

Surcoatec Deutschland GmbH
Willi-Bleicher-Str. 11, 52353 Düren

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen

Abschlussbericht zu dem Entwicklungsprojekt

**Ressourceneffizienzsteigerung durch innovative Hochleistungs-
Oberflächenoptimierung von HSS für die Metallzerspanung**

gefördert unter dem Az. 33071/01-21 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Georg Erkens
Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
M. Sc. Björn Richter
M. Sc. Markus Hein

Düren, Oktober 2018



Az	33071/01-21	Referat	21/0	Fördersumme	264.201 €
Antragstitel	Ressourceneffizienzsteigerung durch innovative Hochleistungs-Oberflächenoptimierung von Hochgeschwindigkeitsstahlwerkzeugen (HSS) für die Metallzerspanung				
Stichworte	HSS, Beschichtungen, Schneidkantenverrundungen				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
2,5 Jahre, 30 Monate	01.04.2016	30.09.2018	1		
Zwischenberichte	November 2016	Mai 2017	November 2017		
Bewilligungsempfänger	Surcoatec Deutschland GmbH Willi-Bleicher-Str. 11 52353 Düren			Tel	02421 952 4821
				Fax	02421 952 4829
				Projektleitung Dr.-Ing. Georg Erkens	
		Bearbeiter Dr.-Ing. Georg Erkens			
Kooperationspartner	Leibniz Universität Hannover Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) An der Universität 2 30823 Garbsen				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Über 90 % der Werkzeuge für die zerspanende Metallbearbeitung werden aus Vollhartmetall (VHM) oder aus Schnellarbeitsstahl (HSS) hergestellt. Für die Herstellung und Verarbeitung von VHM-Werkzeugen müssen wesentlich größere Energie- und Ressourcenaufwendungen aufgebracht werden als für HSS-Werkzeuge. Als wesentliche Ansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit wurden Beschichtungssysteme und Mikrostrukturierungsprozesse der Schneidkanten (Verrundung) erkannt. Die bestehenden Optimierungprozesse für VHM-Werkzeuge sind potentiell auf HSS-Werkzeuge übertragbar. Zielsetzung ist die Erhöhung der Standzeit von HSS-Zerspanwerkzeugen um den Faktor 1,6 (mindestens 60 %) zur Erreichung ökologischer und ökonomischer Verbesserungen in der Metallbearbeitung. Insgesamt können durch die optimierten HSS-Werkzeuge ca. 4.000 t CO₂ pro Jahr eingespart werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Lösungskonzept besteht darin, zum ersten Mal eine PVD-Hochleistungsbeschichtung, Schneidkantenverrundung und Oberflächenstrukturierung gezielt auf den Einsatz von HSS-Fräswerkzeugen auszurichten. Hierzu wird das Verschleißverhalten beschichteter HSS-Werkzeuge untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen anschließend in die Schichtentwicklung für Zerspanprozesse mit erhöhter Produktivität ein. Parallel werden als weitere Eingangsgrößen für die Schichtentwicklung Grundlagenuntersuchungen zur theoretischen thermomechanischen Belastungen der Beschichtungen durchgeführt. Als weiterer Schritt zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der Werkzeuge werden die Schneidkanten hinsichtlich des auftretenden Verschleißverhaltens gezielt präpariert und eine Erhöhung der Schichtdicken und somit des Verschleißvolumens der Schicht untersucht. Die Entwicklung und Optimierung der Schneidkanten und der Beschichtung wird in enger Kooperation mit dem Projektpartner durchgeführt. Surcoatec übernimmt dabei insbesondere die Schichtoptimierung und das Abscheiden der Beschichtungen, das IFW führt die experimentellen Arbeiten sowie die theoretischen Betrachtungen der Schichtbelastungen durch. Die ökologischen und ökonomischen Verbesserungen und Einsparungen werden dabei von beiden Partner über den gesamten Projektzeitraum dokumentiert. Abschließend erfolgt die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse in einen prototypischen Prozess bei der Fertigung eines Demonstratorbauteils.

Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn des Projekts wurde gezeigt, dass konventionelle HSS-Fräser im Vergleich zu Hartmetallfräsern bei einem deutlich geringeren Zerspanvolumen das Verschleißkriterium von $VB = 200 \mu\text{m}$ erreichen. Zur Standzeiterhöhung der HSS-Werkzeuge erfolgte anschließend eine Optimierung des Schichtsystems und der Schichtarchitektur sowie eine gezielte Schneidkantenpräparation. Eine Kombination aus einer Multifunktionsschicht zusammen mit einer asymmetrisch zur Spanfläche verkippten Schneidkantenverrundung ergab ein deutlich besseres Einsatzverhalten. So konnte eine Steigerung des Zeitspanvolumens und somit der Produktivität von 50% erzielt werden. Bei der Energiebetrachtung ergab sich durch diese Standzeiterhöhung insgesamt eine potentielle Reduzierung der CO_2 -Emissionen um ca. 17.000 t pro Jahr gegenüber der Verwendung von VHM-Werkzeugen. Neben den Hauptanwendungsfall wurden zur Vergrößerung des Potentials noch HSS-Bohrer und HSS-Walzenstirnfräser betrachtet. Bei den Bohrern konnte eine Standzeiterhöhung von 20 % erzielt werden. Die Übertragung der Ergebnisse auf HSS-Walzenstirnfräser war nicht möglich, da die Schneidkantenverrundung bei den eingesetzten Walzenstirnfräsern von den der Schafffräser abwich. Für eine geeignete Übertragung bräuchte es weitere Analysen des Einflusses der Vorbehandlung sowie der thermomechanischen Belastung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

G. Erkens, B. Denkena, T. Grove, B. Richter: Steigerung der Ressourceneffizienz bei HSS-Fräsern. Wt Werkstattstechnik online 108, Heft 1/2, 2018, S. 56-62

G. Erkens, B. Denkena, B. Richter: HSS – produktiv mit Verrundungs-Beschichtungs-Kombination. VDI-Z Special Werkzeuge August 2018, S. 19-21

Fazit

In dem Projekt konnte durch eine optimierte Kombination aus Hochleistungsbeschichtung und Schneidkantenverrundung eine deutliche Standzeitsteigerung der HSS-Werkzeuge erreicht werden. Diesbezüglich ergibt sich insgesamt eine potentielle Reduzierung der CO_2 -Emissionen von ca. 17.000 t pro Jahr gegenüber der Verwendung von VHM-Werkzeugen. Die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf HSS-Bohrer zeigte ebenfalls eine Steigerung der Einsatzzeit um 20%. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Walzenstirnfräser ist nicht ohne Anpassung der Vor- und Nachbehandlungsverfahren möglich. Dadurch ist das Anwendungsgebiet zunächst nur auf HSS-Schafffräser- und Bohrer beschränkt. Da die genannten Werkzeugtypen jedoch den größten Anteil an der Gesamtheit der HSS-Werkzeuge auf dem Markt aufweisen, ist die Wirksamkeit der Projektergebnisse bereits als hoch einzustufen. Um sämtliche HSS-Werkzeugtypen abzudecken, wären weitere Untersuchungen zum Beispiel unter Hinzunahme alternativer Schichtvorbehandlungsmethoden erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	1
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1. Zusammenfassung	8
2. Ausgangslage und Motivation.....	9
3. Stand der Technik	11
3.1 Beschichtungstechnik	11
3.2 Schneidkantenverrundung.....	13
4. Durchgeführte Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse	14
4.1 Referenzuntersuchungen.....	14
4.2 Schichtentwicklung und Optimierung der Schneidkantenverrundung für Zerspanprozesse mit erhöhter Produktivität	17
4.2.1 Beschichtungsanlage.....	18
4.2.2 Schneidkantenoptimierung - Entgraten und Verrunden von HSS Schaftfräsern	19
4.2.3 Schichtentwicklung	23
4.2.4 Qualifizierte Schichtsysteme.....	25
4.2.5 Experimentelle Zerspanuntersuchungen C45.....	27
4.2.6 Zerspanuntersuchungen 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10	31
4.2.7 Übertragung der Ergebnisse auf HSS-Stirnfräser und -Bohrer	35
4.2.8 Theoretische Belastung der Beschichtungen.....	39
4.2.9 Energiebetrachtung	44
5. Fazit.....	48
6. Literaturverzeichnis	49

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Eingesetzte HSS- und VHM-Schaftfräser.....	15
Bild 2: Standzeiten der Referenzwerkzeuge	16
Bild 3: Verschleißzustand der HSS-Referenzwerkzeuge am Standzeitende	17
Bild 4: Arc PVD Anlage	18
Bild 5: Fertigungsbedingte Gratbildung bei den HSS-Fräsern im Anlieferungszustand	20
Bild 6: Schneide nach manuellem Entgraten	20
Bild 7: OTEC Schleppscheifanlage für Zerspanwerkzeuge	21
Bild 8: Hauptschneide eines HSS Fräasers vor dem Beschichten	22
Bild 9: Unterschiedliche präparierte HSS Fräser.....	23
Bild 10: Rockwell Eindrucktest 150kg – MpC_2 DBU.....	26
Bild 11: Rockwell Eindrucktest 150kg – MpC_3 DBU.....	26
Bild 12: FIB Schnitt zur Darstellung des nano-lamellaren Schichtdesigns	27
Bild 13: Mikrogeometrien der Präparations- und Schichtvarianten	28
Bild 14: Einsatzverhalten der Beschichtungs- und Präparationsvarianten.....	29
Bild 15: Verschleiß der optimierten Werkzeuge am Standzeitende	30
Bild 16: Produktivitätssteigerung bei der Bearbeitung von C45.....	31
Bild 17: Verschleißverhalten der optimierten Werkzeuge	32
Bild 18: Vergleich des Einsatzverhaltens der Werkzeuge.....	33
Bild 19: Verschleißverhalten der Werkzeuge bei gesteigerten Prozesseinstellgrößen.....	34
Bild 20: Steigerung der Produktivität bei 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10	34
Bild 21: HSS Bohrer: oben - im Anlieferungszustand, unten – nach der Präparation	35
Bild 22: HSS Stirnfräser: oben - im Anlieferungszustand, unten – nach der Präparation	36
Bild 23: Eckenradiusverschleiß der Stirnfräser	38
Bild 24: Freiflächenverschleiß der Bohrer.....	39

Bild 25: Versuchswerkzeuge und Messgeräte	40
Bild 26: Versuchsaufbau.....	41
Bild 27: Oberflächenabtrag bei defokussiertem Betrieb	42
Bild 28: Untersuchung der Bohrtiefe	42
Bild 29: Temperaturverläufe der unterschiedlichen Beschichtungen	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schichteigenschaften der ausgewählten Schichten..... 26

Tabelle 2: Schneidkantenverrundung der HSS-Stirnfräser 38

Tabelle 3: CO₂-Einsparungen **Fehler! Textmarke nicht definiert.8**

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
A_1	Anzahl HSS-Werkzeuge	-
a_e	Arbeitseingriff	mm
a_p	Schnitttiefe	mm
CO_{2HM}	CO ₂ pro HM-Werkzeug	g
CO_{2HSS}	CO ₂ pro HSS-Werkzeug	g
d	Durchmesser	mm
E	Energie	J
E_H	Energie Schleifen HSS	J/mm ²
E_{HM}	Energie Schleifen HM	J/mm ²
E_{HMW}	Energie bezogen auf ein HM-Werkzeug	J
E_{HW}	Energie bezogen auf ein HSS-Werkzeug	J
f	Vorschub	mm
f_z	Zahnvorschub	mm
HM	Hartmetall	-
HSS	Schnellarbeitsstahl	-
L	Länge	mm
m	Masse	kg
m_{HMW}	Masse pro HM-Werkzeug	g
m_{HSS}	Masse pro HSS-Werkzeug	g
n	Drehzahl	1/min
O	Oberfläche des Werkzeugs	mm ²
\bar{S}	mittlere Schneidkantenverrundung	μm
S_α	Schneidkantensegment der Freifläche	μm
S_γ	Schneidkantensegment der Spanfläche	μm
ST_{HM}	Anzahl der Hartmetallwerkzeuge	-
ST_{HSS}	Anzahl der HSS-Werkzeuge	-
t	Dauer	s
t_{99}	Ansprechzeit	s
V	Volumen	mm ³
VB	Verschleißmarkenbreite	μm
VB_B	mittlere Verschleißmarkenbreite	μm
VB_M	maximale Verschleißmarkenbreite	μm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
V_{HM}	Hartmetall-Volumen	mm ³
V_W	zerspantes Volumen	cm ³
Z	Zähnezahl	-
ΔE	Energieeinsparung pro Werkzeug	J
K	Formfaktor	-
ρ	Dichte	g/cm ³
ρ_{HM}	Dichte Hartmetall	g/cm ³

1. Zusammenfassung

Zu Beginn des Projektes wurden konventionelle HSS- und Hartmetallschaftfräser eingesetzt, um das Einsatzverhalten dieser Werkzeuge bei der Bearbeitung der Werkstoffe C45, 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10 zu analysieren. Dabei konnten die HSS-Werkzeuge bei dem erreichten zerspannten Volumen V_w bei allen Werkstoffen nicht das Niveau der Hartmetallfräser erzielen. Die zuvor definierten Verschleißkriterien wurden bei den HSS-Werkzeugen nach einem deutlich geringerem Zerspanvolumen erreicht.

Im Anschluss erfolgte zur Erhöhung der Standzeit der Werkzeuge zum einen eine Optimierung des Schichtsystems und der Schichtarchitektur und zum anderen eine gezielte Verrundung der Schneidkanten der Werkzeuge. Hierzu wurden von der Fa. Surcoatec für den Einsatzfall geeignete Beschichtungen identifiziert und mit für HSS-Werkzeuge optimierten Beschichtungsprozessen abgeschieden. Diese Werkzeuge sowie Werkzeuge mit verschiedenen Schneidkantenmikrogeometrien (symmetrisch und asymmetrisch) wurden in Zerspanuntersuchungen eingesetzt und bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass eine Kombination aus Multifunktionsschicht und einer asymmetrisch zur Spanfläche verkippten Schneidkantenverrundung von ca. 40 μm eine deutliche Erhöhung des Zerspanvolumens und somit der Standzeit der HSS-Werkzeuge bewirkt. Parallel hierzu wurde die thermische Belastung der Beschichtungen ermittelt. Dadurch konnte neben der Verschleißfestigkeit auch die Temperaturbeständigkeit der Beschichtungen optimiert werden.

Anschließend erfolgte die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf HSS-Stirnfräser und –bohrer. Die Bohrer wurden mit dem Präparationsverfahren und den gleichen Parametern wie die Schaftfräser präpariert. Bei den Walzenstirnfräsern war dies aufgrund der Abmessung nicht möglich und die Präparation musste angepasst werden. Bei den präparierten Bohrern konnte eine Erhöhung der Einsatzzeit bestätigt werden. Dabei konnte die Standzeit um 20% gegenüber den Referenzwerkzeugen gesteigert werden. Bei den Walzenstirnfräsern konnten das verbesserte Einsatzverhalten, ohne weitere Untersuchungen der Einsatzbedingungen und Werkzeugbelastung, nicht bestätigt werden. Abschließend erfolgte eine Energiebetrachtung mit der Ermittlung des Einsparpotentials von CO_2 -Emissionen durch das verbesserte Einsatzverhalten HSS-Werkzeuge und, ob sie dadurch eine Alternative zu den Hartmetallwerkzeugen bieten. Durch die Standzeitsteigerung bzw. die Erhöhung des Zerspanvolumens aufgrund der optimierten Kombination aus Hochleistungsbeschichtung und Schneidkantenverrundung kann eine potentielle Reduzierung der CO_2 -Emissionen von ca. 17.000 t pro Jahr entstehen.

2. Ausgangslage und Motivation

Der Markt der Werkzeuge für spanende Verfahren wird von zwei Werkzeugs substraten dominiert, den Hartmetallen (HM) und den Schnellarbeitsstählen (HSS). Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung dieser Schneidstoffe und der Gewinnung der jeweils erforderlichen Rohstoffe resultieren große ökologische Differenzen bei der Herstellung der Substrate. So fallen bei der Produktion von HSS und vergleichbaren Stählen 1.356 kg CO₂ pro Tonne Stahl [ENE13] im Vergleich zu 8.558 kg CO₂ pro Tonne Hartmetall [GAN12] an. In den letzten Jahren wurde fast ausschließlich im Bereich der Hartmetallwerkzeuge geforscht, der Trend ging zu immer komplexeren und härteren Schneidstoffen für die Bearbeitung von mechanisch und thermisch hochbeständigen Werkstoffen. Es besteht jedoch ein großer Markt an HSS-Zerspanwerkzeugen, der in den letzten Jahren kaum mehr technisch optimiert wurde. So werden ca. 5,5 Mio. Schafffräswerkzeuge pro Jahr in Deutschland aus HSS produziert [VDM13]. Sollte es gelingen, die Produktivität und Prozesssicherheit der HSS-Werkzeuge zu verbessern, müssten weitaus weniger Werkzeuge hergestellt werden, wodurch eine enorme Menge Ressourcen und Energie eingespart werden können. Zudem entstehen bei einer Produktivitätssteigerung erhebliche sekundäre Einsparungseffekte. Daher wird in dem Entwicklungsprojekt angestrebt, erstmalig Kenntnisse aus der Optimierung von Hartmetallwerkzeugen für spanende Verfahren auf HSS-Werkzeuge zu übertragen und dadurch die spanende Industrie wesentlich umweltschonender zu machen.

Die Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen aus Hartmetall konnte zuletzt vor allem durch eine Anpassung der Schneidkantenverrundung und durch neue Beschichtungen bzw. Beschichtungsverfahren verbessert werden. Mit der Übertragung und Weiterführung der Forschung und Entwicklung dieser Bereiche auf HSS-Werkzeuge kann das bisher nicht genutzte Potenzial dieses Schneidstoffs zur ökologischen Optimierung führen. Die Leistungssteigerung der HSS-Werkzeuge in den Prozessen, bei denen diese Werkzeuge heute eingesetzt werden, wird zu längeren Standzeiten und verbesserter Wiederverwertung führen. Durch diese Entwicklung werden umfangreiche ökologische und ökonomische Vorteile entstehen:

- Die Reduktion der Produktionsmenge von HSS-Werkzeugen durch die Standzeiterhöhung führt zu hohen Energie- und Ressourceneinsparungen.
- Steigerung der Produktivität von HSS-Werkzeugen führt zu einem wirtschaftlichen Einsatz dieses Schneidstoffs
- Verbesserung der Wiederverwendung von Zerspanwerkzeugen (Recycling)

Vorrangige Motivation ist es, die Leistungsfähigkeit von HSS-Werkzeugen für spanende Verfahren zu verbessern. Durch die erstmalige Anwendung und Weiterentwicklung modernster Oberflächentechnologien auf HSS-Werkzeuge kann zudem die Wirtschaftlichkeit von HSS-Werkzeugen in einigen Einsatzgebieten möglicherweise derart erhöht werden, dass diese als Alternative für andere Schneidstoffe wie Hartmetall eingesetzt werden können. Dies hätte weitere ökologische, aber auch ressourcenpolitische Konsequenzen, denn bei Hartmetall-Werkzeugen werden vielfach kritische Rohstoffe eingesetzt. So besteht eine geringe Verfügbarkeit von Kobalt (Co) sowie eine Ressourcenabhängigkeit, vor allem von China, beim Übergangsmetall Wolfram (W) [GIE12]. Eine Verknappung oder ein Wegfall dieser Rohstoffe kann im Ernstfall einen Produktionsstopp von Hartmetallwerkzeugen bedeuten. Daraus würden wiederum weitreichende wirtschaftliche Folgen für die vielen deutschen Unternehmen entstehen, die sich mit Metallbearbeitung befassen. HSS-Werkzeuge bieten gegenüber den Hartmetallwerkzeugen folgende Vorteile:

- Bei HSS werden in der Regel weniger geopolitisch kritische Legierungselemente eingesetzt. Insbesondere wird wesentlich weniger Wolfram eingesetzt, wodurch die Abhängigkeit vom Hauptlieferanten China verringert werden kann.
- Der Aufwand zur Wiederaufarbeitung (Entschichtung/Nachschleifen) von HSS-Werkzeugen ist aufgrund kürzerer Schleifzeiten wesentlich geringer. Das bei HM-Werkzeugen auftretende Kobalt-Leaching, das Lösen des Kobalt aus dem HM durch die Entschichtungschemikalien, tritt beim Entschichten von HSS-Werkzeugen nicht auf und erhöht die Wiederverwertbarkeit deutlich.
- Der Aufwand, vor allem bezüglich des Energieverbrauchs, bei der Herstellung von HSS ist wesentlich geringer als bei der Herstellung von Hartmetallen.
- HSS lässt sich wesentlich einfacher weiterverarbeiten, wodurch auch in diesem Bereich ein geringerer Energie- und Materialaufwand erforderlich ist, als bei der Weiterverarbeitung von Hartmetallen.
- Der Werkstoff lässt sich wesentlich besser recyceln und zur Herstellung von den gleichen Präzisionswerkzeugen wiederverwenden. Recyceltes HM wird in der Regel nicht wieder in den Zyklus zur Herstellung von HM-Präzisionswerkzeugen zurückgeführt, sondern zur Herstellung von Verschleißteilen genutzt.

Die aktuell zur Verfügung stehenden Beschichtungsverfahren und -werkstoffe ermöglichen es, temperaturstabile und bis zu hohen Einsatztemperaturen phasenstabile in situ Beschichtungen herzustellen. Der bei erhöhter Temperatur auftretende in-situ-Schmiereffekt basiert auf der Mikrolegierung der Schichten mit Elementen, deren Reaktionsprodukte, meist Oxide oder Oxinitride, zu einer Reduzierung der Reibung in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück führen. Da in dem

Projekt angestrebt wird, das gesamte System aus Oberflächen- und Schneidkantenpräparation, Beschichtung, Beschichtungsverfahren und Werkzeugsubstrat von einem neuen, ganzheitlichen Ansatz her zu betrachten, sollen Hochleistungsbeschichtungen mit bei erhöhten Einsatztemperaturen möglichst selbstschmierenden Eigenschaften zum Einsatz kommen.

3. Stand der Technik

Hartmetalle sind Verbundwerkstoffe, die aus harten Carbidteilchen und einem metallischen Bindemittel bestehen, gesinterte Carbidmetalle. Teilchen aus Wolframcarbid (WC) und das Bindemittel Kobalt (Co) bilden das Hartmetallgrundgefüge, aus dem im Laufe der Zeit andere Hartmetallsorten entstanden sind. So gibt es auch weitere Sorten mit Anteilen von z. B. Titancarbid (TiC) oder Tantalcarbid (TaC). Zu den wichtigsten Eigenschaften von Hartmetallen gehören Verschleißfestigkeit, sehr hohe Warmhärte, mechanische Festigkeit und Korrosionsfestigkeit [DEN11, KLO08].

Neben Hartmetallwerkzeugen kommen bei einer Vielzahl von Fertigungsprozessen HSS-Werkzeuge zum Einsatz. Der so genannte Schnellarbeitsstahl ist eine Gruppe von legierten Werkzeugstählen, die im Vergleich zum Hartmetall eine höhere Zähigkeit und Kantenfestigkeit aufweist. Allerdings ist der Einsatz durch die geringere Härte und mechanische Festigkeit vor allem bei anspruchsvollen Prozessen eingeschränkt. In einigen Anwendungsfeldern, vor allem bei der Verarbeitung weicher Metalle (z. B. Kupfer oder Aluminium) und der Stahlzerspanung (Stähle mittlerer und geringer Härte), werden HSS-Werkzeuge jedoch in großer Zahl eingesetzt [DEN11, KLO08]. Zur Verbesserung von spanenden Werkzeugen sind bisher vor allem die Bereiche Werkzeugsubstrat, Beschichtungsverfahren sowie Oberflächen- und Schneidkantenpräparation erforscht worden.

3.1 Beschichtungstechnik

Werkzeuge für spanende Verfahren sind je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Beschichtungen versehen. Ziel der Beschichtungstechnik ist es, die Eigenschaften einer Oberfläche zu verändern, damit das Werkzeug ein bestimmtes Anforderungsprofil erfüllen kann. In der Zerspanung werden Beschichtungen dazu eingesetzt, die thermische und mechanische Beständigkeit zu erhöhen sowie die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück zu reduzieren.

Der Grundwerkstoff erfüllt hauptsächlich die Funktion der Formgebung, bei runddrehenden Werkzeugen für die Zerspanung kommen hierbei in der Regel Hartmetalle oder HSS zum Einsatz. Ein solcher Werkstoff muss eine hohe Grundfestigkeit und Härte aufweisen, um ein plastisches Verformen zu vermeiden und die Stützwirkung der Oberflächenschicht zu gewährleisten. Eine große Duktilität muss gegeben sein, um die mechanischen Belastungen ohne Rissbildung aufzunehmen. Bei den Zerspanprozessen entstehen hohe Temperaturen, so dass der Grundwerkstoff ausreichend temperaturbeständig sein muss, um Gefügeänderungen zu verhindern. Ziel ist es, die Wärme so

schnell wie möglich aus der Kontaktzone zwischen Schneide und Werkstück zu entfernen. Ein geringer Wärmeausdehnungskoeffizient verhindert eine Verformung des Werkzeugs während der Zerspanung. Die hohe Formbeständigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen und eine hohe Wärmekapazität sorgen dafür, dass thermisch induzierte Risse vermieden werden. Eine Verformung des Werkzeugs muss auch vermieden werden, um die Haftung der Beschichtung am Werkzeug nicht zu gefährden.

An die Oberflächenbeschichtung werden zudem noch weitere Ansprüche gestellt [KLO08, WEI99]:

- Hohe Oberflächenhärte und möglichst hohe Zähigkeit, um Abrasion zu vermeiden
- Geringe adhäsive Bindungskräfte, um ein Verschweißen der Oberfläche mit dem Werkstückmaterial zu vermeiden
- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Hohe Phasenstabilität
- Hohe chemische Beständigkeit gegen Oxidation, besonders Tribooxidation und Korrosion
- Geringe Deformationsneigung
- Geringe Gleitreibung zwischen Werkzeug und Werkstück

Bei den Zerspanprozessen sind die Schichthaftung und die Homogenität der Oberfläche sehr wichtige Faktoren der Beschichtung, da sich bereits kleinste Unebenheiten direkt auf dem Werkstück abbilden und die Scherbelastung an der Schneide des Werkzeugs extrem groß ist. Jedes Werkzeug unterliegt zu Beginn der Schnittphase einem Anfangsverschleiß, dem sogenannten Initialverschleiß. Der Anfangsverschleiß ist wesentlich für das weitere Verschleißverhalten eines Werkzeugs. Um signifikante Verbesserungen der Produktivität und der Prozesssicherheit bei gleichen oder erhöhten Schnittbedingungen zu erzielen, muss der Verschleißmechanismus während der Anschnittphase verstanden und beurteilt werden. Maßgebliche Faktoren für diesen Initialverschleiß ist die Schichttopographie sowie die Form und Größe der Schneidkantenmikrogeometrie [BER17, BOB16].

Die Beschichtung von Zerspanwerkzeugen kann sowohl auf chemischen als auch auf physikalischem Wege erfolgen. Verfahrensvarianten sind das CVD- und das PVD-Verfahren. Unter den CVD-Verfahren werden chemische Reaktionen, die in der Gasphase bei Grobvakuumbedingungen (103-105 Pa) und unter Zufuhr von Wärme- oder Strahlungsenergie ablaufen und dabei neben flüchtigen Produkten technisch nutzbare Feststoffe (Hartstoffe) bilden, verstanden. Anders als bei den CVD-Verfahren wird bei PVD-Verfahren das Ausgangsmaterial durch physikalische Verfahren in die Gasphase überführt. Das PVD-Verfahren lässt sich in drei unterschiedliche Methoden gliedern:

- Verfahren mit thermischem Verdampfen (Vakuumverdampfen)
- Verfahren mit Lichtbogenverdampfen (Arc-PVD)
- Verfahren mit Kathodenzerstäuben (Sputtern)

Im Projekt sollen die Entwicklungen auf das PVD-Verfahren fokussiert werden. Dieses liefert die notwendige hohe Qualität der Oberflächen und der Haftung bei Prozesstemperaturen $< 500\text{ °C}$, also unterhalb der Anlasstemperatur des HSS, und ist daher schonend für das Werkzeug. Für funktionsoptimierte Werkzeuge ist es notwendig, die primären prozessspezifischen Verschleiß- und Versagensmechanismen zu identifizieren und dann gezielt zu beeinflussen. PVD-Hartstoffbeschichtungen eignen sich hervorragend, um den Verschleiß, die Reibung und die Wechselwirkungsneigung (z. B. Aufbauschneidenbildung), zu verringern.

3.2 Schneidkantenverrundung

Die definierte Nachbehandlung der Mikrogeometrie der Schneidkanten eines Werkzeugs wird als Schneidkantenverrundung bezeichnet. Unabhängig vom Zerspanprozess konnte in mehreren Forschungsarbeiten nachweislich die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen mit angepassten Schneidkantenmikrogeometrien durch Verrunden aufgezeigt werden [BIE08, DEN14, WYE12]. Die Leistungssteigerung wurde dabei auf die höhere Stabilität der Schneidkante gegenüber scharfen Schneidkanten zurückgeführt [DEN14]. Zudem kann durch die Gestalt der Schneidkante das Verschleißverhalten beeinflusst werden. Eine zur Freifläche verkippte Verrundung resultiert, aufgrund der erhöhten Reibung an der Freifläche und somit einer höheren thermischen Belastung, in höherem Freiflächenverschleiß. Durch eine Verkipfung zur Spanfläche wird Kolkverschleiß begünstigt, der auf die erhöhten Temperaturen an der Spanfläche zurückgeführt wird [BAS13]. Die Hauptverschleißmechanismen sind zusätzlich vom Verhältnis der Schneidkantenverrundung zur Spanungsdicke abhängig. Löffler [LÖF96] konnte aufzeigen, dass kleine Verhältnisse von Spanungsdicke zu Schneidkantenverrundung zu ungünstigen Zugspannungen im Schneidkeil verrundeter Schneidkanten und zum Versagen des Werkzeugs führen. Die Erkenntnisse von Löffler wurden durch Untersuchungen von Bassett [BAS13] bestätigt. Eine Erhöhung der Spanungsdicke bei einer konstanten Schneidkantenverrundung führt demnach zu Kolkverschleiß. Hingegen führt eine Verringerung der Spanungsdicke zu verstärktem Freiflächenverschleiß, bedingt durch die erhöhte Reibung an der Freifläche. Durch eine gezielte Einstellung der Schneidkantenmikrogeometrie durch Verrunden kann somit das Einsatz- und Verschleißverhalten von Werkzeugen beeinflusst werden.

Für die Herstellung von Schneidkantenverrundungen existieren unterschiedliche Verfahren, die je nach Art und Einsatzverhalten der Verrundung angewendet werden. Nachfolgend sind die gängigen Verfahren aufgelistet [DEN14]:

- Bürsten
- Wasserstrahlen

- Schleppscheifen
- Magnetfinishing
- Schleifen
- Lasernbearbeitung
- Funkenerosive Bearbeitung

Bei Hartmetallwerkzeugen wird das Verfahren sowohl bei Neuwerkzeugen als auch beim Nachschliff angewendet [KÖT06, UHL15, DEN10].

Wichtig ist auch die Nachbehandlung der beschichteten Oberflächen. Jede beschichtete Oberfläche lässt sich in ihrer Qualität durch eine geeignete Nachbehandlung nochmals bzgl. ihrer tribologischen Eigenschaften optimieren [KÖT06]. Der systematische Ansatz aus Präparation, Beschichtung und Nachbehandlung bildet für jedes Werkzeug und jede Komponente die Möglichkeit der optimierenden Anpassung an eine spezifische Applikation.

4. Durchgeführte Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Vorhaben wurde in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt. Die Erkenntnisse und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden erläutert und diskutiert.

4.1 Referenzuntersuchungen

Im ersten Arbeitspaket wurden am Markt erhältliche HSS- und Hartmetallwerkzeuge eingesetzt, um das Einsatzverhalten dieser Werkzeuge zu untersuchen und das Potential der HSS-Werkzeuge gegenüber Hartmetallwerkzeugen bei der Bearbeitung der Werkstoffe C45, 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10 analysiert. Als Werkzeuge kamen Schafffräser mit einem Durchmesser von $d = 8$ mm und einer Zähnezahl von $z = 4$ der Fa. Gühring zum Einsatz. Diese sind laut Herstellerangaben für die Bearbeitung der vier unterschiedlichen Werkstoffe geeignet und somit universell einsetzbar. Die Makrogeometrie der HSS- und Hartmetallfräser sowie die jeweiligen Beschichtungen und Drallwinkel der Werkzeuge sind in Bild 1 dargestellt. Die mittels eines Alicona Infinite G5 ermittelte Schneidkantenverrundung wies bei den HSS-Fräsern einen Schneidkantenabschnitt an der Freifläche von $S_\alpha = 22 \pm 4$ μm und an der Spanfläche von $S_\gamma = 17 \pm 3$ μm auf. Hieraus folgt im Mittel ein Formfaktor von $K = 0,8$ und somit eine Verkippung der Verrundung zur Freifläche der Werkzeuge. Die HM-Werkzeuge waren mit einer symmetrischen Schneidkantenverrundung mit $S_\alpha = S_\gamma = 12$ μm versehen. Die Einstellgrößen Schnittgeschwindigkeit v_c und Zahnvorschub f_z wurden sowohl bei den HSS- als auch den HM-Fräsern für die vier Werkstoffe nach Angaben des Werkzeugherstellers gewählt. Die Schnitttiefe wurde auf $a_p = 4,0$ mm und die Schnittbreite auf $a_e = 2,4$ mm festgesetzt. Diese Werte wurden in dem gesamten Projekt ebenso wie die KSS-Kühlung (Emulsion 6 %) mit 12 bar

konstant gehalten. Alle Versuche wurden auf einem 4-Achs-Bearbeitungszentrum der Fa. Heller im Teilnutenschnitt durchgeführt.

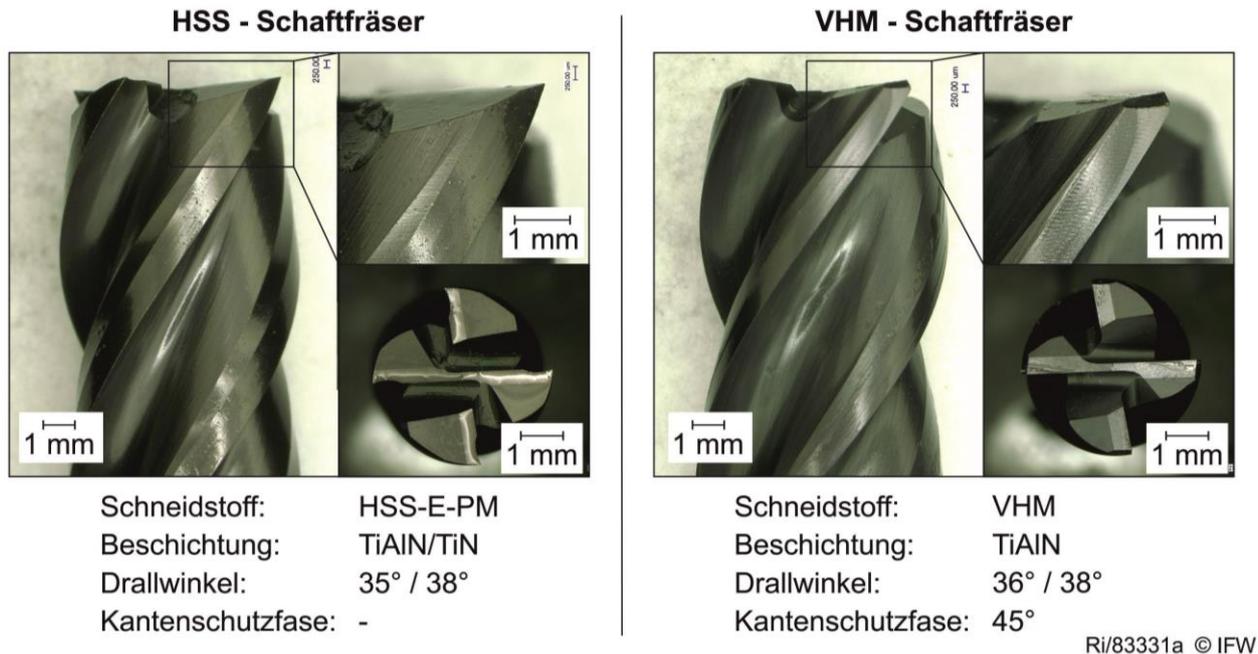


Bild 1: Eingesetzte HSS- und VHM-Schaftfräser

Bei dem erreichten zerspannten Volumen V_w konnten die HSS-Werkzeuge nicht das Niveau der Hartmetallfräser erreichen (Bild 2). Ursache sind die unterschiedlichen thermo-mechanischen Eigenschaften der Schneidstoffe, die das Verschleißverhalten und die Belastbarkeit der Werkzeuge und der Werkzeugschneiden beeinflussen. Die Untersuchungen mit den Hartmetallfräsern wurden bei den vier untersuchten Werkstoffen bei einem zerspannten Volumen von $V_w = 787 \text{ cm}^3$ abgebrochen. Die Verschleißkriterien (Freiflächenverschleiß VB und Ausbrüche CH) waren dabei bei den HM-Werkzeugen noch nicht erreicht. Bei den Referenzwerkzeugen aus HSS ergaben sich aufgrund des Verschleißverhaltens hingegen deutlich geringere zerspannte Volumina im Vergleich zu den HM-Werkzeugen bei allen vier untersuchten Werkstoffen. Insbesondere bei dem Werkstoff C45 ergab sich eine sehr kurze Einsatzzeit der HSS-Fräser mit einer geringen Prozesssicherheit der Werkzeuge, da wiederholt Brüche der Werkzeugschneiden auftraten, die zu einem Ausfall der Werkzeuge führten.

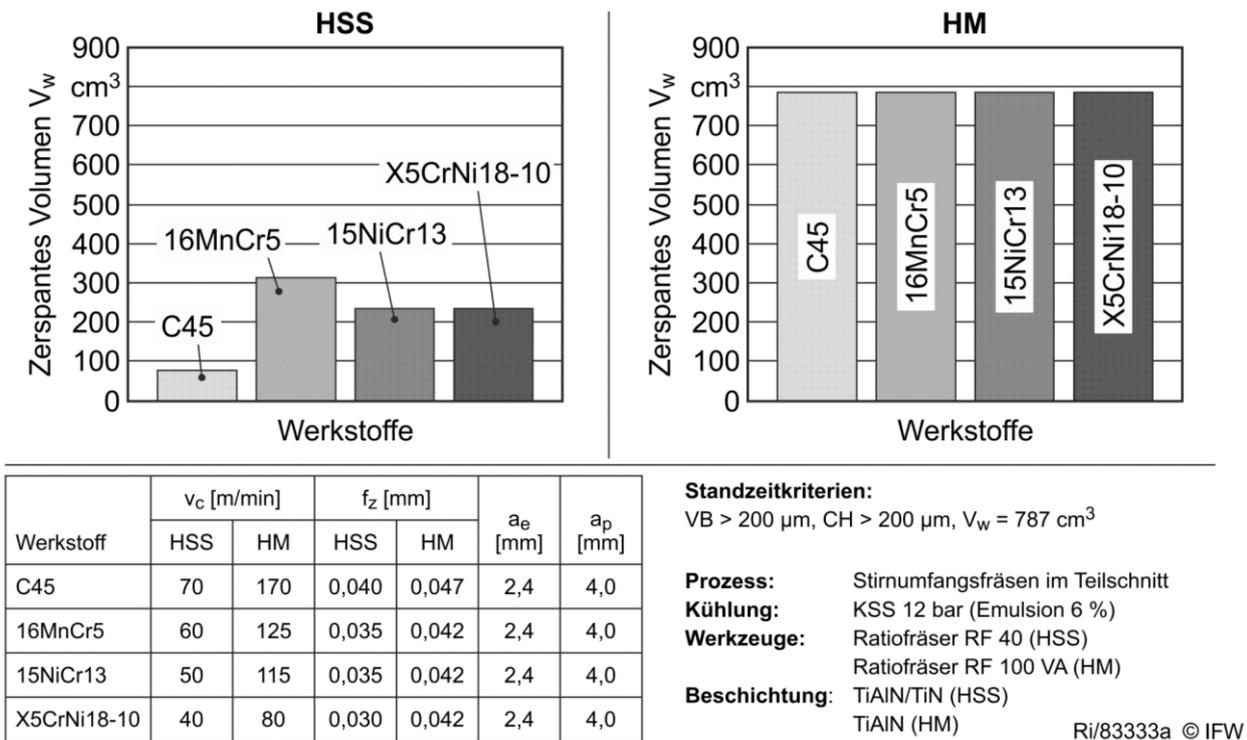


Bild 2: Standzeiten der Referenzwerkzeuge

Das größte zerspannte Volumen konnte bei dem Einsatzstahl 16MnCr5 erreicht werden. Abbruchkriterium war bei diesem Werkstoff jedoch ebenso wie bei dem austenitischen Stahl X5CrNi18-10 nicht der fortschreitende Freiflächenverschleiß, sondern das Ausbrechen der Schneidenecke (Bild 3). Bei der Bearbeitung von C45 trat neben diesem Ausbruch zudem ein signifikanter Versatz der Schneidkante zusammen mit Ausbrüchen entlang der Schneidkante auf. Auffallend ist bei der Zerspannung von C45 mit HSS-Werkzeugen die deutlich geringere Standzeit im Vergleich zu den höher legierten und thermomechanisch anspruchsvolleren Werkstoffen 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10. Als Ursache hierfür kann die höhere Adhäsionsneigung von C45 aufgrund der größeren Stagnationszone entlang der Schneide gegenüber hochlegierten Werkstoffen herangezogen werden [KLO08, REH15]. Hieraus resultiert eine stärkere Aufschweißung von Werkstückstoffpartikeln entlang der Schneidkante, die im Eingriff zum Herausreißen von HSS-Partikeln an der Schneide und zu dem auftretenden Schneidkantenversatz mit Ausbrüchen führen. In den Referenzuntersuchungen wurde bei den eingesetzten Werkstoffen lediglich bei der Bearbeitung des Einsatzstahls 15NiCr13 das Standzeitende aufgrund von abrasivem Freiflächenverschleiß erreicht. Da jedoch auch bei diesem Werkstoff Ausbrüche im Bereich der Schneidenecke (Bild 3) auftraten, wird zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei HSS-Werkzeugen insbesondere die Erhöhung der Prozesssicherheit und somit die Minimierung von Ausbrüchen an der Schneidkante fokussiert. Im Folgenden wurde die Optimierung der Werkzeuge auf die Bearbeitung des Werkstoffs C45 fokussiert, da bei diesem Werkstoff

sowohl die Standzeit der Werkzeuge als auch das Verschleißverhalten gegenüber den anderen eingesetzten Werkstoffen signifikant schlechter war. Hier lagen große Ausbrüche entlang der Schneidkante sowie Schneidkantenversatz und somit hohes Potential zur Verbesserung vor. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden anschließend die Werkzeuge zur Bearbeitung der Werkstoffe 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10 optimiert. Basis der Steigerung der Leistungsfähigkeit von HSS-Werkzeugen waren die umfangreichen Erkenntnisse des IFW zur Auslegung der Mikrogeometrien von Hartmetall-Werkzeugen [BAS13, DEN14, REH15]. In Kombination mit multifunktionalen Hochleistungsschichten der Fa. Surcoatec wurden diese Erkenntnisse auf HSS-Werkzeuge übertragen, um in einem iterativen Prozess die Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit und damit der Ressourceneffizienz von HSS-Fräsern zu erhöhen.

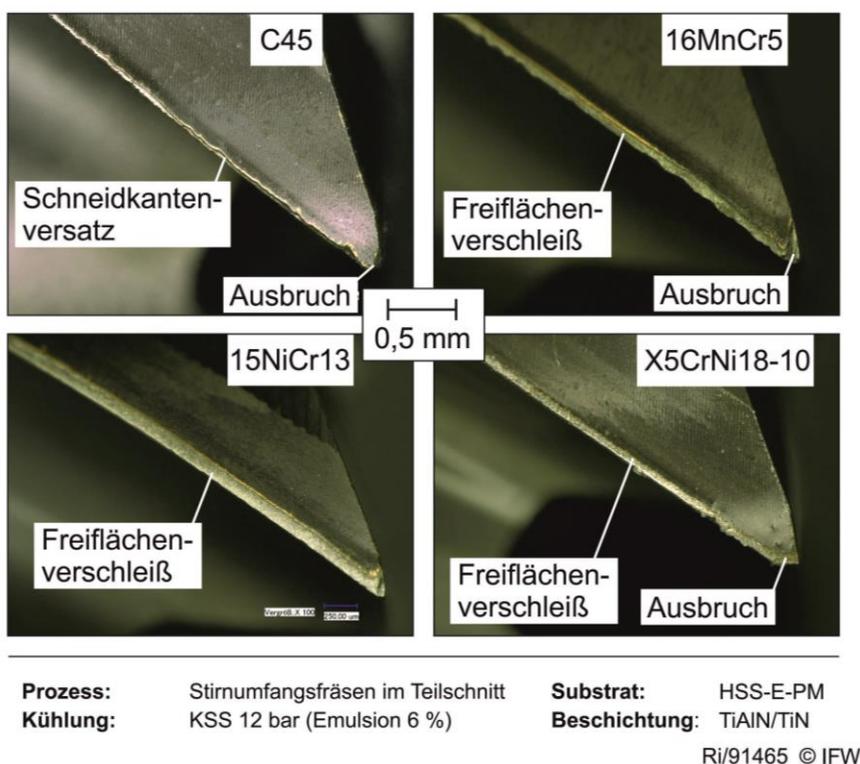


Bild 3: Verschleißzustand der HSS-Referenzwerkzeuge am Standzeitende

4.2 Schichtentwicklung und Optimierung der Schneidkantenverrundung für Zerspanprozesse mit erhöhter Produktivität

Aufgrund der parallelen Durchführung und Entwicklung der Arbeitspakete AP 2 „Schichtentwicklung für Zerspanprozesse mit erhöhter Produktivität“ und AP 4 „Optimierung der Schneidkantenverrundung und Erhöhung der Schichtdicke“ werden die Ergebnisse dieser Arbeitspakete im Folgenden

zusammen dargestellt. Zudem werden wie vorher beschrieben die Erkenntnisse der Werkzeugoptimierung bei der Bearbeitung des Werkstoffs C45 und anschließend für die Werkstoffe 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10 beschrieben. Die Variation der Schichtdicken zeigte dabei keinen signifikanten Auswirkungen auf die Standzeit und die Produktivität der Werkzeuge, so dass diese im Folgenden nicht näher betrachtet werden.

4.2.1 Beschichtungsanlage

Sämtliche Schichten, die während des Vorhabens für HSS Werkzeugstahl entwickelt wurden, wurden mit einer industriellen Arc PVD Produktionsanlage synthetisiert. (Bild 4)



Bild 4: Arc PVD Anlage

Die oktagonale Vakuumkammer war mit vier Arc Verdampferquellen, die variabel bestückt werden konnten, ausgestattet. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Beschichtung der komplex geformten Fräser- und Bohrergeometrien wurden diese während des gesamten Prozesses planetar zwischen den Verdampfern bewegt. Durch eine 3-Achs-Rotation wurde eine ideal gleichmäßige Schichtabscheidung auf der Werkzeugkontur erreicht. Die Prozesse waren derart abgestimmt, dass die kritische HSS Anlasstemperatur von in der Regel 550°C nie erreicht wurde. Dies hätte über die Prozesszeit zu einem Härteverlust des HSS Grundmaterials geführt was unbedingt zu vermeiden war. Die maximale Prozessstemperatur wurde auf 480-500°C festgelegt. Die Zykluszeit eines Beschichtungsprozesses betrug zwischen acht und zehn Stunden. Der Beschichtungszyklus teilte sich in folgende Schritte auf: bestücken, evakuieren, strahlungsheizen, reinigen im Plasma (Ionenätzen), beschichten, abkühlen. Im Gegensatz zu zum Beispiel Hartmetall musste die maximale Temperatur nach der Abkühlphase zum Öffnen der Kammer bei HSS auf 150°C festgelegt werden um eine Oxidation der nicht beschichteten HSS Oberflächen (in der Regel die Schäfte) an Luft zu vermeiden.

Für alle Versuche wurde eine von Beginn an festgelegte sogenannten Dummy-Chargierung festgelegt, die eine volle Produktionscharge simulierte. Auf festgelegten Positionen wurden dann die Versuchswerkzeuge sowie sämtliche Werkzeuge und Referenzteile für interne Qualitätstests nach dem Beschichten chargiert. Diese Art der Versuchsdurchführung hat erfahrungsgemäß den großen Vorteil der Skalierbarkeit. Ohne weitere Prozessanpassungen und Qualitätsunterschiede kann stufenlos von der Beschichtung einzelner Fräser auf eine volle Fräsercharge hochskaliert werden.

Für ein optimales Ergebnis auf HSS mussten alle wesentlichen Prozessparameter wie Verdampferströme, Biasspannung, Gasflüsse, etc. auf das Material HSS hin abgestimmt werden.

Aus der Praxis mit Hartmetallwerkzeugen ist bekannt, dass ca. 80% der Leistungsfähigkeit eines beschichteten Werkzeugs durch die Prozessschritte vor dem eigentlichen Beschichten bestimmt wird. Genau diese Erfahrungswerte galt es, völlig neu auf den Werkstoff HSS anzupassen.

Durch Ionenreinigung, das heißt die Reinigung der Oberflächen im Plasma, lässt sich eine sehr gute Haftung der Beschichtung erzielen. Dieser Prozessschritt zur Entfernung von Reaktionsschichten und zur Aktivierung der Oberflächen ist jedem Beschichtungsprozess vorgeschaltet und erfolgt in der Vakuumbeschichtungsanlage.

Durch die Erzeugung eines sehr dichten Inertgasplasmas (meist ein Argonplasma) und die Beaufschlagung der Werkzeuge und Bauteile mit einer negativen Bias-Spannung werden diese durch Ionenbeschuss gereinigt. In der Fachliteratur wird dieses Ionenätzen sehr anschaulich als „Mikrostrahlen im atomaren Bereich“ beschrieben.

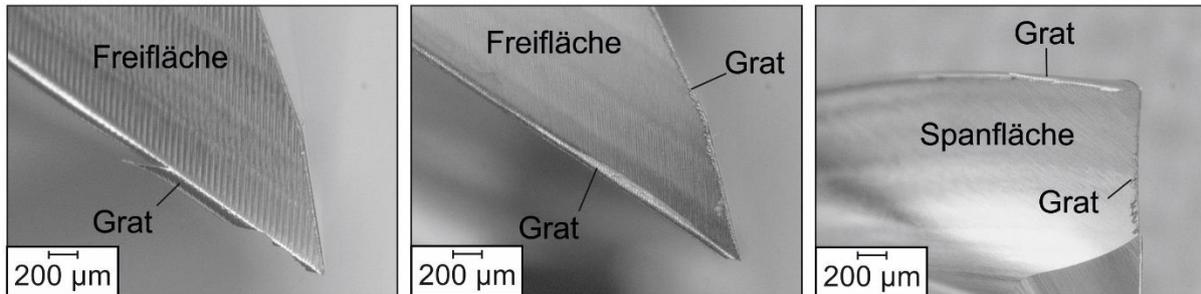
Hinsichtlich der Schichthaftung musste der Ionenätzprozess auf das Grundmaterial HSS spezifisch angepasst werden. Kontaminationen und Reaktionsschichten im Mikrometerbereich wurden durch Variation der Parameter Biasspannung und –strom, Pulsfrequenz sowie Kathoden-, Anodenstrom und Prozessgasdruck entfernt. Gleichzeitig wurde die HSS Oberfläche so aktiviert, was in einer optimierten Schichthaftung resultierte.

4.2.2 Schneidkantenoptimierung - Entgraten und Verrunden von HSS Schafffräsern

Zielsetzung: Reproduzierbares Entgraten und Verrunden in einem Arbeitsschritt, applikationsoptimierte Kantenverrundung, Formfaktor $K > 1$.

Grundsätzliche Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz eines beschichteten HSS-Werkzeugs sind die gleichmäßige und vollständige Entfernung des herstellungsbedingten Grates sowie die gezielte Verrundung der Schneiden vor der Beschichtung. Hierdurch wird das Werkzeug zum einen erst in einen beschichtungsfähigen Zustand gebracht und zum anderen hinsichtlich der Mikrogeometrie anwendungsspezifisch eingestellt.

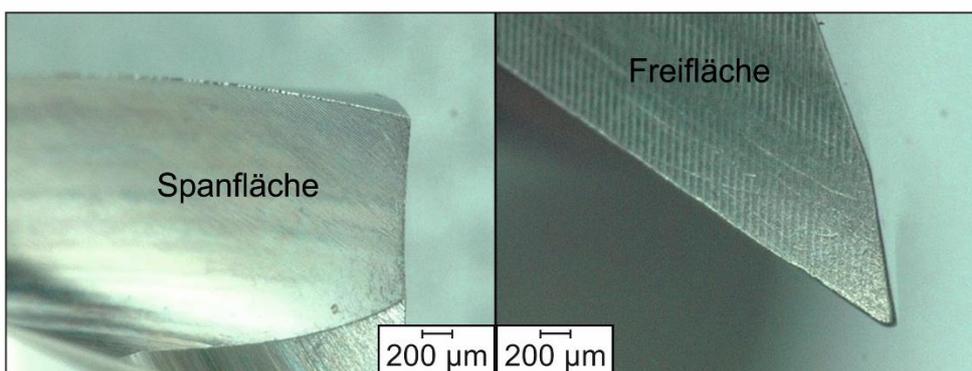
Zur Verbesserung des Einsatz- und Verschleißverhaltens von HSS-Fräsern wurden die Schafffräser desselben Herstellers wie in den Referenzuntersuchungen eingesetzt (HSS-E-PM), jedoch in unbeschichtetem Anlieferungszustand. Hierbei zeigte sich, dass die Fräser fertigungsbedingt teils erhebliche Grate in Richtung der Spanfläche entlang der Schneidkanten aufwiesen (Bild 5).



Hn/97023 © IFW

Bild 5: Fertigungsbedingte Gratbildung bei den HSS-Fräsern im Anlieferungszustand

Zum Entgraten und Verrunden wurden unterschiedliche Methoden, Techniken und Medien eingesetzt. Untersucht wurden dabei manuelles Entgraten mittels Entgratwerkzeugen oder Bürsten, Entgraten und gleichzeitiges Verrunden durch automatisierte Prozesse wie Nassstrahlen, Trocken- und Glasperlstrahlen und Schleppscheifen ohne Eigenrotation der Werkzeuge. Dabei wurden Parameter- und Einstellvariationen (Düseneinstellungen, Hubgeschwindigkeit, Eintauchtiefe, alternierende Zyklen, etc.) sowie der Einsatz unterschiedlicher Medien untersucht. Alle Ansätze führten zu keinem, unter produktionstechnischen Gesichtspunkten, zufriedenstellendem Ergebnis, da der Grat nicht vollständig oder nur ungleichmäßig entfernt wurde und die Schneiden in der Folge unterschiedlich stark verrundet wurden.



Hn/97024 © IFW

Bild 6: Schneide nach manuellem Entgraten; resultierendes z.T. welliges Schneidenprofil

Erste Versuche zum Entfernen der Grate an Haupt- und Nebenschneide zeigten den Optimierungsbedarf hinsichtlich Gleichmäßigkeit, Reproduzierbarkeit und optimaler Präparation zur Verrundung auf. Der Durchbruch hinsichtlich einer vom Anlieferungszustand nahezu unabhängigen Gratentfernung und Verrundung gelang mit Einsatz einer Schleppscheifanlage, mit der die Werkzeuge in dreifacher Rotation durch das Medium geführt werden konnten (Bild 7). Diese Anlage stand zu Beginn des Vorhabens noch nicht zur Verfügung.



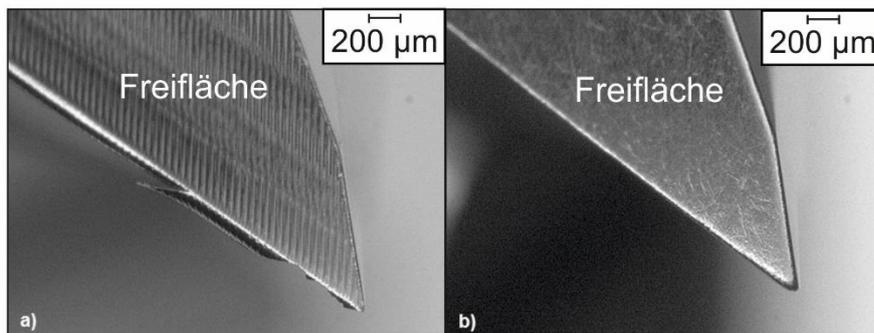
Bild 7: OTEK Schleppscheifanlage für Zerspanwerkzeuge (Bild [GEG09])

Für eine konstante und einheitliche Verrundung über die gesamte Länge der einzelnen Schneiden der Werkzeuge war eine Anpassung des Präparationsverfahrens mittels Schleppscheifen hinsichtlich Bearbeitungsparameter und eingesetztem Medium erforderlich, um in einem Arbeitsgang sowohl den Grat gleichmäßig zu entfernen als auch die Schneidkantenverrundung reproduzierbar zu erzeugen. Dies konnte durch die 3-fach-Rotation des Werkzeugs in der Schleppscheifanlage realisiert werden. Das Abrasivmedium wurde durch entsprechende Manipulation des Werkzeugs vorrangig durch die Spannuten und somit entlang der Spanfläche gefördert, um den Grat von der Spanfläche her über die Kante hin zur Freifläche zu brechen und in der Folge die Schneiden zu verrunden. Die Anpassung ermöglichte es zudem, zur Spanfläche geneigte Schneidkantenverrundungen (Formfaktor $K > 1$) mit dem Verfahren des Schleppscheifens zu erzeugen.

Durch die Verwendung neuartiger Abrasivmedien war ein reproduzierbares und gleichmäßiges Entgraten und Verrunden in einem Arbeitsgang möglich. Mit dem gleichen Abrasivmedium und angepassten Parametern konnten die HSS-Fräser auch nach dem Beschichten gefinisht werden. Nach gezielten Versuchsreihen wurden erste Fräser verrundet, beschichtet und untersucht. In weiteren

Versuchsreihen wurde, auch aufgrund der Erkenntnisse hinsichtlich der Verrundung von Hartmetallwerkzeugen zur Reduzierung der Ausbruchsneigung, einer mittleren Schneidkantenverrundung von $\bar{S} > 30 \mu\text{m}$ angestrebt.

Ergebnis der Verrundung für einsatzoptimierte HSS Schafffräser durch Schleppscheifen waren Werkzeuge mit einer mittleren Schneidkantenverrundung von $\bar{S} = 37 \pm 3 \mu\text{m}$ und einem Formfaktor $K = 1,5$. Zudem bestätigt sich für HSS-Werkzeuge die bereits bei Hartmetallwerkzeugen bestehende Erkenntnis, dass die Optimierung eines Präzisionswerkzeugs eine aufeinander abgestimmte Kombination aus angepasster Werkzeuggeometrie durch Verrundung, Oberflächenpräparation und Beschichtung bedarf, um eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit auch von HSS-Zerspanwerkzeugen zu erreichen.



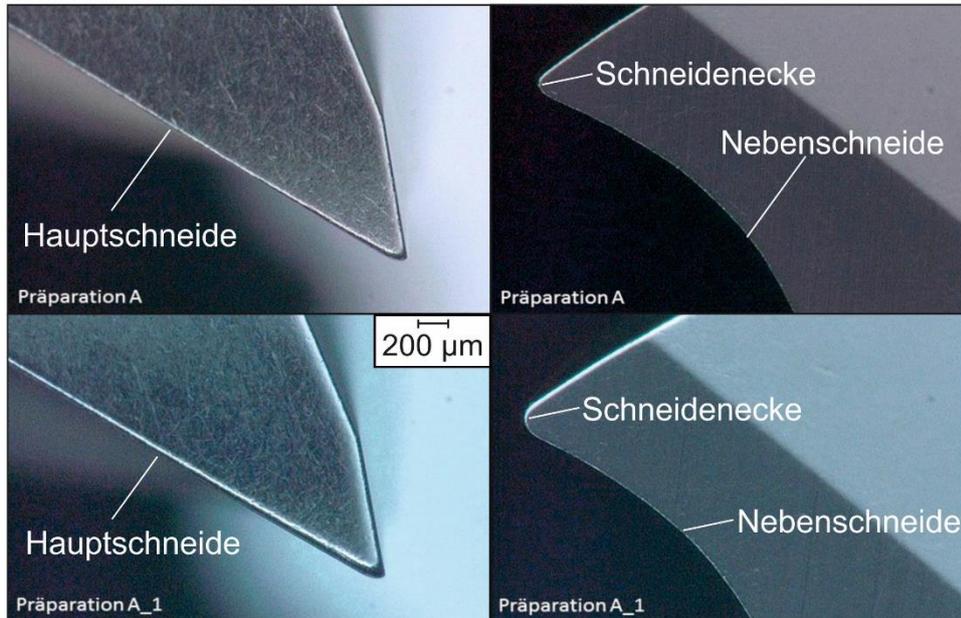
Hn/97025 © IFW

Bild 8: Hauptschneide eines HSS Fräsers vor dem Beschichten: (a) ausgeprägte Grate im Anlieferungszustand; (b) kanten- und oberflächenoptimierter Zustand (Entgraten, Verrunden, Konturieren (Formfaktor $K=1,5$) in einem Arbeitsgang)

Im Zuge der Entwicklung wurde als weiterer wesentlicher Faktor der Anlieferungszustand identifiziert. Es zeigte sich, dass unterschiedliche Lose stark unterschiedlich ausgeprägte Grate aufwiesen. So musste der Prozess nicht nur hinsichtlich entgraten und verrunden in einem Arbeitsgang optimiert werden, sondern auch dahingehend die gleiche Verrundung zu liefern, unabhängig von der Gratausprägung. Die Bearbeitungsstrategie war hier den Grat unabhängig von der Stärke innerhalb der gleichen Zykluszeit schnell und präzise zu brechen, um dann gezielt zu verrunden. Erreicht wurde dies durch eine ausgewogene Mischung von SiC, Al_2O_3 und Walnussschalen Granulat und optimierter Drehzahl im Rechts- und Linkslauf. Im Zuge des iterativen Entwicklungsprozesses wurde letztendlich ein ganzheitlicher Präparationsprozess für HSS Fräser festgelegt, der den angestrebten Kriterien genügte.

Um zu identifizieren, welche der Präparationsvarianten für die unterschiedlichen Bearbeitungsfälle die am besten geeignete war, wurden Fräser unterschiedlich präpariert und in einem Zyklus mit dem

gleichen Schichtsystem beschichtet und entsprechend eingesetzt. Nach Durchlaufen mehrerer Iterationsschleifen wurden zwei Varianten festgelegt, die in Bild 9 anhand der Hauptschneide, Schneidecke und Nebenschneide dargestellt sind. Letztendlich wurde aufgrund der Ergebnisse in Einsatzuntersuchungen die Variante A_1 für die weitere Schichtentwicklung ausgewählt.



Hn/97026 © IFW

Bild 9: Unterschiedliche präparierte HSS Fräser (Schleppscheifen, 3fach Rotation) – Hauptschneide, Schneidecke, Nebenschneide

4.2.3 Schichtentwicklung

Zielsetzung: Entwicklung eines auf HSS abgestimmten multifunktionalen Schichtsystems um bei allen vier ausgewählten Materialien eine Leistungssteigerung der HSS-Werkzeuge zu erreichen.

Da, wie beschrieben, die Oberflächen- und Kantenpräparation wesentlich ist für die Funktion eines beschichteten Werkzeugs, war die Schichtentwicklung von Beginn an Bestandteil der iterativen Prozessentwicklung. Die für die Schichtentwicklung genutzte PVD Anlage verfügte über 4 Verdampferquellen, wovon jede einzelne mit einem anderen Ausgangsmaterial für die Schichtherstellung bestückt werden konnte. Es wurde angestrebt den Schichten gezielt durch Mikrolegieren einen multifunktionalen Charakter zu geben. Durch geeignetes Prozessmanagement wurden die Schichten hinsichtlich Haftung und ihrer Eigenschaften optimierend an das Grundmaterial und die Anwendung angepasst.

Basierend auf verschiedenen Legierungselementen der Beschichtungen konnten die Eigenschaften, die Morphologie, und die Kristallstruktur fein abgestimmt und für den Zweck angepasst werden. Die

entwickelten nano-strukturierten Schichten wurden im Wesentlichen durch statistische Unterbrechung des Schichtwachstums mittels periodischer Parametervariation synthetisiert.

Nanostrukturierte Materialien zeichnen sich im Allgemeinen durch besondere Eigenschaften in Bezug auf die zugehörige Prozesstechnologie und das Endprodukt aus. Die nanostrukturierten Materialien sind vorwiegend durch die Grenzflächen zwischen den die Beschichtung bildenden Körnern gekennzeichnet. Durch Manipulation von Atomen, Molekülen und Molekülclustern durch Mikrolegierung werden nanostrukturierte Materialien und deren Eigenschaften in einer Weise verändert, die nicht mehr mit homogenen Materialien zu vergleichen sind. Die Eigenschaften von nanostrukturierten Materialien sind somit nicht mehr materialspezifisch, sondern werden von der Struktur selbst dominiert. Dadurch werden bessere Möglichkeiten zur Anpassung anforderungsspezifischer Eigenschaften und Beschichtungen bereitgestellt. Zum Beispiel grenzen Nanokristallite (1-10) nm, die in eine Matrix eingebaut sind, die Versetzungsbeweglichkeit ab, begrenzen die Rissausbreitung und erhöhen die Härte. [ERK08]

Für die Zerspanuntersuchungen wurden die verrundeten Werkzeuge mit (TiAl)N- und (CrAl)N-basierten, prozesstechnisch auf HSS ausgelegten Multifunktionsschichten versehen. Neue Targetmaterialien zur Synthese von mikrolegierten Mehrstofflegierungen wurden eingesetzt. Zum Einsatz kamen Elemente, die in der (Ti,Al)N oder (Cr,Al)N Matrix nur eine geringe Löslichkeit aufwiesen. Durch die Ausscheidung intermediärer und intermetallischer Phasen im Nanobereich konnten hierdurch Härte, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturstabilität und Reibungswiderstand für die Applikation positiv eingestellt werden. Zur optimierten Anbindung der Schicht an das HSS wurden Interlayer aus Ti/TiN sowie Cr/CrN appliziert. Der nano-laminierte Aufbau der Schicht sollte gezielt Duktilität und Härte an lokalen Spannungsspitzen liefern. Bei erhöhter Temperatur in der Kontaktzone wurden dazu lokal Diffusionsprozesse in den Schichten aktiviert, was „in situ“ an der Oberfläche zu einer den Bedingungen optimal angepassten Modifikation der Schichteigenschaften führen soll. Verschiedene Schichtvarianten (Schichtdicken ca. 2-3 µm) wurden für erste Zerspanuntersuchungen auf vorher präparierte Fräser appliziert. Zur Glättung der Schichten wurden diese mittels Schleppscheiben entsprechend nachbehandelt.

Ausgehend vom „best case“ wurden dann durch Variationen des Schichtdesigns (mehrlagiger Aufbau, Doppelbeschichtung, Gradientenschichten) Untersuchungen zur Erhöhung der Schichtdicke auf 4-5 µm durchgeführt und Fräser mit optimierter Schneidkantenpräparation beschichtet.

Die Synthese multifunktionalen Schichten unterschied sich unter anderem durch den Ansatz, das Filmwachstum durch periodische Parametervariation statistisch zu unterbrechen. Dies führte zu einer nano-laminierten und mehrfach mikrolegierten Schichtstruktur und damit zu einstellbaren und veränderten Filmeigenschaften. Der Grundidee folgend waren die Schichten so ausgelegt, dass sie durch eine Vielzahl von Mikrolegierungen aufeinander aufbauen, um das Spektrum der geforderten Anwendungen abzudecken. So unterschied sich zum Beispiel MpC_2 DBU von MpC_3 DBU (MpC

steht allgemein für Multi Purpose Coating, MpC_X DBU ist der Arbeitsname für die während des Projektes speziell für HSS entwickelten Beschichtungsprozesse und Schichten) nur durch die Zugabe eines weiteren Reaktivgases und die Synthese einer reibungsreduzierenden Deckschicht. Die Schichten wurden hinsichtlich Schichthaftung, Schichtarchitektur, Schichtdicke, Kantenstabilität und Topographie optimiert. Grundsätzlich wurden die beschichteten Werkzeuge nach dem Beschichten durch Schleppscheifen geglättet und zwar wie schon beschrieben mit dem gleichen Medium, mit dem die HSS Fräser entgratet und Kantenpräpariert wurden. Dies war von Beginn an aus produktionstechnischer und ressourcenschonender Sicht angestrebt worden.

4.2.4 Qualifizierte Schichtsysteme

Wie beschrieben war der Chargenaufbau immer gleich. Zu Analyse Zwecken wurden in jeder Testcharge Referenzwerkzeuge aus HSS, Hartmetall und gehärtetem Stahl mit beschichtet. Diese dienten zur Ermittlung der Schichtdicke, der –härte, der –haftung und –struktur.

Die Schichtdicke wurde mittels Kalottenschliff und mikroskopischer Auswertung bestimmt, die Haftung durch den Rockwell Eindrucktest sowie einem internen manuellen Abrasionstest. Der Kalottenschliff lieferte auch erste Informationen bezüglich der Haftung der Schicht zum Grundmaterial sowie zur Haftung der Schichten untereinander bei einem mehrlagigen Schichtaufbau. Des Weiteren gab der Schliff einen ersten Eindruck zum grundsätzlichen Schichtaufbau. Bei Bedarf konnte die Schichtstruktur im Nanobereich mittels REM (Rasterelektronenmikroskop) und FIB (Focussed Ion Beam) Analyse ermittelt werden.

Die zum Einsatz gekommenen Werkzeuge wurden zu 100% eingangs- und ausgangskontrolliert. Dies erfolgte visuell mit Hilfe der optischen Mikroskopie.

Verschiedenste Schichtvarianten wurden auf präparierten Fräsern appliziert und untersucht. Da für die Nassbearbeitung immer noch TiCN eine der besten Schichtvarianten ist, wurden in einer ersten Testreihe zur Optimierung der Präparation entsprechende Varianten von TiCN, wie TiCN selbst, TiVCN und TiSiCN getestet. Um die Schichten in Richtung Multifunktionalität zu optimieren, wurden mikrolegierte Systeme auf AlTi und AlCr Basis, wie AlTiSiN, AlCrSiN, AlTiCrSiN, MpC_2-C DBU (anstatt AlTi basiert, AlCr basiert), MpC_2 DBU und MpC_3 DBU hergestellt. Am Ende der Versuchsreihen zur Bearbeitung der verschiedenen Materialien zeigten die Schichten mit dem Arbeitsnamen MpC_2 DBU und MpC_3 DBU das größte Potenzial zur Produktivitätssteigerung gegenüber der Referenz bei erhöhten Einsatzparametern.

MpC_2 DBU ist ein auf AlTiN aufbauendes Schichtsystem mit unterschiedliche Al/Ti Verhältnissen einzelner Nanolagen. Durch das Legieren einzelner Lagen mit Si und C sowie der Verwendung der verschiedenen Reaktivgase N₂, O₂ und CH₆ wurden die Schichten hinsichtlich ihrer multifunktionalen

Einsetzbarkeit optimiert. MpC_3 DBU baute dabei auf MpC_2 DBU auf und unterschied sich im Wesentlichen durch eine kohlenstoffreiche Decklage, die als Festschmierstoff diente.

Tabelle 1: Schichteigenschaften der ausgewählten Schichten

Schichteigenschaften	MpC_2 DBU	MpC_3 DBU
Schichtmaterial	(Al,Ti) basiert	(Al,Ti) basiert
Mikrohärte	3.300 HV _{0.05}	3.000 HV _{0.05}
Max. Einsatztemperatur	>1.100°C	950°C
Reibung gegen Stahl (trocken)	0,3 – 0,4	0,2
Schichtdesign	nano lamellar	nano lamellar

Die Haftung wurde sowohl auf HSS ermittelt, aber auch auf Hartmetallsubstraten als Referenz. In Bild 10 und 11 sind die Ergebnisse des Rockwell Eindrucktests für die beiden optimierten Schichtsysteme dargestellt. Sowohl für MpC_2 DBU als auch für MpC_3 DBU ergab sich eine optimale Haftung auf HSS und HM entsprechend der in DIN50103 Teil1 festgelegten Haftklasse 1 (HF1).

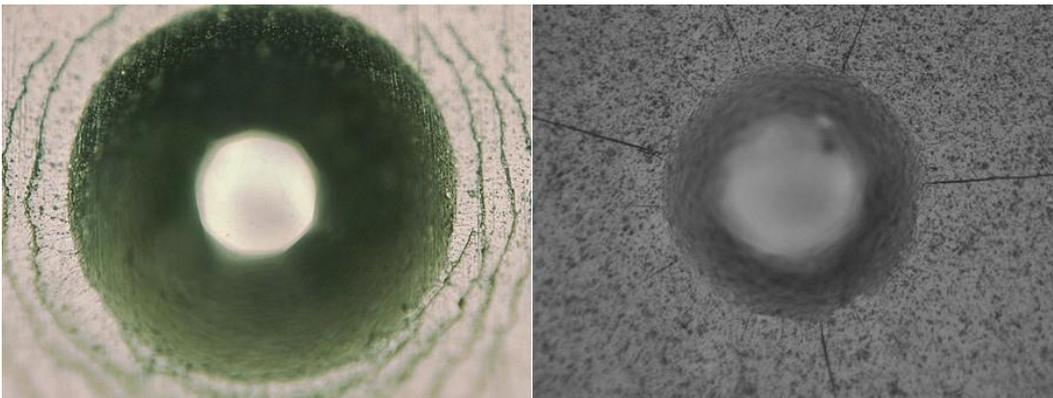


Bild 10: Rockwell Eindrucktest 150kg – MpC_2 DBU – links HSS Frägerschaft Haftungsklasse HF1, rechts Hartmetall Referenz Haftungsklasse HF1

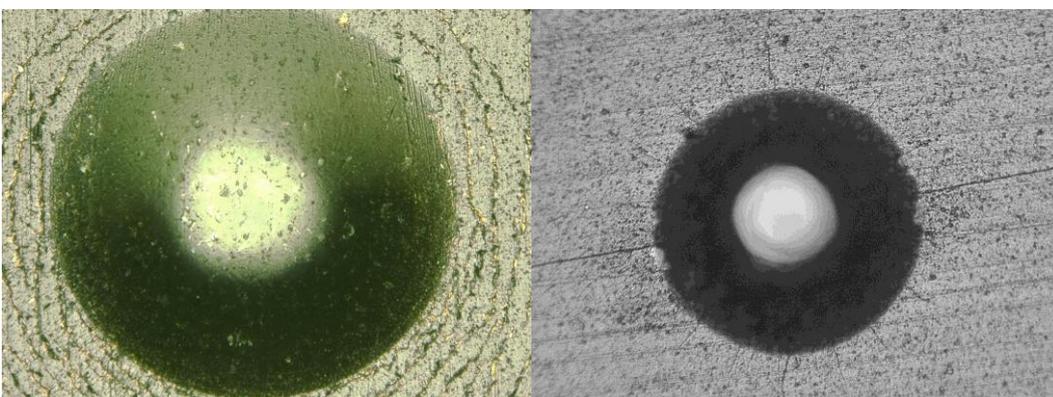


Bild 11: Rockwell Eindrucktest 150kg – MpC_3 DBU – links HSS Frägerschaft Haftungsklasse HF1, rechts Hartmetall Referenz Haftungsklasse HF1

Bild 12 illustriert den nano-lamellaren Schichtaufbau der beiden Schichten. Deutlich zu erkennen ist die nano-strukturierte Decklage der MpC_3 DBU Schicht, die durch ihren Festschmierstoffcharakter auf der einen Seite den Einlaufverschleiß und auf der anderen Seite den Spanabfluss günstig beeinflussen sollte.

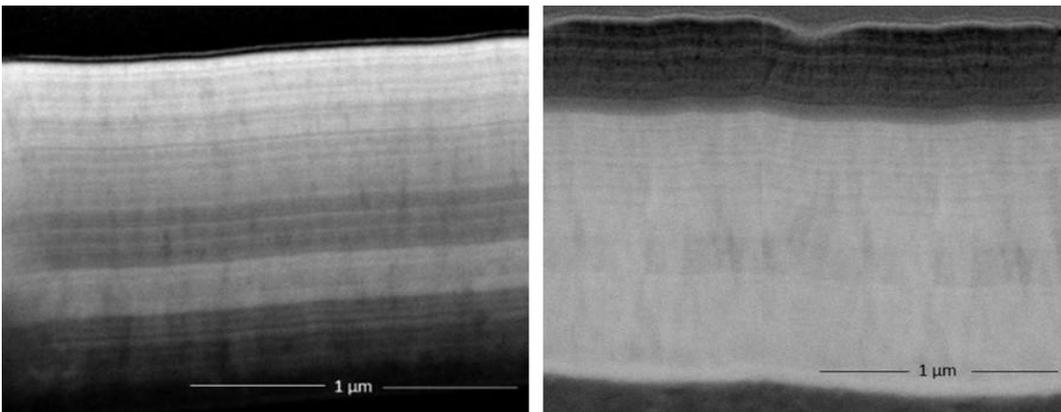
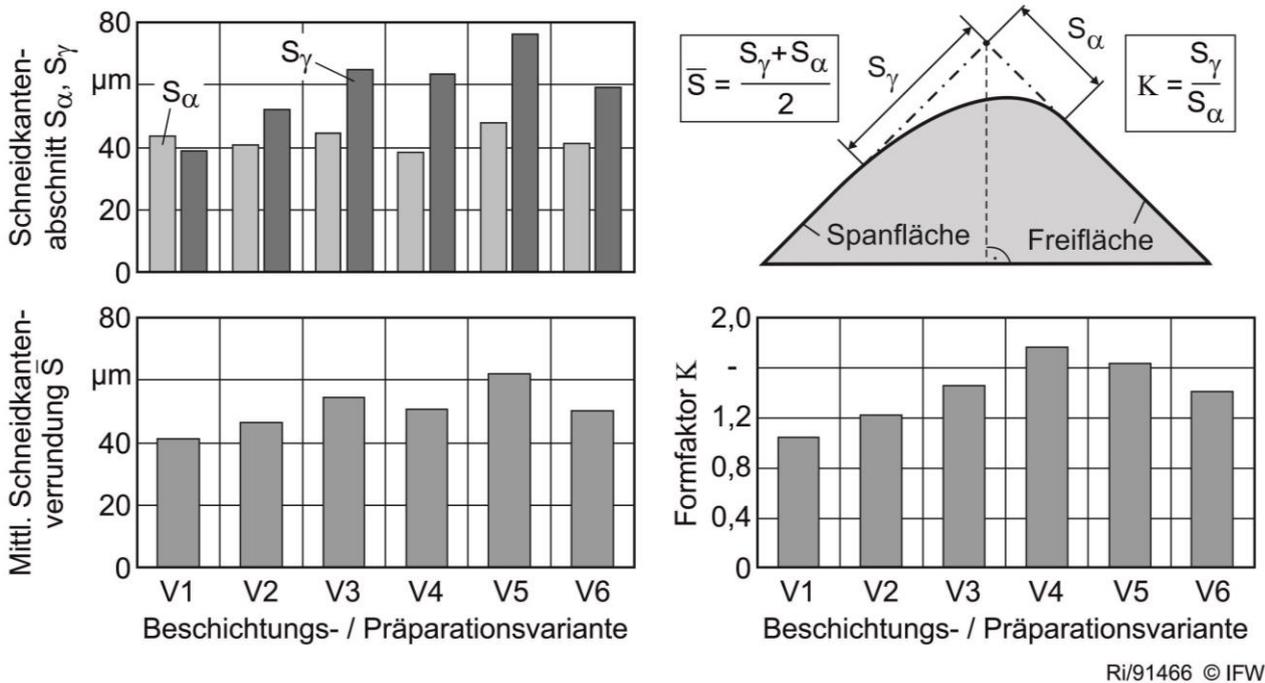


Bild 12: FIB Schnitt zur Darstellung des nano-lamellaren Schichtdesigns links MpC_2 DBU, rechts MpC_3 DBU

4.2.5 Experimentelle Zerspanuntersuchungen C45

Die durch inkrementelle Anpassung der Parameter an die variierende Gratausprägung im Anlieferungszustand erzielte Schneidkantenpräparation ist in Bild 13 dargestellt. Die Werte entsprechen dabei jeweils dem Mittelwert aus acht Messungen an den beschichteten Werkzeugen. Die maximale Standardabweichung von der mittleren Schneidkantenverrundung \bar{S} beträgt dabei 15 µm und im Mittel über alle Varianten 10 µm. Die Variante V1 entspricht einem auf das Grundmaterial HSS adaptierten Standardprozess für HM-Schafffräser. Das Resultat der Prozessentwicklung zeigen die Ergebnisse der Varianten V2 bis V6. Die Schichten der Varianten V1 bis V3 basieren dabei auf im Rahmen des Projektes für HSS entwickelte Multifunktionsschichten MpC DBU der Fa. Surcoatec. Die Schichten der Varianten V4 bis V6 sind Derivate der multifunktionellen Schichten durch Variation der Mikrolegierung.



Ri/91466 © IFW

Bild 13: Mikrogeometrien der Präparations- und Schichtvarianten

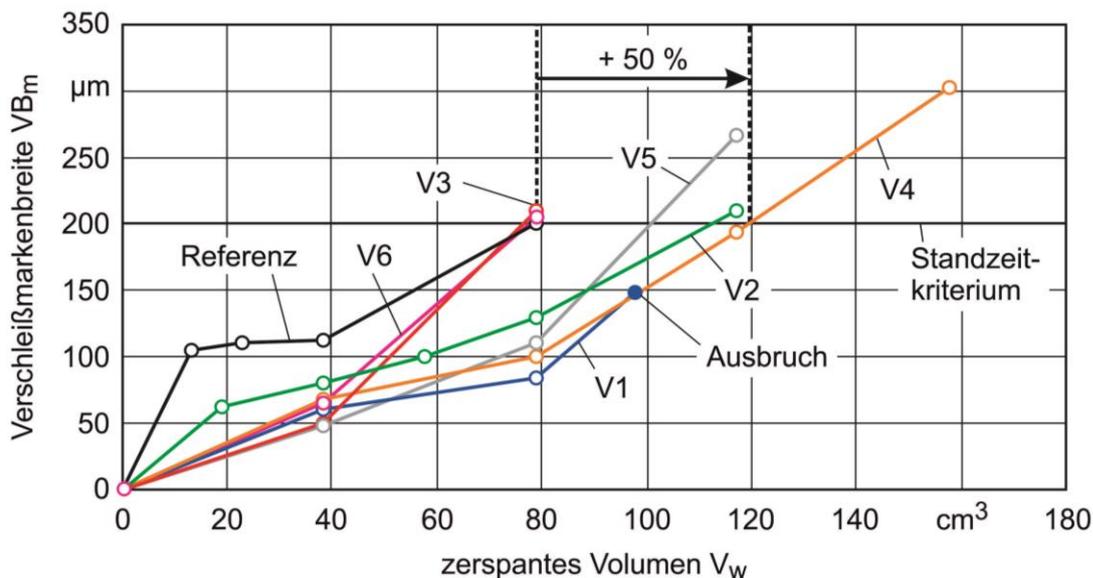
Für die Zerspanuntersuchungen wurden im Weiteren verschiedene Modifikationen der MpC DBU Schichten im Verbund mit den entwickelten Präparationsvarianten appliziert.

Anhand des Ergebnisses für V1 wurde deutlich, dass die Adaptierung eines HM-Präparationsprozesses auf HSS zwar leichte Grate zuverlässig entfernte, aber die Kante nicht mit der angestrebten Verrundung mit $K > 1$ präpariert wurden. Bei den Varianten V2 bis V6 ergaben sich hingegen Verrundungen mit einem größeren Schneidkantenabschnitt S_γ als S_α . S_γ erreichte dabei Größen von 50 bis 80 μm , so dass sich relativ große Verrundungen mit einem Formfaktor von $K > 1,5$ mit dem Verfahren Schleppscheifen einstellen ließen.

Die Kombination aus Multifunktionsschicht und zur Spanfläche verkippten, großen Schneidkantenverrundungen bewirkt eine deutliche Erhöhung des zerspannten Volumens und somit der Standzeit der HSS-Werkzeuge bis zum Verschleißkriterium von $VB = 200 \mu\text{m}$ (Bild 14). Gegenüber dem Referenzwerkzeug kann so das zerspannte Volumen mit den Varianten V2 und V4 um 50 % gesteigert werden. Die Wiederholungen der Untersuchungen bestätigen dieses Ergebnis mit einer Standardabweichung von $\pm 6 \%$. Zurückzuführen ist dies auf eine gegen Ausbrüche stabilisierte und resistenterere Schneidkante aufgrund der Beschichtung und des durch die Verrundung veränderten thermomechanischen Belastungskollektivs [BAS13, REH15]. Hinsichtlich der Größe der Schneidkantenverrundung zeigt sich, für die Fräsbearbeitung von C45 mit HSS-Werkzeugen, dass die Einsatzzeit mit einer mittleren Schneidkantenverrundung von $\bar{S} > 40 \mu\text{m}$ signifikant erhöht werden kann. Anhand der drei am besten abschneidenden Varianten V2, V4 und V5 lässt sich zudem erkennen, dass der

Formfaktor zwischen $K = 1,2$ bis $2,0$ liegen sollte und die Schneidkantenverrundung somit zur Spanfläche geneigt sein sollte. Bei HM Werkzeugen ist bekannt, dass die Prozesssicherheit durch Minimierung des Auftretens von Ausbrüchen entlang der Schneidkante aufgrund einer Beeinflussung des Belastungskollektives mittels der Mikrogeometrie erhöht werden kann. Die hier durchgeführten Untersuchungen bestätigen diese Erkenntnisse.

Dass eine reine Modifikation der Schneidkantenverrundung nicht gleichzeitig oder ausschließlich zu einer Erhöhung der Standzeit der Werkzeuge führt, zeigen die Ergebnisse der Varianten V3 und V6. Trotz ähnlicher Größe und Form der Verrundung dieser Werkzeuge mit den Varianten V4 und V5 konnte für V3 und V6 keine Steigerung des zerspanten Volumens im Vergleich zu den Referenzwerkzeugen erreicht werden. Somit haben die Mikrolegierungsanteile und –bestandteile der Beschichtung einen signifikanten Einfluss auf das Einsatzverhalten der Werkzeuge. Zudem bestätigt sich für HSS-Werkzeuge die bereits bei Hartmetallwerkzeugen bestehende Erkenntnis, dass die Optimierung eines Präzisionswerkzeugs eine aufeinander abgestimmte Kombination aus angepasster Werkzeuggeometrie durch Verrundung, Oberflächenpräparation und Beschichtung sowie deren Nachbehandlung erfordert, um eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit zu erreichen.



Prozess: Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt
Kühlung: KSS 12 bar (Emulsion 6 %)
Werkzeug: HSS-E-PM, $d = 8$ mm, $z = 4$
Werkstoff: C45

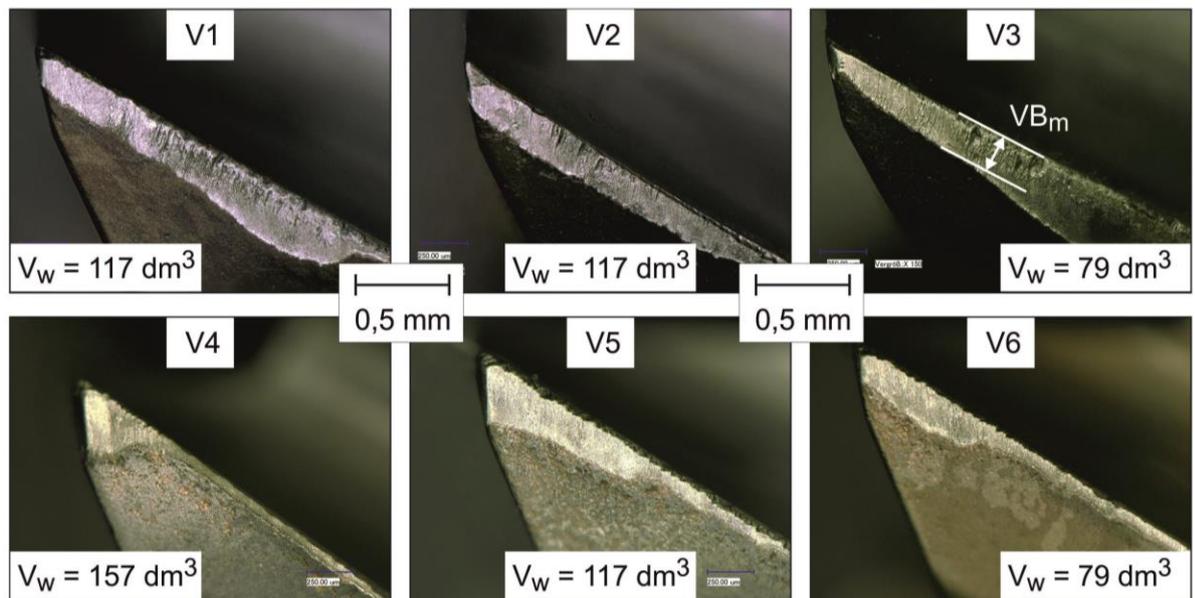
Prozesseinstellgrößen: $v_c = 70$ m/min
 $f_z = 0,04$ mm
 $a_e = 2,4$ mm
 $a_p = 4,0$ mm

Ri/91467 © IFW

Bild 14: Einsatzverhalten der Beschichtungs- und Präparationsvarianten

Neben der Erhöhung der Standzeit zeigen die Aufnahmen des Verschleißes der Werkzeuge am Standzeitende in Bild 15 die Veränderung der Verschleißform aufgrund der Schneidkantenpräparation und der multifunktionellen Schichten im Vergleich zu den Referenzwerkzeugen (Bild 3). Bei allen

Varianten dominiert nach der Optimierung der Werkzeuge abrasiver Freiflächenverschleiß als Verschleißform. Die Version V4 weist dabei starken Verschleiß im Bereich der Schneidenecke auf, so dass diese Präparationsvariante zu hohen lokalen Belastungen führt. Allerdings ist der Verschleiß entlang der Umfangsschneide gering. Der auftretende Verschleiß der Varianten V5 und V6 prägt sich vergleichbar zu V4 aus. Die Variante V2, die ein ähnliches Einsatzverhalten bis zum Verschleißkriterium (Bild 14) wie V4 zeigt, verschleißt hingegen wie die Varianten V1 und V3 konstant entlang der Schneidkante. Im Bereich der Schneidenecke treten zwar weiter Mikroausbrüche der Schneide auf, diese sind jedoch nicht mehr standzeitbegrenzend, da sie im Vergleich zu den Referenzwerkzeugen deutlich geringere Ausmaße annehmen. Aufgrund der durch die Schneidkantenverrundung und Beschichtung veränderten Verschleißform der HSS-Werkzeuge konnte daher neben der Standzeiterhöhung auch die Prozesssicherheit gesteigert werden. Sowohl das Auftreten von Schneidkanten ausbrüchen als auch der Versatz der Schneidkanten wurde durch die Modifikation der Werkzeuge minimiert und das Einsatzverhalten somit signifikant verbessert.



Prozess: Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt
Kühlung: KSS 12 bar (Emulsion 6 %)
Werkzeug: HSS-E-PM, d = 8 mm, z = 4
Werkstoff: C45

Prozesseinstellgrößen: $v_c = 70$ m/min
 $f_z = 0,04$ mm
 $a_e = 2,4$ mm
 $a_p = 4,0$ mm

Ri/91468 © IFW

Bild 15: Verschleiß der optimierten Werkzeuge am Standzeitende

Um das gesteigerte Potential der hinsichtlich der Beschichtung und Mikrogeometrie optimierten Werkzeugen zu ermitteln, wurden aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse mit der Schichtvariante V2 (MpC_2 DBU) und optimierter Verrundung $K > 1$ Zerspanuntersuchungen mit erhöhten Prozesseinstellgrößen bei C45 durchgeführt. Hierbei wurde die Schnittgeschwindigkeit um 43 % von $v_c = 70$ m/min auf $v_c = 100$ m/min und der Zahnvorschub um 25 % von $f_z = 0,04$ mm auf $f_z = 0,05$ mm gesteigert. Die Ergebnisse in Bild 16 zeigen, dass auch bei den erhöhten Prozesseinstellgrößen

(V2-2) weiterhin abrasiver Freiflächenverschleiß auftritt und dieser gegenüber den niedrigen Prozesseinstellgrößen (V2) nur geringfügig während der Einsatzzeit und im Endzustand abweicht. Mittels der Multifunktionsschicht und der an den Werkstoff angepassten Mikrogeometrie der HSS-Werkzeuge konnte so eine Steigerung des Zeitspanvolumens und somit der Produktivität von 79 % erzielt werden (Bild 16). Durch diese Erhöhung ergeben sich im Vergleich zu den Referenzwerkzeugen Einsparungen hinsichtlich der erforderlichen Energie zum Betrieb der Bearbeitungsmaschine und deren Nebenaggregate sowie des eingesetzten Kühlschmierstoffs und somit ein Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Für die Bearbeitung des gleichen zu zerspanenden Volumens bedarf es durch die optimierten Werkzeuge mit höherer Standzeit ca. 50 % weniger Werkzeugressourcen.

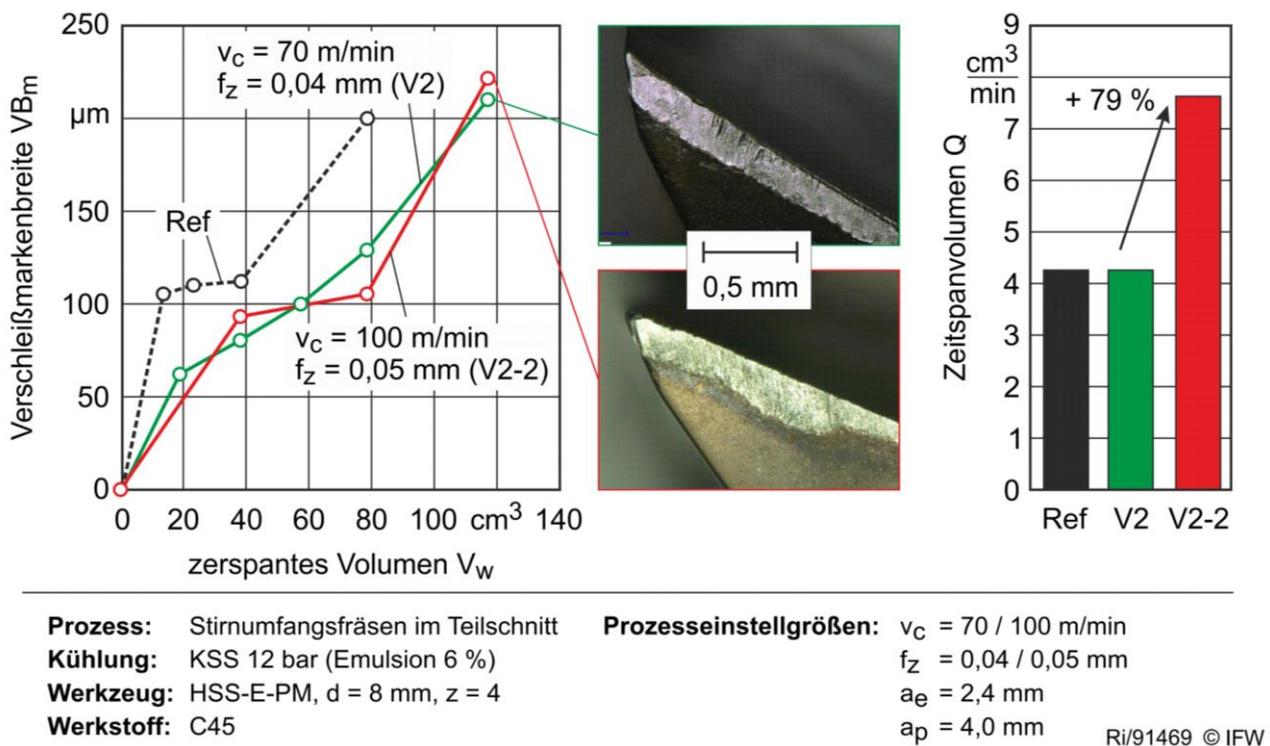


Bild 16: Produktivitätssteigerung bei der Bearbeitung von C45

4.2.6 Zerspanuntersuchung 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10

Basierend auf dem Verschleißverhalten der Referenzwerkzeuge wird zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der HSS-Werkzeuge auch bei weiteren Stahlwerkstoffen die Erhöhung der Prozesssicherheit und somit die Minimierung von Ausbrüchen der Schneidkante fokussiert. Gleichzeitig wird durch optimierte Kombinationen aus Schneidkantenverrundung und Beschichtung eine Steigerung der Produktivität angestrebt. Analog zu dem Werkstoff C45 werden hierzu die Werkzeuge anhand der Erkenntnisse bei Hartmetallwerkzeugen [DEN14] verrundet und mit auf HSS prozesstechnisch ausgelegten multifunktionalen Hochleistungsbeschichtungen (MpC DBU) versehen. Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse zu Hartmetallwerkzeugen zur Reduzierung der Ausbruchsneigung wird auch hier eine mittlere Schneidkantenverrundung von $\bar{S} > 30$ µm angestrebt. Ergebnis der Verrundung

durch Schleppscheifen sind Werkzeuge mit einem Schneidkantenabschnitt an der Freifläche von $S_\alpha = 30 \pm 3 \mu\text{m}$ und einem Schneidkantenabschnitt an der Spanfläche von $S_\gamma = 42 \pm 5 \mu\text{m}$. Hieraus resultiert eine mittlere Schneidkantenverrundung von $\bar{S} = 37 \pm 3 \mu\text{m}$ und ein Formfaktor $K = 1,5$. Als Beschichtung kommt bei den Einsatzstählen 16MnCr5 und 15NiCr13 eine MpC_3 DBU Schicht zum Einsatz, der hochlegierte Stahl X5CrNi18-10 wird hingegen mit einer temperaturbeständigeren MpC_2 DBU Beschichtung bearbeitet. Die Untersuchungen wurden dabei mit denselben Prozess-einstellgrößen wie bei den Referenzuntersuchungen durchgeführt und bei Erreichen des zerspannten Volumens der Referenzwerkzeuge abgebrochen.

Die Ergebnisse des Verschleißverhaltens mit den optimiert verrundeten und beschichteten Werkzeugen bei Erreichen des Standzeitkriteriums in Bild 17 zeigen, dass Ausbrüche an den Schneidkanten durch die Schneidkanten- und Oberflächenpräparation nicht mehr auftreten. Stattdessen tritt nun bei allen drei Werkstoffen gleichmäßiger Freiflächenverschleiß auf. Die Prozesssicherheit der HSS-Werkzeuge bei der Bearbeitung der Werkstoffe 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10 kann somit ebenfalls durch eine geeignete Kombination aus Verrundung und Beschichtung signifikant gesteigert werden.

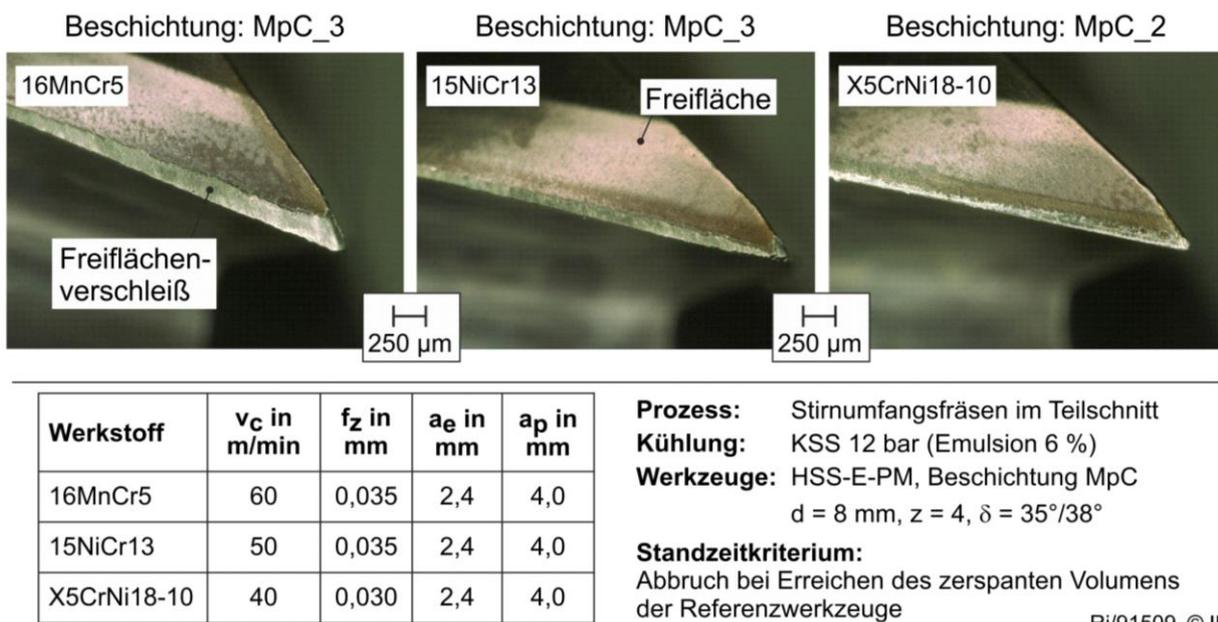
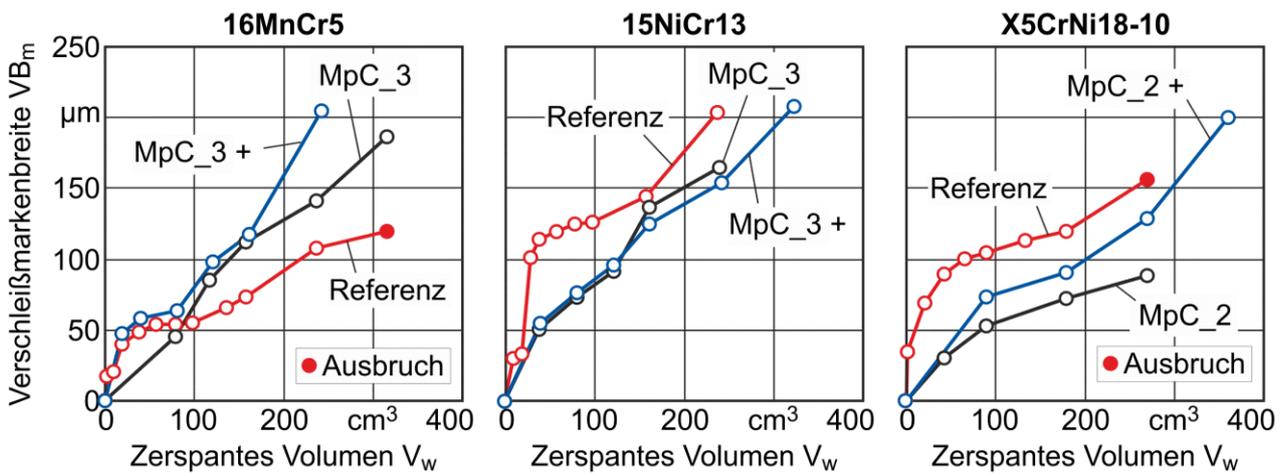


Bild 4: Verschleißverhalten der optimierten Werkzeuge

Aufgrund des Verschleißverhaltens der optimierten Werkzeuge bieten diese hohes Potential zur Erhöhung der Prozessstellgrößen und damit zur Steigerung der Produktivität beim Einsatz von HSS-Fräsern bei höher legierten Werkstoffen. Bei den hinsichtlich der Mikrogeometrie und der Beschichtung optimierten Werkzeugen wird daher gleichzeitig die Schnittgeschwindigkeit v_c um 50 % und der

Zahnvorschub f_z um 20 % erhöht. In der Tabelle in Bild 18 sind diese Erhöhungen unter der Bezeichnung MpC_2 + und MpC_3 + aufgelistet. Beim Einsatz der Werkzeuge zeigt sich trotz der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs bei den Werkstoffen 15NiCr13 und X5CrNi18-10 aufgrund der optimierten Kombination aus großer Verrundung und multifunktionaler Beschichtung ein besseres Verschleißverhalten gegenüber den Referenzwerkzeugen (Bild 18). Bei dem Werkstoff 16MnCr5 ergibt sich mit den erhöhten Einstellgrößen zwar ein schneller fortschreitender Verschleißverlauf als bei den Referenzstellgrößen, jedoch tritt auch hier konstanter Freiflächenverschleiß ohne Ausbrüche auf (Bild 19).

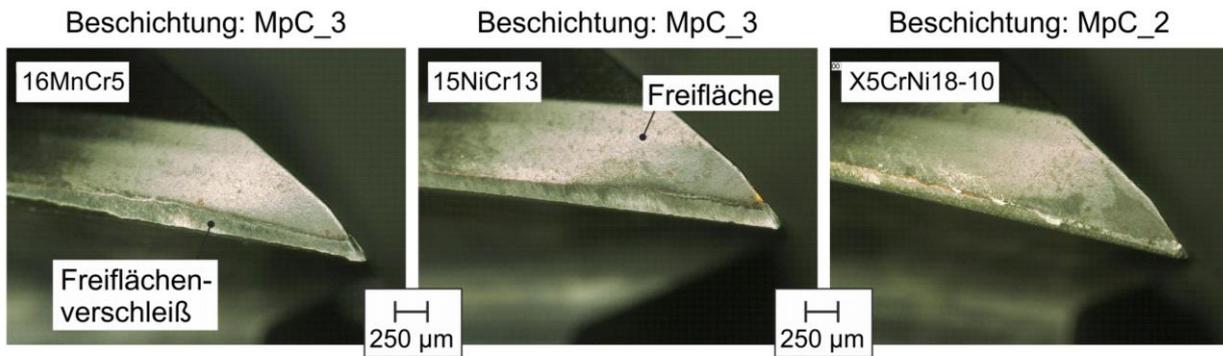


	v _c in m/min			f _z in mm		
	Referenz	MpC_3 MpC_2	MpC_3 + MpC_2 +	Referenz	MpC_3 MpC_2	MpC_3 + MpC_2 +
16MnCr5	60	60	90	0,035	0,035	0,042
15NiCr13	50	50	75	0,035	0,035	0,042
X5CrNi18-10	40	40	60	0,030	0,030	0,036

Prozess:
 Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt
 $a_e = 2,4$ mm; $a_p = 4$ mm
Kühlung:
 KSS 12 bar (Emulsion 6 %)
Werkzeug:
 HSS-E-PM Ri/91510 © IFW

Bild 18: Vergleich des Einsatzverhaltens der Werkzeuge

Die Werkzeuge beim Einsatz in 15NiCr13 und X5CrNi18-10 weisen ebenfalls abrasiven Freiflächenverschleiß ohne Ausbrüche entlang der Schneide am Standzeitende auf (Bild 19). Trotz der erhöhten Einstellgrößen können die optimierten HSS-Werkzeuge prozesssicher und mit einem kontrollierbaren Verschleißverhalten auch bei höher legierten Werkstoffen eingesetzt werden. Die Schneidkantenverrundung führt dabei zu einer Reduktion der Spannungsbelastung im Schneidkeil und verringert somit deutlich die Neigung zu Schneidkantenausbrüchen. Die Beschichtung erhöht gleichzeitig die thermische Isolation und den Schutz des Substrats vor der thermischen Belastung im Zerspanprozess.



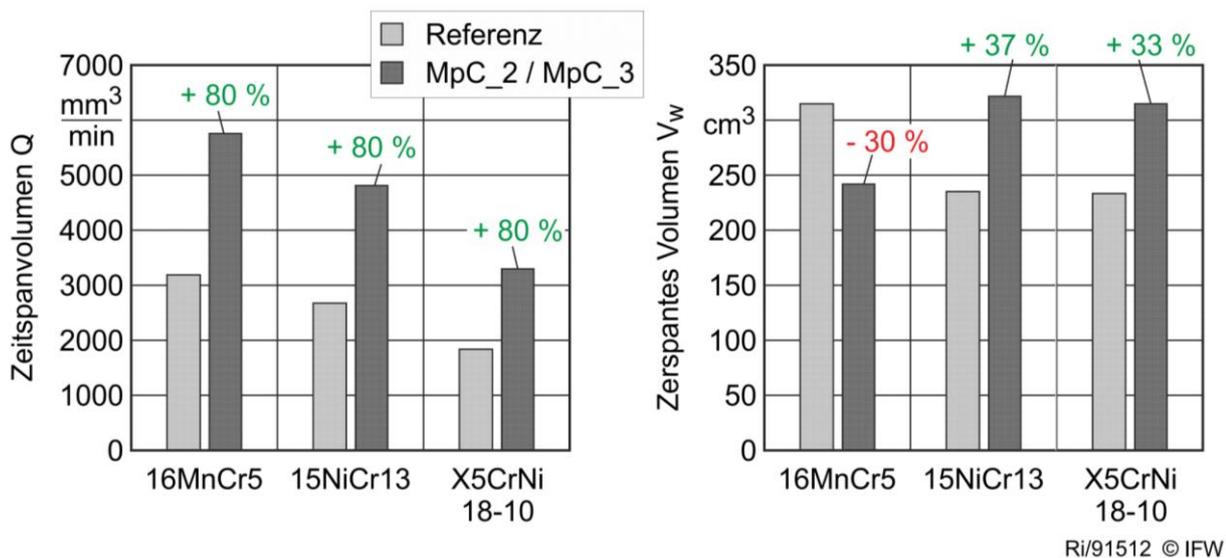
Werkstoff	v_c in m/min	f_z in mm	a_e in mm	a_p in mm
16MnCr5	90	0,042	2,4	4,0
15NiCr13	75	0,042	2,4	4,0
X5CrNi18-10	60	0,036	2,4	4,0

Prozess: Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt
Kühlung: KSS 12 bar (Emulsion 6 %)
Werkzeuge: HSS-E-PM, Beschichtung MpC
 $d = 8 \text{ mm}$, $z = 4$, $\delta = 35^\circ/38^\circ$
Standzeitkriterium:
 Verschleißmarkenbreite VBm > 200 µm

Ri/91511 © IFW

Bild 5: Verschleißverhalten der Werkzeuge bei gesteigerten Prozesseinstellgrößen

Aus der Steigerung der Prozesseinstellgrößen resultiert eine Erhöhung des Zeitspanvolumens Q_w um 80 % gegenüber den Referenzstellgrößen (Bild 20). Da die Optimierung der Schneiden gleichzeitig das Einsatz- und Verschleißverhalten der Werkzeuge verbessert, ergibt sich zudem bei den Werkstoffen 15NiCr13 und X5CrNi18-10 ein Anstieg des zerspannten Volumens V_w um 37 % bzw. 33 % (Bild 20). Somit kann auch bei legierten Stählen die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung der Ressourceneffizienz durch eine optimierte Kombination aus Schneidkantenverrundung und Beschichtung signifikant gesteigert werden. Bei dem Werkstoff 16MnCr5 ergibt sich hingegen eine Senkung des zerspannten Volumens um 30 %, jedoch wird dieses durch die Steigerung der Produktivität um 80 % bei gegebener Prozesssicherheit ausgeglichen.



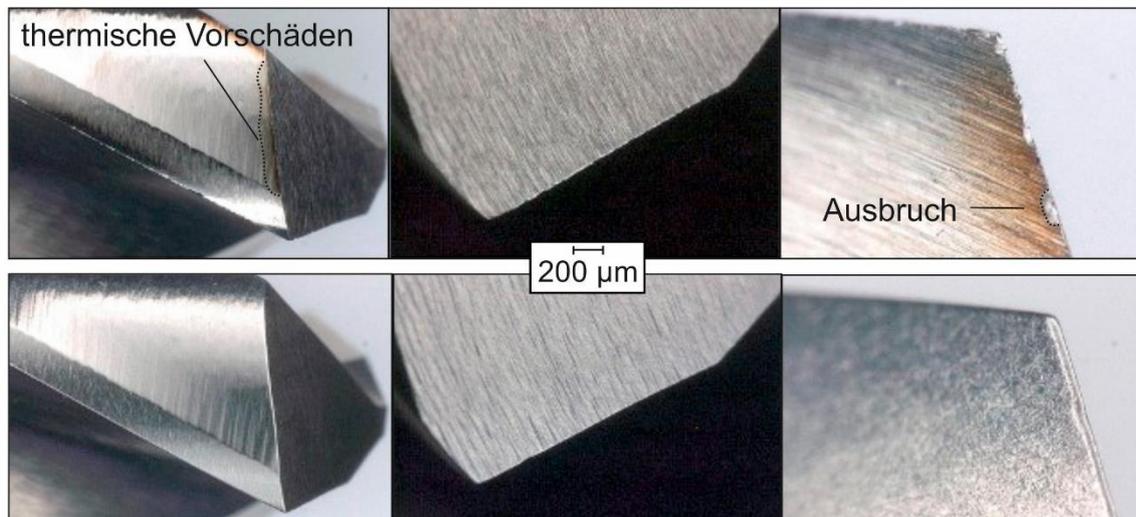
Ri/91512 © IFW

Bild 20: Steigerung der Produktivität bei 16MnCr5, 15NiCr13 und X5CrNi18-10

Durch eine optimierte Kombination aus Multifunktionsschicht und Schneidkantenverrundung konnte eine deutliche Erhöhung des Zerspanvolumens und somit der Standzeit der HSS-Werkzeuge erreicht werden. Aus der Standzeiterhöhung durch die durchgeführte Präparation der Werkzeuge resultiert eine Steigerung der Ressourceneffizienz bei der Bearbeitung eines großen Spektrums marktüblicher Stahlwerkstoffe.

4.2.7 Übertragung der Ergebnisse auf HSS-Stirnfräser und -Bohrer

Im Weiteren galt es zu evaluieren, in wie weit und in welchem Maße die Prozesskenntnisse auf andere HSS Werkzeugtypen zu übertragen sind. Für die Untersuchungen wurden unbeschichtete HSS Bohrer ($d = 8 \text{ mm}$) und Walzenstirnfräser ($d = 40 \text{ mm}$) beschafft.

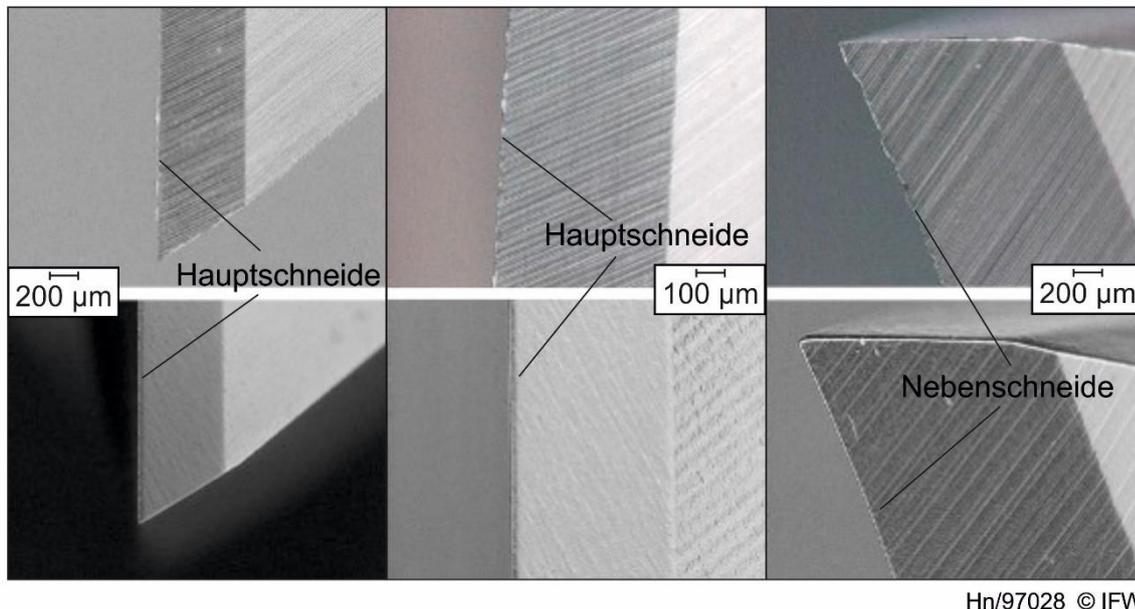


Hn/97027 © IFW

Bild 21: HSS Bohrer unbeschichtet: oben - im Anlieferungszustand, unten – nach der Präparation

Die HSS Bohrer zeigten im Anlieferungszustand zwar kaum Grate auf, allerdings waren Haupt- und Nebenschneide sehr schartig und besaßen kleine Deformationen und Mikroausbrüche. Außerdem war bei allen gelieferten Bohrern Schleifbrand, das heißt Bereiche thermisch durch den Schleifprozess vorgeschädigte Schneidstoffes, erkennbar. Im Gegensatz zu den bisher vorbehandelten HSS Fräsern galt es bei den Bohrern darauf zu achten die Schneidenecken nur gering zu verrunden aber gleichzeitig die Schartigkeit und die Mikroausbrüche an Haupt- und Nebenschneide zu reduzieren. Gleichzeitig mussten die durch den Schleifbrand entstandenen Oxidationsschichten vollständig entfernt werden, um die Haftung der Beschichtung zu gewährleisten. Das Ergebnis der Optimierung ist in Bild 21 unten dargestellt. Die Bohrer wurden wie die Fräser mittels Schleppscheiben (3-fach-Rotation) unter der Verwendung des gleichen Schleifmediums und den ansonsten gleichen Parameter

präpariert. Nur der zyklische Wechsel zwischen Recht- und Linkslauf wurde dahingehend angepasst, dass die Schneidenecke weniger stark belastet wurde. Für Zerspanuntersuchungen wurden die Bohrer dann mit den Schichten MpC_2 DBU und MpC_3 DBU beschichtet und mit dem entwickelten Finishprozess nachbehandelt.



Hn/97028 © IFW

Bild 22: HSS Walzenstirnfräser: oben - im Anlieferungszustand, unten – nach der Präparation

Die Walzenstirnfräser waren im Anlieferungszustand gratfrei. In der Folge galt es die Schartigkeiten an den Schneiden, die die Mikroskopaufnahmen in Bild 22 oben illustrieren, zu reduzieren und die Kanten gezielt zu verrunden.

Der Prototypenprozess für HSS-Schaftfräser konnte auf die Präparation der Walzenstirnfräser aus verschiedensten Gründen jedoch nicht ohne weitere Anpassungen adaptiert werden. Zum einen konnten die Werkzeuge mittels der vorhandenen Halterungstechnik nicht aufgenommen werden um sie durch Schleppscheifen zu behandeln und zum anderen hätte aufgrund der Abmessungen eine komplett neue Prozessführung erarbeitet werden müssen. Da jedoch die Zielgrößen bezüglich der Kantenverrundung durch die mit den Schaftfräsern erreichten Ergebnissen bekannt waren, wurden die Walzenstirnfräser durch Nassstrahlen vor- und nachbehandelt. Das Ergebnis ist in Bild 22 unten demonstriert. Nach Durchlaufen von einigen Optimierungsschleifen des Präparationsprozesses für Walzenstirnfräser konnte diese entsprechend vorbehandelt, mit den für das Projekt qualifizierten Schichten beschichtet, nachbehandelt und für Einsatzuntersuchungen analysiert werden.

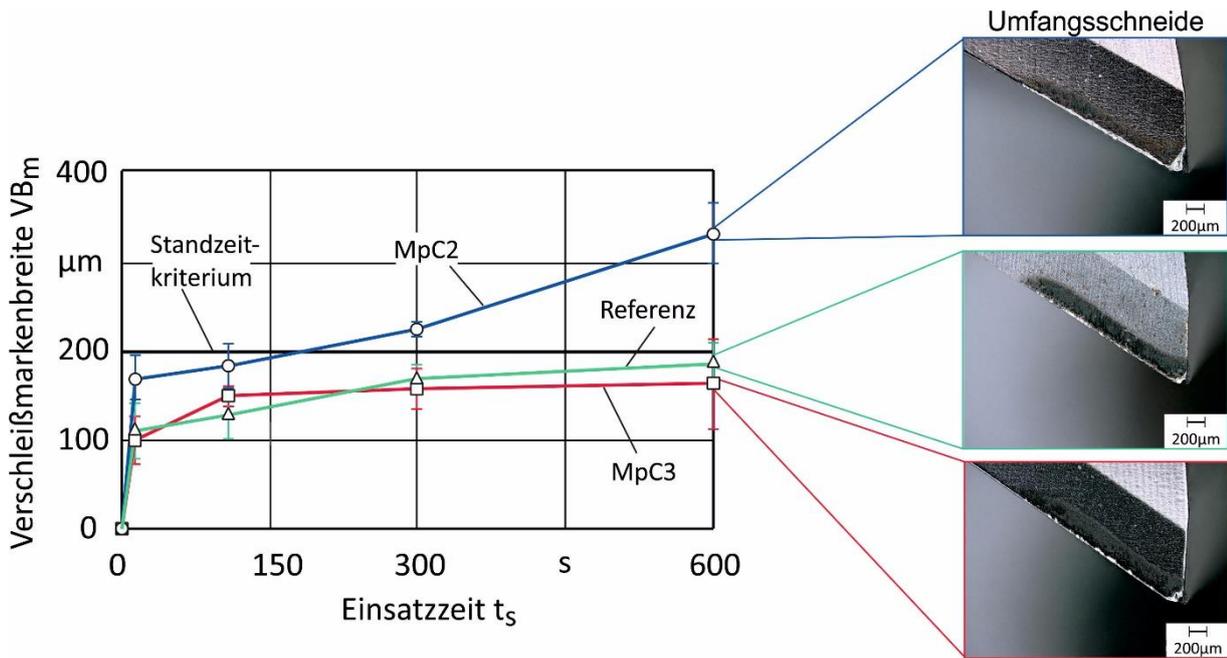
Alle Zerspanuntersuchungen der HSS-Stirnfräser und –Bohrer wurden ebenfalls auf dem 4-Achs-Bearbeitungszentrum der Fa. Heller durchgeführt. Die eingesetzten Walzenstirnfräser der Firma

Gühring besitzen einen Durchmesser von $d = 40$ mm und eine Zähnezahl von $z = 8$. Die mittels des Alicona Infinite G5 ermittelte Schneidkantenverrundung der HSS-Stirnfräser sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es ergibt sich für die HSS-Fräser mit der MpC_3 DBU Beschichtung und den Referenzwerkzeugen mit der TiCN Beschichtung eine Verkippung der Verrundung zur Freifläche des Werkzeugs. Bei den Fräsern mit der MpC_2 DBU Beschichtung hingegen eine Verkippung der Verrundung zur Spanfläche des Werkzeugs.

Tabelle 2: Schneidkantenverrundung der HSS-Stirnfräser

Verrundung	TiCN	MpC_2 DBU	MpC_3 DBU
S_α	$15 \pm 2 \mu\text{m}$	$28 \pm 6 \mu\text{m}$	$30 \pm 2 \mu\text{m}$
S_γ	$9 \pm 3 \mu\text{m}$	$25 \pm 4 \mu\text{m}$	$45 \pm 2 \mu\text{m}$
\bar{S}	$12 \pm 3 \mu\text{m}$	$27 \pm 5 \mu\text{m}$	$38 \pm 2 \mu\text{m}$
K	0,6	0,9	1,5

Die Einstellgrößen Schnittgeschwindigkeit v_c und Zahnvorschub f_z wurden auf $v_c = 60$ m/min und $f_z = 0,15$ mm festgelegt. Die Schnitttiefe a_p wurde auf 20,0 mm und die Schnittbreite a_e auf 2 mm festgesetzt. Diese Werte wurden für alle Untersuchungen mit den Walzenstirnfräsern konstant gehalten. Die Referenzwerkzeuge besitzen eine TiCN Beschichtung. Die Walzenstirnfräser mit der MpC_2 DBU und MpC_3 DBU Beschichtung wurden beim Zerspanen von 42CrMo4 eingesetzt. Die Ergebnisse des Verschleißverhaltens am Eckenradius der Walzenstirnfräser sind in Bild 23 gezeigt. Dabei wurden die Verschleißmessungen über die acht Zähne gemittelt. Es wird deutlich, dass trotz der optimierten Verrundung und Beschichtung die Ausbrüche an den Ecken der Schneide nicht signifikant reduziert werden konnten. Die Standzeit des Walzenstirnfräses mit der MpC_3 DBU Beschichtung weist einen leicht geringeren Verschleiß am Eckenradius auf, jedoch versagt der Walzenstirnfräser mit der MpC_2 DBU Beschichtung früher und weist deutlich größere Ausbrüche auf. Die Schneidkantenverrundung bei den eingesetzten Walzenstirnfräsern weicht von den der Schaftfräser ab, wodurch die Standzeit beeinflusst wird. Um die Standzeit zu steigern, müssen weitere Untersuchungen zu den Stirnfräsern durchgeführt werden.



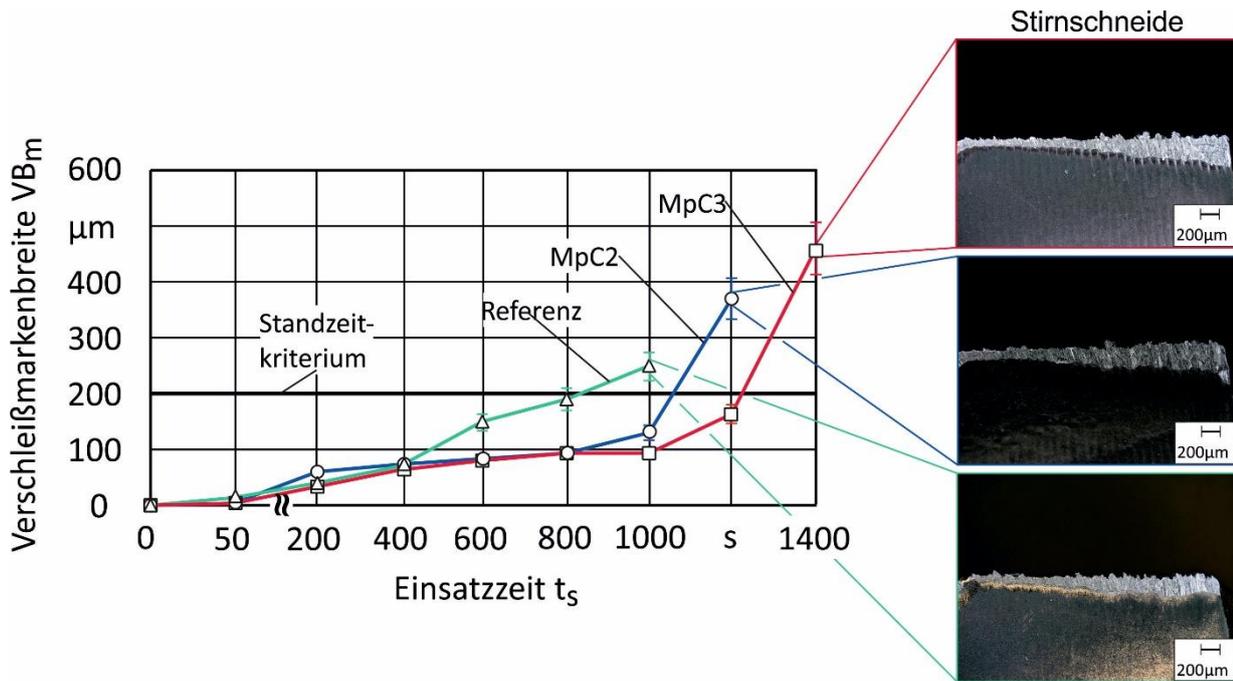
Prozess: Stirnumfangsfräsen
Kühlung: KSS 12 bar (extern)
Werkzeug: HSS-M42, $d = 40$ mm, $z = 8$
Werkstoff: 42CrMo4

Prozesseinstellgrößen: $v_c = 60$ m/min
 $f_z = 0,15$ mm
 $a_e = 2$ mm
 $a_p = 20$ mm

Hn/97022 © IFW

Bild 23: Eckenradiusverschleiß der Stirnfräser

Für die Zerspanuntersuchungen wurden HSS-Bohrer von der Firma Hoffmann Group eingesetzt. Die mittels eines Alicona Infinite G5 ermittelte Mikrogeometrie wies bei den Referenz- sowie den beschichteten Werkzeugen symmetrischen Schneidkantenverrundung mit $S_\alpha = S_\gamma = 40$ μm auf. Die Einstellgrößen Schnittgeschwindigkeit v_c und Zahnvorschub f_z wurden auf $v_c = 60$ m/min und $f_z = 0,6$ mm festgelegt. Die Bohrlochtiefe l_B wurde auf 20,0 mm festgesetzt. Diese Werte wurden für alle Untersuchungen mit den eingesetzten Bohrern konstant gehalten. Die Ergebnisse der Bohrversuche sind in Bild 24 abgebildet. Es wurden Wiederholversuche durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Freiflächenverschleiß mit den verrundeten und beschichteten Werkzeugen einen geringeren Anstieg aufweist, wodurch sich die Standzeit der Werkzeuge gegenüber der Referenz erhöht. Dank einer gezielten Werkzeugbeschichtung und der angepassten Schneidkantenpräparation kann die Standzeit um bis zu 20 % erhöht werden. Diese Steigerung ist geringer als bei den Fräs Werkzeugen, jedoch ohne zusätzliche Untersuchungen der Werkzeugbelastung und Einsatzbedingungen erzielt worden. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass bei genaueren Untersuchungen die Standzeit noch weiter erhöht werden kann.



Prozess: Bohren
Kühlung: KSS 12 bar (extern)
Werkzeug: HSS-E, $d = 8 \text{ mm}$, $z = 2$
Werkstoff: 42CrMo4

Prozesseinstellgrößen: $v_c = 60 \text{ m/min}$
 $f_z = 0,6 \text{ mm}$
 $IB = 20 \text{ mm}$

Hn/97023 © IFW

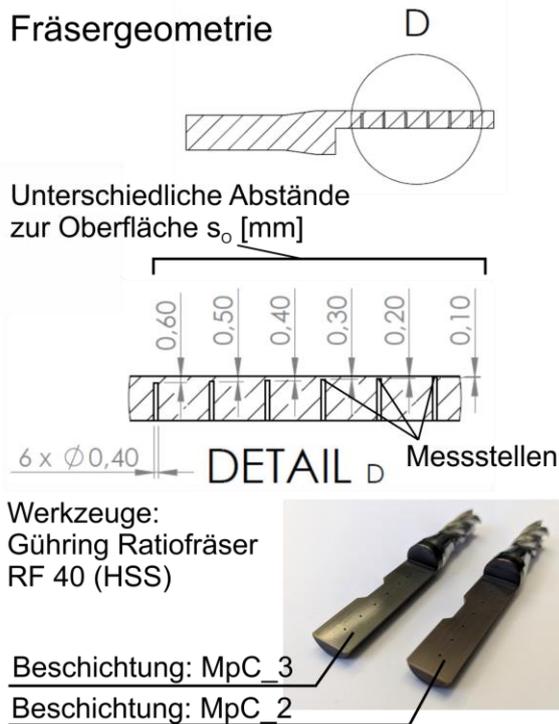
Bild 24: Freiflächenverschleiß der Bohrer

Bei der Übertragung der Ergebnisse auf HSS-Stirnfräser und –Bohrer, konnte bei den Bohrern eine Erhöhung der Standzeit um ca. 20% erzielt werden. Bei den Walzenstirnfräsern konnten die Ergebnisse nicht bestätigt werden. Die Einsatzzeit wurde nicht signifikant erhöht. Hintergrund hierfür sind zum einen die sehr schartige Haupt- und Nebenschneiden der HSS-Bohrer bereits im Anlieferungszustand. Zum anderen wiesen die Bohrer zusätzlich kleine Deformationen und Mikroausbrüche auf, wodurch sich die geringere Standzeiterhöhung im Vergleich zu den HSS-Schafffräsern erklären lassen kann. Die Ergebnisse der Walzenstirnfräser lassen sich durch mehrere Aspekte erklären. Zum einen gab es Unterschiede bei dem Beschichtungsverfahren der Stirnfräser und der Schafffräser. Zum anderen weichen die Schneidkantenverrundungen bei den eingesetzten Walzenstirnfräsern von den Schafffräsern ab, wodurch die Standzeit beeinflusst wird.

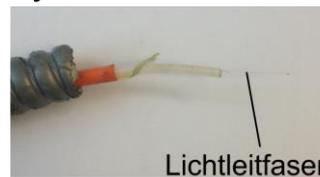
4.2.8 Theoretische Belastung der Beschichtungen

Ziel des Arbeitspakets das Erlangen von Erkenntnissen über die thermische Belastung der verschiedenen Beschichtungen. Außerdem sollen Erkenntnisse über die Wechselwirkung verschiedener Beschichtungen, Prozessparameter und thermische Belastung abgeleitet werden.

Für die Untersuchung der lokalen thermischen Belastung der Beschichtung wurden die HSS-Werkzeuge mit Bohrungen für Lichtleitfasern mittels Senkerodieren präpariert ($d = 0,4 \text{ mm}$) (Bild 25). Vorhergehende Untersuchungen die Bohrungen mittels Mikrofräsen einzubringen konnten aufgrund von Werkzeugbrüchen nicht erfolgreich umgesetzt werden. Die Bohrungen wurden in unterschiedlichen Abständen zur Fräseroberfläche ausgeführt (vgl. Bild 25), so dass das Temperaturverhalten in unterschiedlichen Tiefen untersucht werden kann. Die Werkzeuge wurden anschließend mit den Beschichtungen MPC_2 DBU und MPC_3 DBU versehen.

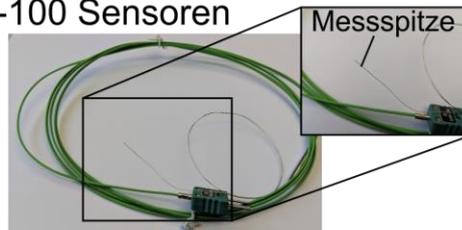


Pyrometer



Bezeichnung: LumaSense IGAR 12-LO Mb13
2 Farben Pyrometer
Messbereich: +350..+1300 °C

PT-100 Sensoren

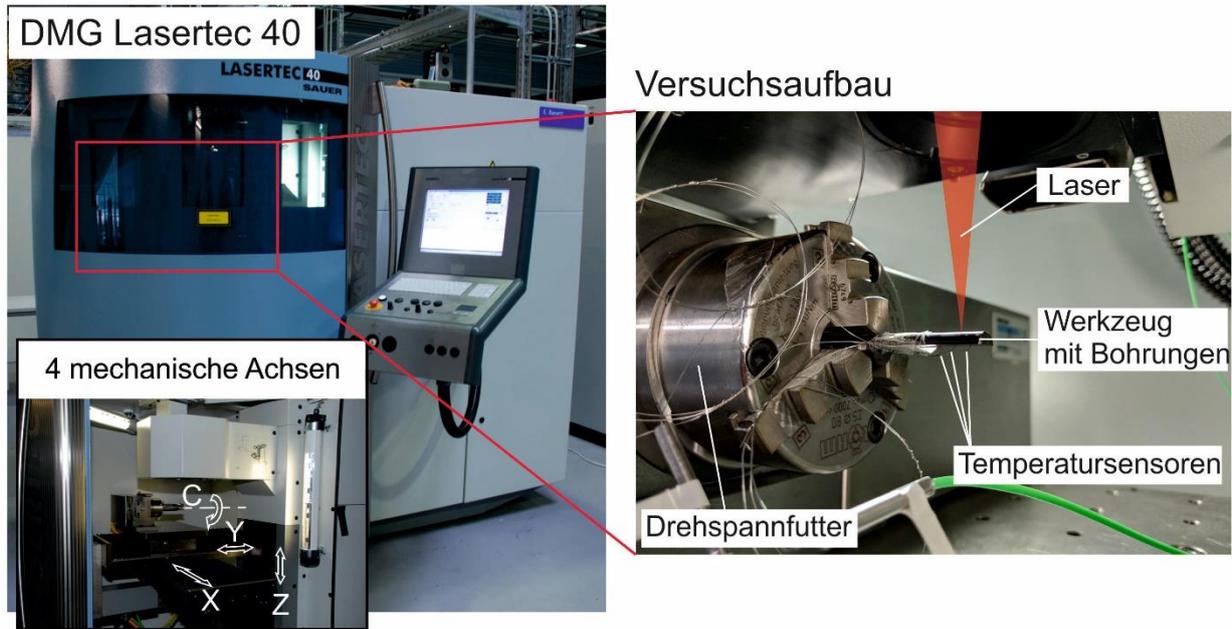


Bezeichnung: FEP-isolierte Thermoleitung,
TE Typ K
Messbereich: -200..+1000 °C
 t_{99} : 1 s

Bm/84574 © IFW

Bild 25: Versuchswerkzeuge und Messgeräte

Zur Messung der Temperatur standen wahlweise ein Zwei-Farben-Pyrometer sowie Thermoelemente zur Verfügung. Vorteil des Pyrometers ist die schnellere Ansprechzeit, jedoch kann erst ab einer Temperatur von + 350° C gemessen werden. Die eingesetzten Thermoelemente messen bereits bei einer Temperatur von $T = - 200^\circ \text{ C}$ und weisen eine Ansprechzeit von nur $t_{99} = 1 \text{ s}$ auf. Für die Erwärmung der Oberfläche und Durchführung der Untersuchungen wurde die am IFW vorhandene DMG Sauer Lasertec 40 gewählt (Bild 26). Die Maschine verfügt über einen Q-Switch-YAG Laser mit einer maximalen Leistung von 12 W. Das max. Arbeitsfeld beträgt $60 \times 60 \text{ mm}^2$. Die Maschine verfügt zusätzlich über eine Rotationsachse wodurch die Bohrung auf der gegenüberliegenden Seite sehr genau bestimmt werden kann.



Maschine: DMG Lasertec 40
 Laserleistung: 12 W (Q-Switch-YAG Laser)
 Arbeitsfeld Laser: 60x 60 mm²

Bm/84575 © IFW

Bild 26: Versuchsaufbau

Die eingekoppelte Leistung des Laserstrahls darf dabei den Schmelzpunkt der Beschichtungen nicht überschreiten, muss jedoch auch ausreichend für eine messbare thermische Belastung der Beschichtung sein. Zur Bestimmung der maximal möglichen Laserleistung, bei der kein Oberflächenabtrag erfolgt, wurde die Laserleistung kontinuierlich gesteigert. Zudem wurde die Schraffur (Bahn des Lasers), der Zeilenabstand der Schraffur und der Vorschub variiert. Dabei zeigte sich, dass ein Abtragen der Oberfläche bereits bei einer Laserleistung von 2,2 W beginnt. Die Art der Schraffur, der Zeilenabstand und die Vorschubgeschwindigkeit zeigten dabei nur geringen Einfluss auf die gemessene Temperatur. Es wurden Temperaturen bis zu 56 °C in der Bohrung mit dem geringsten Oberflächenabstand von 0,1 mm gemessen. Die erreichte Temperatur ist verglichen mit realen Prozesstemperaturen jedoch zu gering, um experimentelle Vergleiche zwischen den Oberflächenbeschichtungen zu realisieren. In [BEB17] wurden zum Vergleich in einer experimentellen Untersuchung eines kontinuierlichen Drehprozesses Temperaturen bis zu 700 °C bei einem Oberflächenabstand von 0,3 mm gemessen.

Um die eingekoppelte Laserleistung und somit die Temperatur weiter zu steigern, wurde die kontinuierliche Bestrahlung eines Punktes untersucht. Um einen Abtrag an der Oberfläche zu verhindern musste der Fokuspunkt des Lasers dabei variiert werden, um die Laserleistung auf eine größere Fläche zu verteilen (Bild 27). Schon eine Defokussierung um 1 mm bewirkt eine Vergrößerung der

bestrahlten Fläche um den Faktor 20. Um bei einer Laserleistung von 12 W keinen Oberflächenabtrag zu bewirken, musste der Fokuspunkt um 12 mm verschoben werden. Dies führt zu einer Vergrößerung der Strahlquerschnittsfläche von 0,005 mm² auf 2,428 mm². Durch die Defokussierung ist eine dauerhafte Bestrahlung beider Beschichtungen möglich, ohne eine Veränderung der Oberfläche zu bewirken.

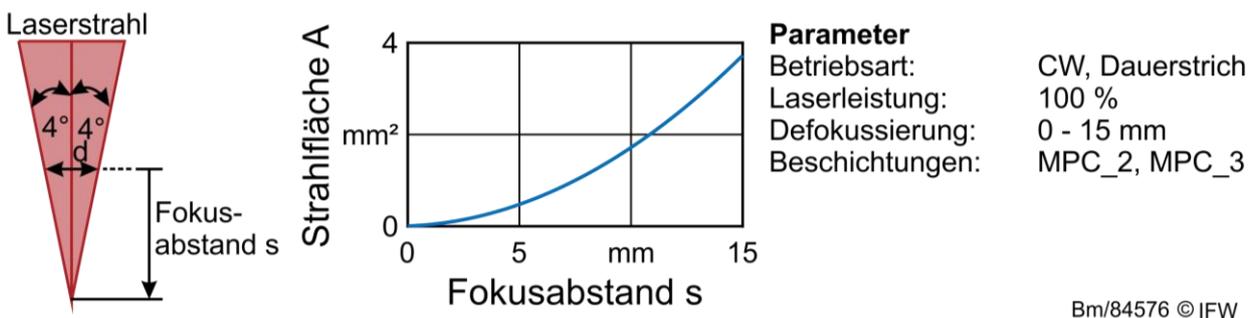
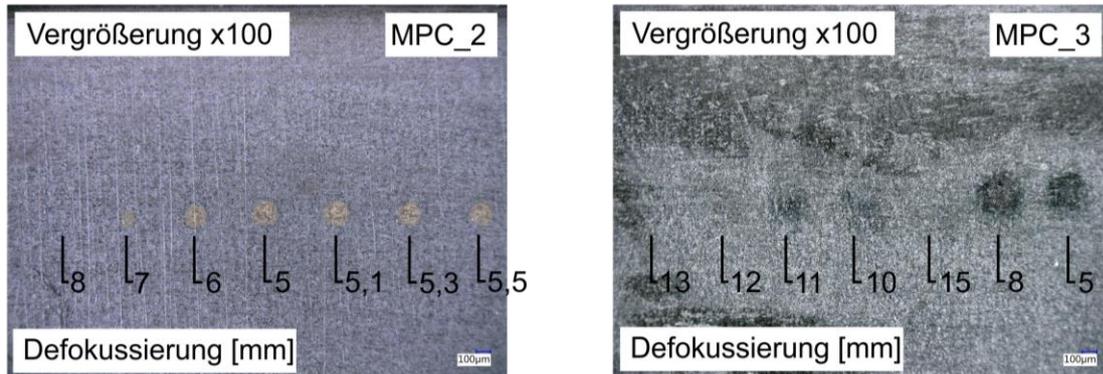
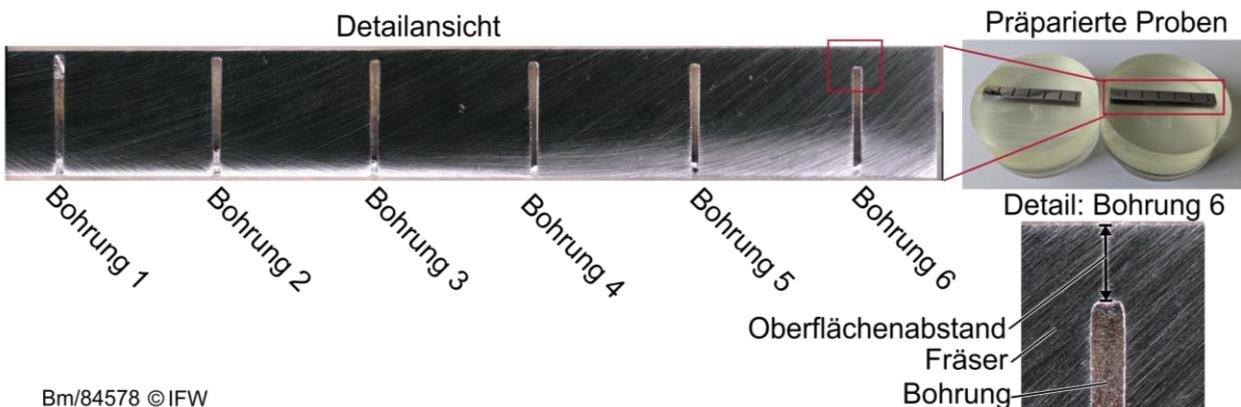


Bild 27: Oberflächenabtrag bei defokussiertem Betrieb

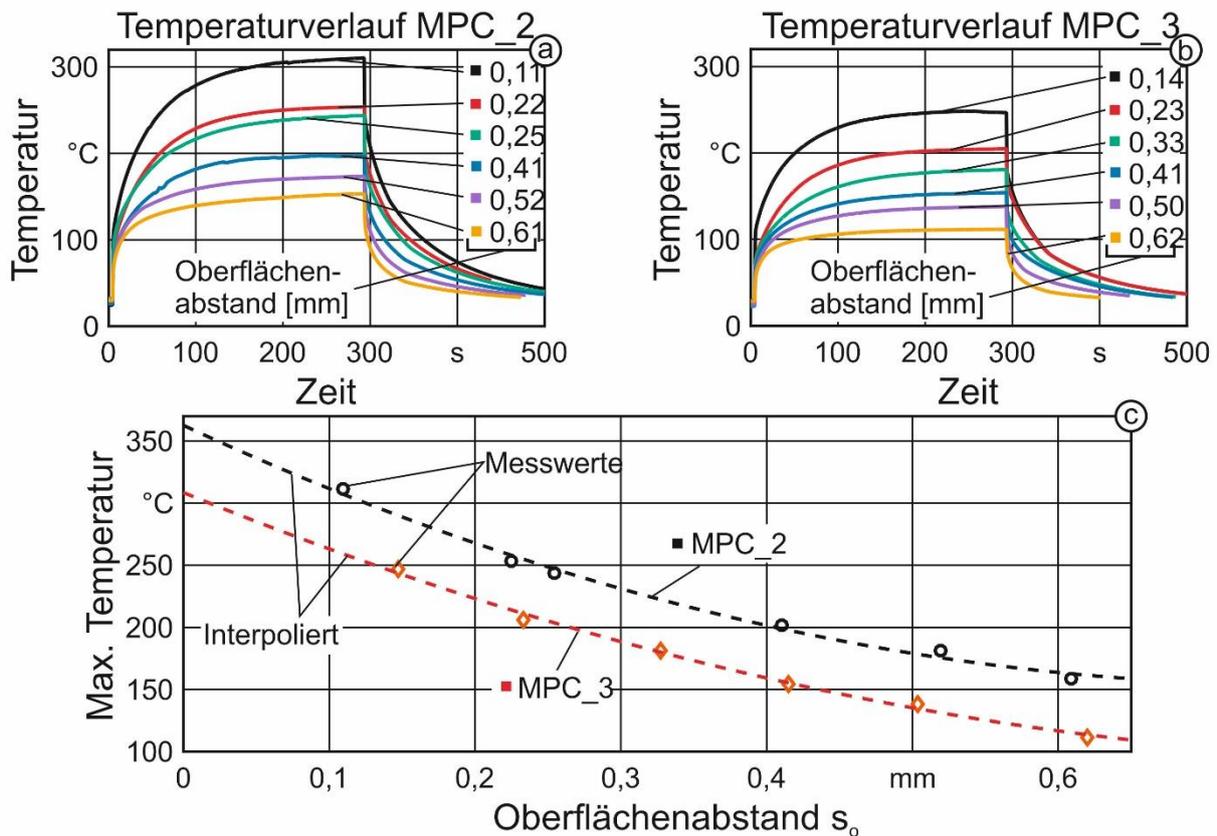
Die Tiefe der Bohrungen wurde mit einer Fertigungstoleranz von $\pm 0,05$ mm gefertigt. Um die exakte Bohrungstiefe bzw. den Abstand zur Oberfläche zu ermitteln, wurden die Werkzeuge nach den Temperaturuntersuchungen längs aufgeschnitten, präpariert und die Bohrtiefen unter dem Mikroskop ermittelt (Bild 28).



Bm/84578 © IFW

Bild 28: Untersuchung der Bohrtiefe

Die experimentell ermittelten Temperaturverläufe von Werkzeugen mit unterschiedlichen Beschichtungen sind in Bild 27 dargestellt. In a) und b) sind die Temperaturen über der Zeit aufgetragen. In Diagramm c) ist ein Vergleich der Maximalwerte beider Beschichtungen dargestellt. Beide Beschichtungen wurden mit den gleichen Laserparametern und einer Zeitdauer von $t = 300$ s bestrahlt. Aufgrund der geringen Temperaturen wurde nur die Thermoelemente zur Temperaturmessung eingesetzt. Die Temperaturverläufe zeigen eine Abnahme der erreichten Maximaltemperatur mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche. Im direkten Vergleich der Maximaltemperaturen (Bild 25 c) ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Werkzeugen sichtbar. Die Temperaturen des Werkzeugs mit der Beschichtung MpC_3 DBU liegen im Durchschnitt ~ 50 °C unter denen des mit MpC_2 DBU beschichteten Werkzeugs. Daraus folgt eine geringere Wärmeleitfähigkeit der MpC_3 DBU Beschichtung. Die interpolierten Temperaturen an der Oberfläche betragen 362 °C (MpC_2 DBU) und 308 °C (MpC_3 DBU). Der Isolierungseffekt der Beschichtung (vgl. [BEB17]) kann durch die Interpolation jedoch nicht berücksichtigt werden. Die Fertigung von Bohrungen näher an der Oberfläche ist mit dem Erodierverfahren nicht möglich.

**Parameter:**

Laserleistung	= 100 % (12 W)
Strahldauer	= 300 s
Betriebsart	= CW, Dauerstrich
Defokussierung	= 12 mm
Gemessene Oberflächenabstände	= 0,1...0,6 mm

Bm/84577 © IFW

Bild 29: Temperaturverläufe der unterschiedlichen Beschichtungen

Kammermeier definierte als Kennzahl zur Beschreibung der thermischen Isolationswirkung unterschiedlicher Werkzeugbeschichtungen die Wärmeeindringzahl b , die Aufteilung der im Reibkontakt entstehenden Wärme zwischen Werkzeug und Werkstück beschreibt.

$$b = \sqrt{\rho \cdot l \cdot c_p}$$

Aus den Stoffgrößen Dichte ρ , Wärmeleitfähigkeit l und spezifischer Wärmekapazität c_p kann die Wärmeeindringzahl abgeleitet werden. Bei Reduzierung der Wärmeeindringzahl in Zerspanuntersuchungen konnte eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit festgestellt werden, wodurch Schichten mit geringem b -Wert eine besondere Eignung für die Trockenbearbeitung zugesprochen wurde [KAM92]. Hintergrund ist die geringe thermische Belastung der Schneidstoffe. Daraus folgt, dass für

die Beschichtung MpC_3 DBU mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit besonders für die Zerspaltung erwartet werden kann. Dies wurde insbesondere auch beim Bohren mit HSS-Werkzeugen gezeigt (Bild 24).

4.2.9 Energiebetrachtung

Auf Basis der in Deutschland produzierten Schaftfräser aus HSS können die ökologischen Einsparungen durch die hinsichtlich ihrer Beschichtung und Schneidkantenverrundung optimierten Werkzeuge betrachtet und berechnet werden. Hierbei wird von einer Anzahl von ca. 5,5 Millionen Schaftfräsern mit einem Durchmesser von $d = 10$ mm und einer Länge von $L = 80$ mm ausgegangen, die sich aus dem Produktionswert nach [VDM13] ergeben. Mit einem Energiebedarf beim Schleifen von einem mm^2 HSS von 50 J [KAR11] ergibt sich anhand der nachfolgenden Rechnung bisher eine erforderliche Energie zur Herstellung der HSS-Schaftfräser von ca. 734,3 GJ.

A_1	-	Anzahl HSS-Werkzeuge		= 5.500.000
O	-	Oberfläche des Werkzeugs	$= \pi \cdot d \cdot L + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	= 2.670 mm^2
E_H	-	Energie Schleifen HSS		= 50 J/ mm^2
E_{HW}	-	Energie pro HSS-Werkzeug	$= O \cdot E_H$	= 133,5 kJ
E	-	Energie	$= A_1 \cdot E_{HW}$	= 734,3 GJ

Durch die Standzeitsteigerung bzw. die Erhöhung des zerspannten Volumens aufgrund der optimierten Kombination aus Hochleistungsbeschichtung und Schneidkantenverrundung bei den Werkstoffen C45 von 50 %, 15NiCr13 von 37 % und X5CrNi18-10 von 33 % ergibt sich im Mittel eine Reduzierung der erforderlichen Schaftfräser von 40 %. Diese Senkung der Anzahl der HSS-Werkzeuge führt pro Jahr zu einer Einsparung der erforderlichen Energie bei der Herstellung der Werkzeuge von ca. 293,7 GJ. Somit können ca. 81.600 kWh Energie eingespart werden. Hieraus folgt mit einem vorläufigen Emissionsfaktor für den deutschen Strommix 2016 von 527 g/kWh [ICH17] eine **Einsparung von ca. 43,0 t CO₂ bei der Werkzeugherstellung von HSS-Schaftfräsern.**

Aus den Standzeitsteigerungen folgt zudem eine Reduzierung der erforderlichen Ressourcen des HSS (Masse m) und der CO₂-Emissionen bei der Herstellung des Schneidstoffs um 40 %. Diese liegen nach [ENE13] bei 1.356 kg pro Tonne HSS. Hieraus folgt eine **Einsparung von ca. 153 t CO₂ pro Jahr aufgrund der Ressourcenschonung.**

ρ	-	Dichte HSS		= 8,15 g/ cm^3
V	-	HSS-Volumen	$= \pi \cdot d^2 \cdot \frac{L}{4}$	= 6.283 mm^3
m	-	Masse gesamt HSS	$= V \cdot \rho \cdot A_1$	= 281.644 kg

Die im Projektantrag beschriebene Substitution bzw. Komplementarität von Hartmetall-Werkzeugen durch HSS kann insbesondere durch die erreichte Produktivitätssteigerung bei der Bearbeitung von

dem hochlegierten Stahl X5CrNi18-10 als realistisch angesehen werden. Dieser Werkstoff gilt auch mit Hartmetall als schwer zerspanbar und stellt Werkzeuge hinsichtlich Verschleiß und Ausbrüche sowie geeigneter Prozessstellgrößen vor Herausforderungen. Mit den im Projekt erreichten Schnittgeschwindigkeiten und Zahnvorschüben der optimierten HSS-Werkzeuge werden Regionen ähnlich der HM-Werkzeugen erzielt. Aufgrund des prozesssicheren Verschleißverhaltens der HSS-Werkzeuge und der um 80 % gesteigerten Produktivität bei der Zerspanung von X5CrNi18-10 bieten die optimierten HSS-Werkzeuge großes Potential bei hochlegierten Werkstoffen komplementär zu HM-Werkzeugen eingesetzt zu werden. Durch den geringeren Anschaffungspreis von HSS-Schafffräsern gegenüber Hartmetall-Werkzeugen kann aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse realistisch eingeschätzt werden, dass ca. 30 % der Einsatzbereiche von HM durch optimierte HSS-Fräser ersetzt werden könnten. Bei einer Anzahl von ca. 8 Millionen Schafffräsern aus Hartmetall, die sich aus dem Produktionswert nach [VDM13] ergeben, können somit ca. 2,4 Millionen HM-Werkzeuge durch HSS-Schafffräser substituiert werden. Aufgrund der längeren Standzeiten von HM gegenüber HSS wird davon ausgegangen, dass zwei HSS-Werkzeuge ein HM-Werkzeug ersetzen können. Auch hier wird von Fräsern mit einem Durchmesser von $d = 10$ mm und einer Länge von $L = 80$ mm ausgegangen. Die erforderliche Energie zum Schleifen der Schneidstoffe HSS und HM basiert auf den Ergebnissen von Karpuschewski et al. [KAR11].

O	-	Oberfläche des Werkzeugs	$= \pi \cdot d \cdot L + 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	= 2.670 mm ²
E _H	-	Energie Schleifen HSS		= 50 J/mm ²
E _{HW}	-	Energie pro HSS-Werkzeug	$= O \cdot E_H$	= 133,5 kJ
E _{HM}	-	Energie Schleifen HM		= 140 J/mm ²
E _{HMW}	-	Energie pro HM-Werkzeug	$= O \cdot E_H$	= 373,8 kJ
ΔE	-	Energieeinsparung pro Werkzeug	$= E_{HMW} - 2 \cdot E_{HW}$	= 106,8 kJ

Durch die mögliche Substitution von HM-Werkzeugen durch HSS-Fräser können somit pro Werkzeug ca. 0,03 kWh eingespart werden. Bei der prognostizierten Anzahl von 2,4 Millionen HM-Werkzeugen entspricht somit die CO₂-Einsparung bei der Fertigung von HSS- anstelle von HM-Werkzeugen ca. 38 t pro Jahr.

Darüber hinaus können durch die Substitution Einsparungen im Bereich der Hartmetallressourcen und in der Herstellung des Hartmetalls erreicht werden. Die CO₂-Emissionen bei der Produktion von einer Tonne Hartmetall liegen bei 8.558 kg/t, so dass **durch den Austausch der HM-Fräser durch HSS** anhand der nachfolgenden Rechnung **weitere ca. 960 t CO₂ eingespart werden**. Hierbei können die ca. 2,4 Millionen HM-Werkzeuge (ST_{HM}) durch 4,8 Millionen HSS-Werkzeuge (ST_{HSS}) ersetzt werden.

ρ _{HM}	-	Dichte Hartmetall		= 10 g/cm ³
V _{HM}	-	Hartmetall-Volumen	$= \pi \cdot d^2 \cdot \frac{L}{4}$	= 6.283 mm ³

m_{HMW}	- Masse pro HM-Werkzeug	$= V_{HM} \cdot \rho_{HM}$	= 63 g
m_{HSS}	- Masse pro HSS-Werkzeuge	$= V \cdot \rho$	= 51 g
CO_{2HM}	- CO_2 pro HM-Werkzeug	$= 8,558 \frac{kg}{kg} \cdot m_{HMW}$	= 539 g
CO_{2HSS}	- CO_2 pro HSS-Werkzeug	$= 1,356 \frac{kg}{kg} \cdot m_{HSS}$	= 69 g
CO_{2MG}	- CO_2 für HM-Werkzeuge	$= 539 g \cdot ST_{HM}$	= 1293,6 t
CO_{2SG}	- CO_2 für HSS-Werkzeuge	$= 69 g \cdot ST_{HSS}$	= 331,2 t

Die Produktivitätssteigerungen der optimierten Werkzeuge von im Mittel 80 % wirken sich direkt auf den Energieverbrauch der eingesetzten Werkzeugmaschinen aus. Da ca. 80 % des Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen durch Peripheriegeräte wie Kühlaggregate und die Kühlschmierstoffzuführung verursacht werden, führt jede Verbesserung der Produktivität zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs einer Werkzeugmaschine. Der höhere Energieverbrauch der Hauptantriebe durch die gesteigerten Drehzahlen und Vorschübe, der die restlichen ca. 20 % des Energieverbrauchs der Werkzeugmaschine ausmacht, wirkt sich aufgrund des hohen Verbrauchs der Nebengeräte damit positiv auf den Gesamtenergiebedarf aus, da die Gesamtlaufzeit der Maschine deutlich gesenkt werden kann [HÜL16].

Moderne Bearbeitungszentren weisen ca. eine Leistungsaufnahme von 20 kW auf [HÜL16]. Bei einem achtstündigen Betrieb der Maschinen an ca. 230 Arbeitstagen im Jahr entspricht dies somit einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 37.000 kWh. Hierbei werden Mehrschichtbetriebe und in der Großindustrie übliche Maschinenlaufzeiten von 24 Stunden nicht berücksichtigt. Aus dem Produktionsvolumen für spanende und abtragende Werkzeugmaschinen aus dem Jahr 2016 von ca. 15 Milliarden Euro ergeben sich bei einem Durchschnittspreis von 400.000 € allein in Deutschland ca. 37.500 neue Maschinen [VDW17]. Bei einem Einsatz von HSS-Werkzeugen auf ca. 10 % dieser Maschinen und Prozesse verbrauchen diese zusammen ca. 140 GWh.

Durch die Erhöhung der Produktivität der optimierten HSS-Werkzeuge um 80 % kann der Energieverbrauch der Peripherieaggregate der Werkzeugmaschinen um diesen Satz reduziert werden. Der Energieverbrauch kann daher um ca. 300 GWh verringert werden. Mit dem Emissionsfaktor des deutschen Strommix [ICH17] ergeben sich somit **durch die Produktivitätssteigerung der HSS-Werkzeuge Einsparungen von ca. 15.800 t CO_2 pro Jahr.**

In der Tabelle 3 sind die jeweiligen CO_2 -Einsparungen durch die hinsichtlich der Beschichtung und Schneidkantenverrundung optimierten HSS-Schafffräser zusammengefasst. **Insgesamt ergibt sich eine potentielle Reduzierung der CO_2 -Emissionen von ca. 17.000 t pro Jahr.**

Tabelle 3: CO₂-Einsparungen

Bereich	Einsparung CO ₂ in t/Jahr
Werkzeugherstellung	43
Ressourcenschonung HSS	153
Substitution HSS – HM, Werkzeugherstellung	38
Substitution HSS – HM, Ressourcenschonung HM	960
Werkzeugmaschine	15.800
Gesamt	16.994

5. Fazit

In dem Projekt konnte durch eine optimierte Kombination aus Hochleistungsbeschichtung und Schneidkantenverrundung eine deutliche Standzeitsteigerung der HSS-Schaftfräser erreicht werden. Dabei wurde festgestellt, dass eine Kombination aus Multifunktionsschicht und einer asymmetrisch zur Spanfläche verkippten Schneidkantenverrundung von ca. 40 µm eine deutliche Erhöhung des Zerspanvolumens und somit der Standzeit der HSS-Werkzeuge bewirkt. Diesbezüglich ergibt sich insgesamt eine potentielle Reduzierung der CO₂-Emissionen von ca. 17.000 t pro Jahr gegenüber der Verwendung von VHM-Werkzeugen. Die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf HSS-Bohrer zeigte ebenfalls eine Steigerung der Einsatzzeit um 20%. Diese Steigerung ist geringer als bei den Fräsworkzeugen, jedoch ohne zusätzliche Untersuchungen der Werkzeugbelastung und Einsatzbedingungen erzielt worden. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass bei genaueren Untersuchungen die Standzeit noch weiter erhöht werden kann. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Stirnfräser ist nicht ohne Anpassung der Vor- und Nachbehandlungsverfahren im Zeitraum dieses Projekts möglich. Auch die Schneidkantenverrundung bei den eingesetzten Stirnfräsern weicht von den der Schaftfräser ab, wodurch ebenfalls die Standzeit beeinflusst wird. Um die Standzeit der Stirnfräser zu steigern, müssen weitere Untersuchungen zu diesen Werkzeugen durchgeführt werden. Das Anwendungsgebiet ist nach den abgeschlossenen Untersuchungen dieses Projekts zunächst nur auf HSS-Schaftfräser- und Bohrer beschränkt. Es sind zusätzliche Untersuchungen mit anderen Fräsworkzeugen, die sich in Lage und Form der Schneide unterscheiden, sinnvoll, um weitere mögliche Anwendungsgebiete zu erschließen.

6. Literaturverzeichnis

- [BAS13] Bassett, E.: Belastungsspezifische Auslegung und Herstellung von Schneidkanten für Drehwerkzeuge. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2013
- [BEB17] Beblein, S., Breidenstein, B., Denkena, B.: On the thermal insulation effect of PVD-AlCrN-coated cutting tools in continuous turning of AISI 4140 , 13th International Conference “THE-A Coatings” in Manufacturing Engineering, 5th October, Thessaloniki, 2017
- [BER03] Berg Van Den, H.: Material-Prozess-Anwendung. ISL-Verlag Hagen, S.27-48, 2003
- [BER17] Bergmann, B.: Grundlagen zur Auslegung von Schneidkantenverrundungen. Dr.-Ing Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2017
- [BIE08] Biermann, D.; Terwey, I.: Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Vol. 1, Nr. 2, S. 76–80, 2008
- [BOB16] Bobzin, K.: High-performance coating for cutting tools. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Review, RWTH Aachen Universität, 2016
- [DEN10] Denkena, B.; De Leon, L.; Basset, E.; Rehe, M.: Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing. Key Engineering Materials, 438, S.1-7, 2010
- [DEN11] Denkena, B.; Tönshoff, H.K.: Spanen. Grundlagen. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [DEN14] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 63 (2), S. 631-653, 2014
- [ENE13] Energiewirtschaft. Themenpapier, stahl-online.de, 2013, <http://www.stahl-online.de>
- [ERK08] Erkens, G.; Jahrbuch der Oberflächentechnik 2008 Band 64, Leuze-Verlag (2008), S. 100-131
- [GAN12] Gandenberger, C.; Glöser, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Ostertag, K.; Walz, R.: Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien - Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie. Arbeitsbericht Nr. 150. TAB Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag, Berlin, 2012
- [GEG09] Gegenheimer, H.; Präparationsverfahren Gleitschleppscheifen In: Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden, Kassel university press GmbH, Hrg. F.Tikal (2009), S. 98-107
- [GIE12] Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J.: Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Texte Nr. 01/2012, Umweltbundesamt, Dessau, 2012
-

-
- [HÜL16] Hülsemeyer, L.: Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen und bedarfsge-
rechter Betrieb am Beispiel der inneren Kühlschmierstoffzufuhr. Dr.-Ing. Dissertation,
Leibniz Universität Hannover, 2016
- [ICH17] Icha, P.; Kuhs, G.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deut-
schen Strommix in den Jahren 1990 – 2016. Climate Change 15/2017, Umweltbun-
desamt, Dessau-Roßlau
- [KAM92] Kammermeier, D.: Charakterisierung von binären und ternären Hartstoffschichten an-
hand von Simulations- und Zerspanuntersuchungen. Dr.-Ing. Dissertation, Aachen,
1992
- [KAR11] Karpuschewski, B.; Kalhöfer, E.; Joswig, D.; Rief, M.: Energiebedarf bei der Herstel-
lung von Hartmetall-Wendeschneidplatten. ZWF 106 (2011) 9, S. 602-605
- [KÖT06] Kötter, D.: Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das
Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dort-
mund, 2006
- [KLO08] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Auflage,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2008
- [LÖF96] Löffler, R.: Belastungs- und Beanspruchungsanalyse bei der Fräsbearbeitung von le-
giertem Grauguß mit Toruswerkzeugen. Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [REH15] Rehe, M.: Herleitung prozessbezogener Kenngrößen der Schneidkantenverrundung
im Fräsprozess. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2015
- [UHL15] Uhlemann, E.; Eulitz, A.; Dethlefs, A.: Discrete Element Modelling of Drag Finishing.
Procedia CIRP, 31, S. 369-374, 2015
- [VDM13] VDMA: Einfuhr, Ausfuhr, Produktion und Marktvolumen von Präzisionswerkzeugen,
Stand: Juli 2013. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frank-
furt/Main, 2013
- [VDW17] VDW: Marktbericht 2016. Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V., Frank-
furt/Main, 2017
- [WEI99] Weinert, K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung. Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York, 1999
- [WYE12] Wyen, C.-F.: Rounded cutting edges and their influence in machining titanium. Dr.-
Ing. Dissertation., ETH Zürich, Düsseldorf, 2012
-