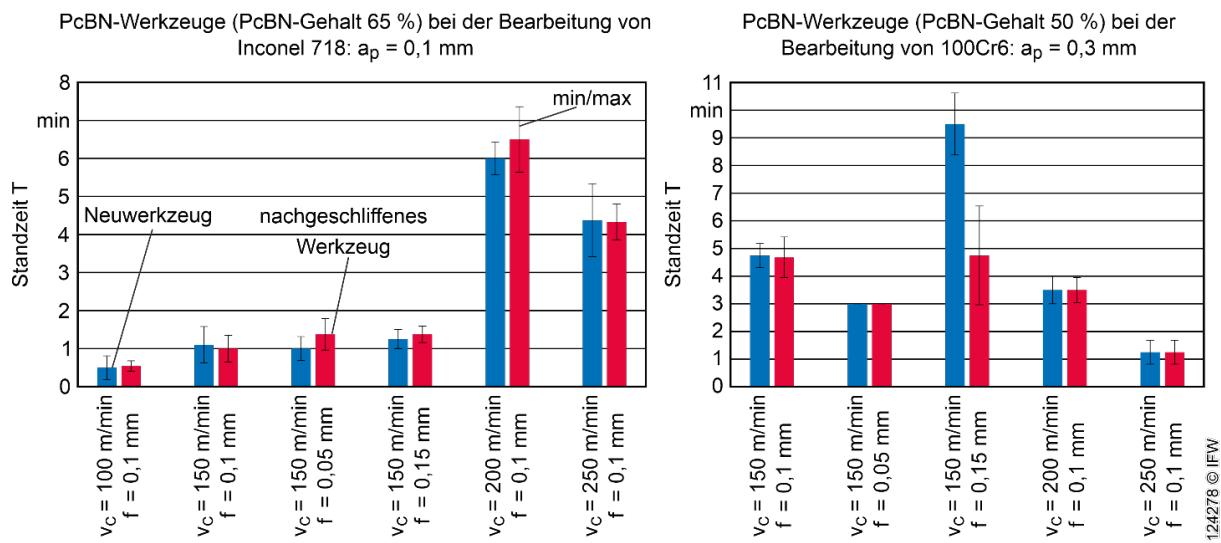


Abbildung 4 Resultierende Standzeiten von neu- und nachgeschliffenen PCBN-Werkzeugen bei verschiedenen Prozessstellgrößen und Werkstoffen

Auf der rechten Seite der Abbildung 4 sind die Standzeiten von neuen PCBN-Werkzeugen und nachgeschliffenen PCBN-Werkzeugen bei der Hartbearbeitung aufgezeigt. Standzeitkriterium war das Ausbrechen der Schneidkante infolge des steigenden Kolkverschleißes, der aufgrund der hohen Temperaturen bei der Hartbearbeitung dominierend ist. Bei vier der fünf untersuchten Prozessstellgrößenkombinationen konnten mit den nachgeschliffenen Werkzeugen Standzeiten erzielt werden, die mit denen der Neuwerkzeuge vergleichbar sind. Beim Einsatz eines Vorschubs von $f = 0,15 \text{ mm}$ zeigte sich jedoch, dass die Standzeit nachgeschliffener Werkzeuge im Vergleich zu den Neuwerkzeugen reduziert ist.

Weiterführende Untersuchungen zur Erklärung des Standzeitunterschiedes von Neuwerkzeugen und nachgeschliffenen Werkzeugen bei Verwendung des Vorschubs $f = 0,15 \text{ mm}$ deuten darauf hin, dass thermische Einflüsse während des Ersteinsatzes kritisch sind. Zu diesem Zweck wurde ein Neuwerkzeug bei etwa 900°C für 9 Minuten

im Ofen geglüht. Die mit diesem Werkzeug erzielte Standzeit von $T = 4,5$ min bei einem Vorschub von $f = 0,15$ mm entspricht weitgehend den Standzeiten nachgeschliffener Werkzeuge bei identischem Vorschub. Ein Erklärungsansatz ist, dass während des Ersteinsatzes thermisch induzierte Zugeigenspannungen im Werkzeug resultieren. Durch den erhöhten Vorschub steigt die mechanische Belastung zusätzlich an. Treten diese Zugeigenspannungen im Schneidekeil gemeinsam mit der höheren mechanischen Last auf, führt dies insbesondere bei Überschreiten der kritischen Belastung zum Ausbrechen des Werkzeugs. Auch bei einem Vorschub von $f = 0,1$ mm können thermisch bedingte Zugeigenspannungen entstehen. Aufgrund der jedoch deutlich geringeren mechanischen Beanspruchung im Vergleich zu $f = 0,15$ mm resultieren keine signifikanten Auswirkungen auf das Verschleißverhalten.

In einem weiteren iterativen Schritt wurde das Schleifaufmaß der bei dem Vorschub von $f = 0,15$ mm verwendeten Werkzeugen aufgrund der stark reduzierten Standzeit im nachgeschliffenen Zustand erhöht. Hierbei wurde die Zustellung für das Nachschleifen so gewählt, das neben dem Kolkverschleiß ebenso die thermischen Einflusszonen des Verschleißes entfernt wurden. Durch die erhöhte Zustellung beim Nachschleifen wurden mit den nachgeschliffenen Werkzeugen bei einem gesteigerten Vorschub von $f = 0,15$ mm Standzeiten erzielt, die den Standzeiten des Neuwerkzeugs entsprechen. Zur weiterführenden Validierung wurden zusätzlich Versuche mit einem Vorschub von $f = 0,2$ mm durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass in diesem Fall für einen prozesssicheren Einsatz ein erhöhtes Schleifaufmaß erforderlich ist und die thermisch beeinflussten Randzonen vollständig berücksichtigt und beim Nachschleifen entfernt werden müssen. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde anschließend ein phänologisches Modell für das Nachschleifen von PcbN-Werkzeugen bei der Hartbearbeitung erstellt. Dieses ist in Abbildung 5 dargestellt.

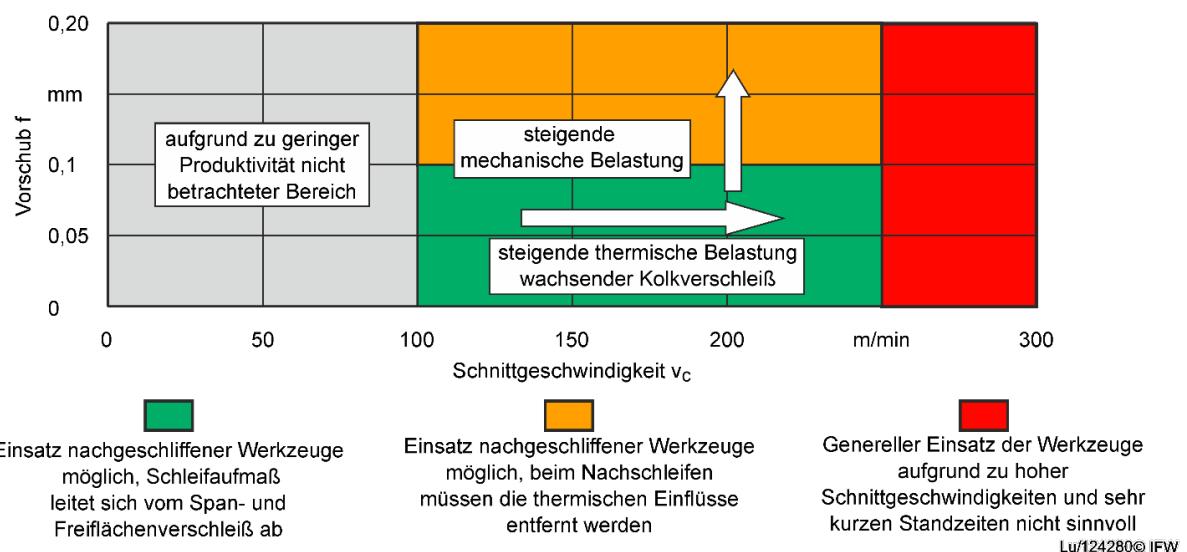


Abbildung 5 Phänologisches Modell für den Nachschliff von PcbN-Werkzeugen bei der Hartbearbeitung

Abschließend wurde das Einsatzverhalten der Neuwerkzeuge und nachgeschliffenen Werkzeuge aus Keramik verglichen. In diesem Fall handelt es sich um Werkzeuge der Geometrie RNGN1207. Diese Werkzeuge wurden spanflächenseitig nachgeschliffen, sodass die Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche des eingesetzten Neuwerkzeugs zugleich das Aufmaß für den Nachschleifprozess ist. Im Gegensatz zu den PcbN-Werkzeugen kommt es zu einer signifikanten Streuung der Verschleißmarkenbreiten bei gleichen Schnittzeiten. Aus diesem Grund wurden in diesem Fall die Verschleißmarkenbreiten VB_{max} nach definierten Schnittzeiten verglichen (siehe Abbildung 6). Die linke Seite der Abbildung zeigt die Keramik-Wendeschneidplatten für die Bearbeitung von Inconel 718. Grundlegend ist festzuhalten, dass unabhängig vom Schneidstoff keine signifikanten Unterschiede zwischen nachgeschliffenen Werkzeugen und Neuwerkzeugen ersichtlich sind. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der Freiflächenverschleiß mit steigendem Whiskeranteil abnimmt. Dies ist auf die bessere Verschleißfestigkeit durch erhöhten Whiskeranteil zurückzuführen. Zusätzlich wurde ein nachgeschliffenes Werkzeug aus einer Whisker-Keramik mit Hartmetallbinder hinsichtlich des Verschleißverhaltens analysiert. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 150$ m/min beträgt die Verschleißmarkenbreite nach einer Schnittzeit von $t_c = 2$ min bei neuem und nachgeschliffenem Werkzeug ca. 800 µm. Dieser Wert liegt zwischen der Whisker-Keramik mit geringem Whiskeranteil und der Whisker-Keramik mit mittlerem Whiskeranteil bei gleicher Schnittgeschwindigkeit. Die Verschleißmarkenbreite der Whisker-Keramik mit Hartmetallbinder bei der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200$ m/min liegt auf einem vergleichbaren Niveau wie die bei mittleren Whiskeranteil und gleicher Schnittgeschwindigkeit.

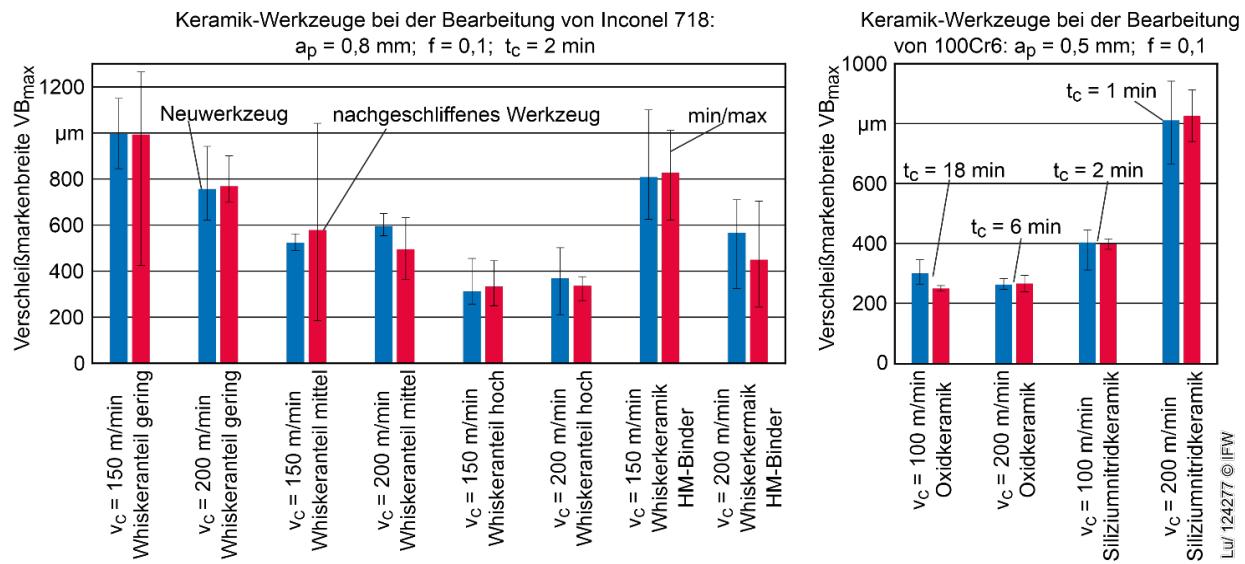


Abbildung 6 Resultierende Standzeiten von neu- und nachgeschliffenen Werkzeugen aus Keramik bei verschiedenen Prozessstellgrößen und Werkstoffen

Auf der rechten Seite der Abbildung 6 sind die Verschleißmarkenbreiten der beim Hartdrehen eingesetzten Werkzeuge aus Keramik dargestellt. Auch in diesem Fall resultieren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verschleißmarkenbreiten von Neuwerkzeugen und nachgeschliffenen Werkzeugen für die jeweiligen Kombinationen aus Schneidstoff und Prozessstellgrößen. Die höchste Leistungsfähigkeit, gemessen am

zerspanten Volumen, erreicht die Oxidkeramik bei der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 100$ m/min und einem Vorschub von $f = 0,1$ mm.

Zusammenfassung

Es lässt sich festhalten, dass sich die Leistungsfähigkeiten von neuen und nachgeschliffenen Werkzeugen auf Grundlage der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse nicht signifikant unterscheiden.

Mit dem Nachschleifen von hochharten Schneidstoffen und dem erneuten Einsatz dieser Werkzeuge geht ein hohes Energieeinsparpotential einher. Dieses ist nachfolgend anhand von Literaturwerten des Energieverbrauchs für die Herstellung einer PcbN-Wendeschneidplatte der Geometrie CNGA 120408 sowie der Wiederaufbereitung dieses Werkzeugs dargestellt. Abbildung 7 zeigt den benötigten Energieverbrauch für die jeweiligen Prozesse. Dargestellt ist der Energiebedarf für die Herstellung einer PcbN-Wendeschneidplatte mit einem PcbN-Einsatz mit einem Gewicht von 0,08 g. Insbesondere die Herstellung der PcbN-Spitze ist mit 2.675 kWh besonders energieintensiv [Fur20, Lia24, Win15]. Die Herstellung des Hartmetallgrundkörpers, auf den die PcbN-Spitze gelötet wird, einschließlich Schleifen und Schneidkantenvorbereitung, umfasst 0,32 kWh für das Werkzeug [Kar11]. Der Aufbereitungsprozess für die Wendeschneidplatte gliedert sich in das Nachschleifen und die Präparation der Schneidkantenmikrogeometrie mittels Bürsten. Für das Nachschleifen wurde der dreifache Energiebedarf im Vergleich zum Umfangsschleifen neuer Werkzeuge angenommen, da die Arbeiten gezeigt haben, dass für das Nachschleifen verschlissener Werkzeuge ein etwa dreifacher Materialabtrag im Vergleich zum Umfangsschleifen neuer Werkzeuge nötig ist [Toe13]. Für die Präparation der Schneidkantenmikrogeometrie wird der gleiche Energieverbrauch wie bei Neuwerkzeugen angenommen [Kar11]. Somit resultiert eine Energieeinsparung von 85 % für die Wiederaufbereitung von Wendeschneidplatten mit einem PcbN-Einsatz im Vergleich zur Herstellung neuer Werkzeuge.

Dies führt dazu, dass die Energie-, Ressourcen- und Kosteneffizienz durch das Nachschleifen signifikant gesteigert wird.

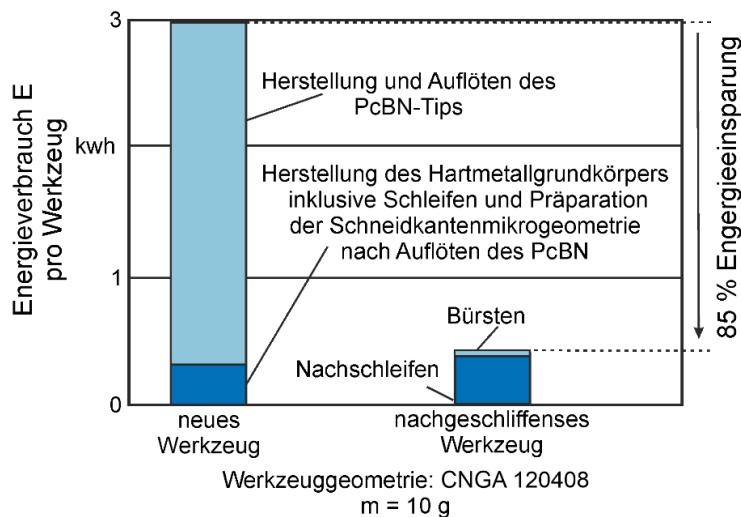


Abbildung 7 Energieverbrauch für die Herstellung sowie die Aufbereitung von Wendeschneidplatten im Vergleich

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.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Lars Luthe unter 0511-762.18332.

Literatur:

- [Den20] Denkena, B.; Krödel, A.; Heckemeyer, A.: Harte Kante dem Verschleiß, Werkstatt + Betrieb Ausgabe 02/20, S. 44-46, 2020
- [Fur20] Furberg, A.; Fransson, K.; Zackrisson, M.; Larsson, M.; Arvidsson, R.: Environmental and Resource Aspects of Substituting Cemented Carbide with Polycrystalline Diamond: The Case of Machining Tools. *J. Clean. Prod.* 2020, 277, 123577
- [Kar11] Karpuschewski, B.; Kalhöfer, E.; Joswig, D.; Rief, M.: Energiebedarf bei der Herstellung von Hartmetall-Wendeschneidplatten. *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (Journal for Economic Production)* 2011, 106(9), S. 602–605. Carl Hanser Verlag, Munich.
- [Lia24] Llanos, I.; Urresti Espilla, I.; Bilbatua, D.; Zelaieta, O.: Evaluation of Sustainability and Cost Effectiveness of Using LCO₂ as Cutting Fluid in Industrial Hard-Turning Installations. *Sustainability* 2024, 16 (22), 10078.
- [Öze09] Özel, T.: Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcbN tooling. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (11), S. 5167–5177, 2009
- [Toe13] Toenshoff, H.K.; Denkena, B.: *Basics of Cutting and Abrasive Processes*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Win15] Winter, M.; Ibbotson, S.; Kara, S.; Herrmann, C.: Life Cycle Assessment of Cubic Boron Nitride Grinding Wheels. *J. Clean. Prod.* 2015, 107, S. 707–721.