

Leistungsfähigkeit von Eckfrässystemen

Masterarbeit

von

Christian Striedner

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Fertigungstechnik

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas

Graz, im Februar 2018

In Kooperation mit:

Ceratizit Austria Gesellschaft m.b.H.



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit werden acht Wendeschneidplatten-Eckfrässysteme verschiedener Hersteller miteinander verglichen. Beim Werkstoff der Wendeschneidplatten handelt es sich um CVD- und PVD-beschichtetes Hartmetall. Ziel ist es, die Eigenschaften der Eckfrässysteme hinsichtlich ihres Standvermögens und somit ihrer Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Um die Ergebnisse zu erhalten, werden Fräsversuche durchgeführt. Hierbei ist festzustellen, dass sich die Leistungen der einzelnen Werkzeuge und Beschichtungen deutlich unterscheiden. Die Verschleißformen differenzieren hier stark. Bei 50% der untersuchten Werkzeuge funktioniert die Spanabfuhr nur bis zu einer gewissen Eingriffsbreite. Kommt Kühlschmierstoff bei der Bearbeitung zum Einsatz, so verringert sich die Standzeit unabhängig von Hersteller und Beschichtung. Als weitere Gemeinsamkeit aller Eckfrässysteme ist das Gleichbleiben der Werkstückoberflächenqualität über die Standzeit zu erwähnen. Ein kurzer Ausblick auf die Online-Werkzeugüberwachung (Tool Condition Monitoring) wird gegeben. Die wirtschaftlichen Möglichkeiten und die technischen Herausforderungen dieser Methode werden dargestellt.

Abstract

The aim of this master thesis is to evaluate the properties of shoulder milling systems with indexable inserts regarding their tool life and consequently their cost effectiveness. Eight shoulder milling systems by various manufacturers are compared. The inserts are made of CVD- and PVD-coated carbide. Milling experiments are performed to obtain results. It is observed that the performance of the individual tools and coatings vary considerably from each other and the types of wear differ strongly. The chip removal works just up to a certain cutting width for the half of the evaluated tools. The tool life of every tested shoulder milling system decreases if cooling lubricant is used. Another similarity of all tested tools is the constant surface quality of the workpiece over the entire tool life. A brief outlook is given on tool condition monitoring. The economic opportunities and the technical challenges of this approach are explained.

Vorwort

An dieser Stelle darf ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank der Ceratizit Austria GmbH, hier vor allem Frau Dr. Tamara Tepperneegg und Herrn Dr. Christoph Czettl, für die hilfreichen Anregungen und die fachliche Unterstützung.

Bei Frau Dipl.-Ing. Wenqi Liu und Herrn Prof. Franz Haas bedanke ich mich für die Betreuung meiner Masterarbeit.

Meinen Freunden und Kommilitonen Martin und Stephan danke ich für die Unterstützung während der gemeinsamen Studienzeit.

Mein größtes Dankeschön gebührt meiner Familie, besonders meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben und meiner Freundin Daniela, die immer für mich da ist.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Ziele	3
1.2 Aufgabenstellung	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
2 Grundlagen	5
2.1 Fertigungsverfahren Fräsen	5
2.2 Frässysteme/ Fräserarten	8
2.3 Schneidstoffe	8
2.4 Hartmetalle.....	9
2.5 Beschichtung.....	10
2.5.1 CVD-Beschichtung	10
2.5.2 PVD-Beschichtung	11
2.6 Verschleiß	13
2.6.1 Verschleißmechanismen	13
2.6.2 Verschleißformen	14
2.7 Standvermögen.....	17
3 Versuchsplanung.....	18
3.1 Fräsen mit einzahnigem Werkzeug im Vergleich zum Fräsen mit vollbestücktem Werkzeug.....	18
3.2 Standzeitabschätzung	19
3.3 Schnittparameter und Versuchsumfang.....	20
4 Versuchsdurchführung	22
4.1 Versuchswerkstück	22
4.2 Eckfrässysteme	22
4.3 Fräseingriff	27
4.4 Benötigte Antriebsleistung der Arbeitsspindel.....	28
4.5 Versuchsaufbau	31

4.6	Versuchsablauf	32
4.7	Verschleißmessung.....	34
5	Ergebnisse der Fräsversuche.....	35
5.1	Versuche ohne Kühlschmierstoff	35
5.1.1	Ceratizit MaxiMill 491	35
5.1.2	Iscar HELIDO S890.....	39
5.1.3	Seco Square 6	40
5.1.4	Ceratizit MaxiMill 211	43
5.1.5	Sandvik CoroMill 390	45
5.1.6	Tungaloy TPW13	49
5.1.7	Tungaloy TPM11	52
5.1.8	Ingersoll Gold-Max 8	55
5.2	Versuche mit Kühlschmierstoff	57
5.2.1	Ceratizit MaxiMill 491	57
5.2.2	Seco Square 6	59
5.2.3	Ceratizit MaxiMill 211	60
5.2.4	Tungaloy TPW13	61
6	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	63
6.1	Versuche ohne Kühlschmierstoff bei $v_c = 300$ m/min	63
6.2	Versuche mit Kühlschmierstoff bei $v_c = 300$ m/min.....	67
6.3	Versuche bei $v_c = 190$ m/min	69
7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	73
8	Ausblick	76
8.1	Statistische Versuchsplanung	76
8.2	Tool Condition Monitoring.....	76
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	88
	Anhang A	

Abkürzungsverzeichnis

a_e	Eingriffsbreite	mm
$a_{e,geg}$	Eingriffsbreite Gegenlauf	mm
$a_{e,gl}$	Eingriffsbreite Gleichlauf	mm
a_p	Schnitttiefe	mm
$a_{p,max}$	Maximale Schnitttiefe	mm
b	Spanungsbreite	mm
CVD	Chemical Vapour Deposition	
D	Fräserdurchmesser	mm
f	Vorschub	mm/U
f_z	Vorschub je Zahn	mm
h_m	mittlere Spanungsdicke	mm
K	Kolkverhältnis	-
KB	Kolkbreite	mm
$k_{c1.1}$	Spezifische Schnittkraft bezogen auf $h = 1 \text{ mm}$, $b = 1 \text{ mm}$	N/mm^2
KM	Kolkmittenabstand	mm
K_{sch}	Schneidstoffkorrektur	-
KSS	Kühlschmierstoff	
KT	Kolktiefe	mm
K_t	Verschleißkorrektur	-
K_v	Schnittgeschwindigkeitskorrektur	-
n	Drehzahl der Antriebsspindel	U/min
PVD	Physical Vapour Deposition	
Q	Zeitspanvolumen	cm^3/min
r_e	Eckenradius	mm
SKV	Schneidkantenversatz	mm
SV	Schneidenversatz	mm
VB	Verschleißmarkenbreite	mm
VB_{max}	maximale Verschleißmarkenbreite	mm

v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
z	Zähnezahl des Fräasers	-
z_{ie}	Zähne im Eingriff	-
γ	Spanwinkel	Grad
γ_0	Versuchsspanwinkel	Grad
η	mechanischer Wirkungsgrad der Werkzeugmaschine	-
κ_r	Einstellwinkel	Grad
φ	Schnittbogenwinkel	Grad
φ_a	Schnittbogenwinkel bei Fräseraustritt	Grad
φ_e	Schnittbogenwinkel bei Fräseintritt	Grad
φ_{geg}	Schnittbogenwinkel Gegenlauf	Grad
φ_{gl}	Schnittbogenwinkel Gleichlauf	Grad

1 Einleitung

Spanende Bearbeitungsverfahren stellen wichtige Eckpfeiler der industriellen Produktion dar. Aufgrund einer Vielzahl an Möglichkeiten und Einsatzgebieten gepaart mit hoher Qualität und Genauigkeit bei gleichzeitig großer Produktivität und Flexibilität ist die spanende Bearbeitung die erste Wahl bei der Verwirklichung vieler Produkte in allen Branchen.¹

Von großem Interesse sind deshalb die Weiterentwicklung und Leistungssteigerung von Werkzeugen für diese Fertigungsverfahren. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich damit, das Verhalten und die Funktion von modernen Werkzeugen zu untersuchen, um eine Basis für die nächsten Entwicklungsschritte schaffen zu können. In der Einleitung werden Ziele und Aufgabenstellung der Arbeit definiert und die Vorgehensweise erörtert.

1.1 Ziele

Heute befindet sich eine große Anzahl an Werkzeugherstellern am Markt. Für Anwendungen abseits der Sonderfertigungsverfahren bieten viele Hersteller ähnlich aufgebaute Werkzeugsysteme an.²

Somit stellt sich die Frage, wie sich Produkte von unterschiedlichen Anbietern differenzieren, die den gleichen Einsatzbereich abdecken. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ausgewählte Werkzeugsysteme hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften zu vergleichen und über die ermittelte Zerspanungsleistung die für den Anwender wichtigen wirtschaftlichen Schlussfolgerungen zu ziehen.

1.2 Aufgabenstellung

Für diesen Vergleich werden acht Eckfrässysteme von sechs verschiedenen Herstellern ausgewählt, welche die gleichen Spezifikationen besitzen. Es handelt sich dabei um Wendeschneidplattenwerkzeuge mit mehrschneidigen Wendeschneidplatten aus beschichtetem Hartmetall. Der Durchmesser dieser Eckfrässysteme mit fünf Zähnen beträgt 50 mm. Der zu bearbeitende Werkstoff ist 42CrMo4 (Werkstoffnummer: 1.7225). Dafür werden Wendeschneidplatten mit mittlerer Spanleitstufe und der Hartmetallsorte P30 eingesetzt, die jeweils mit CVD- und PVD-Beschichtung versehen sind. Der Vergleich der Eckfrässysteme soll bei einer Eingriffsbreite von 70 % des Fräserdurchmessers erfolgen.

¹ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 1 f.

² Vgl. Verlag moderne Industrie GmbH (2017), S. 2 ff.

1.3 Vorgehensweise

Um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Eckfrässysteme zu treffen, muss das jeweilige Standvermögen in Versuchen ermittelt werden. Die Lebensdauer der Wendeschneidplatten lässt dann direkte Aussagen auf das erzeugte Spanvolumen zu. Aus den Kosten pro Schneidkante lassen sich die Kosten pro zerspantem Volumen darstellen.

2 Grundlagen

Das Fertigungsverfahren Fräsen und das Eckfräsen im Besonderen werden in diesem Kapitel vorgestellt. Eine kurze Übersicht über Fräswerkzeugkonstruktionen und die Eigenschaften der unterschiedlichen Schneidstoffe wird gegeben. Die Herstellung von Hartmetallen und die Beschichtungsverfahren werden genauer betrachtet. Durch die spanende Bearbeitung treten unterschiedliche Verschleißmechanismen am Werkzeug auf. Diese Verschleißmechanismen und ihr Einfluss auf das Standvermögen werden gezeigt.

2.1 Fertigungsverfahren Fräsen

Fräsen ist eine spanende Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide. Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt wie in Abbildung 1 nach DIN 8580.³

Fräswerkzeuge führen eine kreisförmige Schnittbewegung aus.⁴ Kennzeichnend für die Fräsbearbeitung ist der unterbrochene Schnitt.⁵

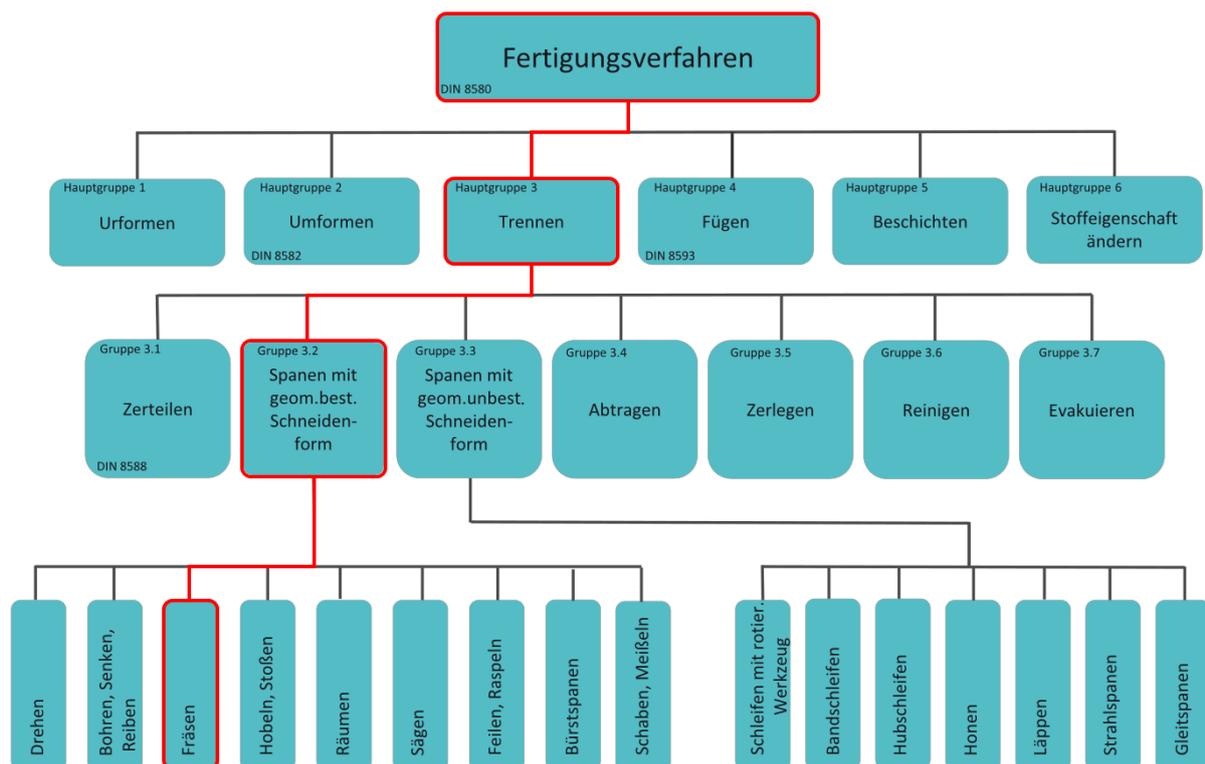


Abbildung 1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580, Quelle: Heisel et al., 2014, S. 21 (leicht modifiziert).

³ Vgl. Heisel, Klocke, Uhlmann & Spur (2014), S. 21.

⁴ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 426.

⁵ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 428.

Fräsen wird weiter wie in Abbildung 2 nach DIN 8589-3 in verschiedene Fräsverfahren gegliedert. Beim Eckfräsen handelt es sich um Stirn-Umfangs-Planfräsen. Mit Eckfräsern, die einen Eckenwinkel von 90° aufweisen, werden in einem Bearbeitungsschritt die Stirnfläche und die Schulterfläche hergestellt.⁶

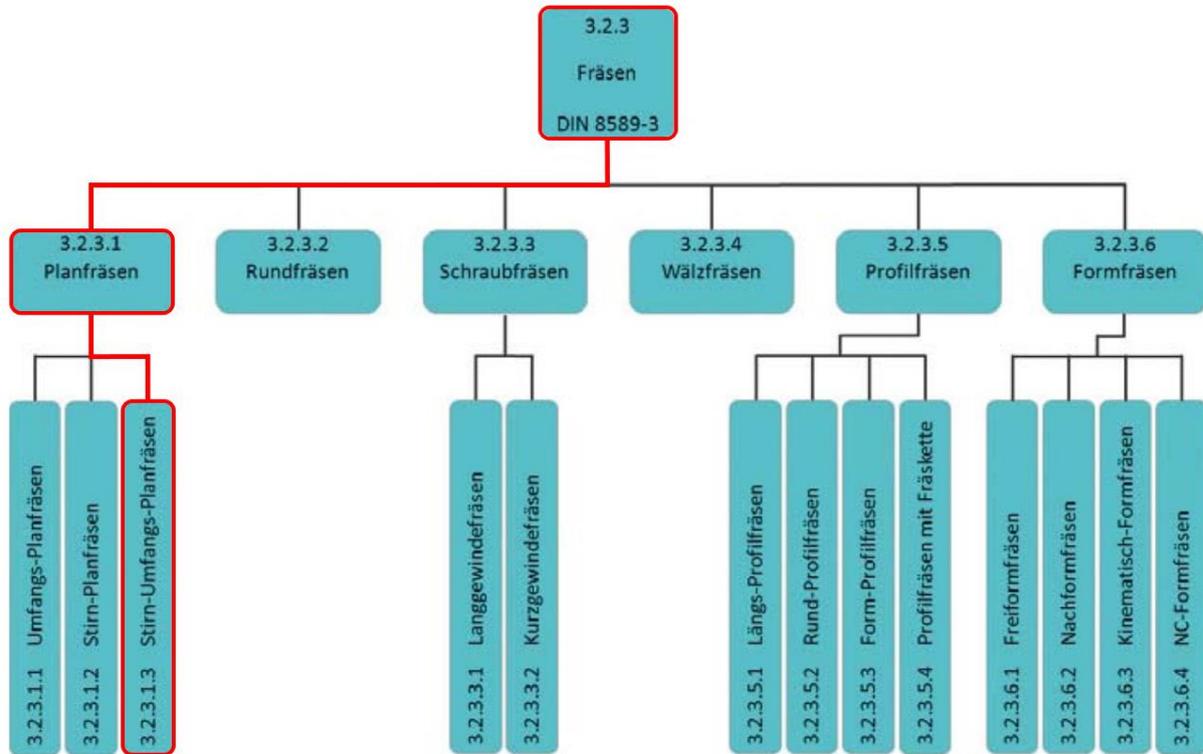


Abbildung 2: Fräsverfahren nach DIN 8589-3, Quelle: Heisel et al., 2014, S. 402 (leicht modifiziert).

Beim Planfräsen liegt die Bewegungsrichtung des Vorschubes senkrecht zur Drehachse des Werkzeuges. Je nach Richtung des Vorschubes wird hierbei, wie in Abbildung 3 gezeigt, zwischen Gleichlaufräsen und Gegenlaufräsen unterschieden.⁷

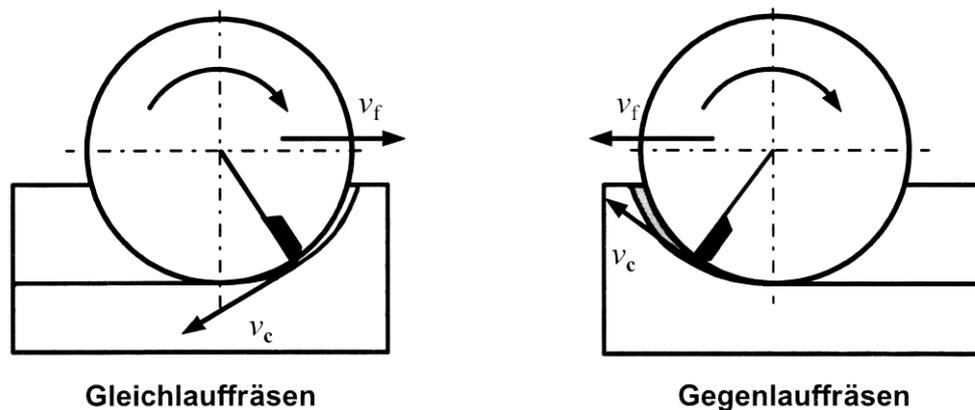


Abbildung 3: Gleich- und Gegenlaufräsen, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 427 (leicht modifiziert).

⁶ Vgl. Heisel, Klocke, Uhlmann & Spur (2014), S. 402.

⁷ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 426.

Beim Gegenlauffräsen erfolgt der Eintritt des Werkzeuges bei einer Spanungsdicke $h=0\text{ mm}$ und es kommt beim Eintritt zu Gleit- und Reibungsprozessen, die den Werkzeugverschleiß erhöhen.⁸

Beim Gleichlauffräsen tritt der Fräser bei großer Spanungsdicke h in das Werkstück ein und tritt bei $h=0\text{ mm}$ wieder aus. Ein Rückfedern wird verhindert und die erzeugte Werkstückoberflächenqualität ist höher. Somit ist das Gleichlauffräsen zu bevorzugen, jedoch muss die Maschinensteifigkeit hierbei für die auftretenden Belastungen beim Werkzeugeintritt hoch genug sein.⁹

Beim Planfräsen ist es möglich einen Gleich- und Gegenlaufeingriff, wie in Abbildung 4 gezeigt, während eines Schnittes auszuführen. Dies kann zur Minimierung der resultierenden Kräfte am Werkstück genutzt werden. Ist die Eingriffsbreite a_e größer als 50% des Fräserdurchmessers tritt immer ein Gleich- und Gegenlaufeingriff auf.¹⁰

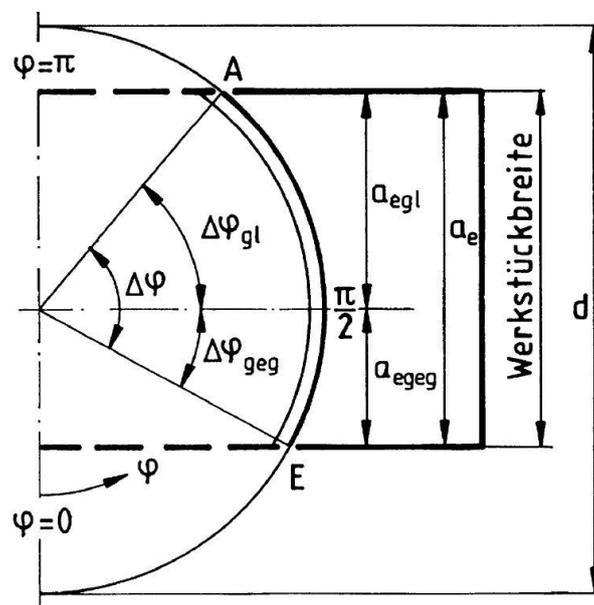


Abbildung 4: Fräseingriff, Quelle: Paucksch et al., 2008, S. 217.

Wichtig beim Fräsen sind der Ein- und Austritt des Werkzeuges. Der Eintritt in das Werkstück soll wie in Abbildung 5a stattfinden und nicht wie in Abbildung 5b an der Schneidenecke, welche den mechanisch schwächsten Punkt darstellt.¹¹

⁸ Vgl. Paucksch, Holsten, Linß & Tikal (2008), S. 214.

⁹ Vgl. Schönherr (2002), S. 227 f.

¹⁰ Vgl. Paucksch, Holsten, Linß & Tikal (2008), S. 215 ff.

¹¹ Vgl. Paucksch, Holsten, Linß & Tikal (2008), S. 217.

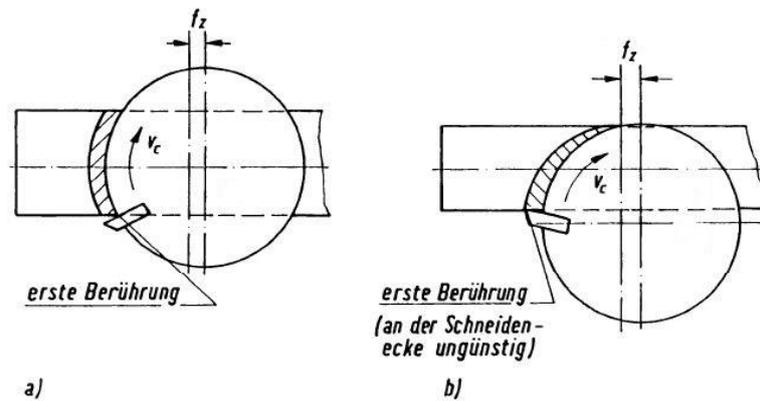


Abbildung 5: Berührungspunkte beim Fräseintritt, Quelle: Paucksch et al., 2008, S. 219 (leicht modifiziert).

Beim Austritt aus dem Werkstück soll auf den Austrittswinkel geachtet werden. Liegt der Austrittswinkel innerhalb des Bereichs von -45° bis $+20^\circ$ kann es zu Ausbrüchen der Schneidkante nach sehr kurzer Bearbeitungszeit kommen.¹²

2.2 Frässysteme/ Fräserarten

Fräswerkzeuge können in Schafffräser, Messerkopffräser und Scheibenfräser unterteilt werden. Eine weitere Unterscheidung betrifft Voll-Werkzeuge und Wendeschneidplatten-Werkzeuge. Schafffräser und Scheibenfräser sind je nach Durchmesser als Voll-Werkzeuge und Wendeschneidplatten-Werkzeuge üblich, Messerköpfe hingegen sind meist Wendeschneidplatten-Werkzeuge.¹³

In dieser Arbeit werden Messerkopffräser, die mit Wendeschneidplatten bestückt sind, untersucht.

2.3 Schneidstoffe

Als Schneidstoffe werden Kaltarbeitsstähle, Schnellarbeitsstähle (HSS, High-Speed-Steels), Hartmetalle, Schneidkeramiken, Bornitrid und Diamant verwendet. Die Eigenschaften der jeweiligen Schneidstoffe sind in der Abbildung 6 dargestellt. Der Zielkonflikt zwischen Härte (Verschleißfestigkeit) und Zähigkeit wird dargestellt.¹⁴

¹² Vgl. Pekelharing (1984).

¹³ Vgl. Heisel, Klocke, Uhlmann & Spur (2014), S. 416.

¹⁴ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 103 ff.

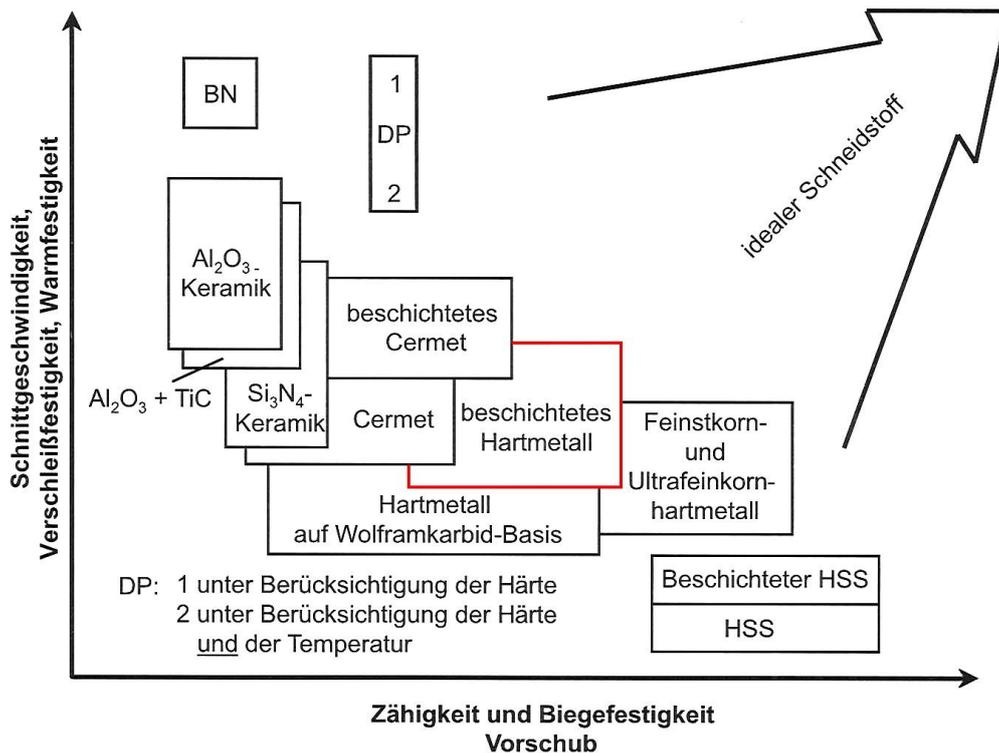


Abbildung 6: Eigenschaften der Schneidstoffe, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 104 (leicht modifiziert).

Besonders beschichtete Hartmetalle stellen einen Kompromiss zwischen Verschleißfähigkeit und Zähigkeit dar, was sie je nach Zusammensetzung zum idealen Schneidstoff für verschiedene Stahlwerkstoffe macht.¹⁵

2.4 Hartmetalle

Hartmetalle bestehen aus zwei oder mehreren Legierungsphasen. Die Herstellung erfolgt pulvermetallurgisch. Die α -Phase wird durch Wolframkarbid (WC) gebildet. Sie stellt die wichtigste Hartstoffphase dar, die für die Verschleißfestigkeit verantwortlich ist. Die β -Phase bestimmt die Zähigkeit und wird durch Kobalt (Co) gebildet. Kobalt fungiert als Bindemetall. Die γ -Phase besteht aus weiteren Hartstoffen. Meist kommen hier Metallkarbide wie Titankarbid (TiC), Tantalcarbid (TaC) und andere Titanmischkarbide zum Einsatz. Die gute Löslichkeit von Wolframkarbid in Kobalt hat hohe innere Bindekräfte und gute Kantenfestigkeit zur Folge. Der Kobalt-Gehalt und die Korngröße des Wolframkarbids bestimmen die Zähigkeit bzw. Verschleißfestigkeit der Hartmetalle. Bezogen auf den Anwendungsfall können verschleißfeste Hartmetalle einen Kobalt-Anteil von nur

¹⁵ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 176.

fünf Gewichtsprozent und zähe Hartmetalle mit hoher Biegefestigkeit einen Kobalt-Anteil von bis zu 15 Gewichtsprozent besitzen.¹⁶

Die Korngröße des Wolframkarbids in Hartmetallen liegt je nach Anwendung meist in einem Bereich von 0,2 µm bis 8 µm. Durch eine dichtere Packung der Körner bei sogenannten Feinst- und Ultrafeinkorn-Hartmetallen mit einem WC-Korndurchmesser unter 1 µm, steigen einerseits die Härte und andererseits auch die Biegefestigkeit.^{17 18}

In der Fräsanwendung, die durch den unterbrochenen Schnitt gekennzeichnet ist, werden Hartmetalle mit mittlerem Co-Gehalt¹⁹ und einer WC-Korngröße von ungefähr 1 µm²⁰ eingesetzt.

2.5 Beschichtung

Um Hartmetalle als Schneidstoffe noch leistungsfähiger zu machen, werden seit Ende der 1960er Jahre verschleißfeste Beschichtungen aufgebracht. Die Beschichtungen haben sich von einer Schicht hin zu Multilagenschichten, bestehend aus verschiedenen carbidischen, nitridischen und/oder oxidischen Schichtstoffen, entwickelt.²¹

Diese Beschichtungen verringern sämtliche Verschleißvorgänge, wie Abrasions-, Adhäsions-, Diffusions- und Oxidationsverschleiß. Die Beschichtung kann chemisch (CVD) oder physikalisch (PVD) erfolgen.²²

2.5.1 CVD-Beschichtung

Beim CVD-Verfahren erfolgt die Abscheidung der Schichtstoffe aus der Dampfphase auf chemischem Weg bei 10³ Pa bis 10⁵ Pa.²³ Die Prozesstemperaturen liegen bei 700 °C bis 1000 °C.²⁴ CVD-Beschichtungen besitzen durch Diffusionsvorgänge mit dem Grundmaterial eine sehr gute Schichthaftung.²⁵

Bei der CVD-Beschichtung sind Schichtdicken von bis zu 20 µm möglich. Bei Werkzeugen für den unterbrochenen Schnitt betragen die Schichtdicken maximal 6 µm, damit die Zähigkeit

¹⁶ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 175.

¹⁷ Vgl. Schedler (1988), S. 33.

¹⁸ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 129.

¹⁹ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 176.

²⁰ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 128.

²¹ Vgl. Schedler (1988), S. 205 ff.

²² Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 137 f.

²³ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 139.

²⁴ Vgl. Schedler (1988), S. 212.

²⁵ Vgl. Schedler (1988), S. 220.

noch ausreichend hoch ist. Mit dem CVD-Verfahren können komplexe Geometrien beschichtet werden, da die Hartschichtstoffe die Grundkörper in der Gasphase umgeben.²⁶ Das Funktionsprinzip einer CVD-Beschichtungsanlage ist in Abbildung 7 dargestellt.

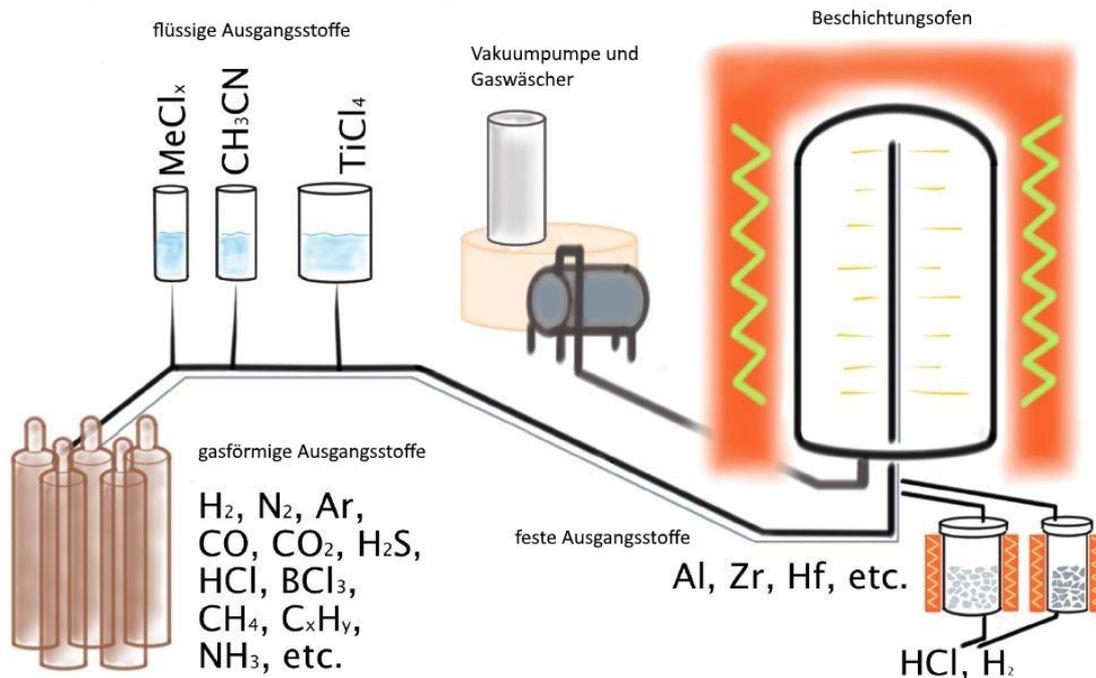


Abbildung 7: CVD-Beschichtungsanlage, Quelle: Czettl, 2013, S. 2 (leicht modifiziert).

2.5.2 PVD-Beschichtung

Beim PVD-Verfahren erfolgt die Abscheidung der Schichtstoffe auf physikalischem Weg bei Temperaturen zwischen 160°C und 600°C . Durch die bei der Herstellung induzierten Druckeigenstressungen sind die Schichtdicken auf $3\ \mu\text{m}$ bis $6\ \mu\text{m}$ begrenzt, jedoch wirken sich diese Eigenstressungen in der Beschichtung vorteilhaft auf die Widerstandsfähigkeit bei der Bearbeitung mit unterbrochenem Schnitt aus.²⁷

Die gebräuchlichsten Verfahren für die PVD-Beschichtung sind: Vakuumverdampfen, Lichtbogenverdampfen, Sputtern (Kathodenzerstäubung) und Ionenplattieren.²⁸

Hierbei wird je nach Verfahren das Beschichtungsmaterial mit unterschiedlichen Energiequellen verdampft bzw. beim Sputtern durch Ionenbeschuss zerstäubt. Auf dem Weg des Beschichtungsmaterials zu den Werkstücken wird der Dampfstrom je nach Methode in einem Plasma ionisiert, um eine höhere kinetische Energie zu erlangen und somit bei guter Haftfähigkeit des Beschichtungsmaterials an den Werkstücken die Prozesstemperaturen zu

²⁶ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 142.

²⁷ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 154.

²⁸ Vgl. Mattox (2010), S. 3.

drosseln. Reaktionsgas kann zugeführt werden, um Karbide, Nitride und/oder Oxide auszubilden. Die Anordnung der Werkstücke ist beim PVD-Verfahren wichtig, da die Beschichtungsleistung von der Strömungsrichtung des Beschichtungsmaterials abhängt und die Werkstücke somit direkt für das Beschichtungsmaterial zugänglich sein müssen. Maßnahmen wie die Rotation der zu beschichtenden Werkstücke können hier Abhilfe schaffen.²⁹

Beispielhaft für PVD-Verfahren werden in Abbildung 8 die Lichtbogenverdampfung und in Abbildung 9 die Kathodenzerstäubung dargestellt.

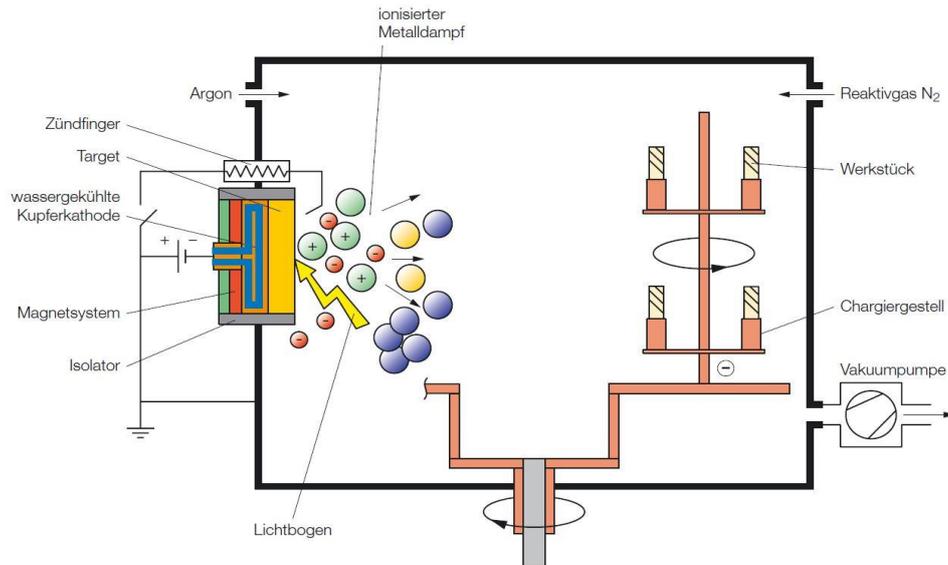


Abbildung 8: Lichtbogenverdampfung, Quelle: Emuge-Franken, 2004, S. 137.

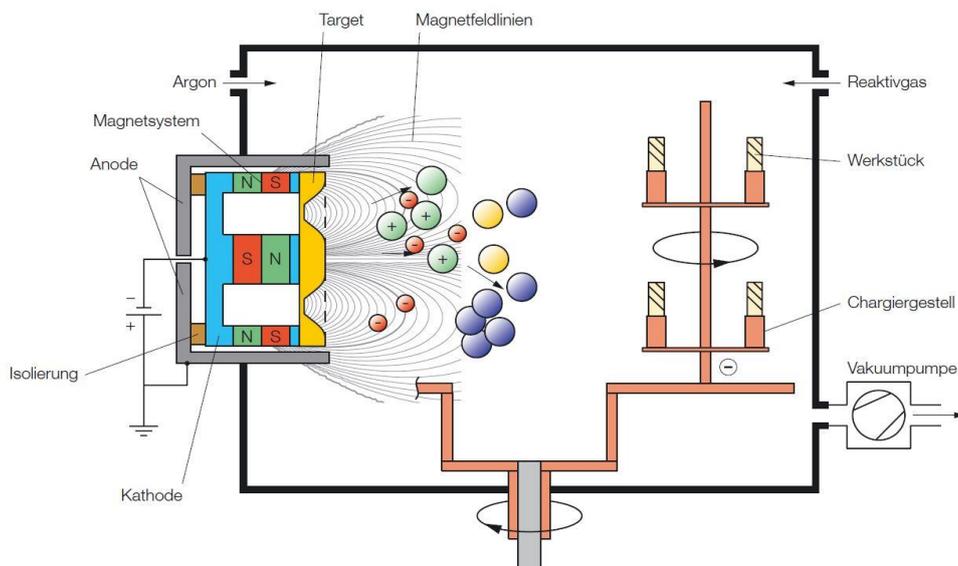


Abbildung 9: Kathodenzerstäubung, Quelle: Emuge-Franken, 2004, S. 139.

²⁹ Vgl. Schedler (1988), S. 214 ff.

2.6 Verschleiß

Durch die mechanische, thermische und chemische Beanspruchung bei der spanenden Bearbeitung tritt Verschleiß am Werkzeug auf. Diese Beanspruchung während des Zerspanens löst verschiedene Verschleißmechanismen bzw. Verschleißursachen aus, die in weiterer Folge zu den Verschleißformen bzw. Verschleißarten führen, welche man an den Werkzeugschneiden beobachten und erkennen kann. Diese sind nachfolgend in den Kapiteln 2.6.1 und 2.6.2 laut Denkena & Tönshoff, Klocke & Wilfried und Paucksch et al. beschrieben:^{30 31 32}

2.6.1 Verschleißmechanismen

2.6.1.1 Abrasion

Bei Abrasion handelt es sich um Abrieb infolge des Kontakts zwischen Werkzeug und Werkstück. Es handelt sich hierbei um einen mechanischen Prozess, der durch die thermische Schwächung des Werkzeuges beim Zerspanungsvorgang beschleunigt wird. Abrasiver Verschleiß wird auch als Furchungverschleiß bezeichnet. Es dringen Rauheitshügel des Werkstückes oder vorhandene Partikel in die Werkzeugoberfläche ein und es entstehen Furchen durch Relativbewegung. Bei duktilen Werkstoffen kann es dadurch zu einer plastischen Verformung oder zu einem spanenden Abtrag des Werkzeugwerkstoffes kommen. Bei spröden Werkstoffen kommt es zur Bildung von Rissen und damit verbunden zu kleinen Ausbrüchen an der Oberfläche. Abrasion tritt an der Spanfläche und an der Freifläche auf.

2.6.1.2 Adhäsion

Bei Adhäsion kommt es zu Verschweißungen des Werkstoffes mit dem Schneidstoff. Die so auf dem Werkzeug entstehenden Aufschweißungen werden bei der Zerspanung mit hoher Frequenz abgeschert und wiederaufgebaut. Bei jedem Ablösen werden auch Teile des verschweißten Schneidstoffes herausgerissen, was zum Werkzeugverschleiß führt. Besonders gefährdet für Adhäsionsverschleiß sind ferritische und austenitische Werkstoffe. Dieser Verschleiß tritt in allen Schnittgeschwindigkeitsbereichen auf. Bei geringer Schnittgeschwindigkeit ($v_c < 30 \text{ m/min}$) kommt es zur Ausbildung einer sogenannten Aufbauschneide und der Verschleiß durch Adhäsion ist dominierend.

³⁰ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 135 ff.

³¹ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 75 ff.

³² Vgl. Paucksch, Holsten, Linß & Tikal (2008), S. 48 f.

2.6.1.3 Diffusion

Aufgrund der hohen Temperaturen beim Zerspanungsvorgang lösen sich thermisch aktivierte Atome des Schneidstoffes und vermischen sich mit dem Werkstückwerkstoff oder umgekehrt. Besonders bei Hartmetallschneidstoffen tritt die Kobalt-Diffusion auf. Wegen dem Verlust von Legierungselementen durch Diffusion kann es zu Eigenschaftsänderungen des Schneidstoffes und somit zur Abnahme der Verschleißfestigkeit kommen.

2.6.1.4 Verzunderung/ Oxidation

Oxidation tritt an den Rändern des Kontaktes von Span und Werkzeug auf. Dort bildet sich eine Oxidschicht an der Oberfläche. Besonders unbeschichtete Hartmetalle neigen zur Oxidation.

2.6.1.5 Mechanische und thermische Überbeanspruchung

Insbesondere beim unterbrochenen Schnitt kommt es zu Rissbildungen am Werkzeug. Die Ursachen für die Rissbildung sind die mechanischen Belastungen in Verbindung mit den thermischen Wechselbelastungen.

Zu Ausbrüchen kommt es an der Ecke und den Kanten der Schneide ebenfalls durch mechanische Belastung. Der Ein- und Austritt des Werkzeuges ist entscheidend, da hier große Belastungsgradienten auftreten.

2.6.2 Verschleißformen

2.6.2.1 Freiflächenverschleiß

Tritt durch Abrasions- und Adhäsionsvorgänge an Haupt- und Nebenfleißfläche auf und wird mittels der Verschleißmarkenbreite (siehe Abbildung 10) quantifiziert. Der Schneidenversatz gibt die notwendige Werkzeugkorrektur an, damit das gleiche Maß wie mit unbenutzter Schneide erreicht wird.

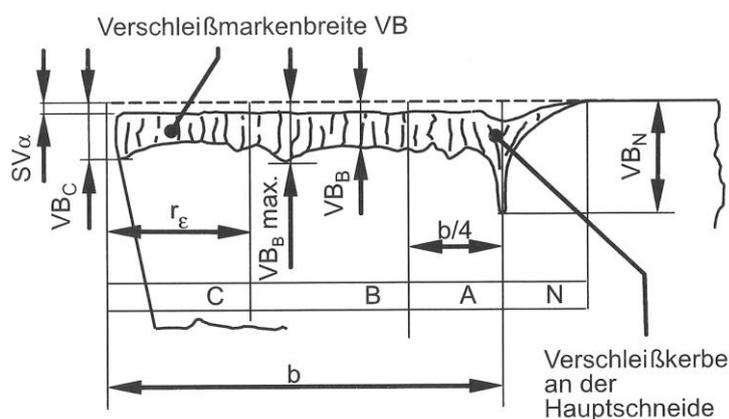


Abbildung 10: Verschleißmarkenbreite mit Messgrößen nach DIN ISO 3685, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 93.

Bei reinem Abrasionsverschleiß von beschichteten Hartmetallwerkzeugen kommt es durch Einlaufvorgänge wie in Abbildung 11 dargestellt zuerst zu einem degressiven Anstieg des Verschleißes bis die wenige μm dicke Beschichtung durchbrochen ist. Danach steigt der Verschleiß nahezu linear an, was auf Stützwirkung und Adhäsionseffekte zurückzuführen ist. Ist ein gewisser Freiflächenverschleiß, repräsentiert durch die Verschleißmarkenbreite VB, erreicht und somit das Ende der Standzeit, steigt der Verschleiß progressiv an. Ab diesem Punkt entspricht die Form des Werkzeuges nicht mehr der zulässigen Kontur und die erreichbare Werkstückgüte bezüglich Maßtoleranzen und Oberflächenrauheit ist zu gering.

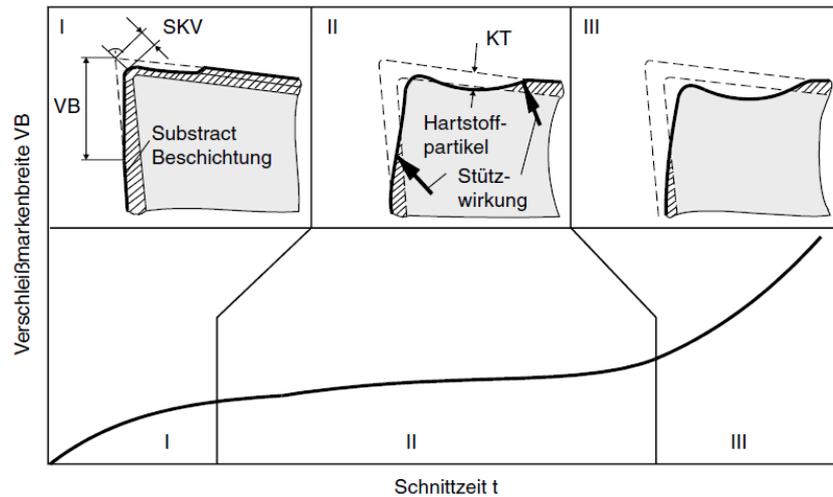


Abbildung 11: Verschleißvorgänge bei beschichtetem Hartmetall, Quelle: Denkena & Tönshoff, 2011, S. 182.

2.6.2.2 Kolkverschleiß

Tritt im höheren Schnittgeschwindigkeitsbereich auf. Die Ursache dieser Verschleißform ist die Diffusion. Das durch die Diffusionsvorgänge geschwächte Gefüge der Spanfläche bietet geringeren Widerstand gegen die durch die abgleitenden Späne hervorgerufene Abrasion. Der Kolkverschleiß wird durch das Kolkverhältnis $K = \frac{KT}{KM}$ bestimmt. Dieses setzt sich aus der Kolktiefe KT und dem Kolkmittenabstand KM zusammen (siehe Abbildung 12). Durch den Kolkverschleiß wird die mechanische Widerstandsfähigkeit der Schneidkante reduziert und der Spanablauf ändert sich.

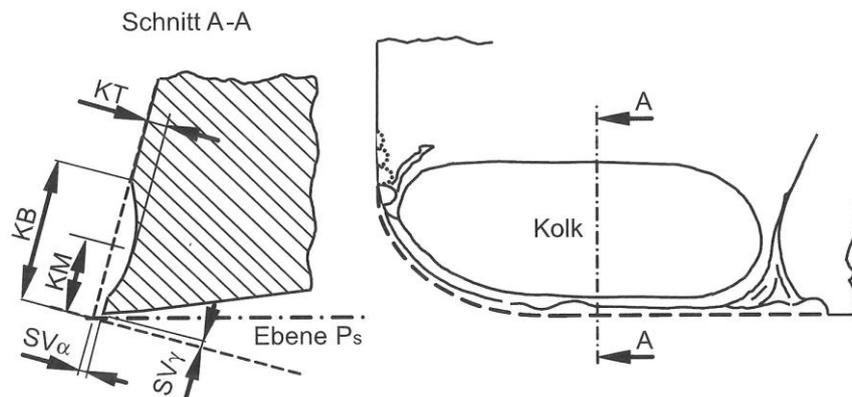


Abbildung 12: Kolkverschleiß mit Messgrößen nach DIN ISO 3685, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 93.

Bei der Zerspanung von Stahlwerkstoffen mit Hartmetallwerkzeugen kommt es aufgrund der hohen möglichen Schnittgeschwindigkeiten und der Werkstoffpaarung zu ausgeprägtem Kolkverschleiß. Abhilfe schafft hierbei die Beschichtung des Hartmetallwerkzeuges. Damit wird die Oberfläche des Schneidstoffes geschützt und es kommt nicht mehr zum direkten Kontakt zwischen Schneidstoff und Werkstoff.

2.6.2.3 Querrisse und Kammrisse

Querrisse treten durch die dynamische Druckschwellbelastung auf, die durch schnelle Schnittkraftwechsel beim unterbrochenen Schnitt hervorgerufen werden. Diese Risse entstehen lateral (parallel) zur Schneidkante.

Kammrisse treten durch thermo-mechanische Beanspruchung vorzugsweise beim unterbrochenen Schnitt mit Hartmetallen und Schneidkeramiken auf. Kammrisse entstehen senkrecht zur Schneidkante und treten in regelmäßigen Abständen auf.

Das Erscheinungsbild von Quer- und Kammrissen ist in Abbildung 13 skizziert.

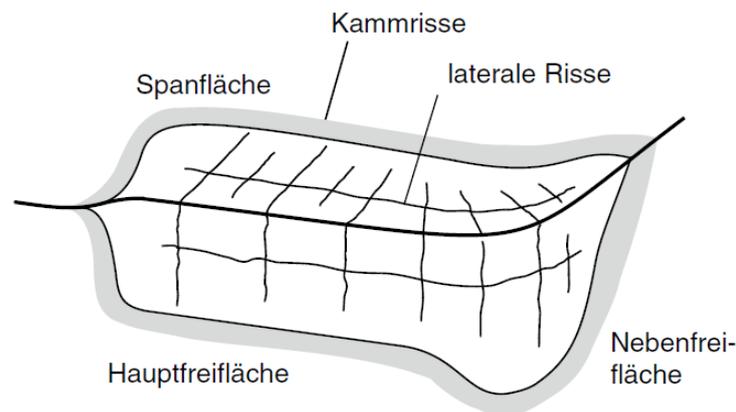


Abbildung 13: Querrisse und Kammrisse, Quelle: Denkena & Tönshoff, 2011, S. 148.

2.6.2.4 Ausbrüche

Treten durch mechanische Beanspruchung auf Grund zu hoher Schnittkräfte oder Schnittunterbrechungen auf.

2.6.2.5 Kerbverschleiß

Tritt meist in Form von Endkerben auf, wo das Ende des Kontaktes zwischen Werkzeug und Werkstück durch starke Veränderung von mechanischen und thermischen Belastungen, den scharfkantigen Spanrand und dem Kontakt mit der Atmosphäre geprägt ist.

2.7 Standvermögen

Nach DIN 6583 ist das Standvermögen definiert als „die Fähigkeit eines Wirkpaares (Werkzeug und Werkstück), einen bestimmten Zerspanvorgang durchzustehen.“³³

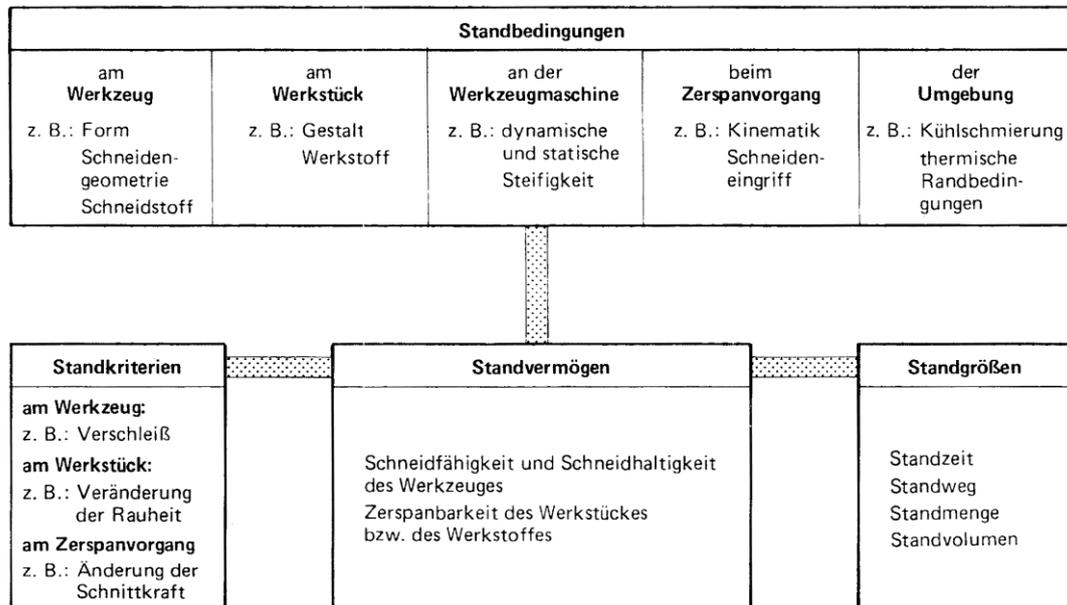


Abbildung 14: Einflüsse auf das Standvermögen, Quelle: Deutsches Institut für Normung, 1981, S. 1.

Die Abbildung 14 zeigt die Einflüsse auf das Standvermögen. Es wird also die Lebensdauer eines Werkzeuges bis zum Erreichen eines gewissen Standkriteriums unter dem Einwirken der Standbedingungen mithilfe von Standgrößen beschrieben.³⁴

³³ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (1981), S. 1.

³⁴ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 259 f.

3 Versuchsplanung

Vor der Versuchsdurchführung ist eine Planung dieser Versuche nötig. Es wird auf die Bestückung der Werkzeuge eingegangen, eine Abschätzung der Standzeit wird vorgenommen und Schnittparameter und Versuchsumfang werden festgelegt.

3.1 Fräsen mit einzahnigem Werkzeug im Vergleich zum Fräsen mit vollbestücktem Werkzeug

In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile des Fräsens mit einem einzahnigen Werkzeug und mit einem vollbestückten Werkzeug zur Bestimmung der Schädigungsmechanismen kurz skizziert. Im Einzahnversuch wird der Vorschub entsprechend der Zähnezahl reduziert. Die Versuche werden kostengünstiger und zeiteffizienter, da der Werkstückverbrauch geringer ist und nur eine Schneide betrachtet werden muss. Die Reduktion des Vorschubs bringt jedoch besonders bei Versuchen zur Bestimmung der Standzeit von Frässystemen Nachteile. So ändert sich die Länge des Eingriffs je Wendeschneidplatte wie in Abbildung 15 dargestellt. Der längere Weg pro Eingriff kann ein Faktor für die Verkürzung der Standzeit bei vollbestückten Fräsern sein.³⁵

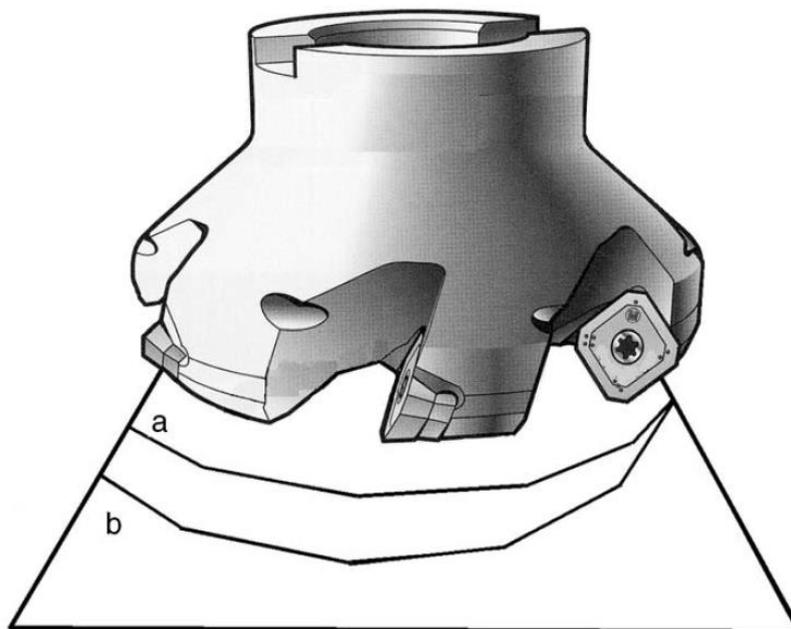


Abbildung 15: Länge des Eingriffes je Wendeschneidplatte beim Einzahnversuch (a) und bei vollbestückten Fräsern (b), Quelle: Richetti et al., 2004, S. 698.

³⁵ Vgl. Richetti, Machado, Da Silva, Ezugwu & Bonney (2004), S. 695 ff.

Den größten Faktor stellen die thermischen Vorgänge dar. Durch die höhere Frequenz der Eingriffe bei voll bestückten Fräsern treten thermisch verursachte Verschleißvorgänge stärker auf. Beim Einzahnversuch hingegen kühlt das Werkstück zwischen den Eingriffen immer wieder ab.³⁶

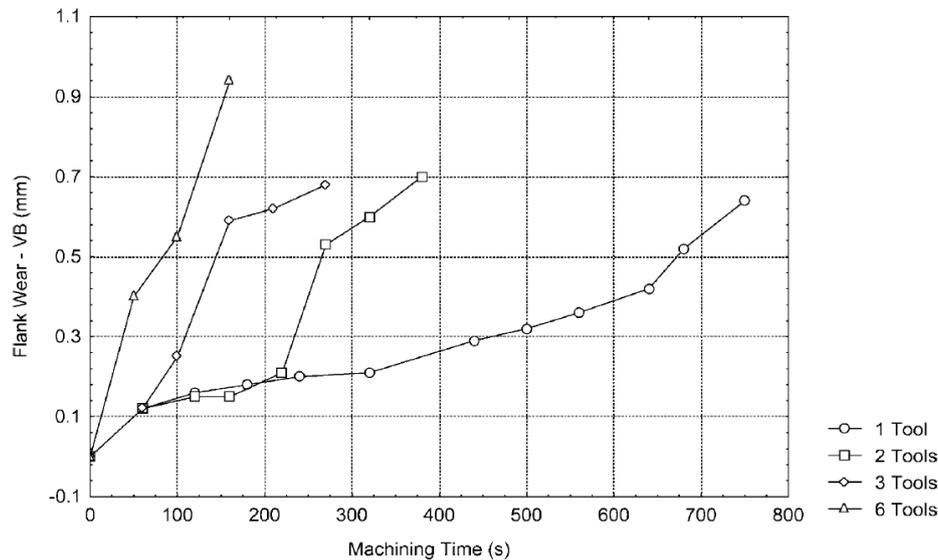


Abbildung 16: Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit der Bestückung, Quelle: Richetti et al., 2004, S. 697.

Im Vergleich zum vollbestückten Werkzeug kann ein komplett verändertes Schädigungsbild im Einzahnversuch generiert werden, wie Abbildung 16 zeigt. Daher sind die gewonnenen Ergebnisse nicht aussagekräftig für die Praxis, wo überwiegend mit vollbestückte Werkzeuge zerspannt wird.³⁷ Zum Standzeitvergleich und zur Ermittlung der maximalen Zerspannungsvolumen verschiedener Frässysteme wird der Einzahnversuch deshalb in dieser Arbeit nicht herangezogen.

3.2 Standzeitabschätzung

Im Vorfeld der Versuche muss die Standzeit der Eckfrässysteme abgeschätzt werden, um die benötigte Anzahl der Versuchswerkstücke für den Materialeinkauf zu ermitteln und um eine Prognose für die Bearbeitungszeit und Maschinenbelegung zu treffen.

Dies stellt eine schwierige Aufgabe dar, da alle mathematischen Modelle zur Standzeitberechnung mit Koeffizienten, die in Versuchen ermittelt werden, arbeiten. Das bedeutet, dass zuerst umfassende Versuche durchgeführt werden müssen, um für eine

³⁶ Vgl. Richetti, Machado, Da Silva, Ezugwu & Bonney (2004), S. 698 f.

³⁷ Vgl. Richetti, Machado, Da Silva, Ezugwu & Bonney (2004), S. 700.

Werkstück-Werkzeug-Kombination und eine Vorschub-Schnitttiefe-Kombination die Standzeit in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit empirisch zu ermitteln.³⁸

Diese Modelle sind Weiterentwicklungen der Taylor-Gleichung die auf das Jahr 1906 zurückgeht und ebenfalls empirisch aus den Ergebnissen von Versuchen entwickelt wurde. Sie zeigt einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Standzeit und Schnittgeschwindigkeit.³⁹

$$v_c = C * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{k}} \quad 3-1 \quad 40$$

Laut Taylor wird eine Standzeit von einer Minute vorhergesagt, wenn 42CrMo4 mit einer Schnittgeschwindigkeit von 234 m/min und einem Schneidstoff aus beschichtetem Hartmetall (Schnittparameter: $a_p=1$ mm, $f=1$ mm/U, $VB=0,4$ mm) bearbeitet wird.⁴¹ Die von den Herstellern empfohlenen Startwerte für die Schnittgeschwindigkeit liegen in oder über diesem Geschwindigkeitsbereich.^{42 43 44 45 46} Daher kann man von einer wesentlich längeren Standzeit ausgehen. Die Abschätzung der Standzeit mit der einfachen Taylor-Gleichung ist daher nicht zulässig.

3.3 Schnittparameter und Versuchsumfang

Für die drei durchzuführenden Versuchsreihen werden die anzuwendenden Schnittparameter festgelegt. Die Versuche der ersten Versuchsreihe sollen eine Vergleichbarkeit der Eckfrässysteme bei einer Schnittparameter-Kombination zulassen. Alle Eckfrässysteme werden bis zum Auftreten eines Standkriteriums getestet, welches das Ende der Lebensdauer des jeweiligen Systems kennzeichnet. Folglich der Literatur nach Debnath et al.⁴⁷ und Mehrban et al.⁴⁸ hat die Schnittgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Standzeit, gefolgt von der Schnitttiefe. Die Vorschubgeschwindigkeit hingegen hat nur einen geringen Einfluss auf die Standzeit.

³⁸ Vgl. Klocke & Wilfried (2008), S. 263 f.

³⁹ Vgl. Taylor (1906), S. 163.

⁴⁰ Denkena & Tönshoff (2011), S. 150.

⁴¹ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 150 f.

⁴² Vgl. Ceratizit Group (2016a), S. 450.

⁴³ Vgl. ISCAR Germany GmbH (2011), S. 6.

⁴⁴ Vgl. Seco Tools GmbH (2016), S. 74.

⁴⁵ Vgl. Sandvik AB (2015), S. 524 ff.

⁴⁶ Vgl. Tungaloy Corporation (2013), S. 639.

⁴⁷ Vgl. Debnath, Reddy & Yi, (2016).

⁴⁸ Vgl. Mehrban, Naderi, Panahizadeh & Moslemi Naeini (2008).

Die ISO 8688-1 enthält Empfehlungen für die Vorgehensweise das Standvermögen des Werkzeuges beim Stirnfräsen zu bestimmen. Um eine Gruppe gleichartiger Werkzeuge gegenüber zu stellen, ist es zweckmäßig alle Versuche mit derselben Schnittparameter-Kombination durchzuführen.⁴⁹

Die anzuwendende Schnittgeschwindigkeit für die erste Versuchsreihe wird mit $v_c=300$ m/min gewählt und der Vorschub auf $f_z=0,15$ mm festgesetzt. Die Schnitttiefe wird mit $a_p=4$ mm im oberen Bereich der von den Herstellern empfohlenen Schnitttiefe gewählt.^{50 51 52 53 54 55} Die erste Versuchsreihe wird ohne Zufuhr von Kühlschmierstoff durchgeführt.

Bei der zweiten Versuchsreihe erfolgt die Zerspanung mit einer deutlich geringeren Schnittgeschwindigkeit unter $v_c=200$ m/min mit ausgewählten Eckfrässystemen. Dies soll ein Abbild der Verschleißmechanismen bei geringeren Schnittgeschwindigkeiten ergeben. Der Vorschub und die Schnitttiefe werden hier gleich wie bei der ersten Versuchsreihe gewählt. Die zweite Versuchsreihe wird ebenfalls ohne Zufuhr von Kühlschmierstoff durchgeführt.

Die dritte Versuchsreihe dient dazu, um Vergleiche zwischen der Bearbeitung mit und ohne Kühlschmierstoff ziehen zu können. Es werden daher wiederum ausgewählte Eckfrässysteme bei jeweils gleichen Schnittbedingungen wie in Versuchsreihe 1 und Versuchsreihe 2, jedoch mit Kühlschmierstoffzufuhr getestet.

Es ist vorgesehen je einen Versuch mit den ausgewählten Eckfrässystemen pro Versuchsreihe durchzuführen.

⁴⁹ Vgl. International Organization for Standardization (Hrsg.) (1989), S. 16

⁵⁰ Vgl. Ceratizit Group (2016a), S. 450.

⁵¹ Vgl. ISCAR Germany GmbH (2011), S. 6.

⁵² Vgl. Seco Tools GmbH (2016), S. 70 ff.

⁵³ Vgl. Sandvik AB (2015), S. 153.

⁵⁴ Vgl. Tungaloy Corporation (2013), S. 637.

⁵⁵ Vgl. Ingersoll Werkzeuge GmbH (2016), S. 93.

4 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die Komponenten, die bei der Durchführung der Versuche im Einsatz sind, beschrieben und Versuchsaufbau und Versuchsablauf werden gezeigt.

4.1 Versuchswerkstück

Die vorgegebenen Abmessungen der Werkstücke betragen 400 mm x 96 mm x 200 mm. Der Werkstoff ist 42CrMo4 (Werkstoffnummer: 1.7225). Dieser Vergütungsstahl liegt in normalisiertem Zustand vor. Zu Beginn der Versuche wird die Walzhaut der Werkstücke in einem Vorbearbeitungsschritt entfernt, da auch diese Oxidschicht ein homogenes Zerspanen stört. Die Bearbeitung findet beidseitig an der 400 mm langen Werkstückseite statt.

4.2 Eckfrässysteme

Zum Zweck der besseren Vergleichbarkeit haben alle ausgewählten Eckfräser den Durchmesser $D=50\text{ mm}$ und die Zähnezahl $z=5$. Die ausgewählten Wendeschneidplatten haben alle Spanleitstufe mittel, Eckenradius $r_e=0,8\text{ mm}$, sind aus der Hartmetallsorte P30 gefertigt und somit zur Bearbeitung des Werkstoffes 42CrMo4 sehr gut geeignet.⁵⁶ Auch die PVD- und CVD-Beschichtungen sind auf den Werkstoff abgestimmt. Jedoch unterscheiden sich die Wendeschneidplatten je nach Eckfrässystem in der Anzahl der Schneiden. Die untersuchten Eckfrässysteme besitzen zwischen zwei und acht nutzbare Schneiden je Wendeschneidplatte. Dies stellt eine wichtige Komponente bei der wirtschaftlichen Betrachtung dar.

Die eingesetzten Eckfräser mit den ausgewählten Wendeschneidplatten werden nachfolgend vorgestellt.

⁵⁶ Vgl. Denkena & Tönshoff (2011), S. 176.

Ceratizit MaxiMill 491

Ausführung	A491.50.R.05-12
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	8
Wendeschneidplatten	
Ausführung	SNHU 120408SR-M50
Schneidenanzahl	8
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	CTCP230 (TiCN+Al ₂ O ₃)
PVD-Beschichtung	CTPP235 (TiAlTaN)

Tabelle 1: Spezifikationen Ceratizit MaxiMill 491⁵⁷



Abbildung 17: Ceratizit MaxiMill 491 und SNHU 120408SR-M50 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

Iscar HELIDO S890

Ausführung	S890 FSN D050-05-22-R13
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	9
Wendeschneidplatten	
Ausführung	S890 SNMU 1305PNTR
Schneidenanzahl	8
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	IC 5400 (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN)
PVD-Beschichtung	IC 830 (TiAlN+TiN)

Tabelle 2: Spezifikationen Iscar HELIDO S890⁵⁸



Abbildung 18: Iscar HELIDO S890 und S890 SNMU 1305PNTR Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁷ Vgl. Ceratizit Group (2016b), S. 30 ff.

⁵⁸ Vgl. ISCAR Germany GmbH (2011), S. 1 ff.

Seco Square 6

Ausführung	R220.96-0050-08-5A
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
$a_{p,max}$ [mm]	5,2
Wendeschneidplatten	
Ausführung	XNEX 080608TR-M13
Schneidenanzahl	6
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	MP2500 (TiCN+Al ₂ O ₃)
PVD-Beschichtung	F40M (TiAlN+TiN)

Tabelle 3: Spezifikationen Seco Square 6⁵⁹

Abbildung 19: Seco Square 6 und XNEX 80608TR-M13 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

Ceratzit MaxiMill 211

Ausführung	A211.50.R05-11
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
$a_{p,max}$ [mm]	10
Wendeschneidplatten	
Ausführung	XDKT 11T308SR-M50
Schneidenanzahl	2
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	CTCP230 (TiCN+Al ₂ O ₃)
PVD-Beschichtung	CTPP235 (TiAlTaN)

Tabelle 4: Spezifikationen Ceratzit MaxiMill 211⁶⁰

Abbildung 20: Ceratzit MaxiMill 211 und XDKT 11T308SR-M50 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁹ Vgl. Seco Tools GmbH (2016), S. 12 ff.⁶⁰ Vgl. Ceratzit Group (2016a), S. 339 ff.

Sandvik CoroMill 390

Ausführung	R390-050Q22-11M
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	10
Wendeschneidplatten	
Ausführung	R390-11 T3 08M-PM
Schneidenanzahl	2
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	4230 (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN)
PVD-Beschichtung	1030 (TiAlN)

Tabelle 5: Spezifikationen Sandvik CoroMill 390⁶¹



Abbildung 21: Sandvik CoroMill 390 und R390-11 T3 08M-PM Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

Tungaloy TPW13

Ausführung	TPW13R050M22.0E05
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	10
Wendeschneidplatten	
Ausführung	SWMT1304PDPR-MJ
Schneidenanzahl	4
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	T3130 (TiCN+Al ₂ O ₃)
PVD-Beschichtung	AH120 (TiAlN)

Tabelle 6: Spezifikationen Tungaloy TPW13⁶²



Abbildung 22: Tungaloy TPW13 und SWMT1304PDPR-MJ Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

⁶¹ Vgl. Sandvik AB (2015), S. 140 ff.

⁶² Vgl. Tungaloy Corporation (2013), S. 25 ff.

Tungaloy TPM11

Ausführung	TPM11R050M22.0E05
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	9,7
Wendeschneidplatten	
Ausführung	LMMU110708PNER-MJ
Schneidenanzahl	4
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	T3130 (TiCN+Al ₂ O ₃)
PVD-Beschichtung	AH725 (TiAlN)

Tabelle 7: Spezifikationen Tungaloy TPM11⁶³



Abbildung 23: Tungaloy TPM11 und LMMU110708PNER-MJ Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.

Ingersoll Gold-Max 8

Ausführung	VJ6K050R00
Durchmesser [mm]	50
Zähnezahl	5
a_{p,max} [mm]	8,7
Wendeschneidplatten	
Ausführung	SGM-44R001
Schneidenanzahl	8
Eckenradius [mm]	0,8
CVD-Beschichtung	-
PVD-Beschichtung	IN4030 (TiAlN+ Al ₂ O ₃)

Tabelle 8: Spezifikationen Ingersoll Gold-Max 8⁶⁴



Abbildung 24: Ingersoll Gold-Max 8 und SGM-44R001 Wendeschneidplatte, Quelle: Eigene Darstellung.

⁶³ Vgl. Tungaloy Corporation (2013), S. 25 ff.

⁶⁴ Vgl. Ingersoll Werkzeuge GmbH (2016), S. 14 ff.

4.3 Fräseingriff

Durch den geplanten Eingriff von 70% des Fräserdurchmessers kommt es zur Ausbildung eines Gegen- und Gleichlaufgebietes während des Fräseingriffs (siehe Abbildung 25). Es wird darauf geachtet, dass das Gleichlaufgebiet überwiegt.

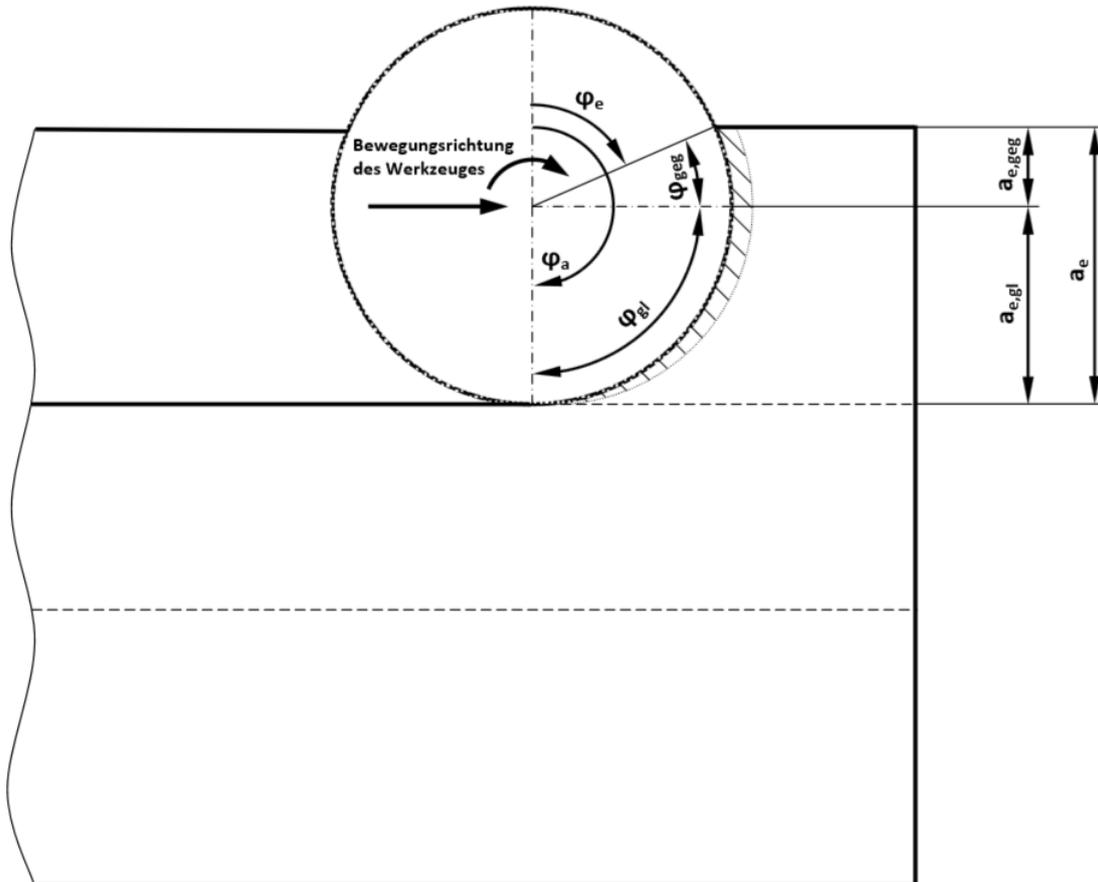


Abbildung 25: Fräseingriff, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Eingriff besteht somit aus 20,76% Gegenlaufgebiet und 79,24% Gleichlaufgebiet. Hierbei tritt der Fräser schlagartig in das Werkstück ein und tritt mit einer Spannungsdicke $h=0$ mm aus. Die Spannungsdicke über den Schnittbogenwinkel ist in Abbildung 26 aufgetragen.

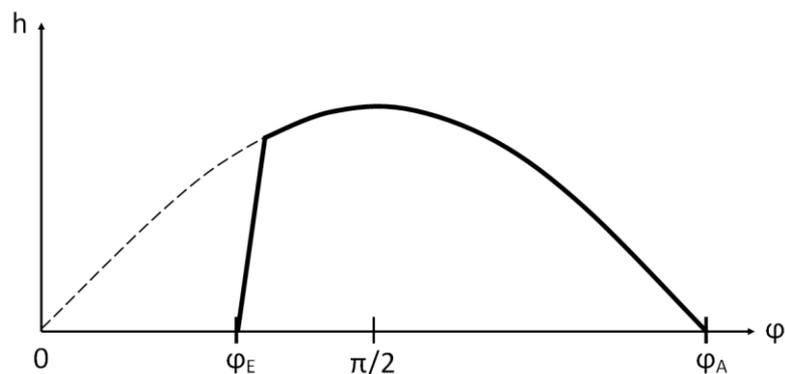


Abbildung 26: Spannungsdicke über den Schnittbogenwinkel, Quelle: In Anlehnung an Paucksch et al., 2008, S. 215.

Durch die gegebene Eingriffsbreite kommt es, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, zu guten Verhältnissen beim Fräseingriff. Durch den korrekten Fräseingriff sollen Schädigungen der Wendeschneidplatten beim Fräseingriff und austritt ausgeschlossen werden.

4.4 Benötigte Antriebsleistung der Arbeitsspindel

Zur Auswahl der Werkzeugmaschine für die Versuche muss die Antriebsleistung der Arbeitsspindel errechnet werden. Für die Berechnung werden die Geometriedaten⁶⁵ des Eckfrässystems Ceratizit MaxiMill 491 (A491.50.R.05-12) mit den Wendeschneidplatten SNHU 120408SR-M50 herangezogen. Die in Kapitel 3.3 ausgewählten Schnittparameter der ersten Versuchsreihe werden für die Berechnung verwendet.

Die Berechnung der mittleren Schnittkraft erfolgt laut Literatur:⁶⁶

Schnittparameter	v_c	300 m/min = 5 m/s
	f_z	0,15 mm
	a_p	4 mm
	a_e	35 mm
	$a_{e,geg}$	10 mm
	$a_{e,gl}$	25 mm
Werkzeugparameter	D	50 mm
	z	5
	γ	25°
	κ_r	90°
Werkstoffparameter	Werkstoff	42CrMo4
	$k_{c1.1}$	1550 N/mm ²
	Anstiegswert 1-z	0,8
	γ_0	8°

⁶⁵ Vgl. Ceratizit Group (2016b), S. 40 f.

⁶⁶ Vgl. Perovic (2013), S. 36 ff.

Korrekturfaktoren	K_v	0,93
	K_{sch}	1
	K_t	1,4

Tabelle 9: Parameter zur Schnittkraftberechnung bei $v_c=300$ m/min

Zur Berechnung der mittleren Schnittkraft F_c ist die Berechnung der Anzahl der Zähne im Eingriff über den Schnittbogenwinkel, die mittlere Spandicke, die Spanbreite und die Spanwinkelkorrektur erforderlich.

Schnittbogenwinkel

$$\varphi_{gl} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot a_{egl}}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{2 \cdot 25}{50}\right) = 90^\circ \quad 4-1$$

$$\varphi_{geg} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot a_{geg}}{D}\right) = \arcsin\left(\frac{2 \cdot 10}{50}\right) = 23,578^\circ \quad 4-2$$

$$\varphi = \varphi_{gl} + \varphi_{geg} = 90 + 23,578 = 113,578^\circ \quad 4-3$$

Zähne im Eingriff

$$z_{ie} = \frac{\varphi}{360} \cdot z = \frac{113,578}{360} \cdot 5 = 1,577 \quad 4-4$$

Mittlere Spandicke

$$h_m = \frac{360}{\pi \cdot \varphi} \cdot f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{a_e}{D} = \frac{360}{\pi \cdot 113,578} \cdot 0,15 \cdot \sin(90) \cdot \frac{35}{50} = 0,106 \text{ mm} \quad 4-5$$

Spanbreite

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} = \frac{4}{\sin(90)} = 4 \text{ mm} \quad 4-6$$

Spanwinkelkorrektur

$$K_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_0}{66,7} = 1 - \frac{25 - 8}{66,7} = 0,745 \quad 4-7$$

Mittlere Schnittkraft

$$F_c = z_{ie} \cdot b \cdot h_m^{1-z} \cdot k_{c1.1} \cdot K_\gamma \cdot K_v \cdot K_{sch} \cdot K_t \quad 4-8$$

$$F_c = 1,577 \cdot 4 \cdot 0,106^{0,8} \cdot 1550 \cdot 0,745 \cdot 0,93 \cdot 1 \cdot 1,4$$

$$F_c = 1574,828 \text{ N}$$

Mit der mittleren Schnittkraft lassen sich nun die Schnittleistung und die erforderliche Antriebsleistung berechnen. Der Wirkungsgrad der Maschine wird mit $\eta=0,7$ gewählt.⁶⁷

Schnittleistung

$$P_c = F_c * v_c = 1574,828 * 5 = 7874,142 \text{ W} \quad 4-9$$

Antriebsleistung

$$P_A = \frac{P_c}{\eta} = \frac{7874,142}{0,7} = 11248,775 \text{ W} \quad 4-10$$

Über die Drehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit kann weiter das Zeitspanvolumen berechnet werden.⁶⁸

Drehzahl

$$n = \frac{v_c * 10^3}{D * \pi} = \frac{300 * 10^3}{50 * \pi} = 1909,859 \frac{U}{min} \quad 4-11$$

Vorschubgeschwindigkeit

$$v_f = f_z * z * n = 0,15 * 5 * 1909,859 = 1432,394 \frac{mm}{min} \quad 4-12$$

Zeitspanvolumen

$$Q = \frac{a_e * a_p * v_f}{10^3} = \frac{35 * 4 * 1432,394}{10^3} = 200,535 \frac{cm^3}{min} \quad 4-13$$

Für den Fall, dass auch Versuche mit höheren Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt werden, wird die Berechnung für $v_c=400 \text{ m/min}=6,667 \text{ m/s}$ wiederholt. Verändert wird nur die Schnittgeschwindigkeit. Bis auf den Faktor $K_v=0,91$ bleiben somit alle anderen Parameter unverändert.

Mittlere Schnittkraft

$$F_c = z_{ie} * b * h_m^{1-z} * k_{c1.1} * K_\gamma * K_v * K_{sch} * K_t \quad 4-14$$

$$F_c = 1,577 * 4 * 0,106^{0,8} * 1550 * 0,745 * 0,91 * 1 * 1,4$$

$$F_c = 1540,961 \text{ N}$$

⁶⁷ Vgl. Schönherr (2002), S. 23.

⁶⁸ Vgl. Ceratizit Group (2016a), S. 571.

Schnittleistung

$$P_c = F_c * v_c = 1540,961 * 6,667 = 10273,075 \text{ W} \quad 4-15$$

Antriebsleistung

$$P_A = \frac{P_c}{\eta} = \frac{10273,075}{0,7} = 14675,821 \text{ W} \quad 4-16$$

Drehzahl

$$n = \frac{v_c * 10^3}{D * \pi} = \frac{400 * 10^3}{50 * \pi} = 2546,479 \frac{\text{U}}{\text{min}} \quad 4-17$$

Vorschubgeschwindigkeit

$$v_f = f_z * z * n = 0,15 * 5 * 2546,479 = 1909,859 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad 4-18$$

Zeitspanvolumen

$$Q = \frac{a_e * a_p * v_f}{10^3} = \frac{35 * 4 * 1909,859}{10^3} = 267,380 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad 4-19$$

4.5 Versuchsaufbau

Bei der für die Versuche verwendeten Werkzeugmaschine handelt es sich um eine 5-Achs-Fräsmaschine der Firma Hermle vom Typ C 50 U. Die Spindelleistung beträgt 35 kW bei 20 % Einschaltdauer und das maximale Drehmoment erreicht dabei 215 Nm.⁶⁹

In der folgenden Abbildung 27 wird der Versuchsaufbau der Fräsversuche gezeigt. Auf den Einfluss und in weiterer Folge auf die Minimierung von Störgrößen wird besonderes Augenmerk gelegt. Wie beschrieben wird auf die Werkstückhomogenität und auf den Ein- und Austritt der Schneiden geachtet. Besonders wichtig sind die stabile Spannung des Werkstückes und die Gesamtsteifigkeit der Werkzeugmaschine um das Werkzeug stabil zu führen und um Schwingungen und Vibrationen, die das Werkzeug schädigen können, zu vermeiden. Um eine stabile Spannung des Werkstückes zu gewährleisten, wird das Werkstück in zwei Schraubstöcken gespannt. Die Einspanntiefe beträgt 40 mm. Die nutzbare Werkstückhöhe beträgt aufgrund der Werkstückeinspannung 160 mm.

⁶⁹ Berthold Hermle AG (o.J.).



Abbildung 27: Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.

4.6 Versuchsablauf

Durch die festgelegte Schnitttiefe $a_p=4\text{ mm}$ je Schnitt, sind insgesamt 80 Schnitte pro Werkstück möglich, d.h. 40 Schnitte je Seite. Mit der Werkstücklänge von 400 mm ergibt sich so eine Fräslänge von 32 m je Werkstück. Die Verschleißmessungen finden nach 10 Schnitten je Werkstückseite, also nach gesamt 20 Schnitten (8 m Fräslänge) statt. Nach 10 Schnitten je Seite muss der verbliebene Steg in der Mitte des Werkstückes (siehe Abbildung 28) entfernt werden, da die Zustellung durch die Werkzeugaufnahme auf 56 mm limitiert ist. Mögliche auftretende Schwingungen auf Grund eines verbleibenden zu hohen Stegs werden vermieden.

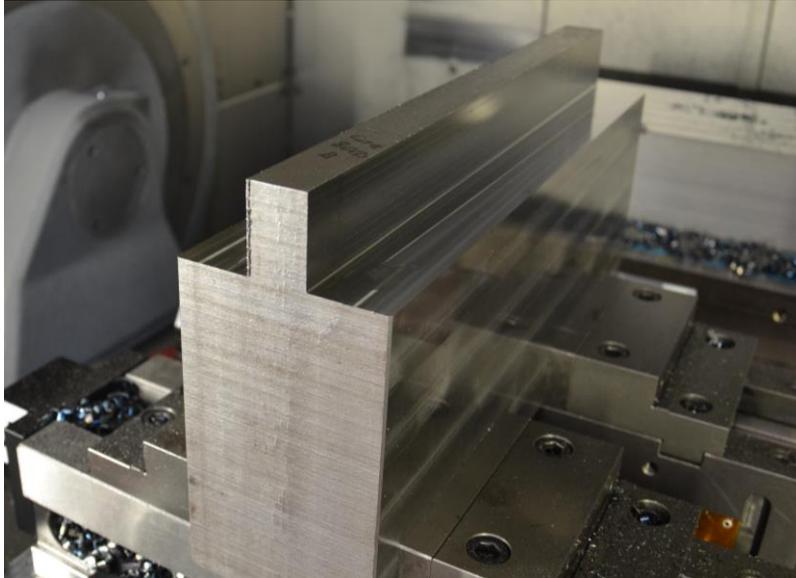


Abbildung 28: Werkstück mit verbliebenem Steg nach 10 Schnitten je Seite, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Rauheitsmessung an den Stirnflächen des Werkstückes wie in Abbildung 29 gezeigt, erfolgt alle 10 Schnitte (4 m Fräslänge).

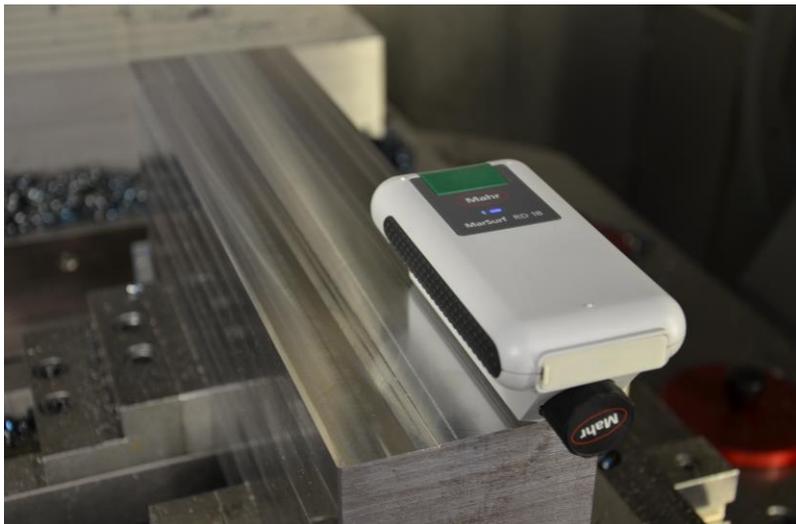


Abbildung 29: Oberflächenmessung an der erzeugten Stirnfläche nach Entfernung des Stegs, Quelle: Eigene Darstellung.

Dabei kommt das Messgerät MahrSurf M300 mit Vorschubgerät RD18 von der Firma Mahr zum Einsatz. Dieses weist einen Messbereich bis $350\ \mu\text{m}$ auf und die Taststrecke beträgt gemäß DIN EN ISO 4288 $5,6\ \text{mm}$.⁷⁰ Eine Oberflächenmessung der Schulterfläche kann aufgrund der Platzverhältnisse nicht durchgeführt werden. Die Bewertung der Schulterfläche erfolgt rein optisch. Zusätzlich werden Späne entnommen und zur Auswertung herangezogen. Bei den Fräsversuchen ohne Einsatz von Kühlschmierstoff werden alle Eckfrässysteme mit den ausgewählten Schnittparametern der ersten Versuchsreihe mit

⁷⁰ Mahr GmbH (o.J.).

$v_c=300$ m/min (siehe Kapitel 3.3) getestet. Sollte eine Zerspanung mit einzelnen Eckfrässystemen unter den ausgewählten Bedingungen nicht möglich sein, so können die Schnittparameter angepasst werden. An der zweiten Versuchsreihe mit reduzierter Schnittgeschwindigkeit $v_c=190$ m/min und ohne den Einsatz von Kühlschmierstoff nehmen nur die ausgewählten Systeme Ceratizit MaxiMill 491 und Tungaloy TPW13, jeweils mit CVD- und PVD-beschichteten Wendeschneidplatten, teil.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden in der dritten Versuchsreihe die Auswirkungen des Einsatzes von Kühlschmierstoff betrachtet. Dazu werden vier ausgewählte Eckfrässysteme (Ceratizit MaxiMill 491, Seco Square 6, Ceratizit MaxiMill 211, Tungaloy TPW13) bei gleichen Schnittbedingungen wie in Versuchsreihe 1 und zwei ausgewählte Eckfrässysteme (Ceratizit MaxiMill 491, Tungaloy TPW13) bei gleichen Schnittbedingungen wie in Versuchsreihe 2 jedoch jeweils mit Kühlschmierstoffzufuhr getestet. Zum Einsatz kommen bei den genannten Eckfräsern wiederum die CVD- und die PVD-beschichteten Wendeschneidplatten. Das Ziel ist es, Vergleiche zwischen der Bearbeitung mit und ohne Kühlschmierstoff zu ziehen. Der KSS wird durch die im Werkzeug liegende KSS-Zufuhr eingebracht. Es handelt sich um einen wassermischbaren KSS mit einem Ölgehalt von 3%. Der KSS-Druck beträgt 25 bar.

4.7 Verschleißmessung

Die Verschleißmessung erfolgt optisch durch einen Alicona IF EdgeMaster. Dieser bildet ein 3-D-Modell und daraus abgeleitet eine 2-D-Darstellung der gemessenen Schneidenecke oder Schneidkante ab. Das 3-D-Modell besitzt die Abmessung von jeweils 2 mm in x-, y- und z-Richtung. Somit besitzen alle 2-D-Verschleißdarstellungen in Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 die Abmessung 2 mm x 2 mm. Das vermessene Objekt wird mit 10-facher Vergrößerung dargestellt und die vertikale Auflösung beträgt 100 nm.⁷¹

⁷¹ Alicona Imaging GmbH (o.J.).

5 Ergebnisse der Fräsversuche

Das Verhalten jedes Eckfrässystems bei den Versuchen wird in diesem Kapitel einzeln dargestellt. Die Verschleißformen und auftretenden Veränderungen während der Lebensdauer werden beschrieben. Die Fräslänge entspricht dem Standweg und wird als Standgröße herangezogen. Weiter wird die erzeugte Werkstückschulter und die Spanform beurteilt. Alle durchgeführten Fräsversuche mit der Angabe des jeweils erreichten Standweges befinden tabellarisch dargestellt in Anhang A.

5.1 Versuche ohne Kühlschmierstoff

Nachfolgend werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.2 vorgestellten Eckfrässysteme gezeigt. Es werden je Eckfräser zuerst die Ergebnisse der CVD-beschichteten und danach die Resultate der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten erläutert. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche der Versuchsreihe 1 und der Versuchsreihe 2 werden ohne den Einsatz von Kühlschmierstoff durchgeführt.

5.1.1 Ceratizit MaxiMill 491

5.1.1.1 CVD-Beschichtung

Versuch mit $v_c = 300 \text{ m/min}$: Der Verschleiß an der schultererzeugenden Schneidkante tritt in Form von Schneidkantenabrundung auf, sprich Spanflächen- und Freiflächenverschleiß setzen gleichzeitig ein. Des Weiteren zeichnet sich, wie in Abbildung 30 ersichtlich, leichte Kammrissbildung ab. An der stirnflächenerzeugenden Schneidkante kommt es zur Ausbildung einer Kerbe in Eckennähe (siehe Abbildung 31) ab 32m Fräslänge. Ab diesem Zeitpunkt treten die Kammrisse und die Schneidkantenabrundung an der schultererzeugenden Schneidkante deutlich auf. Im Neuzustand weist die Schneidkante einen Kantenradius von $60 \mu\text{m}$ auf, nach 40m Fräslänge beträgt der Kantenradius $105 \mu\text{m}$. Auf Grund des Kerbverschleißes und der einhergehenden Veränderung des Funkenfluges ist das Standzeitende nach einer Fräslänge von 40m erreicht. Deutlich zu beobachten ist die progressive Zunahme des Verschleißes wie in Abbildung 32 dargestellt.

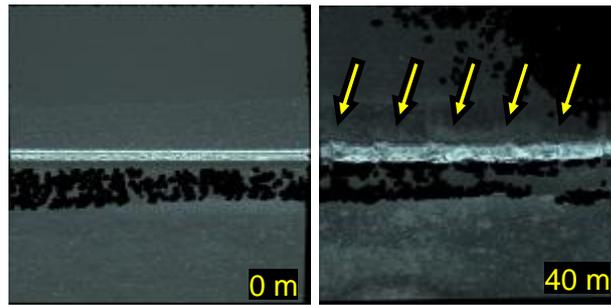


Abbildung 30: Schulterzeugende Schneidkante links im Neuzustand und rechts nach 40 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

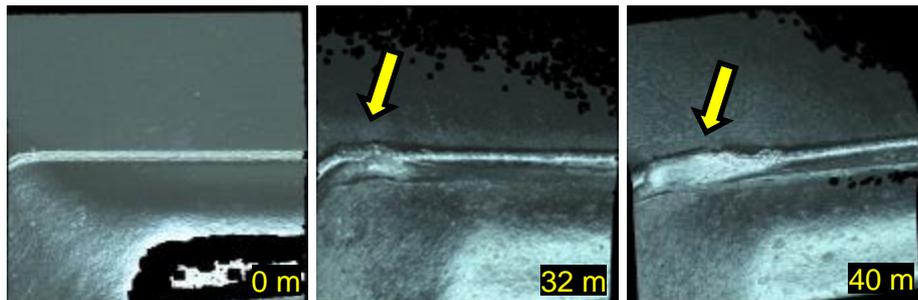


Abbildung 31: Stirnflächenerzeugende Schneidkante links im Neuzustand, in der Mitte nach 32 m Fräslänge und rechts nach 40 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

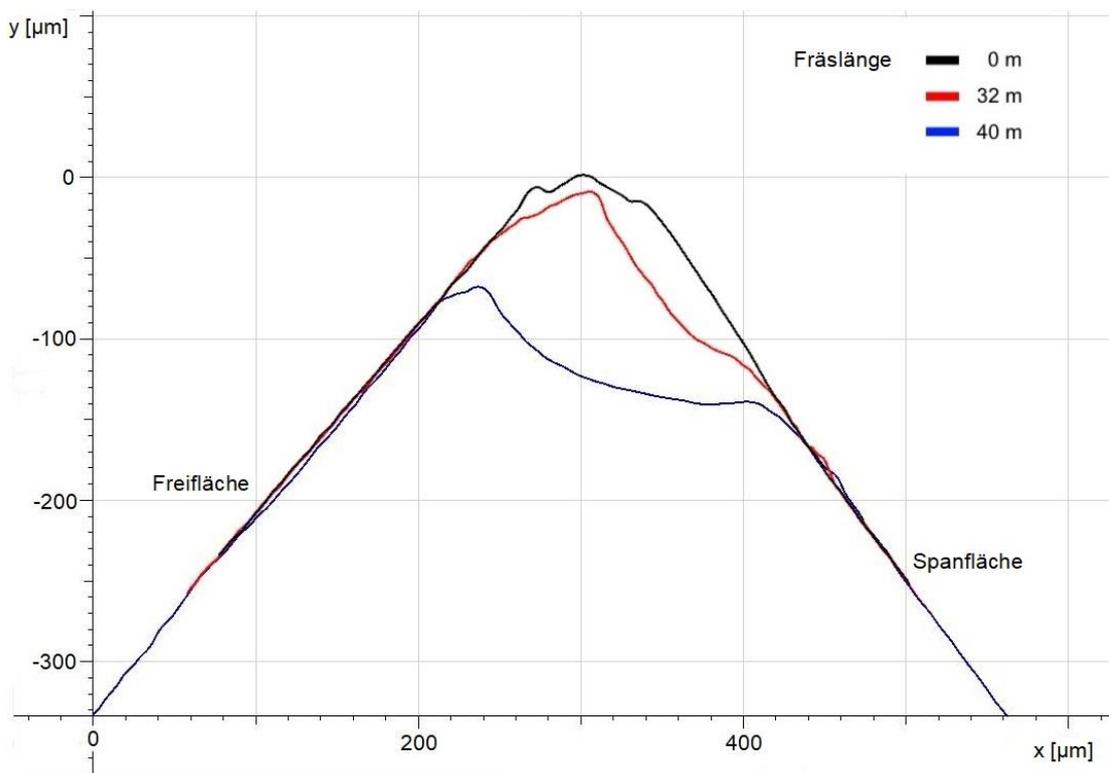


Abbildung 32: Kontur der stirnflächenerzeugenden Schneidkante mit Fortschritt der Kerbenbildung über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Beim Versuch der zweiten Versuchsreihe mit reduzierter Schnittgeschwindigkeit $v_c = 190 \text{ m/min}$ ist nach einer Fräslänge von 32 m kein messbarer Verschleiß vorhanden und der Versuch wird aufgrund der begrenzten Werkstückverfügbarkeit abgebrochen. Eine

Vorhersage der verbleibenden Standzeit ist aufgrund des nicht Vorhandenseins eines Verschleißfortschrittes nicht möglich. Aufgrund der guten Ergebnisse bei $v_c=300\text{ m/min}$ werden bei diesem Eckfrässystem noch zwei Versuche mit $v_c=350\text{ m/min}$ und mit $v_c=400\text{ m/min}$ durchgeführt. Beim Versuch mit $v_c=350\text{ m/min}$ brechen nach 2m Fräslänge zwei schulterzeugende Schneidkanten beim Austritt aus dem Werkstück aus. Beim Versuch mit $v_c=400\text{ m/min}$ wird die Vorschubgeschwindigkeit bei Ein- und Austritt um 50% reduziert. Nach 4m Fräslänge ist noch kein Verschleiß feststellbar. Der Versuch wird hier abgebrochen, da nur von Interesse ist, ob das System bei dieser Schnittgeschwindigkeit noch funktioniert. Die Spanabfuhr dieses Eckfrässystems funktioniert bei allen Schnittgeschwindigkeiten problemlos. In Abbildung 33 zeigt der Grundkörper nach den Versuchen keine Verschleißspuren.



Abbildung 33: Verschleiß am Grundkörper, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erzeugte Schulter hat eine glatte, glänzende Oberfläche und ist frei von mikroverschweißten Spänen. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.

Die Spanformen gleichen einander unabhängig von der gewählten Schnittgeschwindigkeit. In Abbildung 34 sind drei Späne dargestellt, die bei $v_c=300\text{ m/min}$ erzeugt wurden.



Abbildung 34: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit SNHU 120408SR-M50 (CTCP230) bei $v_c=300\text{ m/min}$ und $a_e=35\text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.1.2 PVD-Beschichtung

Bei der ersten Messung mit $v_c=300\text{ m/min}$ zeigen sich nach 8 m Fräslänge leichte Schneidkantenabrundung, geringer Eckenverschleiß und kleine Endkerben an der schultererzeugenden Schneidkante. Nach 13,6 m Fräslänge ist das Standzeitende erreicht. Es kommt zum Ausbruch der Ecken aller fünf Schneiden bei diesem Schnitt. Die Wiederholung des Versuches zeigt die gleichen Verschleißformen mit einem ähnlichen Standzeitende nach 12 m, hervorgerufen durch Eckenausbrüche an drei Schneiden. Eine Absenkung der Schnittgeschwindigkeit auf 250 m/min bewirkt ein Ausbleiben sämtlicher zuvor festgestellter Verschleißformen. Nach 24 m Fräslänge wird der Versuch beendet. Ein Verschleiß ist bei $v_c=250\text{ m/min}$ nicht feststellbar. Bei Wiederholung des Versuches kommt es jedoch bereits beim ersten Schnitt des Werkzeuges zu einer Beschädigung einer Schneidenecke. Dies führt zum Ausbruch von drei Schneidenecken nach 6,4 m Fräslänge und zum Ausbruch der verbleibenden zwei Schneiden nach insgesamt 7,2 m Fräslänge. Eine weitere Wiederholung zeigt wiederum keinen feststellbaren Verschleiß und der Versuch wird nach 8 m beendet. Eine Rücknahme der Eingriffsbreite von $a_e=35\text{ mm}$ (70% des Fräserdurchmessers) auf $a_e=20\text{ mm}$ (40% des Fräserdurchmessers) und $v_c=300\text{ m/min}$ bringt ein Standzeitende nach 16 m. Hierbei kommt es zum Ausbruch an einer schultererzeugenden Schneidkante. Alle anderen Schneiden zeigen keinen Verschleiß. Eine geringere Eingriffsbreite verändert die Verschleißmechanismen somit nicht. Beim Versuch mit $v_c=190\text{ m/min}$ ist nach einer Fräslänge von 32 m kein messbarer Verschleiß vorhanden. Hierbei ist anzumerken, dass alle Ausbrüche nicht bei Ein- und Austritt auftreten, sondern während der Bearbeitung. Es treten somit ab einer Schnittgeschwindigkeit im Bereich von 190 m/min bis 250 m/min plötzliche Ausbrüche der Schneidkanten auf. Die Spanabfuhr funktioniert bei jeder Schnittgeschwindigkeit problemlos, Abbildung 35 zeigt die Spanform. Die erzeugte Schulter hat eine glatte, glänzende Oberfläche und ist frei von mikroverschweißten Spänen. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.



Abbildung 35: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit SNHU 120408SR-M50 (CTPP235) bei $v_c=300\text{ m/min}$ und $a_e=35\text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.2 Iscar HELIDO S890

5.1.2.1 CVD-Beschichtung

Das Eckfrässystem hat einen Einstellwinkel von 88° wie in Abbildung 36 zu erkennen. Hauptanwendungsgebiet ist das Stirnfräsen. Jedoch ist die Schulterbearbeitung laut Produktinformation⁷² möglich.

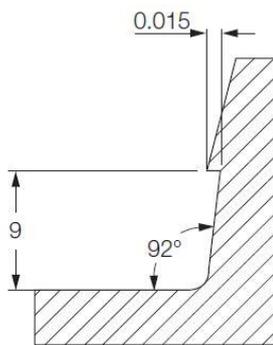


Abbildung 36: Von Iscar HELIDO S890 erzeugte Schulterform, Quelle: ISCAR Germany GmbH, 2011, S. 4



Abbildung 37: Ausbruch der Schneidkante nach 6,8 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach 6,8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min kommt es jedoch an der Freifläche der schultererzeugenden Schneidkante einer Schneide zum Ausbruch (siehe Abbildung 37). Bei allen anderen Wendeschneidplatten ist der beginnende Verschleiß messbar, der zum Ausbruch führt. Optisch ist ebenfalls erkennbar, dass die gesamte Länge der Schneidkante im Eingriff ist und dadurch der Freiflächenverschleiß hervorgerufen wird. Bei der Spanform ist in Abbildung 38 der Kontakt mit der bereits erzeugten Schulter deutlich erkennbar.



Abbildung 38: Späne Iscar HELIDO S890 mit S890 SNMU 1305PNTR (IC 5400) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.2.2 PVD-Beschichtung

Aufgrund der Erkenntnisse mit den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten werden keine Versuche mit den PVD-beschichteten Wendeschneidplatten durchgeführt.

⁷² ISCAR Germany GmbH (2011).

5.1.3 Seco Square 6

5.1.3.1 CVD-Beschichtung

Der Versuch mit $v_c=300\text{ m/min}$ muss nach 1,2m Fräslänge abgebrochen werden. Ab dem dritten Schnitt funktioniert die Spanabfuhr des Systems nicht mehr. Die Späne verklemmen sich zwischen Werkstückschulter und Fräsergrundkörper. Die Folge davon sind in den Fräsergrundkörper eingeklemmte und auf die Schulter verschweißte Späne, die in weiterer Folge den Fräser von der bereits erzeugten Schulter wegdrücken. Dadurch wird auch das Schnittbild der hergestellten Stirnfläche beeinflusst. Die Werkstückschulter und Werkstückstirnfläche und der deutliche Verschleiß auf dem Fräsergrundkörper sind in Abbildung 39 zu erkennen. Eine Schnittgeschwindigkeitsreduktion auf 250 m/min und 220 m/min bringt keine Veränderung dieses Verhaltens.

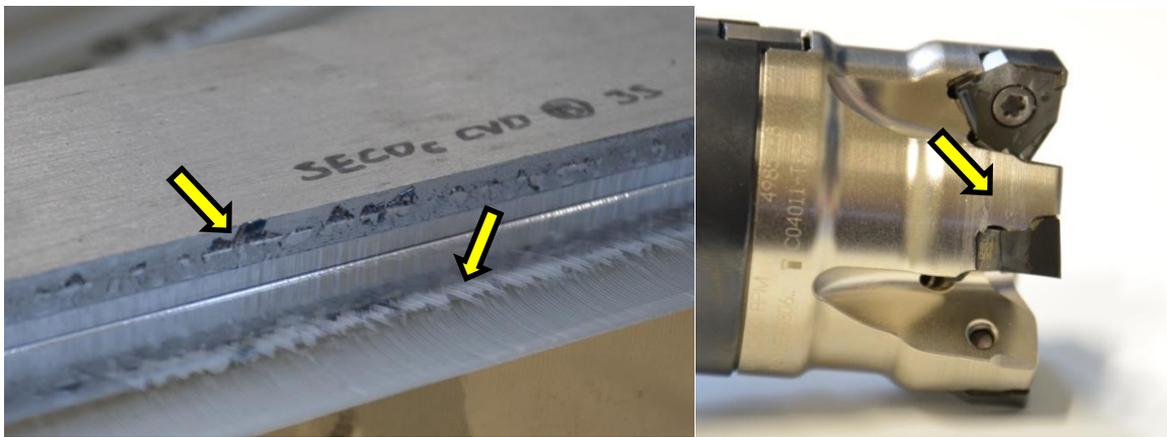


Abbildung 39: Im linken Bild die erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und die hergestellte Stirnfläche und im rechten Bild der Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.

Der erste Span von links in der Abbildung 40 zeigt einen Span der ersten beiden Schnitte bei denen die Spanabfuhr durch das Fehlen der Werkstückschulterfläche noch funktioniert. Bei den restlichen drei Spänen ist ein Knicken und Abbrechen durch die Klemmung zwischen Werkzeug und Werkstückschulter beim dritten Schnitt erkennbar.



Abbildung 40: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (MP2500) bei $v_c=300\text{ m/min}$ und $a_e=35\text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Da eine Schnittgeschwindigkeitsreduktion keine Abhilfe schafft, wird die Eingriffsbreite des Eckfräasers zurückgenommen, um die Länge des Spans zu reduzieren (siehe Abbildung 41).



Abbildung 41: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (MP2500) bei $v_c=300\text{ m/min}$ und $a_e=27,5\text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr dieses Systems funktioniert bis $a_e=27,5\text{ mm}$, was 55% des Fräserdurchmessers entspricht. Mit dieser Eingriffsbreite und $v_c=300\text{ m/min}$ ist bis zu 32 m Fräslänge zuerst ein nahezu linearer und danach progressiver Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke zu beobachten (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43). Die Beschichtung verschleißt und das Substrat wird freigelegt. Ab 40 m Fräslänge ist weiter eine beginnende Kammrissbildung an der schultererzeugenden Schneidkante zu beobachten. Das Standzeitende wird nach 56 m Fräslänge durch den Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke ($VB=440\text{ }\mu\text{m}$) hervorgerufen.

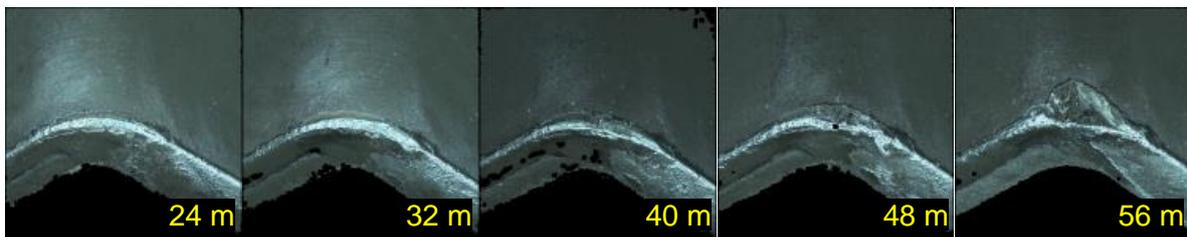


Abbildung 42: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke von links nach rechts nach 24, 32, 40, 48, 56 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

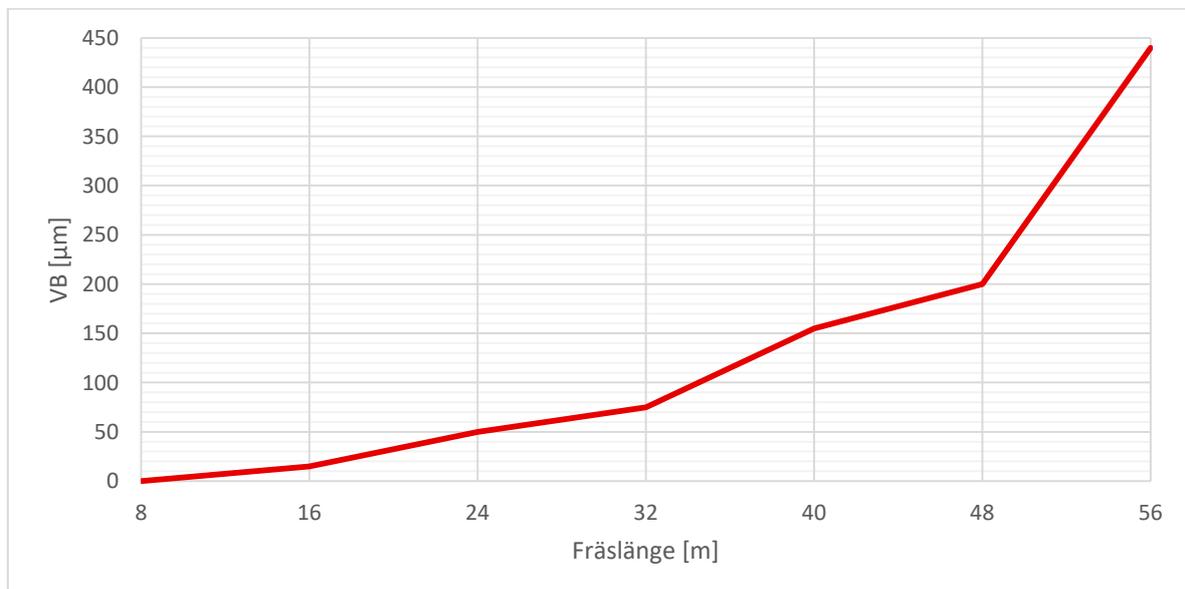


Abbildung 43: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Hierbei funktioniert die Spanabfuhr und der Grundkörper zeigt keine weiteren Verschleißspuren. Die erzeugte Schulter hat eine saubere Oberfläche und ist frei von verschweißten Spänen. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.

5.1.3.2 PVD-Beschichtung

Aufgrund der Erkenntnisse mit den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten werden auch hier die Versuche mit einer Eingriffsbreite von $a_e = 27,5 \text{ mm}$ und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 300 \text{ m/min}$ durchgeführt.

Der Verschleiß ist deutlich höher als bei den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten. So sind bereits bei der ersten Messung nach 8 m Fräslänge deutliche Kammrissbildung zu erkennen. Das Standzeitende ist nach 14,8 m durch Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke (VB = 400 μm) und Kammrissbildung erreicht (siehe Abbildung 44).

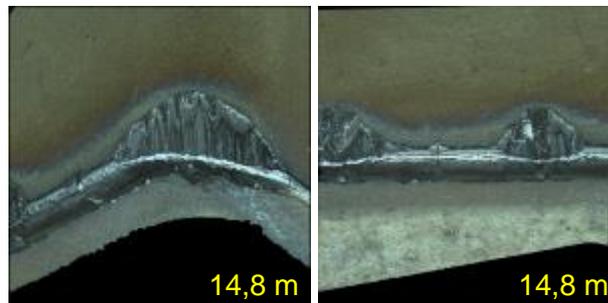


Abbildung 44: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke und Kammrissbildung nach 14,8 m Fräslänge im Detail, Quelle: Eigene Darstellung.

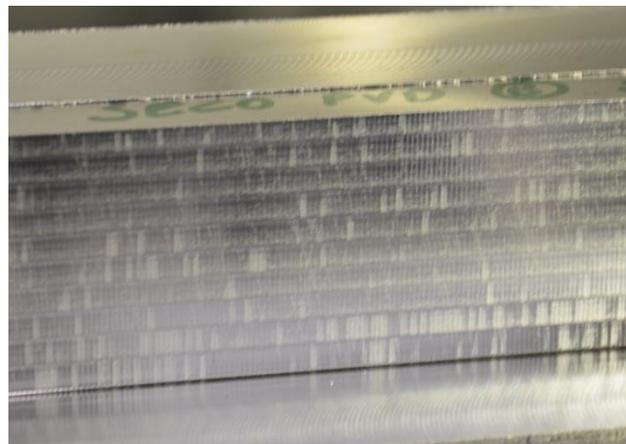


Abbildung 45: Erzeugte Schulterfläche, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erzeugte Schulter hat, wie in Abbildung 45 ersichtlich, eine Oberfläche, die durch sich zufällig wiederholende Spanklemmungen gekennzeichnet ist und somit einige raue Stellen aufweist. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt. Die erzeugten Späne zeigt Abbildung 46.



Abbildung 46: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (F40M) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=27,5\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.4 Ceratizit MaxiMill 211

5.1.4.1 CVD-Beschichtung

Beim Versuch mit $v_c=300\text{m/min}$ ist die Ausbildung einer Endkerbe an allen Schneiden zu beobachten. Nach 40m Fräslänge ist das Standzeitende durch die Endkerben mit $VB=400\mu\text{m}$ an den schultererzeugenden Schneidkanten erreicht (siehe Abbildung 47).

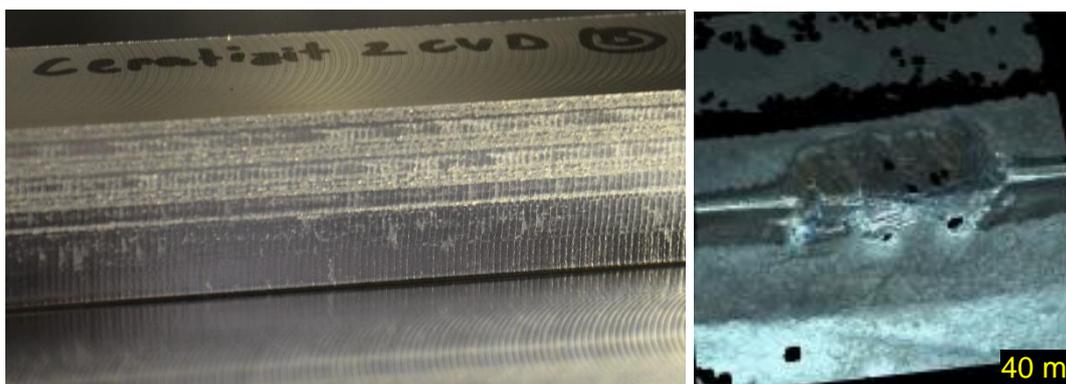


Abbildung 47: Erzeugte Schulter im linken Bild und Endkerbe an schultererzeugender Schneidkante nach 40m Fräslänge im rechten Bild, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr funktioniert sehr gut. Die erzeugte Schulter besitzt einerseits eine glatte, glänzende Oberfläche. Jedoch ist 70% der Oberfläche gekennzeichnet durch raue, matte Bereiche (siehe Abbildung 47). Diese Oberfläche tritt auch beim Versuch mit Schnittgeschwindigkeit $v_c=250\text{m/min}$ auf. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt. Die Spanform entspricht wie in Abbildung 48 dargestellt einem Spiralwendelspan.



Abbildung 48: Späne Ceratizit MaxiMill 211 mit XDKT 11T308SR-M50 (CTCP230) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=35\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.4.2 PVD-Beschichtung

Nach 24m Fräslänge bei $v_c=300\text{m/min}$ ist das Standzeitende erreicht. Es brechen drei Schneidenecken aus. Bis zum Ausbruch der Schneidenecken ist der Verschleiß als geringe Schneidkantenabrundung ausgeprägt. Es gibt keine Anzeichen, die auf einen bevorstehenden Ausbruch hinweisen. Bei der Wiederholung des Versuches ist das Standzeitende bereits nach 8m durch Ausbruch von zwei Schneidenecken erreicht. Eine weitere Wiederholung mit reduzierter Schnittgeschwindigkeit $v_c=250\text{m/min}$ bringt ebenfalls ein Standzeitende nach 8m Fräslänge. Wiederum bricht eine Schneidkante aus. Diese Beschichtung ist unter diesen Schnittbedingungen somit sehr anfällig für Schneidenausbrüche. Der Grundkörper zeigt nach den Versuchen leichte Verschleißspuren (siehe Abbildung 49).

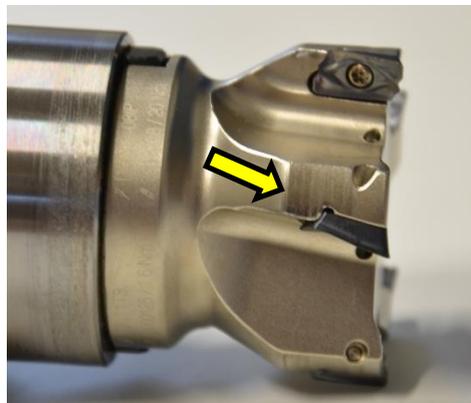


Abbildung 49: Verschleiß am Grundkörper, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr funktioniert gut. Die erzeugte Schulter hat jedoch sowohl bei $v_c=250\text{m/min}$ als auch bei $v_c=300\text{m/min}$ eine durchgehende raue, matte Oberfläche. Die Spanform ist in Abbildung 50 zu sehen. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.



Abbildung 50: Späne Ceratizit MaxiMill 211 mit XDKT 11T308SR-M50 (CTPP230) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=35\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.5 Sandvik CoroMill 390

5.1.5.1 CVD-Beschichtung

Nach 2m Fräslänge wird der Versuch mit der Schnittgeschwindigkeit $v_c=300\text{m/min}$ abgebrochen. Die Spanabfuhr funktioniert ab dem dritten Schnitt nicht mehr. Es zeigt sich eine Einklemmung von Spänen zwischen der Werkstückschulter und dem Fräsergrundkörper. Auffällig ist bei diesem Eckfrässystem die Richtung des Spanauswurfes. Wie in Abbildung 51 zu erkennen, zeigt dieser in Richtung der Schulterfläche des Werkstückes. Bei Systemen mit gut funktionierender Spanabfuhr wie z.B. dem Ceratizit MaxiMill 491 erfolgt der Spanauswurf in negative Vorschubbewegungsrichtung des Werkzeuges.

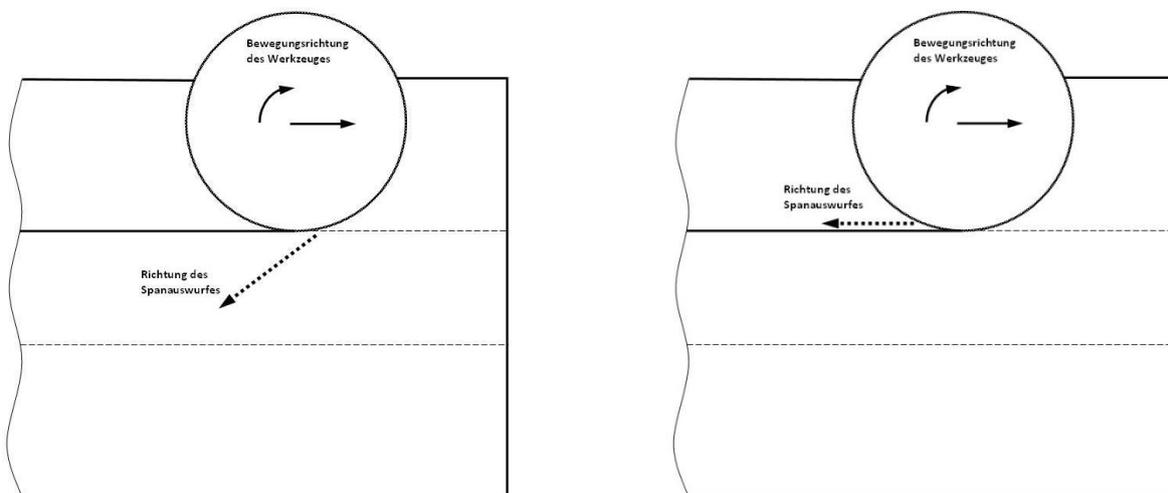


Abbildung 51: Vergleich der Spanauswurfrichtung zwischen Sandvik CoroMill 390 (links) und Ceratizit MaxiMill 491 (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Auch hier bringt die Schnittgeschwindigkeitsreduktion auf 250 m/min und 220 m/min keine Veränderung. Die Folgen sind jeweils Mikroverschweißungen an der erzeugten Werkstückschulter und bereits nach den drei Versuchen mit jeweils drei Schnitten ist der Verschleiß am Fräserkörper sehr deutlich ausgeprägt (siehe Abbildung 52).



Abbildung 52: Erzeugte Schulter mit verschweißsten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.

In der Abbildung 53 stammt der erste Span von links von den ersten beiden Schnitten und hat die Form eines Spiralwendelspans. Die restlichen abgebildeten Späne und Spanteile stammen vom dritten Schnitt und sind ein Produkt der Spanklemmungen zwischen Werkzeug und Werkstückschulter.



Abbildung 53: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (4230) bei $v_c = 300 \text{ m/min}$ und $a_e = 35 \text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Eingriffsbreite wird schrittweise reduziert und die Spanabfuhr dieses Systems funktioniert nur bis $a_e = 15 \text{ mm}$, was 30 % des Fräserdurchmessers entspricht. Mit dieser Eingriffsbreite und $v_c = 300 \text{ m/min}$ ist nach einer Fräslänge von 32 m eine fortschreitende Kantenabrundung feststellbar. Hierbei verschleißen Freifläche und Spanfläche gleich schnell. Der Kantenradius beträgt bei neuer Schneidkante $50 \mu\text{m}$ und bei 32 m Fräslänge $115 \mu\text{m}$. Das Standzeitende ist noch nicht erreicht, muss jedoch aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit an Werkstücken mittels des Fortschritts des Freiflächenverschleißes (Abbildung 54) abgeschätzt werden. Die Abschätzung in Abbildung 55 erfolgt auf Basis des bisherigen Verschleißverhaltens dieser Wendeschneidplatte. Der Verschleiß geht bei dieser Beschichtung weniger progressiv vonstatten, da das Substrat durch die Kantenabrundung nicht so schnell freigelegt wird und die Stützwirkung der Beschichtung gut funktioniert.

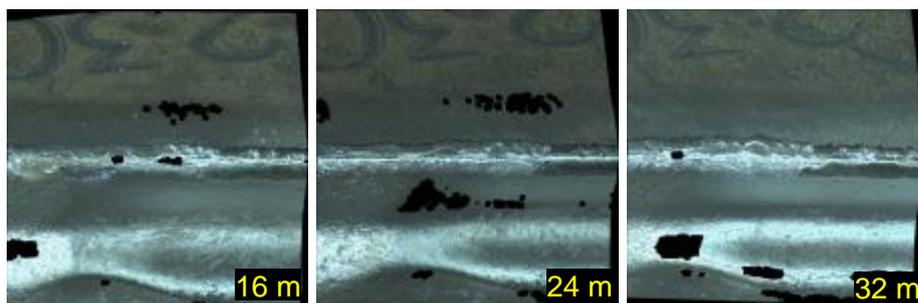


Abbildung 54: Kantenabrundung von links nach rechts nach 16, 24, 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

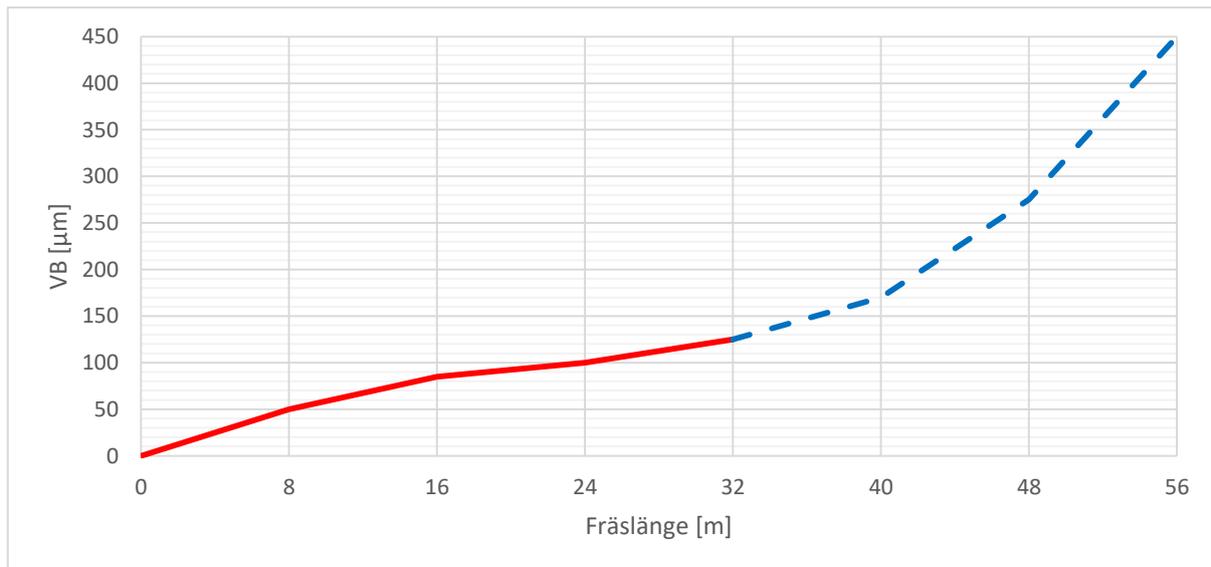


Abbildung 55: Freiflächenverschleiß an der schultererzeugenden Schneidkante über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erzeugte Schulter hat eine glatte, glänzende Oberfläche und ist frei von mikroverschweißten Spänen. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt. Die Länge der Späne nimmt, wie in Abbildung 56 gezeigt, deutlich ab und somit ist die Spanabfuhr noch möglich.



Abbildung 56: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (4230) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=15\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.5.2 PVD-Beschichtung

Aufgrund der Erkenntnisse mit den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten werden auch hier die Versuche mit $a_e=15\text{mm}$ und $v_c=300\text{m/min}$ durchgeführt. Der Verschleiß ist geringer als bei den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten. Neben geringem Freiflächenverschleiß ($VB=50\mu\text{m}$ nach 32m Fräslänge) tritt geringe Kantenabrundung auf. Ersichtlich in Abbildung 57.

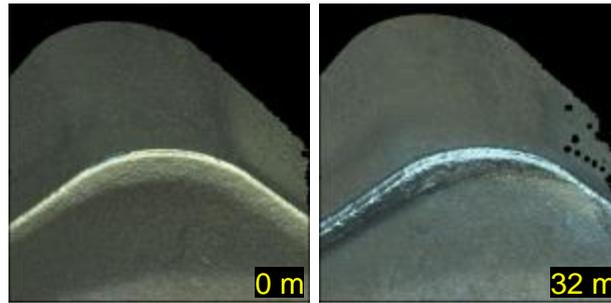


Abbildung 57: Ecke im linken Bild im Neuzustand und im rechten Bild mit Verschleiß nach 32m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Versuch wird nach 32m Fräslänge beendet. Die Standzeit kann in diesem Fall nicht abgeschätzt werden, da der Verschleißfortschritt hier zu gering ausfällt. Aufgrund der begrenzten Werkstückverfügbarkeit wird dieser Versuch nicht weitergeführt. Wegen der geringen Eingriffsbreite ist jedoch die wirtschaftliche Nutzung dieses Systems nur in einem engen Bereich möglich. Die erzeugte Schulter hat eine Oberfläche, die wenige raue Stellen durch Spanklemmungen aufweist (siehe Abbildung 58). Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.

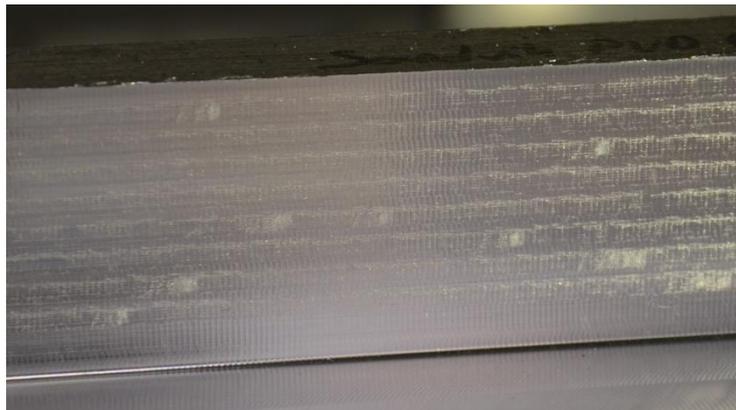


Abbildung 58: Erzeugte Schulter, Quelle: Eigene Darstellung.

Die deutlich kürzere Spanlänge im Vergleich zu den anderen Systemen ist in Abbildung 59 zu erkennen.



Abbildung 59: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (1030) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=15$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.6 Tungaloy TPW13

5.1.6.1 CVD-Beschichtung

Bereits nach 8 m Fräslänge kommt es bei dem Versuch mit $v_c = 300$ m/min zu Kammrissen an den schultererzeugenden Schneidkanten und deutlichem Freiflächenverschleiß an jeder Schneidenecke. Nach 12 m Standzeitende durch Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke mit $VB = 450$ μm (siehe Abbildung 60).

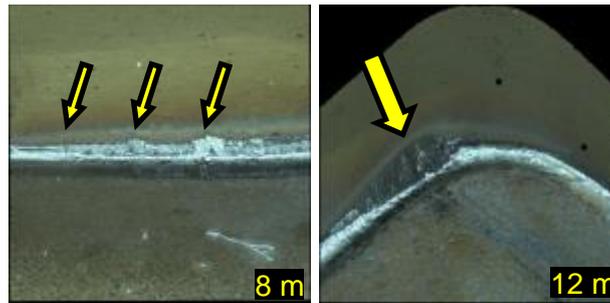


Abbildung 60: links: Kammrissbildung nach 8 m, rechts: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke nach 12 m bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr funktioniert bei $v_c = 300$ m/min noch einwandfrei. Die erzeugte Schulter hat eine saubere Oberfläche und ist frei von mikroverschweißten Spänen. Dieses Frässystem stellt ein stufiges Schulterprofil und somit kein exaktes, durchgängiges 90°-Profil her. Die Spanabfuhr hinterlässt leichte Verschleißspuren auf dem Grundkörper. Auffällig bei diesem Eckfrässystem ist der starke Abfall des Schnittdrucks beim Austritt des Werkzeuges. So kommt es zu einem Rücksprung der Schulterfläche um 0,6 mm wie in Abbildung 61 ersichtlich.

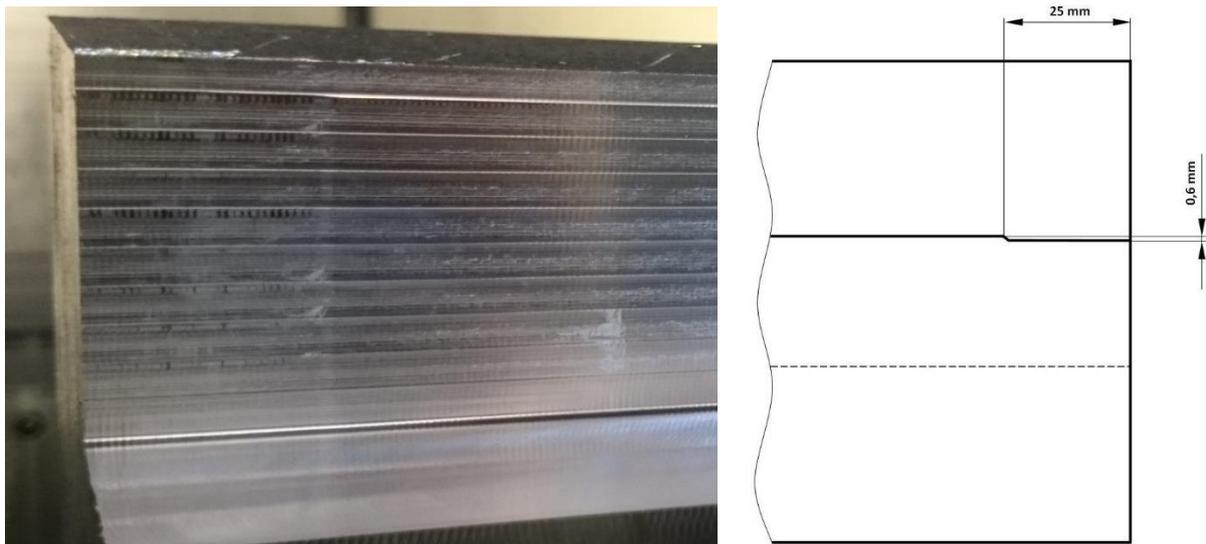


Abbildung 61: Erzeugte Schulter mit Austritt bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Beim Versuch mit $v_c = 190$ m/min beginnt die Kammrissbildung ebenfalls bei einer Fräslänge von 8 m. Der Fortschritt dieser verläuft jedoch langsamer (siehe Abbildung 62). Auch hier

wird der Versuch angesichts der Werkstückverfügbarkeit nach 32m Fräslänge beendet und aufgrund der bekannten Kammrissbildung bei dieser Wendeschneidplatte wird das Standzeitende bei 48m Fräslänge abgeschätzt. Bei $v_c=190\text{m/min}$ wird eine glatte Schulterfläche erzeugt, die kein stufiges Profil aufweist. Der Rücksprung der Schulterfläche ist bei dieser reduzierten Schnittgeschwindigkeit jedoch mit den gleichen Abmessungen vorhanden.

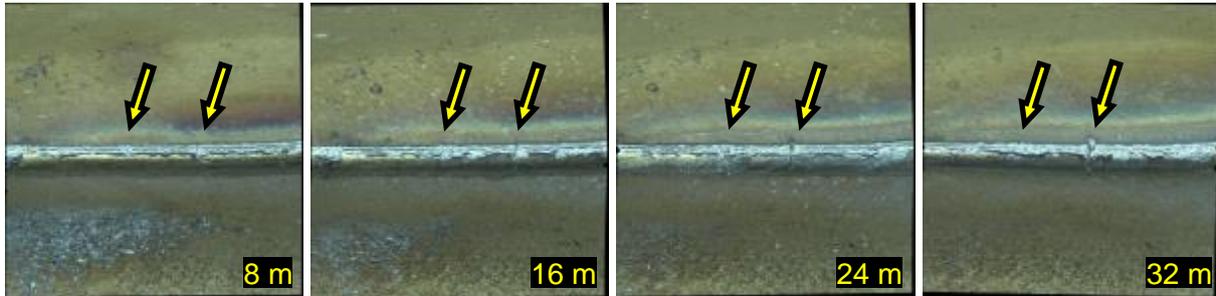


Abbildung 62: Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32 m Fräslänge bei $v_c=190\text{m/min}$

Die erzeugten Späne in Abbildung 63 sind Spiralwendelspäne, die eine fein gezackte Kantenstruktur aufweisen.



Abbildung 63: Späne Tungaloy TPW13 mit SWMT1304PDPR-MJ (T3130) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=35\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.6.2 PVD-Beschichtung

Zwei Versuche mit $v_c=300\text{m/min}$ werden durchgeführt. Das Standzeitende wird nach 4,8m und 16m erreicht. Es kommt jeweils zum Ausbruch einer Schneide beim Austritt aus dem Werkstück (siehe Abbildung 64). Alle anderen Schneiden zeigen kaum Verschleiß, was auf eine hohe Empfindlichkeit der Schneidkanten beim Austritt aus dem Werkstück schließen lässt. Weiter ist die extrem starke Erwärmung, die aufgrund fehlender Messgeräte nur subjektiv festgestellt werden kann, im Gegensatz zu allen anderen Systemen auffällig. Die Beschichtung dieser Wendeschneidplatte ist die einzige, die eine matte, raue Oberfläche besitzt. Alle anderen Wendeschneidplatten im Vergleich besitzen eine glänzende, polierte Oberfläche.

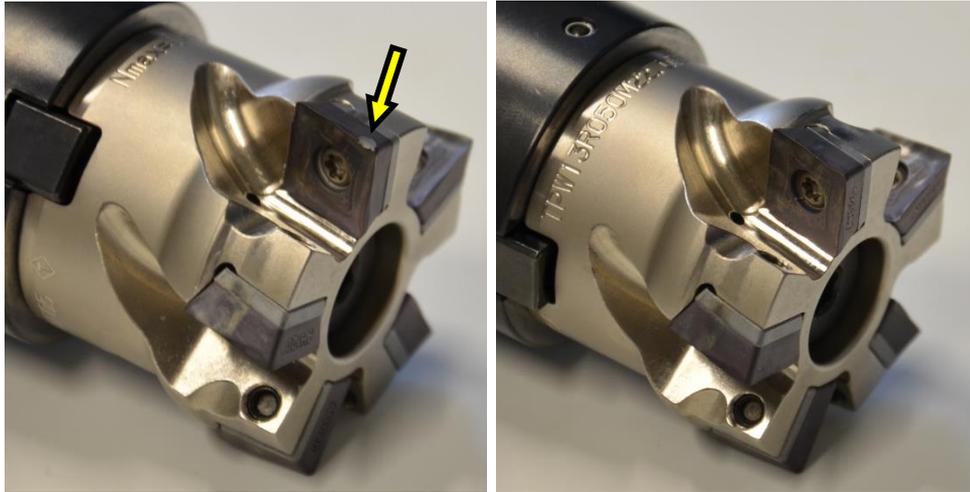


Abbildung 64: Schneidenausbruch im linken Bild und intakte Wendeschneidplatte im rechten Bild nach gleicher Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr hinterlässt Verschleißspuren auf dem Grundkörper und den Wendeschneidplatten. Die in Abbildung 65 gezeigte Werkstückschulter hat eine Oberfläche, die raue Stellen durch Spanklemmungen aufweist. Die Schulter kennzeichnet sich wie beim Versuch mit den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten durch Stufen in der Schulterfläche und dem gleichen Rücksprung der Schulter beim Austritt.

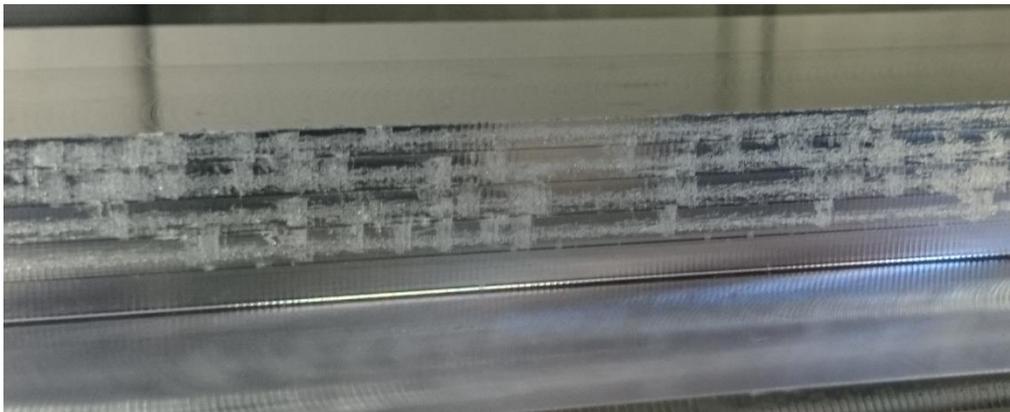


Abbildung 65: Erzeugte Schulter bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Ein weiterer Versuch mit $v_c=190$ m/min wird durchgeführt. Die Schneidenausbrüche bleiben hier aus. Es tritt langsam fortschreitende Kantenabrundung wie in Abbildung 66 auf. Dieser Versuch wird wegen der begrenzt vorhandenen Werkstücke nach 32m Fräslänge beendet und eine Abschätzung kann noch nicht durchgeführt werden.

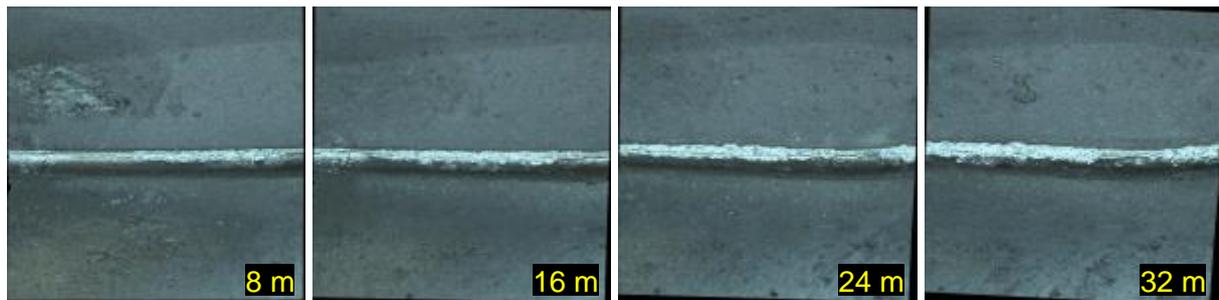


Abbildung 66: Kantenabrundung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erzeugten Späne mit leicht gestauchten bzw. gequetschten Enden in Folge der Spanklemmungen sind in Abbildung 67 dargestellt.



Abbildung 67: Späne Tungaloy TPW13 mit SWMT1304PDPR-MJ (AH120) bei $v_c=300\text{m/min}$ und $a_e=35\text{mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.7 Tungaloy TPM11

5.1.7.1 CVD-Beschichtung

Bei diesem Frässystem sind die Wendeschneidplatten im Gegensatz zu den bisher betrachteten Eckfräsern nicht radial sondern tangential angeordnet. Der Versuch mit $v_c=300\text{m/min}$ muss nach 0,8m Fräslänge abgebrochen werden. Ab dem zweiten Schnitt funktioniert die Spanabfuhr des Systems nicht mehr. Die Späne verklemmen sich zwischen Werkstückschulter und Fräsergrundkörper bzw. Wendeschneidplatte (siehe Abbildung 68).

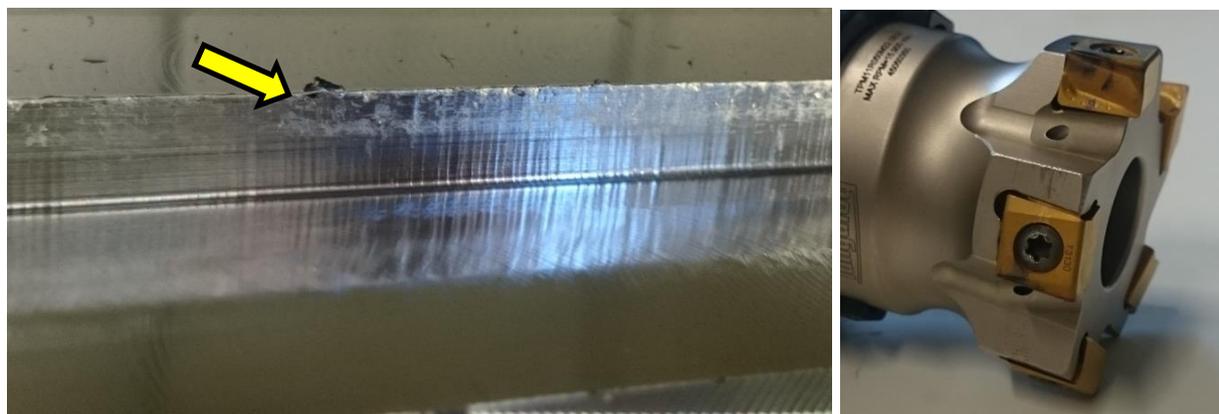


Abbildung 68: Erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 69 zeigt die gequetschten Späne, die bei einer Eingriffsbreite von $a_e = 35$ mm ab dem zweiten Schnitt entstehen.



Abbildung 69: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (T3130) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr dieses Systems funktioniert bis zu einer Eingriffsbreite von $a_e = 20$ mm. Dies entspricht 40% des Fräserdurchmessers. Mit dieser Eingriffsbreite und $v_c = 300$ m/min ist nach einer Fräslänge von 24 m das Standzeitende erreicht. Die fortschreitende Ausbildung des Freiflächenverschleißes und der Kammrissbildung an den schultererzeugenden Schneidkanten sind wie in Abbildung 70 (zweidimensional) und besser zu erkennen in Abbildung 71 (dreidimensional) zu beobachten. Auffallend hierbei sind der zu beobachtende Funkenflug am Ende der Standzeit und der progressive Verlauf des Kammrissfortschrittes. Die erzeugte Schulter hat eine saubere Oberfläche. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt. Abbildung 72 zeigt die hergestellten Späne.

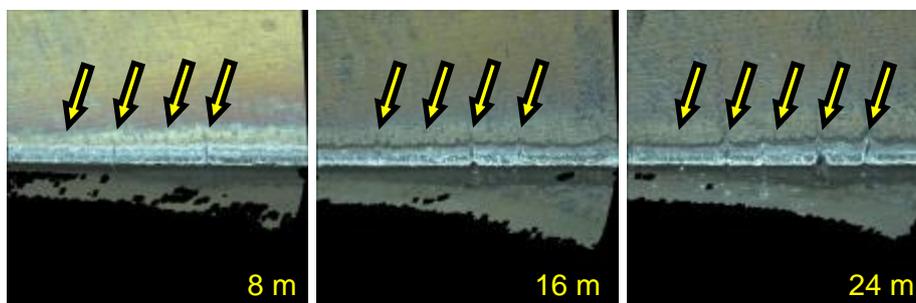


Abbildung 70: Freiflächenverschleiß und Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

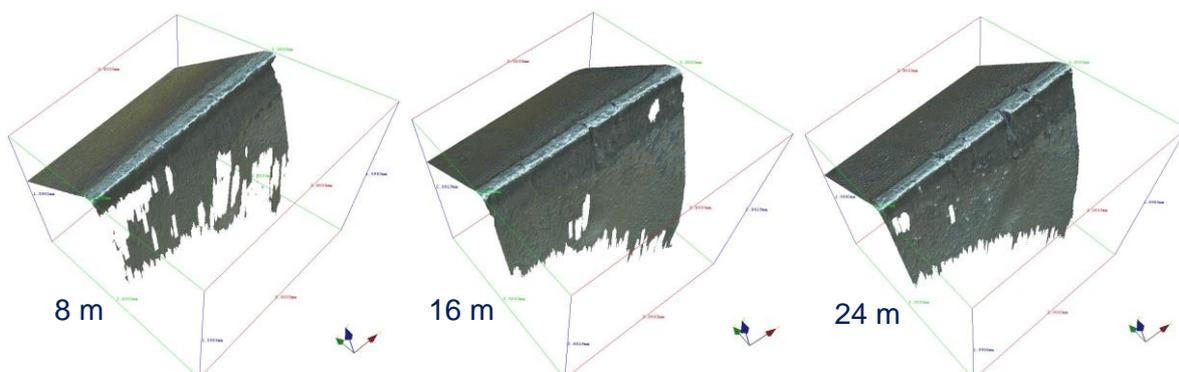


Abbildung 71: Freiflächenverschleiß und Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 72: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (T3130) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.7.2 PVD-Beschichtung

Aufgrund der Erkenntnisse mit den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten werden auch hier die Versuche mit Eingriffsbreite $a_e=20$ mm und Schnittgeschwindigkeit $v_c=300$ m/min durchgeführt. Nach 20 m Fräslänge kommt es zum Standzeitende durch Ausbruch einer Schneide. Dies ist in Abbildung 73 dargestellt. Alle anderen Schneiden weisen einen stark progressiven Fortschritt des Freiflächenverschleißes und des Spanflächenverschleißes auf.

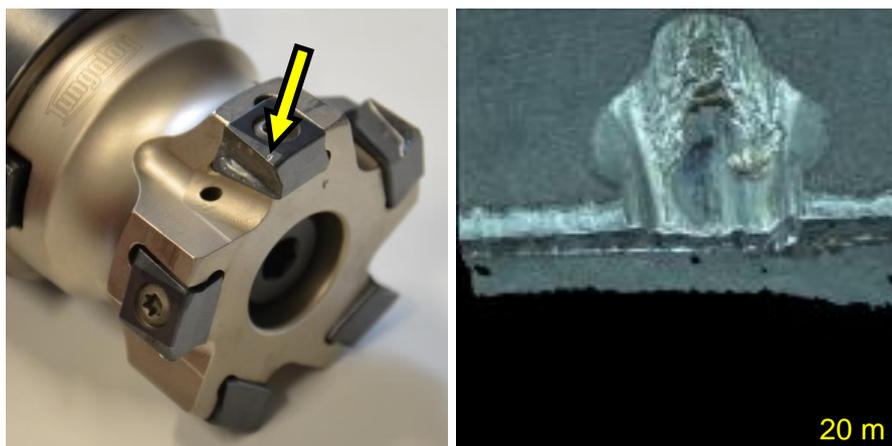


Abbildung 73: Schneidenausbruch nach 20 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Die erzeugte Schulter hat eine glatte, glänzende Oberfläche. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt. Die Form der Späne in Abbildung 74 gleicht der von den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten erzeugten Form.



Abbildung 74: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (AH725) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.8 Ingersoll Gold-Max 8

5.1.8.1 PVD-Beschichtung

Bei diesem System kommen wiederum tangential angeordnete Wendeschneidplatten zum Einsatz. Der Versuch mit $v_c=300\text{ m/min}$ wird nach 0,8m Fräslänge abgebrochen. Ab dem zweiten Schnitt funktioniert die Spanabfuhr bei diesem Eckfrässystem nicht mehr. Die Späne verklemmen sich zwischen Werkstückschulter und Fräsergrundkörper bzw. Wendeschneidplatte (siehe Abbildung 75).

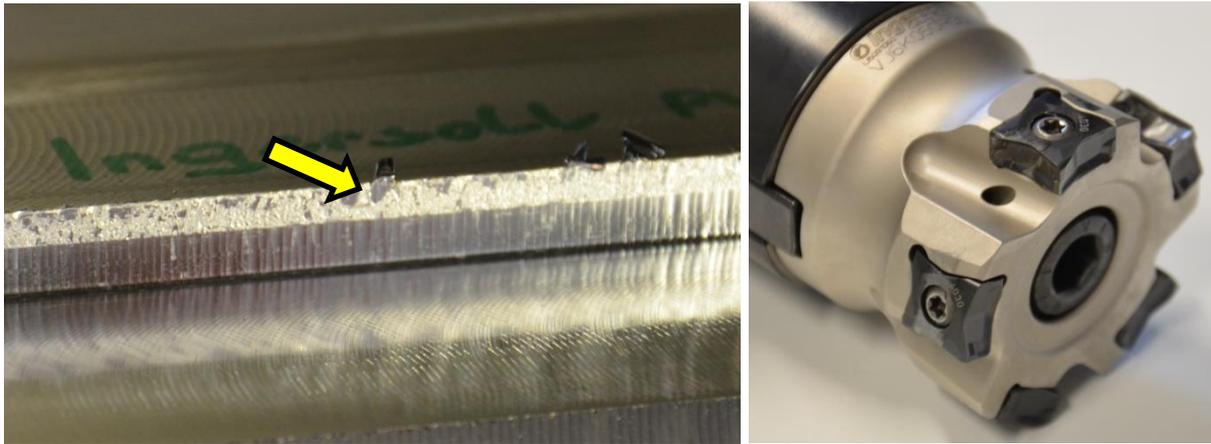


Abbildung 75: Erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.

Der erste Span von links in der Abbildung 76 zeigt einen Span der beim ersten Schnitt erzeugt wurde und bei dem die Spanabfuhr durch das Fehlen der Werkstückschulterfläche noch funktioniert. Bei den restlichen Spänen ist ein Knicken und Abbrechen durch die Klemmung zwischen Werkzeug und Werkstückschulter erkennbar.



Abbildung 76: Späne Ingersoll Gold-Max 8 mit SGM-44R001 (IN4030) bei $v_c=300\text{ m/min}$ und $a_e=35\text{ mm}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spanabfuhr dieses Systems funktioniert bis $a_e=20\text{ mm}$ (40% des Fräserdurchmessers). Die so produzierten Späne sind in Abbildung 77 dargestellt.



Abbildung 77: Späne Ingersoll Gold-Max 8 mit SGM-44R001 (IN4030) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung

Mit der Eingriffsbreite von $a_e=20$ mm und der Schnittgeschwindigkeit $v_c=300$ m/min ist ab einer Fräslänge von 24 m eine progressiv fortschreitende Kantenabrundung mit verbundenem Freiflächen- und Spanflächenverschleiß feststellbar (siehe Abbildung 78 und Abbildung 79). Das Standzeitende ist nach 32 m Fräslänge, bei welcher der Versuch aufgrund der Werkstückverfügbarkeit wieder beendet wird, noch nicht erreicht und kann aufgrund des Verschleißfortschrittes auch noch nicht abgeschätzt werden.

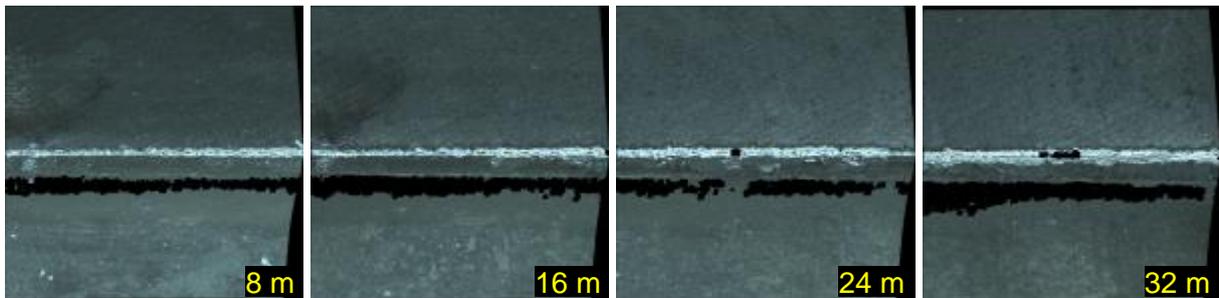


Abbildung 78: Kantenabrundung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

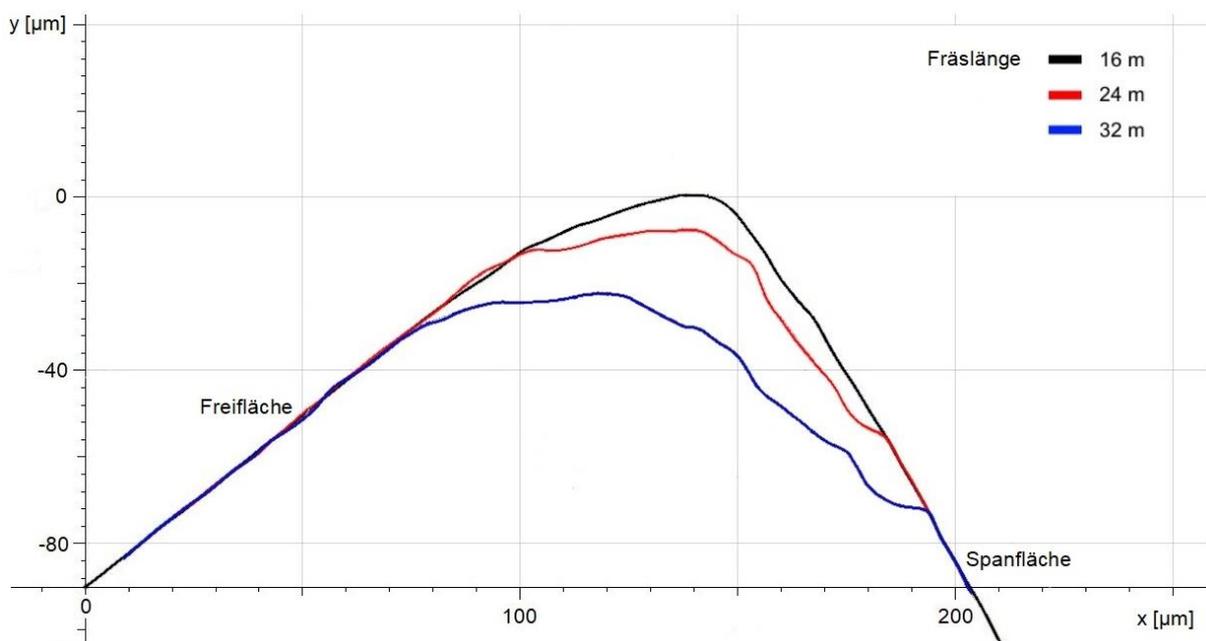


Abbildung 79: Kontur der schultererzeugenden Schneidkante mit Fortschritt der Kantenabrundung über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.

Das System stellt keine gleichmäßige Stirnfläche her. Die Oberflächenqualität ist über die Eingriffsbreite unterschiedlich. Weiter ist dieses System das einzige, dessen hergestellte Oberflächen im Schruppbereich liegen. Während mit allen anderen Systemen ein Ra-Wert zwischen $0,4\mu\text{m}$ und $0,8\mu\text{m}$ erzielt wird, liegt der Eckfräser von Ingersoll hier bei ca. $2\mu\text{m}$. Die erzeugte Schulter hat eine saubere Oberfläche. Eine exakte 90° Schulter wird hergestellt.

5.2 Versuche mit Kühlschmierstoff

Nachfolgend werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6 ausgewählten Eckfrässysteme gezeigt. Es werden je Eckfräser zuerst die Ergebnisse der CVD-beschichteten und danach die Resultate der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten erklärt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche der dritten Versuchsreihe werden unter dem Einsatz von Kühlschmierstoff durchgeführt.

5.2.1 Ceratizit MaxiMill 491

5.2.1.1 CVD-Beschichtung

Beim Versuch mit $v_c = 300\text{ m/min}$ tritt Kammrissbildung auf und nach 8 m Fräslänge wird eine Verschleißmarkenbreite von $400\mu\text{m}$ an der schultererzeugenden Schneidkante und somit das Standzeitende erreicht (siehe Abbildung 80).

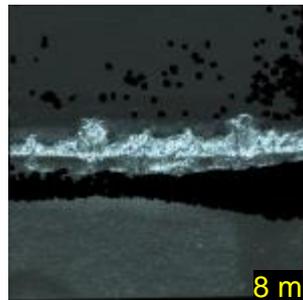


Abbildung 80: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c = 300\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit auf 190 m/min erhöht sich der Standweg auf eine Fräslänge von 24 m. Hier ist wiederum das extrem progressive Fortschreiten der Kammrissbildung anzumerken. Bei einer Fräslänge von 16 m ist der Beginn der Kammrissbildung feststellbar. Nach weiteren 8 m Fräslänge ist das Standzeitende mit einer VB von $400\mu\text{m}$ an den Stellen der Kammrissbildung erreicht. Dieser Vorgang ist in Abbildung 81 dargestellt.

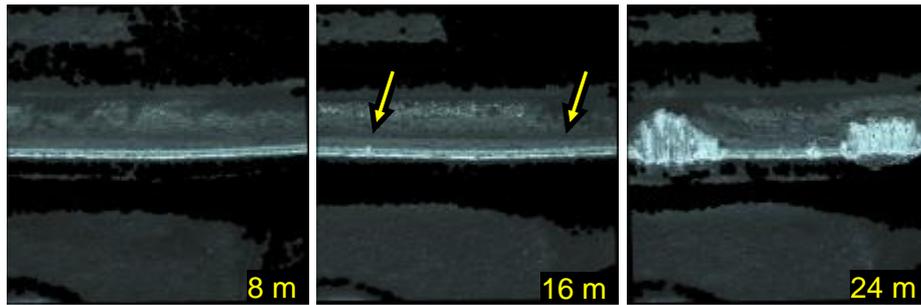


Abbildung 81: Verschleiß von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge bei $v_c=190\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.1.2 PVD-Beschichtung

Ausbruch von zwei Schneidkanten nach 2,8 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$. Abbildung 82 zeigt den durch Kammrisse verursachten Verschleiß bei dieser Fräslänge an einer Schneidkante, die nicht vom Ausbruch betroffen ist.

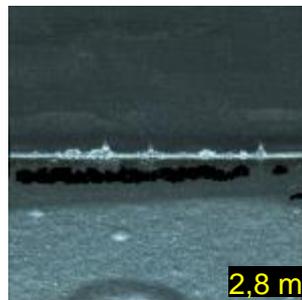


Abbildung 82: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 2,8 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei $v_c=190\text{ m/min}$ treten an allen Schneiden nach 4 m Fräslänge optisch festzustellende Kammrisse auf, an denen sich nach einer Fräslänge von 8 m Kerben mit $VB=250\mu\text{m}$ ausbilden (siehe Abbildung 83). Aufgrund des rapiden Verschleißfortschritts ab diesem Verschleißausmaß wird der Versuch hier beendet.

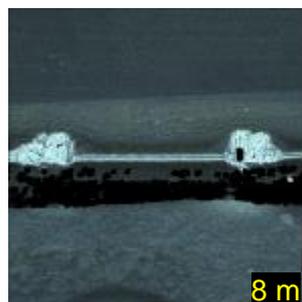


Abbildung 83: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=190\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.2 Seco Square 6

5.2.2.1 CVD-Beschichtung

Bei diesem System funktioniert die Spanabfuhr durch den Einsatz der KSS-Zufuhr bei einer Eingriffsbreite von $a_e=35\text{ mm}$ (70% des Fräserdurchmessers). Der Freiflächenverschleiß an der schultererzeugenden Schneidkante erreicht an den Stellen der Kammrise nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$ eine Verschleißmarkenbreite von $330\text{ }\mu\text{m}$ (siehe Abbildung 84). Das Profil der schultererzeugenden Schneidkante ist in Abbildung 85 dargestellt.

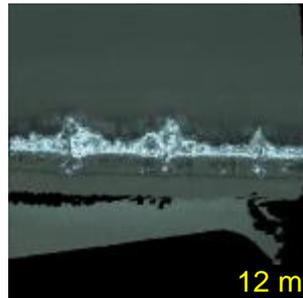


Abbildung 84: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

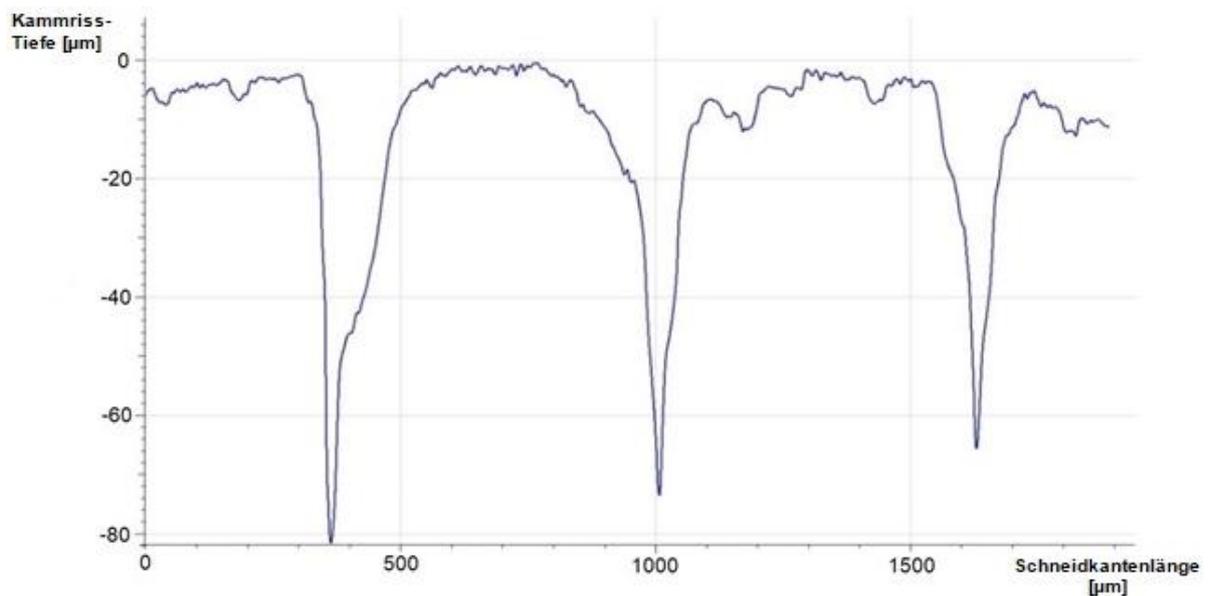


Abbildung 85: Durch Kammrise bestimmtes Profil der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.2.2 PVD-Beschichtung

Nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300\text{ m/min}$ weist die schultererzeugende Schneidkante Kammrissbildung und eine Verschleißmarkenbreite von $440\text{ }\mu\text{m}$ auf (siehe Abbildung 86).

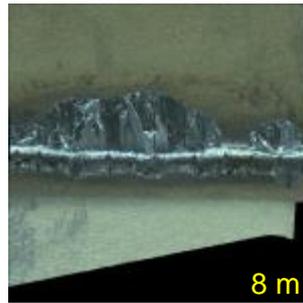


Abbildung 86: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.3 Ceratizit MaxiMill 211

5.2.3.1 CVD-Beschichtung

An der schultererzeugenden Schneidkante kommt es zur Kammrissbildung und der Freiflächenverschleiß erreicht bereits nach 5,6 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min eine VB von $450\ \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 87).

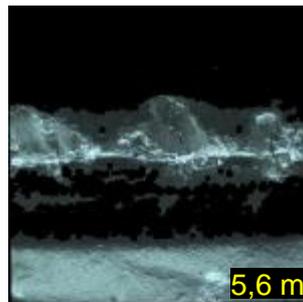


Abbildung 87: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 5,6 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.3.2 PVD-Beschichtung

Nach 8 m Fräslänge sind beim Versuch mit $v_c=300$ m/min Kammrisse mit einer Verschleißmarkenbreite von $310\ \mu\text{m}$ festzustellen (siehe Abbildung 88).

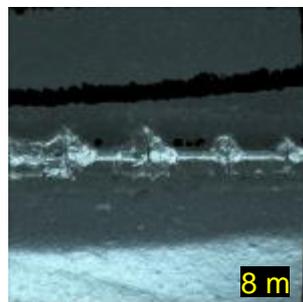


Abbildung 88: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.4 Tungaloy TPW13

5.2.4.1 CVD-Beschichtung

Bereits nach 2m Fräslänge bei $v_c=300\text{m/min}$ treten Kammrisse auf. Dies führt zum durchgehenden Abtrag der Beschichtung und zur Freilegung des Substrats. Nach 4m Fräslänge ist eine VB von $260\mu\text{m}$ erreicht und der Versuch wird beendet (siehe Abbildung 89).

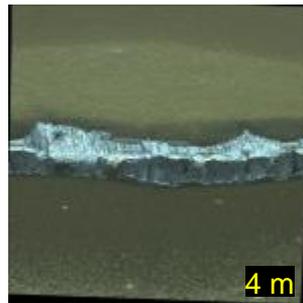


Abbildung 89: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 4m Fräslänge bei $v_c=300\text{m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Durchführung des Versuches mit $v_c=190\text{m/min}$ kommt es zum gleichen Verschleißbild wie beim vorangehenden Versuch mit $v_c=300\text{m/min}$ wobei der Verschleißfortschritt langsamer vonstattengeht und eine Fräslänge von 8m erreicht wird (siehe Abbildung 90).

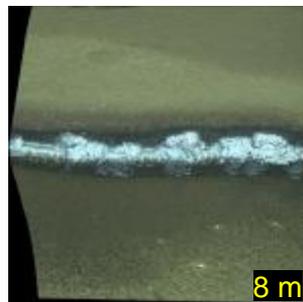


Abbildung 90: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8m Fräslänge bei $v_c=190\text{m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.4.2 PVD-Beschichtung

Von Beginn der Bearbeitung an kommt es bei $v_c=300\text{m/min}$ zur Kammrisbildung an der schultererzeugenden Schneidkante. Ein progressives Fortschreiten der Kammrisse ist sehr deutlich zu beobachten und nach 12m Fräslänge kommt es zum Standzeitende (siehe Abbildung 91).

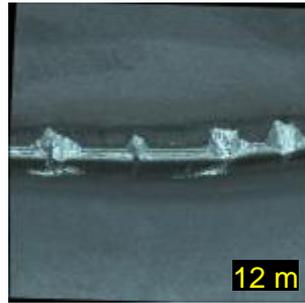


Abbildung 91: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei $v_c = 190$ m/min kommt es ab 16 m Fräslänge zur Kammrissbildung. An allen Schneiden kommt es ab 24 m Fräslänge zu einer Kerbe, die 3 mm von der Schneidenecke, d.h. 1 mm von der Schnitttiefe entfernt liegt (siehe Abbildung 92). Es handelt sich somit nicht um eine Endkerbe. Durch das rasche Voranschreiten dieser Kerbe ist das Standzeitende nach 32 m erreicht.

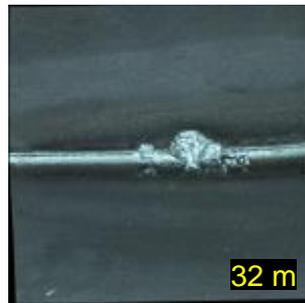


Abbildung 92: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 32 m Fräslänge bei $v_c = 190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

6 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse aus den Versuchsreihen werden in Kapitel 6 miteinander verglichen, und beschrieben. Dazu werden jeweils das zerspannte Volumen und die Kosten pro zerspantem Volumen über dem Zeitspanvolumen aufgetragen. Weiter werden die erzeugten Oberflächenrauheiten angegeben.

6.1 Versuche ohne Kühlschmierstoff bei $v_c = 300$ m/min

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Versuche bei Schnittgeschwindigkeit $v_c = 300$ m/min, Vorschub $f_z = 0,15$ mm und Schnitttiefe $a_p = 4$ mm ohne Zufuhr von KSS ersichtlich. In Abbildung 93 ist das insgesamt erzeugte Spanvolumen und das dazugehörige Zeitspanvolumen der CVD-beschichteten Wendeschneidplatten aufgetragen. Hierbei erreicht das Eckfrässystem von Seco das höchste Spanvolumen, doch das Zeitspanvolumen ist aufgrund der geringeren Eingriffsbreite von 55% des Fräserdurchmessers mit $157,6 \text{ cm}^3/\text{min}$ geringer als das von Ceratizit, Iscar und Tungaloy (TPW13) mit $200,5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

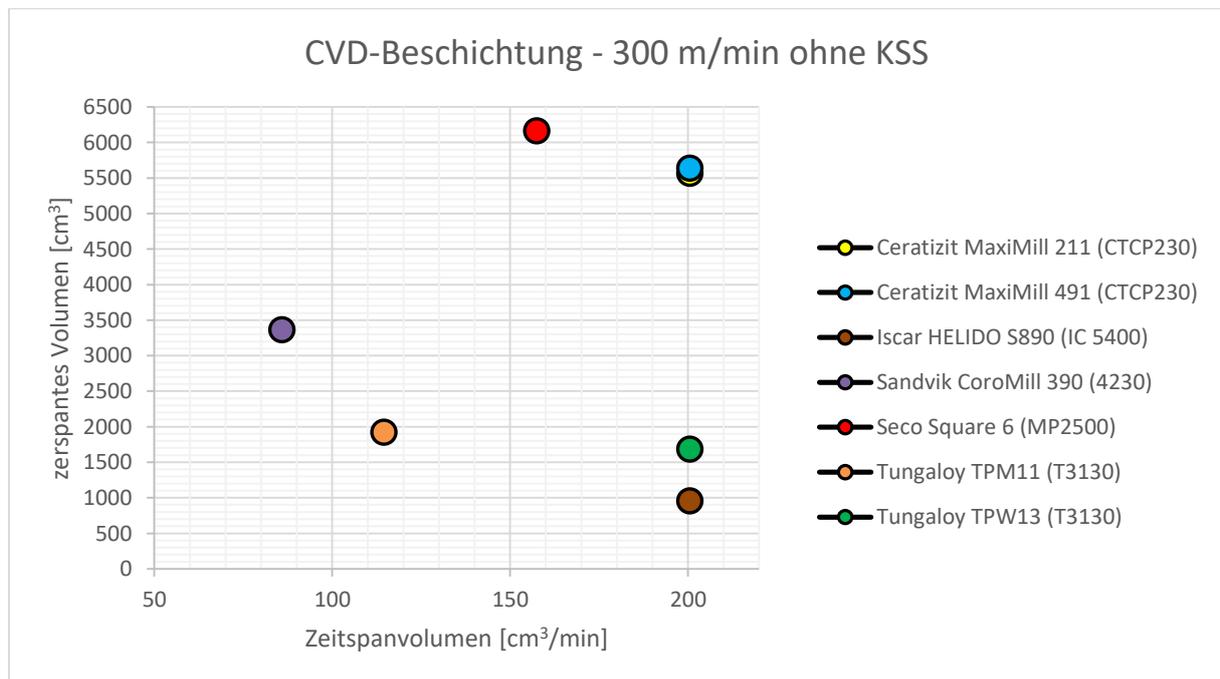


Abbildung 93: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c = 300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit den Kosten pro Schneide können dann in Abbildung 94 die Kosten pro zerspantem Volumen angegeben werden. Die Kosten pro zerspantem Volumen beziehen sich hier rein auf die Kosten der Hartmetall-Wendeschneidplatten. Hier sind ebenfalls Ceratizit und Seco die führenden Systeme. Bei Ceratizit ist jedoch der Unterschied zwischen MaxiMill 491 mit acht nutzbaren Schneiden und MaxiMill 291 mit zwei nutzbaren Schneiden deutlich zu

erkennen. Bei gleichem zerspanbarem Volumen sind die Kosten pro Schneide beim MaxiMill 211 2,1-fach so hoch und damit ebenfalls die Kosten pro zerspantem Volumen.

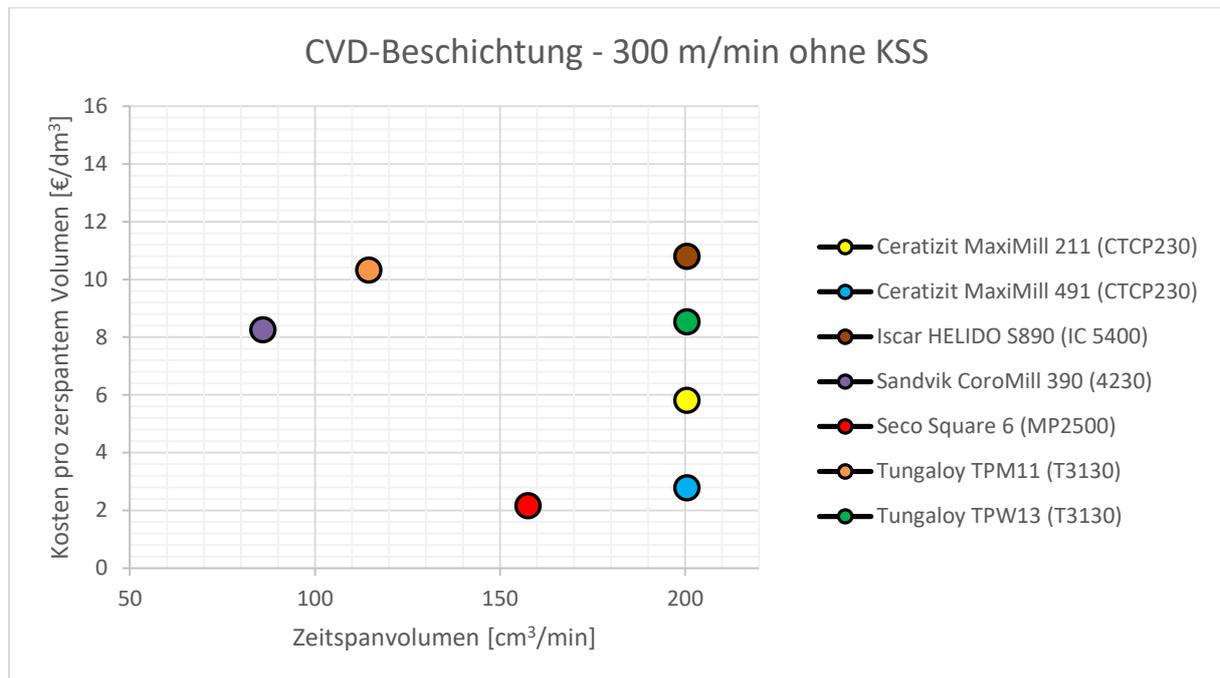


Abbildung 94: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c = 300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 95 ist das insgesamt erzeugte Spanvolumen und das dazugehörige Zeitspanvolumen der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten aufgetragen. Da eine genaue Abschätzung der Standzeit und damit des zerspanbaren Volumens bei Ingersoll und Sandvik mit den begrenzten Werkstücken nicht möglich ist, wird im Diagramm ein tendenzieller Vergleich zu den anderen Systemen angestellt.

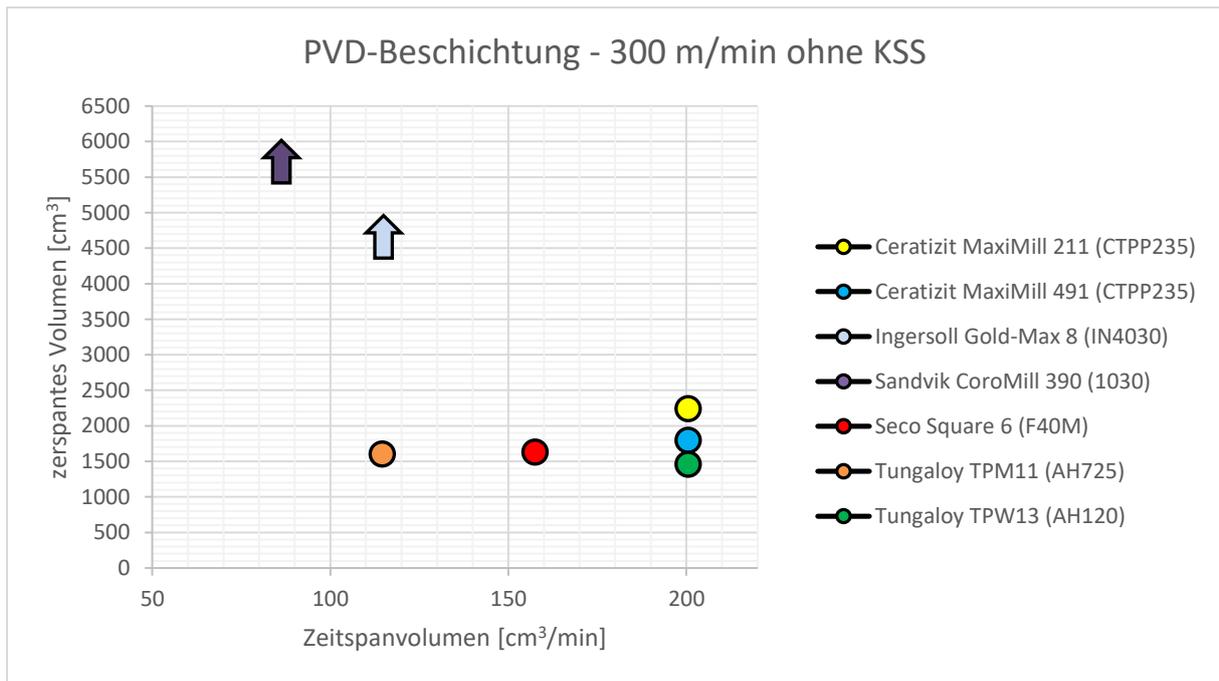


Abbildung 95: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300\text{ m/min}$ ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Kosten pro Schneide ergibt sich die in Abbildung 96 ersichtliche Aufstellung.

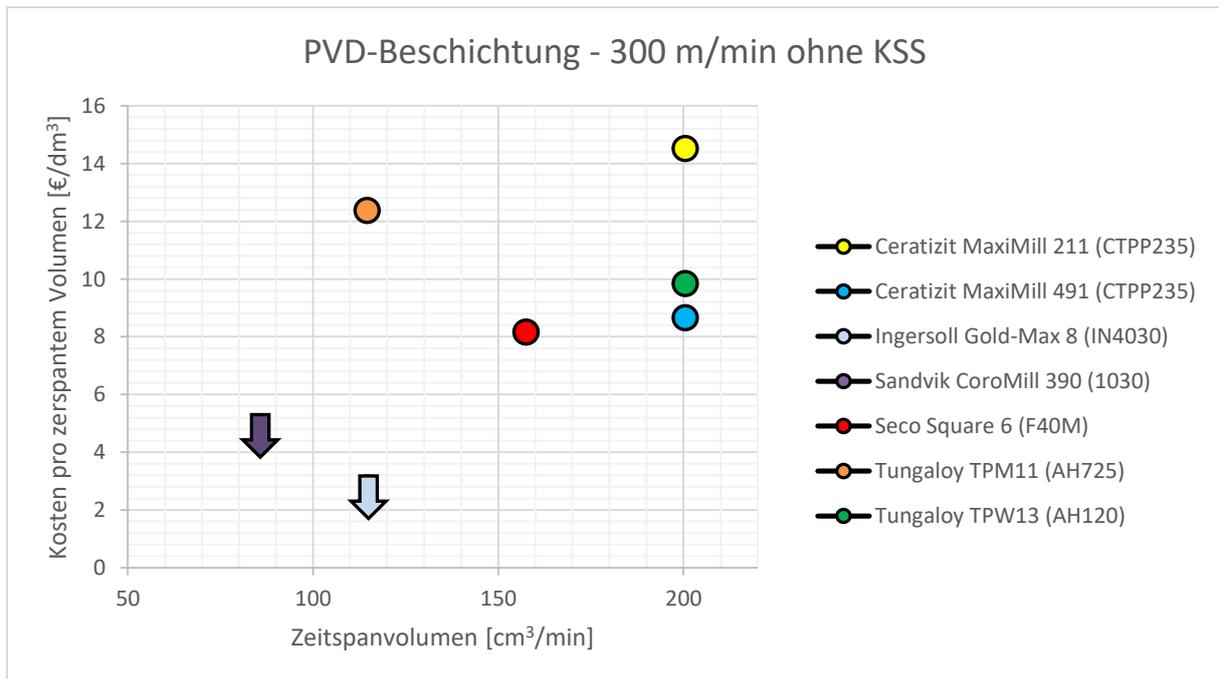


Abbildung 96: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300\text{ m/min}$ ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 97 zeigt die Ergebnisse der Rauheitsmessung an den erzeugten Stirnflächen am Werkstück. Hier fällt das Werkzeug von Ingersoll auf, das Oberflächen im Schruppbereich herstellt. Alle anderen Eckfrässysteme stellen über die gesamte Lebensdauer gleichbleibende Oberflächen im Schlichtbereich her.

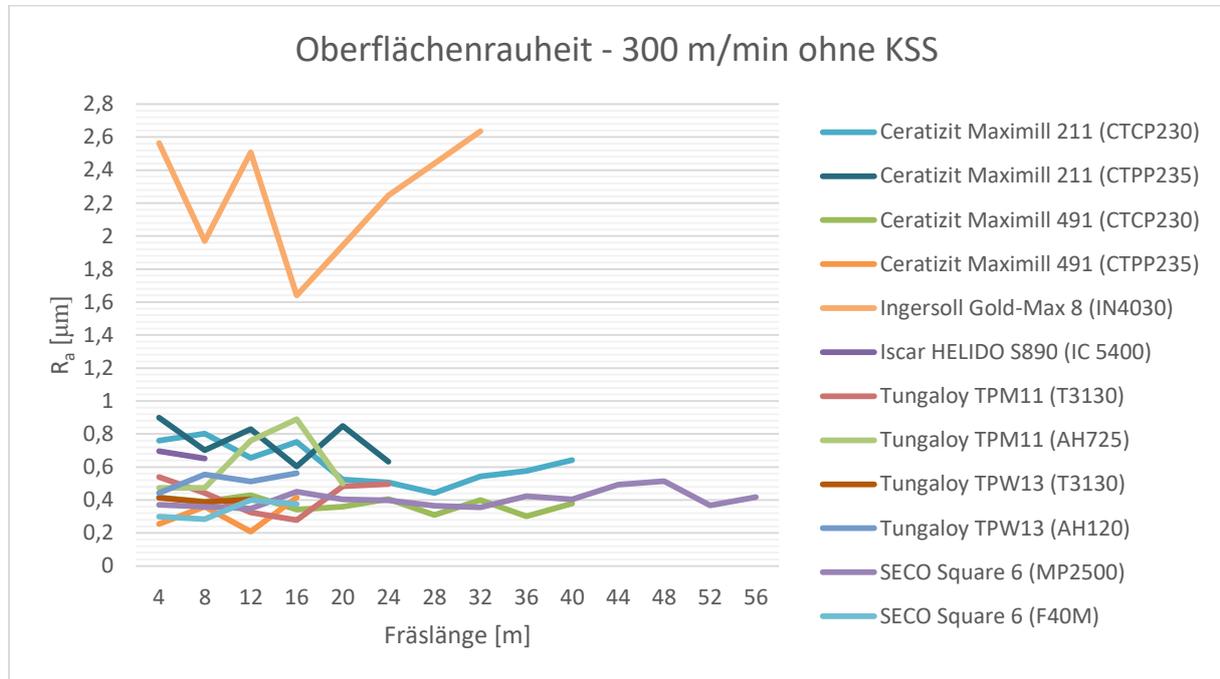


Abbildung 97: Oberflächenrauheit der Werkstückstirnfläche bei $v_c=300\text{ m/min}$ ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Überleitung von den Ergebnissen der Versuche ohne Einsatz von Kühlschmierstoff zu den Ergebnissen der Versuche mit Kühlschmierstoff folgt ein Vergleich der erzeugten Spanformen. Beim Eckfrässystem Ceratizit MaxiMill 491 ist ein Vergleich der Spanformen, die bei der Bearbeitung ohne KSS (siehe Abbildung 98) und mit KSS (siehe Abbildung 99) entstehen, sehr gut möglich. Die Späne weisen beim Einsatz von KSS keine Anlauffarben auf und der Austritt beim Gleichlaufräsen hin zu Spanungsdicke $h=0\text{ mm}$ ist durch die Schmierung von Gleitprozessen geprägt, was zu einem ausgefransten Ende des Spans führt.



Abbildung 98: Späne Ceratizit MaxiMill 491 ohne KSS bei $v_c=300\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 99: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit KSS bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2 Versuche mit Kühlschmierstoff bei $v_c = 300$ m/min

Im direkten Vergleich zeigen die nachfolgenden Diagramme die Ergebnisse der Versuche mit den vier ausgewählten Eckfrässystemen bei Schnittgeschwindigkeit $v_c=300$ m/min, jedoch mit Zufuhr von KSS. Der Verschleißmechanismus ist außer beim Ceratizit MaxiMill 491 mit PVD-beschichteten Wendeschneidplatten immer der Gleiche. Das Standzeitende wird durch Kammrissbildung und einhergehendem Freiflächenverschleiß bestimmt. Beim Ceratizit MaxiMill 491 mit PVD-beschichteten Wendeschneidplatten kommt es wie schon in den Trockenversuchen zum Ausbruch zweier Schneidkanten, aber auch hier ist die Kammrissbildung an allen Schneiden deutlich zu erkennen. Abbildung 100 zeigt das insgesamt erzeugte Spanvolumen und das dazugehörige Zeitspanvolumen der CVD-beschichteten Wendeschneidplatten und Abbildung 101 die zugehörigen Kosten pro Schneide.

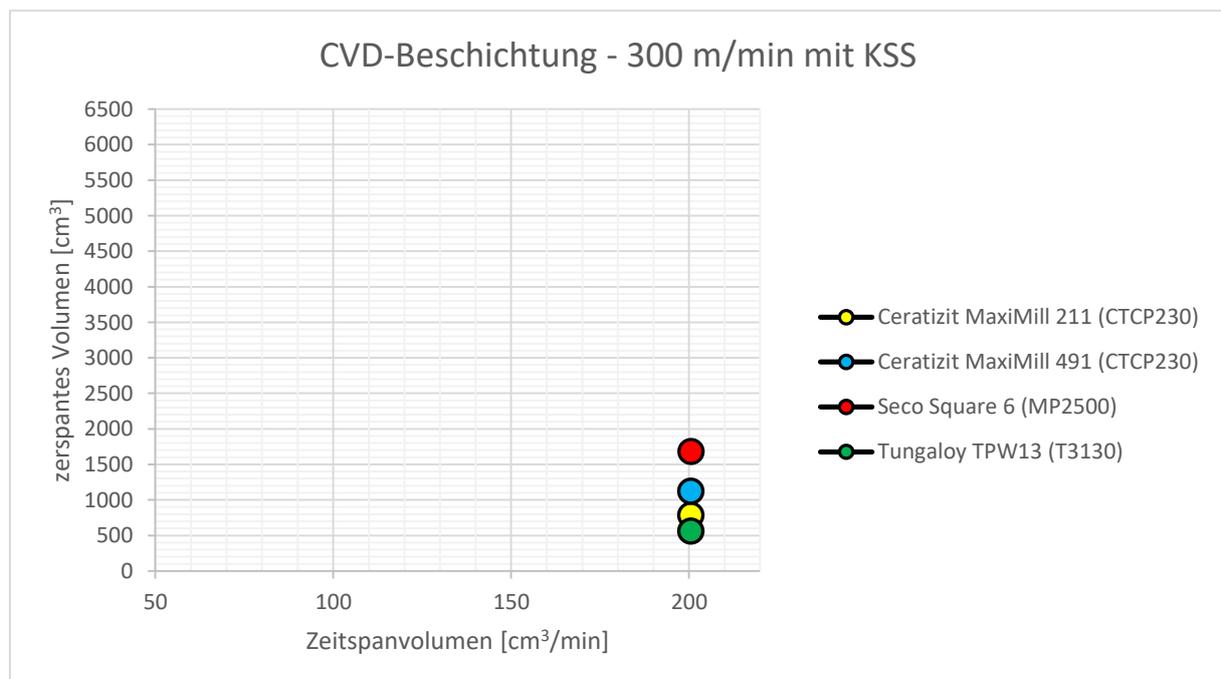


Abbildung 100: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Einsatz von KSS verringert sich das Standvermögen und somit steigen die Kosten pro zerspantem Volumen im Vergleich zur Bearbeitung ohne KSS je nach System um den Faktor 3 (Tungaloy TPW13) bis Faktor 7,15 (Cerazit MaxiMill 211).

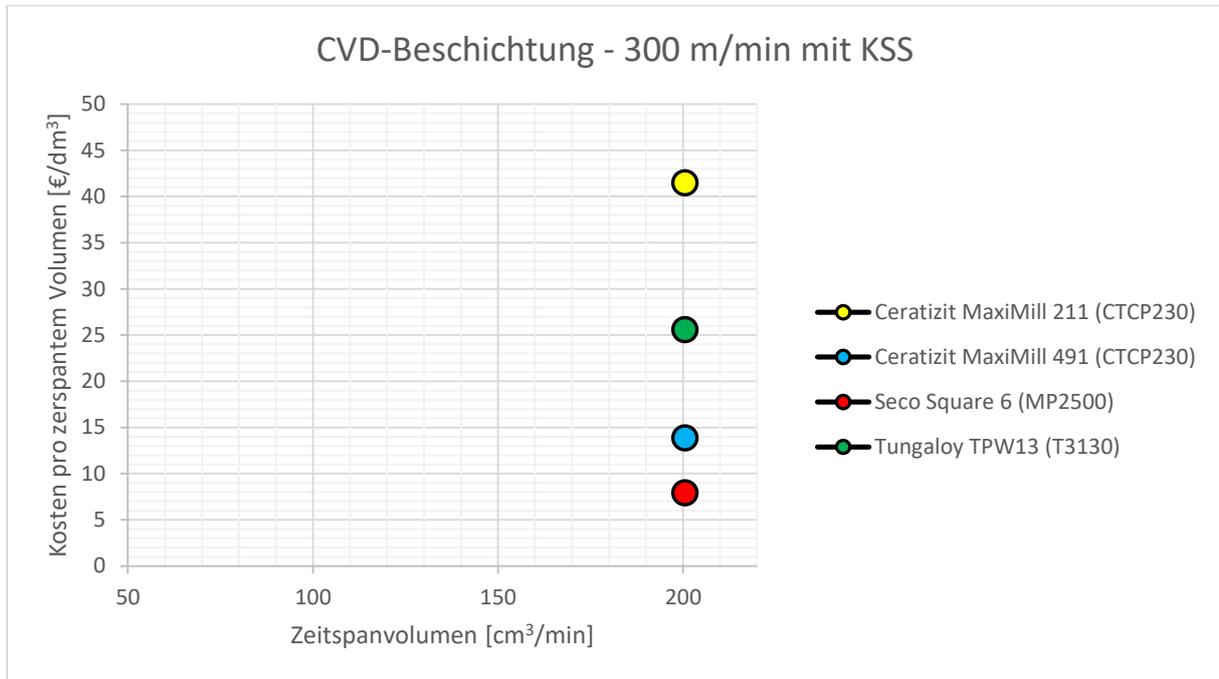


Abbildung 101: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Das insgesamt erzeugte Spanvolumen und das Zeitspanvolumen der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten ist in Abbildung 102 dargestellt.

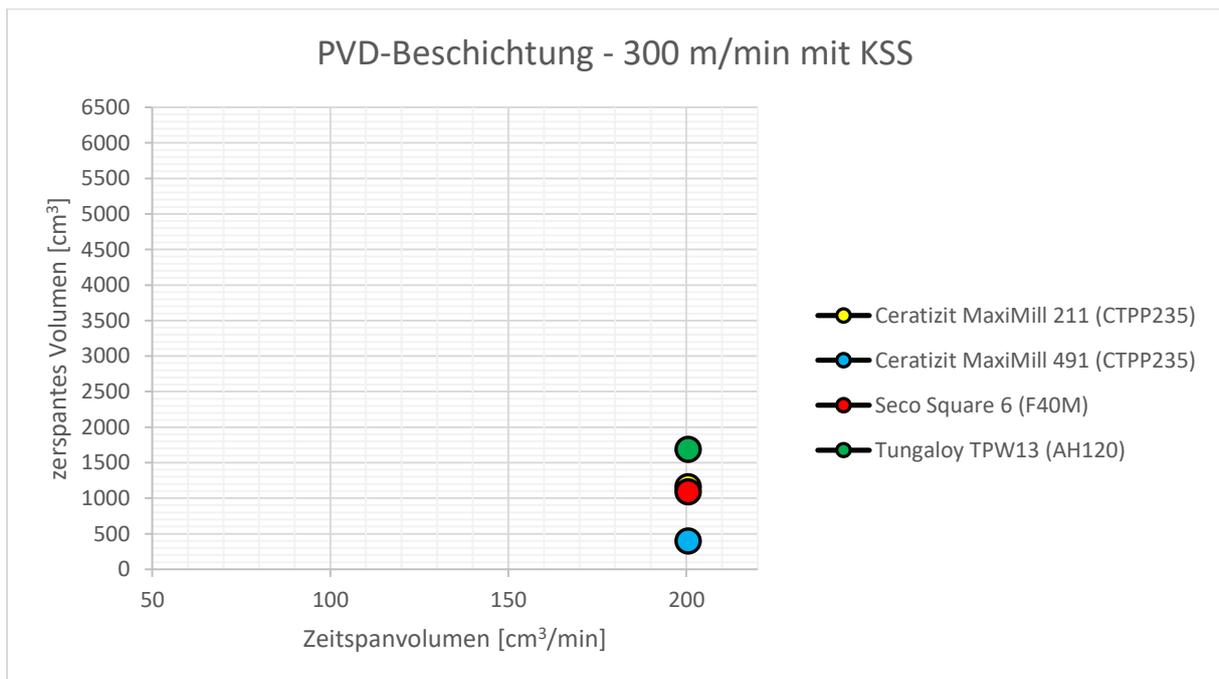


Abbildung 102: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Leistungen der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten liegen bei der Bearbeitung mit KSS-Zufuhr im Bereich jener Leistungen der CVD-beschichteten Wendeschneidplatten mit KSS-Zufuhr. Da die Leistungen der PVD-beschichteten Wendeschneidplatten der ausgewählten Systeme ohne KSS-Zufuhr unter denen der CVD-beschichteten liegen, steigen die Kosten pro zerspantem Volumen wie in Abbildung 103 zu erkennen nicht so stark an, wie beim Vergleich der CVD-beschichteten Wendeschneidplatten mit und ohne KSS-Zufuhr.

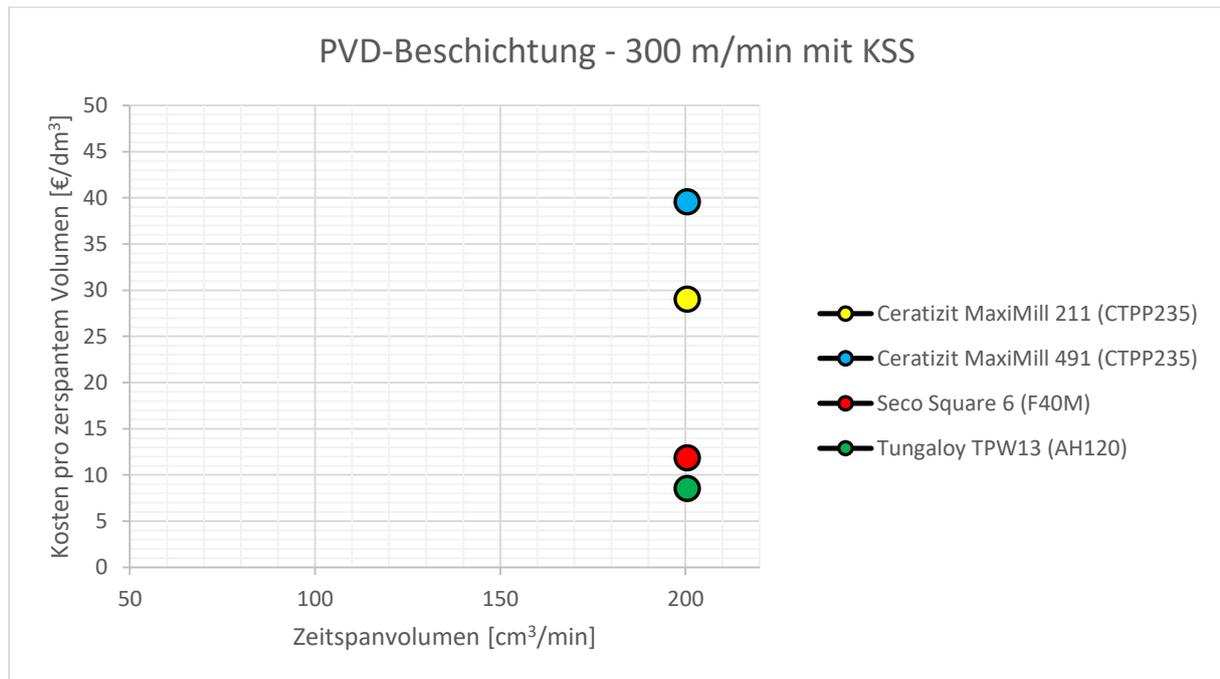


Abbildung 103: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3 Versuche bei $v_c=190$ m/min

Die Versuche bei reduzierter Schnittgeschwindigkeit werden nur noch an den zwei ausgewählten Systemen Ceratizit MaxiMill 491 und Tungaloy TPW13 durchgeführt. Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse dieser beiden Systeme aus den Versuchen mit und ohne KSS jeweils in einem Diagramm dargestellt. Die Parameter Vorschub $f_z=0,15$ mm und Schnitttiefe $a_p=4$ mm bleiben wie bei den vorhergehenden Versuchen gleich. Bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c=190$ m/min sind stabile Zerspanungsbedingungen vorhanden. Vibrationen und vorzeitige Schneidenausbrüche, die bei Versuchen zwischen $v_c=150$ m/min und $v_c=180$ m/min zu beobachten sind, bleiben dabei aus. In Abbildung 104 ist das Spanvolumen und das Zeitspanvolumen bei diesen Schnittparametern zu sehen. Durch das Gleichbleiben des Vorschubes pro Zahn bei Verringerung der Schnittgeschwindigkeit sinkt das Zeitspanvolumen von $200,5$ cm³/min um den Faktor 1,58 auf 127 cm³/min. Durch die geringere Schnittgeschwindigkeit steigt bei allen getesteten Systemen das insgesamt zerspanbare Volumen. Dies gilt sowohl für den Einsatz ohne als auch mit KSS. Konkret

steigt das Spanvolumen beim Ceratizit MaxiMill 491 über das doppelte (ohne KSS) und um den Faktor 3 (mit KSS) im Vergleich zu $v_c=300\text{ m/min}$ an. Beim Tungaloy TPW13 wird hierbei ohne KSS das vierfache Spanvolumen und mit KSS das doppelte Spanvolumen erreicht.

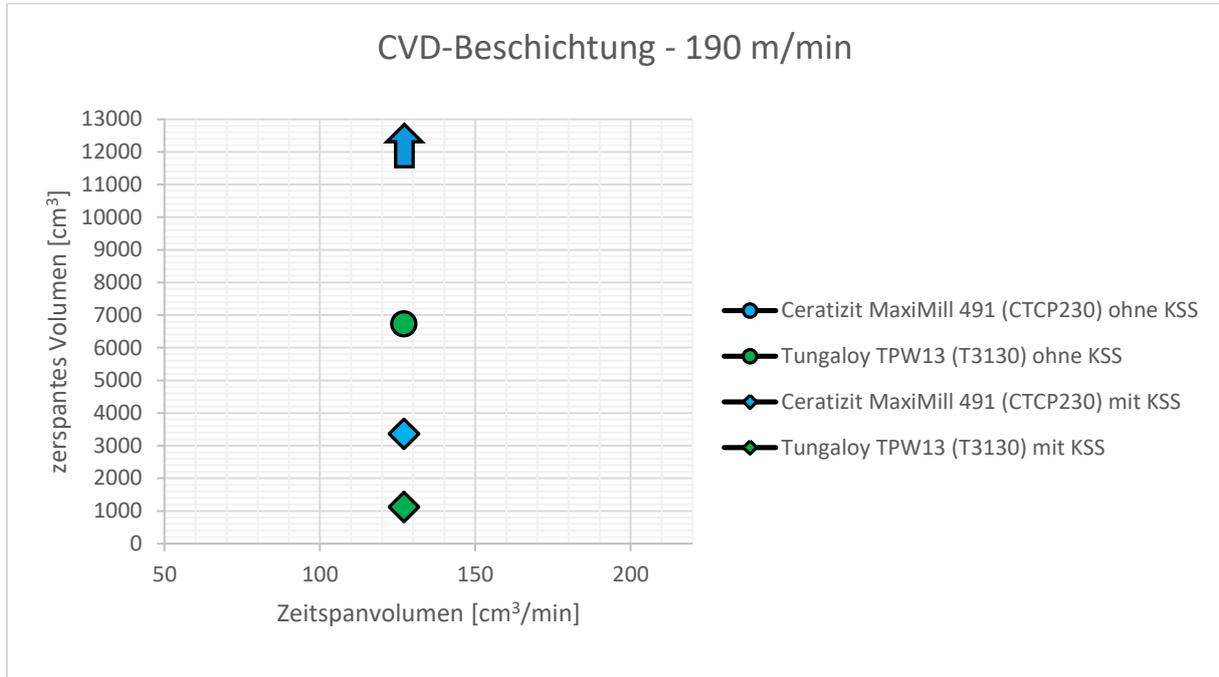


Abbildung 104: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=190\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Dies wirkt sich in weiterer Folge direkt auf die Kosten pro zerspantem Volumen aus (siehe Abbildung 105).

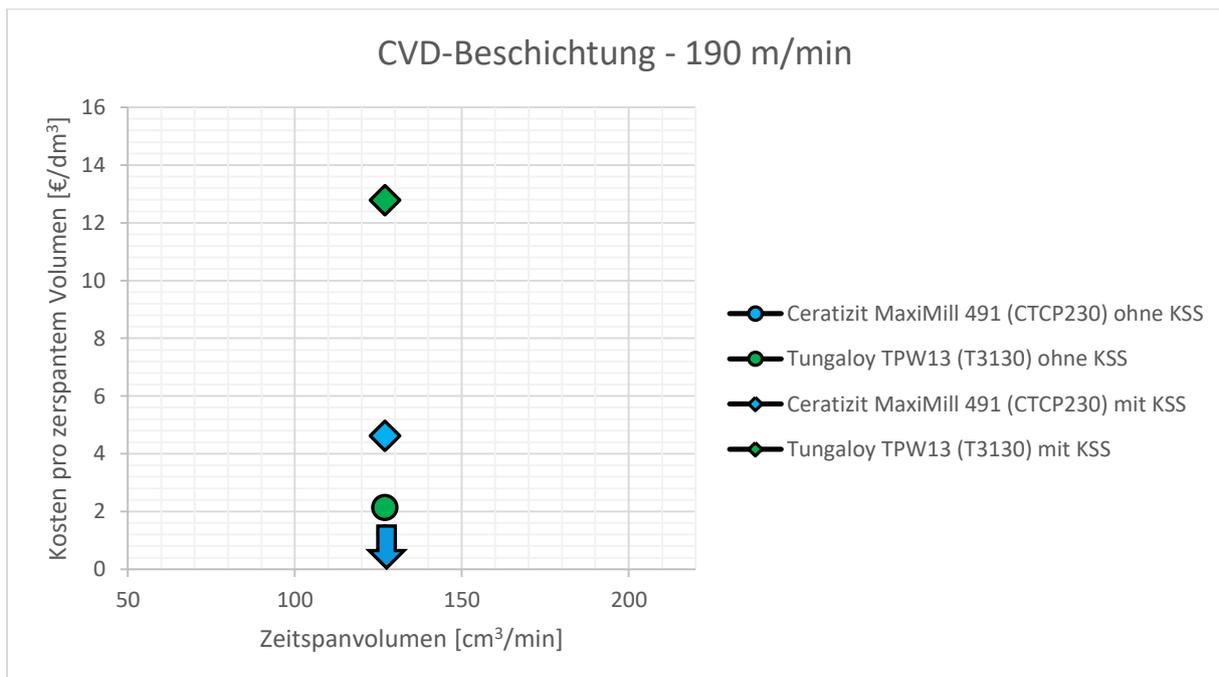


Abbildung 105: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=190\text{ m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 106 sind die Ergebnisse der beiden ausgewählten Eckfrässysteme mit PVD-beschichteten Wendeschneidplatten aufgetragen. Aufgrund der begrenzten Werkstückverfügbarkeit können die Systeme bei der Bearbeitung ohne KSS nicht bis zum Standzeitende benutzt werden. Durch die Beobachtung des Verschleißfortschritts wird die Größenordnung des erreichbaren Spanvolumens abgeschätzt. Bei den PVD-beschichteten Wendeschneidplatten wirkt sich der Vorteil der geringeren Schnittgeschwindigkeit durch das Ausbleiben der Schneidenausbrüche vor dem, durch abrasiven Verschleiß verursachten, Standzeitende stärker als bei den CVD-beschichteten Wendeschneidplatten aus. Im Vergleich zu $v_c=300\text{m/min}$ ohne KSS erreicht der Ceratizit MaxiMill 491 hier etwa das 7-fache Spanvolumen und der Tungaloy TPW13 steigert sein erreichbares Spanvolumen um den Faktor 5,5. Bei Einsatz von KSS vergrößert sich das zerspanbare Volumen bei dieser geringeren Schnittgeschwindigkeit um den Faktor 2,85 (Ceratizit MaxiMill 491) bzw. 2,67 (Tungaloy TPW13).

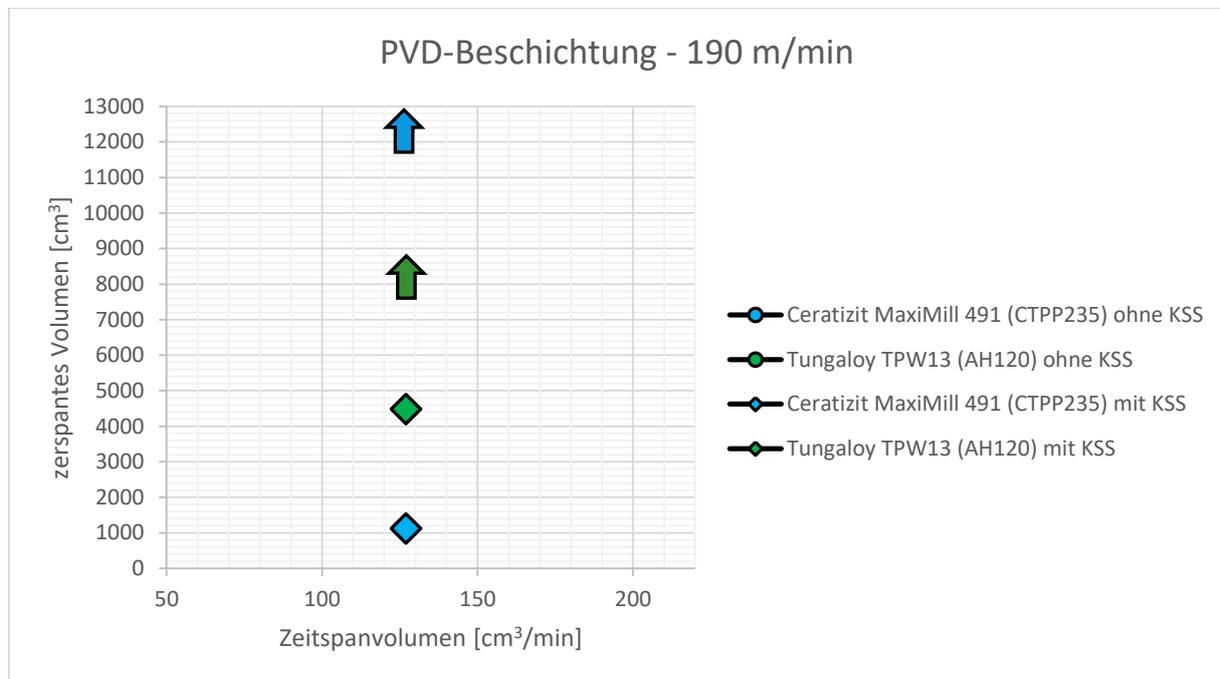


Abbildung 106: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=190\text{m/min}$, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 107 verdeutlicht nochmals die starken Unterschiede der verschiedenen Systeme. So verändern sich die Kosten beim Tungaloy TPW13 beim Einsatz mit und ohne KSS um den Faktor 1,75. Beim Ceratizit MaxiMill 491 verringert sich die Lebensdauer beim Einsatz von KSS drastisch und die Kosten pro zerspanntem Volumen liegen hier um das 11-fache höher als bei der Zerspannung ohne KSS-Zufuhr.

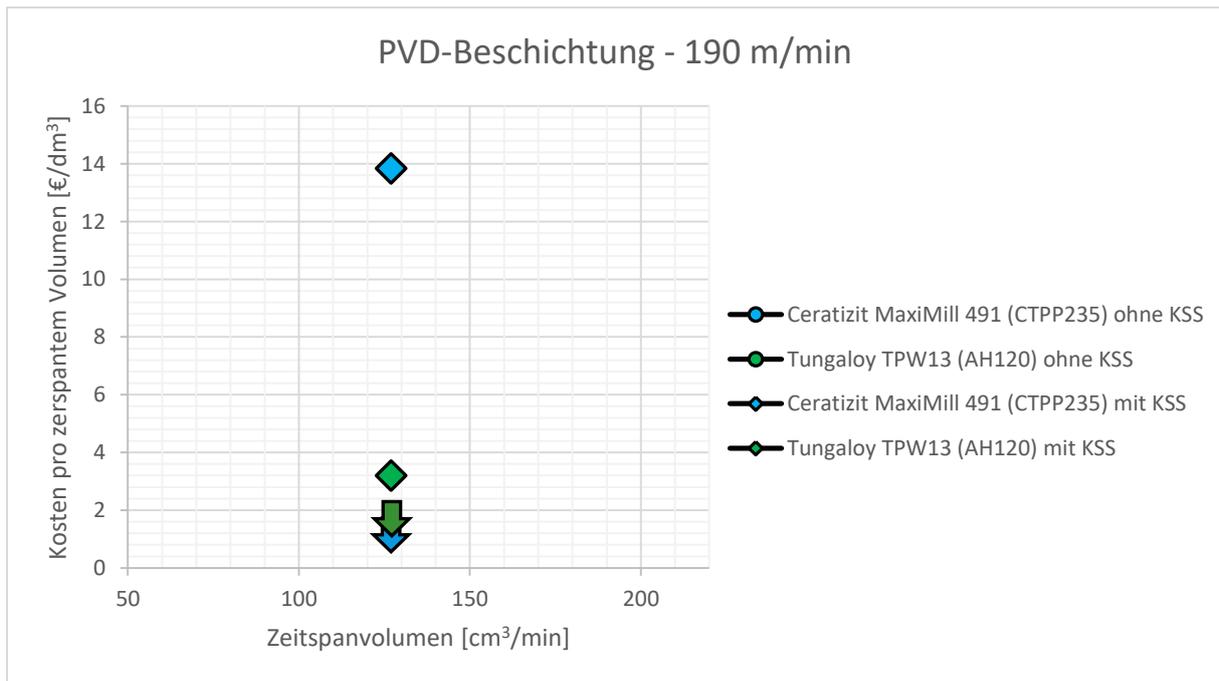


Abbildung 107: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

Die gemessenen Oberflächenrauheiten der erzeugten Werkstückstirflächen liegen bei $v_c=190$ m/min (siehe Abbildung 108) im gleichen Bereich wie bei $v_c=300$ m/min. Dies gilt sowohl für die Bearbeitung mit als auch ohne KSS.

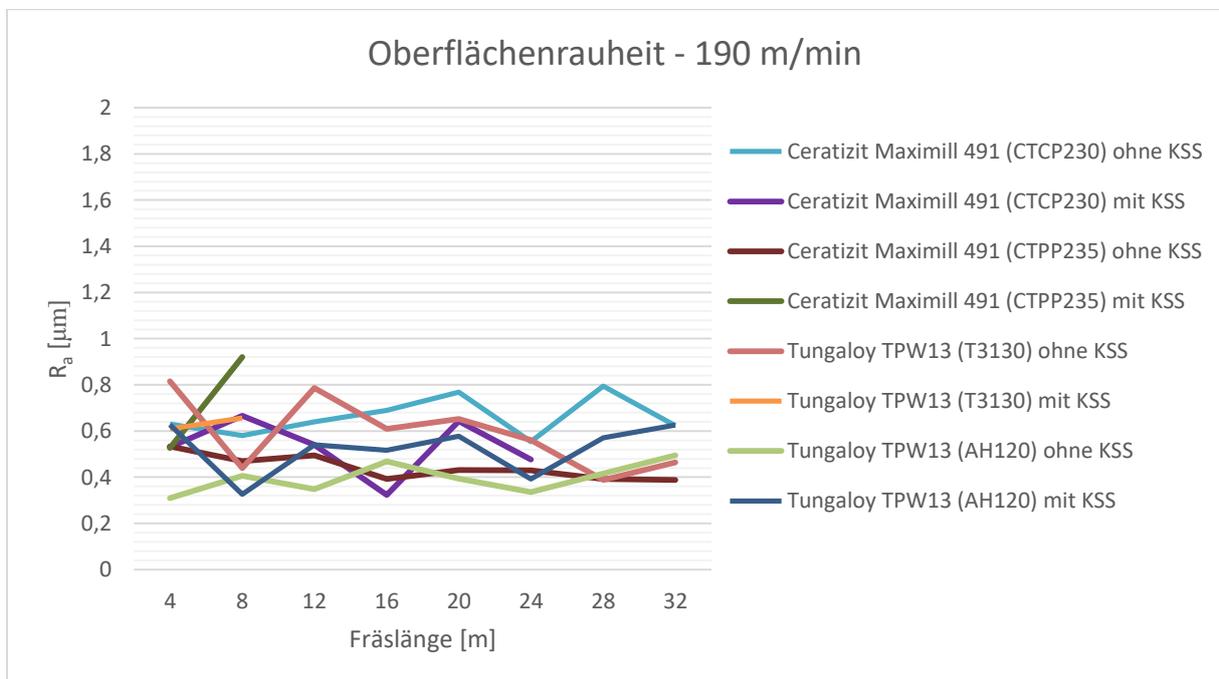


Abbildung 108: Oberflächenrauheit der Werkstückstirfläche bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden unterschiedliche Eckfräser von verschiedenen Herstellern untersucht. Alle Eckfräser sind mit beschichteten Hartmetall-Wendeschnidplatten bestückt. Obwohl die zu erwartenden Leistungen der untersuchten Eckfrässysteme aufgrund der identen Abmessungen und Zähnezahlen bis hin zu ähnlichen Wendeschnidplattengeometrien und den gleichen Beschichtungsverfahren nahe zusammenliegen sollten, zeigen die durchgeführten Versuche ein anderes Bild. Je nach Hersteller erzielen die CVD- oder PVD-beschichteten Wendeschnidplatten höhere Standzeiten und somit ein höheres insgesamt zerspantes Volumen. Somit kann keine Aussage über die bevorzugt anzuwendende Beschichtungsart bei diesen Bearbeitungsbedingungen getroffen werden. Die Verschleißformen bei der Bearbeitung ohne KSS unterscheiden sich abhängig von Hersteller und Beschichtung. Somit kann nicht bei allen Eckfrässystemen die Verschleißmarkenbreite als empfohlene⁷³ und sehr gut zu vergleichende Größe herangezogen werden. Die Verwendung der Verschleißmarkenbreite der Freifläche als Standkriterium gibt auch Astakhov⁷⁴ durch den Einsatz moderner Schneidstoffe und Werkzeuggeometrien als nicht mehr zeitgemäß an. Das Standvermögen wird somit bei ähnlichem Schädigungsausmaß beurteilt. Während es bei keiner CVD-beschichteten Wendeschnidplatte zu einem plötzlichen Schneidenausbruch kommt, treten diese bei den PVD-beschichteten Wendeschnidplatten von Ceratizit und Tungaloy bei Schnittgeschwindigkeiten ab 250 m/min auf. Durch den Zerspanungsprozess findet bei den eingesetzten Wendeschnidplatten keine Schädigung des Substrats oder anderer nicht im Einsatz befindlicher Schneiden statt. Diese Aussage lässt sich dadurch begründen, dass alle nutzbaren Schneiden einer Wendeschnidplatte die gleichen Verschleißmechanismen und die gleiche Performance zeigen. In weiterer Folge bedeutet dies, dass aus wirtschaftlicher Sicht eine Wendeschnidplatte mit höherer Schneidenanzahl zu bevorzugen ist. Auffallend bei den durchgeführten Versuchen waren die Schwierigkeiten einiger Eckfrässysteme beim Abtransport der produzierten Späne nach dem Schnitt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, funktioniert die Spanabfuhr bei der Hälfte der untersuchten Eckfrässysteme nicht mit der gewünschten Eingriffsbreite von 70 % des Fräserdurchmessers. Es kommt zum Einklemmen von Spänen zwischen der Werkstückschulter und dem Fräsergrundkörper. Hierbei sieht man den direkten Zusammenhang zur Spanlänge. So bringt die Reduktion der Schnittgeschwindigkeit keine Verbesserung der Spanabfuhr, sondern nur die Rücknahme der Eingriffsbreite. Eine Verbesserung der Spanabfuhr ist auch beim Einsatz von KSS zu

⁷³ Vgl. International Organization for Standardization (Hrsg.) (1989), S. 12.

⁷⁴ Vgl. Astakhov (2004).

beobachten. In der Literatur finden sich keine Hinweise auf Schwierigkeiten mit der Spanabfuhr bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen. Das Ausbleiben dieses Effekts könnte mit den geringeren erzielten Zeitspanvolumina und den anders gestalteten Versuchslayouts zusammenhängen.^{75 76 77} Obwohl das maximale Zeitspanvolumen bei den Versuchen mit $200,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ deutlich unter den Werten der in der Aluminiumbearbeitung angewendeten Hochvolumenzerspannung (Zeitspanvolumen $> 8000 \text{ cm}^3/\text{min}$) liegt, scheinen bei gegebenen Schnittparametern die Elemente Spanform (durch die Schneidengeometrie hervorgerufen) und Konstruktion des Fräsergrundkörpers und der Spanräume (beeinflusst den Spanauswurf) entscheidend zu sein.^{78 79} Anders als bei Wendeschneidplatten aus unbeschichtetem Hartmetall, wie durch Diniz & Filho⁸⁰ dargestellt, konnte bei den durchgeführten Versuchen mit beschichteten Wendeschneidplatten keine Änderung des vorherrschenden Verschleißes bei unterschiedlichen Eingriffsbreiten (siehe Kapitel 5.1.1.2) beobachtet werden. Bei den eingesetzten beschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten hängt der Verschleißmechanismus bei gleichbleibendem Vorschub je Zahn und konstanter Schnitttiefe nur von der Schnittgeschwindigkeit ab. Anders als durch Paucksch et al.⁸¹ beschrieben, konnte keine Schädigung durch den Erstkontakt zwischen Schneidkante und Werkstück beim Eingriff unter 50% des Fräserdurchmessers festgestellt werden. Dies lässt einen Vergleich zwischen den Eckfrässystemen bei Versuchsanordnungen mit unterschiedlichen Eingriffsbreiten zu. Um die Verschleißmechanismen zu erhalten, welche rein durch die Zerspanung hervorgerufen werden, ist auf Vibrationen der Werkzeugmaschine, die eine Schädigung des Werkzeuges verursachen, besonders zu achten (siehe Kapitel 6.3). Die Schnittparameter sind so zu wählen, dass eine Bearbeitung außerhalb der schwingungsanregenden Frequenzbereiche möglich ist.⁸² Beim Einsatz von KSS kommt es bei jedem untersuchten System unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit zur Kammrissbildung. Diese Verschleißform bei Verwendung von KSS wird auch von Melo et al.⁸³ beobachtet. Bei der Bearbeitung mit KSS verringert sich die Standzeit der Werkzeuge in den durchgeführten Versuchen unabhängig von Hersteller, Beschichtung und Schnittgeschwindigkeit durch den auftretenden Thermoschock immer im Vergleich zur

⁷⁵ Vgl. Ghani, Choudhury & Hassan (2004).

⁷⁶ Vgl. Kopac & Krajnik (2007).

⁷⁷ Vgl. Richetti, Machado, Da Silva, Ezugwu & Bonney (2004).

⁷⁸ Vgl. Emuge-Franken (o.J.), S. 4.

⁷⁹ Vgl. MAPAL Dr. Kress KG (o.J.), S. 8 f.

⁸⁰ Vgl. Diniz & Filho (1999).

⁸¹ Vgl. Paucksch, Holsten, Linß & Tikal (2008), S. 217.

⁸² Vgl. Altintas, Stepan, Merdol & Dombovari (2008).

⁸³ Vgl. Melo, Milan, da Silva & Machado (2006).

Bearbeitung ohne KSS. Dies korreliert mit der Literatur bei Fräsbearbeitung der Vergütungsstähle C22E (Werkstoffnummer: 1.1151)⁸⁴ und C45 (Werkstoffnummer: 1.0503)⁸⁵. Bei der Bearbeitung von schwerer zerspanbaren Werkstoffen wie Nickelbasislegierungen dreht sich dieser Mechanismus jedoch um. Hier erhöht sich die Standzeit beim Einsatz von KSS.⁸⁶ Weder die Schnittgeschwindigkeit, die Beschichtungsart noch der Einsatz von KSS zeigen eine Veränderung der erzeugten Werkstückoberflächenqualität. Diese Beobachtungen können auf den gleichbleibenden Vorschub je Zahn, der den größten Einfluss auf die Oberflächenrauheit hat, zurückgeführt werden.⁸⁷ Weiter verändert sich die Werkstückoberflächenqualität über die Standzeit nicht. Die Spanform hängt bei den durchgeführten Versuchen von der jeweiligen Wendeschneidplattengeometrie ab und ist unabhängig von der eingesetzten Beschichtung. Die Anlauffarben der Späne unterscheiden sich je nach untersuchtem Eckfrässystem und gewählter Schnittgeschwindigkeit. Beim Einsatz von KSS kommt es zu einem Ausbleiben der Anlauffarben und das Spanende ist von Gleitvorgängen geprägt. Die Vorteile der tangentialen Wendeschneidplattenanordnung, die laut Hersteller⁸⁸ mehr Stabilität und Laufruhe durch einen größeren Materialquerschnitt des Fräsergrundkörpers und fehlende Gewindebohrung im Plattensitz schaffen soll, sind bei den gewählten Versuchsbedingungen nicht zu erkennen.

⁸⁴ Vgl. Vieira, Machado & Ezugwu (2001).

⁸⁵ Vgl. Melo, Milan, da Silva & Machado (2006).

⁸⁶ Vgl. Rodrigues, Hassui, da Silva & Loureiro (2016).

⁸⁷ Vgl. Ghani, Choudhury & Hassan (2004), S. 90.

⁸⁸ Vgl. Tungaloy Corporation (o.J.).

8 Ausblick

8.1 Statistische Versuchsplanung

Um die Abhängigkeit des Standvermögens von den Schnittparametern über den gesamten Einsatzbereich zu zeigen, vorherzusagen und zu vergleichen, wäre eine statistische Versuchsplanung nötig. Der Aufwand würde hierbei drastisch steigen. Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan⁸⁹ würde sich pro Eckfrässystem ein Versuchsaufwand von 27 Versuchen bei den drei auftretenden Faktoren Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe, mit jeweils drei Stufen (niedrig, mittel, hoch), ergeben. Eine Verringerung dieses Versuchsaufwandes würde der Einsatz eines Central-Composite-Designs⁹⁰ bringen. Die Anzahl der benötigten Versuche je Eckfrässystem könnte durch diese Methode auf 15 reduziert werden.

8.2 Tool Condition Monitoring

Um die Wirtschaftlichkeit von Zerspanungswerkzeugen zu steigern, ist es notwendig ein Werkzeug bis zum gewünschten Verschleißmaximum einzusetzen. Dies gelingt aber nur dann, wenn der Status des Verschleißes bekannt ist und das Werkzeug vor Beschädigung und Ausfall oder bei erreichter Verschleißgrenze zur optimalen Zeit getauscht wird. Somit ist eine indirekte Werkzeugüberwachung während der Fertigung innerhalb der Maschine notwendig. Diese Online-Überwachung wird als Tool Condition Monitoring bezeichnet. Prickett & Johns sowie Siddhpura & Paurobally haben die Ergebnisse der Ansätze zum Tool Condition Monitoring zusammengefasst:^{91 92}

Ein System für die indirekte Echtzeitüberwachung des Werkzeugzustandes besteht aus drei Ebenen. Zuerst nehmen Sensoren messbare Größen auf. Am häufigsten werden Schnittkräfte, Vibrationen, Schallemissionen und Geräusche genutzt. Diese Sensorsignale werden aufbereitet, verstärkt, gefiltert und digitalisiert. In weiterer Folge werden die Signale einer Merkmalsextraktion unterzogen, bei denen Merkmale gefiltert werden, die bekannt einem Verschleißsignal zugeordnet werden können. Diese Signale werden nun in ein Computerprogramm weitergeleitet, das über Algorithmen auf den Zustand des Werkzeuges

⁸⁹ Vgl. Siebertz, van Bebber & Hochkirchen (2010), S. 6.

⁹⁰ Vgl. Siebertz, van Bebber & Hochkirchen (2010), S. 38 ff.

⁹¹ Vgl. Prickett & Johns (1999).

⁹² Vgl. Siddhpura & Paurobally (2013).

schließen kann. Bei jeder der drei Stufen gibt es Herausforderungen, die noch zu lösen sind. Am Anfang steht die richtige Wahl der zu messenden Größe. Schnittkräfte reagieren sehr unempfindlich auf Werkzeugverschleiß. Weiter verschlechtert sich die Steifigkeit der Aufspannung durch die Kraftmessplatte am Maschinentisch oder die Steifigkeit des Werkzeuges durch den Einsatz eines Werkzeughalters mit Kraftmesshardware. Bei den Messungen der Vibrationen zeigen sich gute Ergebnisse, jedoch ist es nicht einfach zu beurteilen, ob sich das Signal aufgrund des Werkzeugverschleißes oder wegen der Änderung der Bearbeitungsbedingungen (Schnittparameter, Einspannung, Wandstärke) verändert. Gerade beim Fräsprozess, der durch den unterbrochenen Schnitt bestimmt wird, ist eine Interpretation des Signals schwierig. Das Problem des unterbrochenen Schnittes tritt auch bei der Messung der Schallemissionen auf. Hierbei ist besonders die Filterung der Signale entscheidend, um die typischen Schockwellen, die bei plastischer Verformung des Materials entstehen, aufnehmen zu können. Der Ansatz, den Verschleiß akustisch, d.h. über die Veränderung des Bearbeitungsgeräusches, zu beurteilen, zeigt unter Laborbedingungen gute Ergebnisse, lässt sich aber in industrieller Umgebung durch das Vorhandensein vieler Nebengeräusche schwer umsetzen. Bei der zweiten Stufe, der Extraktion der Merkmale, müssen die mit dem Verschleiß korrelierenden Sensorsignale in Echtzeit aufgenommen werden. Dies bedingt ein genaues Kennen des Aussehens der Signale, die dem Verschleiß zugeordnet sind und eine hohe Rechnerleistung. In der letzten Stufe werden schließlich diese Verschleißsignale und ihre Auswirkung auf den Werkzeugzustand interpretiert. Der Trend geht dazu, mehrere Größen (z. B. Schnittkräfte, Vibrationen und Schallemissionen) zu messen und die Signale in der letzten Stufe mittels neuronaler Netzwerke und Fuzzylogik zu beurteilen.

Literaturverzeichnis

- Alicona Imaging GmbH. (o.J.). *Alicona Focus Variation*.
- Altintas, Y., Stepan, G., Merdol, D., & Dombovari, Z. (2008). Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, pp. 35-44.
- Astakhov, V. P. (2004). The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, pp. 637-647.
- Berthold Hermle AG. (o.J.). *C 52*.
- Ceratizit Group. (2016a). *Gesamtprogramm Cutting Tools 2016*.
- Ceratizit Group. (2016b). *Programmergänzungen Cutting Tools 2016.2*.
- Czettel, C. (2013). *PhD Thesis - Design of CVD Coatings for Cutting Tools*. Leoben.
- Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2016). Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. *Measurement*, pp. 111-119.
- Denkena, B., & Tönshoff, H. K. (2011). *Spanen*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). (1981). *Begriffe der Zerspantechnik; Standbegriffe (DIN 6583:1981)*.
- Diniz, A. E., & Filho, J. C. (1999). Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. *Wear*, pp. 67-75.
- Emuge-Franken. (2004). *Handbuch der Gewindetechnik und Frästechnik*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing.
- Emuge-Franken. (o.J.). *Franken Alu-Cut - Volumenzerspanung in Aluminiumwerkstoffen*.
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 84-92.
- Heisel, U., Klocke, F., Uhlmann, E., & Spur, G. (2014). *Handbuch Spanen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Ingersoll Werkzeuge GmbH. (2016). *Fräs- und Bohrwerkzeuge*.
- International Organization for Standardization (Hrsg.). (1989). *Tool life testing in milling - Part 1: Face milling (ISO 8688-1:1989)*.
- ISCAR Germany GmbH. (2011). *Produktinformation HELIDO S890-Plan-Eckfräser*.
- Klocke, F., & Wilfried, K. (2008). *Fertigungsverfahren 1*. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Kopac, J., & Krajnik, P. (2007). Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 400-403.
- Mahr GmbH. (o.J.). *Mahrsurf M 300*.

- MAPAL Dr. Kress KG. (o.J.). *Werkzeuge für moderne Leichtbauwerkstoffe*.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Norwich: William Andrew.
- Mehrban, M., Naderi, D., Panahizadeh, V., & Moslemi Naeini, H. (2008). Modelling of Tool Life in Turning Process Using Experimental Method. *International Journal of Material Forming*, pp. 559-562.
- Melo, A. C., Milan, J. C., da Silva, M. B., & Machado, A. R. (2006). Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 269-277.
- Paucksch, E., Holsten, S., Linß, M., & Tikal, F. (2008). *Zerspantechnik - Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Pekelharing, A. J. (1984). The Exit Failure of Cemented Carbide Face Milling Cutters Part I - Fundamentals and Phenomena. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 33, pp. 47-50.
- Perovic, B. (2013). *Vorrichtungen im Werkzeugmaschinenbau - Grundlagen, Berechnung und Konstruktion*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Prickett, W. P., & Johns, C. (1999). An overview of approaches to end milling tool monitoring. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 105-122.
- Richetti, A., Machado, A. R., Da Silva, M. B., Ezugwu, E. O., & Bonney, J. (2004). Influence of the number of inserts for tool life evaluation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, pp. 695–700.
- Rodrigues, M. A., Hassui, A., da Silva, R. H., & Loureiro, D. (2016). Tool life and wear mechanisms during Alloy 625 face milling. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1439-1448.
- Sandvik AB. (2015). *Rotierende Werkzeuge*.
- Schedler, W. (1988). *Hartmetall für den Praktiker*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Schönherr, H. (2002). *Spanende Fertigung*. München Wien: Oldenbourg.
- Seco Tools GmbH. (2016). *Katalog und technischer Guide 2016*.
- Siddhpura, A., & Paurobally, R. (2013). A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 65, pp. 371-393.
- Siebertz, K., van Bebbber, D., & Hochkirchen, T. (2010). *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Taylor, F. W. (1906). *On the Art of Cutting Metals*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Tungaloy Corporation. (2013). *Tungaloy Hauptkatalog*.
- Tungaloy Corporation. (o.J.). *Tangentialfräser für hohes Zeitspannvolumen*.

Verlag moderne Industrie GmbH. (2017). *Werkzeuge Markt 2017*.

Vieira, J. M., Machado, A. R., & Ezugwu, E. O. (2001). Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology* 116, pp. 244-251.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580, Quelle: Heisel et al., 2014, S. 21 (leicht modifiziert).....	5
Abbildung 2: Fräsverfahren nach DIN 8589-3, Quelle: Heisel et al., 2014, S. 402 (leicht modifiziert).....	6
Abbildung 3: Gleich- und Gegenlaufräsen, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 427 (leicht modifiziert).....	6
Abbildung 4: Fräsereingriff, Quelle: Paucksch et al., 2008, S. 217.....	7
Abbildung 5: Berührungspunkte beim Fräseintritt, Quelle: Paucksch et al., 2008, S. 219 (leicht modifiziert).	8
Abbildung 6: Eigenschaften der Schneidstoffe, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 104 (leicht modifiziert).....	9
Abbildung 7: CVD-Beschichtungsanlage, Quelle: Czettl, 2013, S. 2 (leicht modifiziert).	11
Abbildung 8: Lichtbogenverdampfung, Quelle: Emuge-Franken, 2004, S. 137.	12
Abbildung 9: Kathodenzerstäubung, Quelle: Emuge-Franken, 2004, S. 139.	12
Abbildung 10: Verschleißmarkenbreite mit Messgrößen nach DIN ISO 3685, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 93.	14
Abbildung 11: Verschleißvorgänge bei beschichtetem Hartmetall, Quelle: Denkena & Tönshoff, 2011, S. 182.....	15
Abbildung 12: Kolkverschleiß mit Messgrößen nach DIN ISO 3685, Quelle: Klocke & Wilfried, 2008, S. 93.....	15
Abbildung 13: Querrisse und Kammrisse, Quelle: Denkena & Tönshoff, 2011, S. 148.	16
Abbildung 14: Einflüsse auf das Standvermögen, Quelle: Deutsches Institut für Normung, 1981, S. 1.....	17
Abbildung 15: Länge des Eingriffes je Wendeschneidplatte beim Einzahnversuch (a) und bei vollbestückten Fräsern (b), Quelle: Richetti et al., 2004, S. 698.....	18
Abbildung 16: Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit der Bestückung, Quelle: Richetti et al., 2004, S. 697.....	19
Abbildung 17: Ceratizit MaxiMill 491 und SNHU 120408SR-M50 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	23

Abbildung 18: Iscar HELIDO S890 und S890 SNMU 1305PNTR Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	23
Abbildung 19: Seco Square 6 und XNEX 80608TR-M13 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	24
Abbildung 20: Ceratizit MaxiMill 211 und XDKT 11T308SR-M50 Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	24
Abbildung 21: Sandvik CoroMill 390 und R390-11 T3 08M-PM Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	25
Abbildung 22: Tungaloy TPW13 und SWMT1304PDPR-MJ Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	25
Abbildung 23: Tungaloy TPM11 und LMMU110708PNER-MJ Wendeschneidplatten, Quelle: Eigene Darstellung.....	26
Abbildung 24: Ingersoll Gold-Max 8 und SGM-44R001 Wendeschneidplatte, Quelle: Eigene Darstellung.....	26
Abbildung 25: Fräseingriff, Quelle: Eigene Darstellung.....	27
Abbildung 26: Spannungsdicke über den Schnittbogenwinkel, Quelle: In Anlehnung an Paucksch et al., 2008, S. 215.....	27
Abbildung 27: Versuchsaufbau, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abbildung 28: Werkstück mit verbliebenem Steg nach 10 Schnitten je Seite, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Abbildung 29: Oberflächenmessung an der erzeugten Stirnfläche nach Entfernung des Stegs, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Abbildung 30: Schulterzeugende Schneidkante links im Neuzustand und rechts nach 40 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abbildung 31: Stirnflächenerzeugende Schneidkante links im Neuzustand, in der Mitte nach 32 m Fräslänge und rechts nach 40 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abbildung 32: Kontur der stirnflächenerzeugenden Schneidkante mit Fortschritt der Kerbenbildung über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abbildung 33: Verschleiß am Grundkörper, Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Abbildung 34: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit SNHU 120408SR-M50 (CTCP230) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	37

Abbildung 35: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit SNHU 120408SR-M50 (CTPP235) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	38
Abbildung 36: Von Iscar HELIDO S890 erzeugte Schulterform, Quelle: ISCAR Germany GmbH, 2011, S. 4.....	39
Abbildung 37: Ausbruch der Schneidkante nach 6,8 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abbildung 38: Späne Iscar HELIDO S890 mit S890 SNMU 1305PNTR (IC 5400) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	39
Abbildung 39: Im linken Bild die erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und die hergestellte Stirnfläche und im rechten Bild der Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.	40
Abbildung 40: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (MP2500) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 41: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (MP2500) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=27,5$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	41
Abbildung 42: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke von links nach rechts nach 24, 32, 40, 48, 56 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Abbildung 43: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Abbildung 44: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke und Kammrissbildung nach 14,8 m Fräslänge im Detail, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abbildung 45: Erzeugte Schulterfläche, Quelle: Eigene Darstellung.....	42
Abbildung 46: Späne Seco Square 6 mit XNEX 080608TR-M13 (F40M) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=27,5$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abbildung 47: Erzeugte Schulter im linken Bild und Endkerbe an schultererzeugender Schneidkante nach 40 m Fräslänge im rechten Bild, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abbildung 48: Späne Ceratizit MaxiMill 211 mit XDKT 11T308SR-M50 (CTCP230) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abbildung 49: Verschleiß am Grundkörper, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Abbildung 50: Späne Ceratizit MaxiMill 211 mit XDKT 11T308SR-M50 (CTPP230) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	44

Abbildung 51: Vergleich der Spanauswurfrihtung zwischen Sandvik CoroMill 390 (links) und Ceratizit MaxiMill 491 (rechts) , Quelle: Eigene Darstellung.....	45
Abbildung 52: Erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Abbildung 53: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (4230) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Abbildung 54: Kantenabrundung von links nach rechts nach 16, 24, 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Abbildung 55: Freiflächenverschleiß an der schultererzeugenden Schneidkante über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	47
Abbildung 56: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (4230) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 15$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 57: Ecke im linken Bild im Neuzustand und im rechten Bild mit Verschleiß nach 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Abbildung 58: Erzeugte Schulter, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Abbildung 59: Späne Sandvik CoroMill 390 mit R390-11 T3 08M-PM (1030) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 15$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Abbildung 60: links: Kammrissbildung nach 8 m, rechts: Freiflächenverschleiß an der Schneidenecke nach 12 m bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Abbildung 61: Erzeugte Schulter mit Austritt bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Abbildung 62: Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32 m Fräslänge bei $v_c = 190$ m/min.....	50
Abbildung 63: Späne Tungaloy TPW13 mit SWMT1304PDPR-MJ (T3130) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Abbildung 64: Schneidenausbruch im linken Bild und intakte Wendeschneidplatte im rechten Bild nach gleicher Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abbildung 65: Erzeugte Schulter bei $v_c = 300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.....	51
Abbildung 66: Kantenabrundung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abbildung 67: Späne Tungaloy TPW13 mit SWMT1304PDPR-MJ (AH120) bei $v_c = 300$ m/min und $a_e = 35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	52

Abbildung 68: Erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abbildung 69: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (T3130) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Abbildung 70: Freiflächenverschleiß und Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abbildung 71: Freiflächenverschleiß und Kammrissbildung von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abbildung 72: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (T3130) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 73: Schneidenausbruch nach 20 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 74: Späne Tungaloy TPM11 mit LMMU110708PNER-MJ (AH725) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 75: Erzeugte Schulter mit verschweißten Spänen und Fräsergrundkörper mit Verschleiß, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abbildung 76: Späne Ingersoll Gold-Max 8 mit SGM-44R001 (IN4030) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=35$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abbildung 77: Späne Ingersoll Gold-Max 8 mit SGM-44R001 (IN4030) bei $v_c=300$ m/min und $a_e=20$ mm, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abbildung 78: Kantenabrundung von links nach rechts nach 8, 16, 24, 32 m Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abbildung 79: Kontur der schultererzeugenden Schneidkante mit Fortschritt der Kantenabrundung über die Fräslänge, Quelle: Eigene Darstellung.....	56
Abbildung 80: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abbildung 81: Verschleiß von links nach rechts nach 8, 16, 24 m Fräslänge bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abbildung 82: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 2,8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abbildung 83: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	58

Abbildung 84: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abbildung 85: Durch Kammrise bestimmtes Profil der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abbildung 86: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abbildung 87: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 5,6 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abbildung 88: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abbildung 89: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 4 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abbildung 90: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 8 m Fräslänge bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abbildung 91: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 12 m Fräslänge bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abbildung 92: Verschleiß der schultererzeugenden Schneidkante nach 32 m Fräslänge bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abbildung 93: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	63
Abbildung 94: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Abbildung 95: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abbildung 96: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abbildung 97: Oberflächenrauheit der Werkstückstirnfläche bei $v_c=300$ m/min ohne KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	66
Abbildung 98: Späne Ceratizit MaxiMill 491 ohne KSS bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	66
Abbildung 99: Späne Ceratizit MaxiMill 491 mit KSS bei $v_c=300$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	67

Abbildung 100: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abbildung 101: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.....	68
Abbildung 102: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abbildung 103: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=300$ m/min mit KSS, Quelle: Eigene Darstellung.....	69
Abbildung 104: Spanvolumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abbildung 105: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen CVD-Beschichtung bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abbildung 106: Spanvolumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	71
Abbildung 107: Kosten pro zerspantem Volumen und Zeitspanvolumen PVD-Beschichtung bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abbildung 108: Oberflächenrauheit der Werkstückstirnfläche bei $v_c=190$ m/min, Quelle: Eigene Darstellung.	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikationen Ceratizit MaxiMill 491	23
Tabelle 2: Spezifikationen Iscar HELIDO S890.....	23
Tabelle 3: Spezifikationen Seco Square 6	24
Tabelle 4: Spezifikationen Ceratizit MaxiMill 211	24
Tabelle 5: Spezifikationen Sandvik CoroMill 390	25
Tabelle 6: Spezifikationen Tungaloy TPW13	25
Tabelle 7: Spezifikationen Tungaloy TPM11.....	26
Tabelle 8: Spezifikationen Ingersoll Gold-Max 8	26
Tabelle 9: Parameter zur Schnittkraftberechnung bei $v_c = 300$ m/min	29

Anhang A

Durchgeführte Fräsversuche:

Versuch Nr.	Frässystem	Wendeschneidplatte	Beschichtung	v_c [m/min]	a_e [mm]	# Schnitte	Fräslänge [m]
Versuche ohne Kühlschmierstoff							
1	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	250	35	80	32
2	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	CVD	250	35	40	16
3	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	300	35	100	40
4	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	CVD	300	35	100	40
5	Iscar HELIDO S890	S890SNMU1305PNTR	CVD	300	35	17	6,8
6	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	CVD	300	35	3	1,2
7	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	CVD	250	35	3	1,2
8	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	CVD	220	35	3	1,2
9	Sandvik CoroMill 390	R390-11T308M-PM	CVD	300	35	5	2
10	Sandvik CoroMill 390	R390-11T308M-PM	CVD	250	35	5	2
11	Sandvik CoroMill 390	R390-11T308M-PM	CVD	220	35	3	1,2
12	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	300	35	34	13,6
13	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	300	35	30	12
14	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	250	35	60	24
15	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	250	35	18	7,2
16	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	250	35	20	8
17	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	300	20	40	16

18	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	PVD	300	35	60	24
19	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	PVD	300	35	20	8
20	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	PVD	250	35	20	8
21	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	350	35	5	2
22	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	400	35	10	4
23	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	CVD	300	35	30	12
24	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	PVD	300	35	12	4,8
25	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	PVD	300	35	40	16
26	Tungaloy TPM11	LMMU110708PNER-MJ	CVD	300	35	2	0,8
27	Tungaloy TPM11	LMMU110708PNER-MJ	CVD	300	20	60	24
28	Tungaloy TPM11	LMMU110708PNER-MJ	PVD	300	20	50	20
29	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	CVD	300	27,5	140	56
30	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	PVD	300	27,5	37	14,8
31	Sandvik CoroMill 390	R390-11T308M-PM	CVD	300	15	80	32
32	Sandvik CoroMill 390	R390-11T308M-PM	PVD	300	15	80	32
33	Ingersoll Gold-Max 8	SGM-44R001	PVD	300	35	2	0,8
34	Ingersoll Gold-Max 8	SGM-44R001	PVD	300	20	80	32
35	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	150	35	8	3,2
36	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	CVD	150	35	2	0,8
37	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	180	35	10	4
38	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	190	35	80	32

39	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	190	35	80	32
40	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	CVD	190	35	80	32
41	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	PVD	190	35	80	32
Versuche mit Kühlschmierstoff							
42	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	CVD	300	35	30	12
43	Seco Square 6	XNEX080608TR-M13	PVD	300	35	20	8
44	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	300	35	20	8
45	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	300	35	7	2,8
46	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	CVD	300	35	14	5,6
47	Ceratizit MaxiMill 211	XDKT11T308SR-M50	PVD	300	35	20	8
48	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	CVD	300	35	10	4
49	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	PVD	300	35	30	12
50	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	CVD	190	35	60	24
51	Ceratizit MaxiMill 491	SNHU120408SR-M50	PVD	190	35	20	8
52	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	CVD	190	35	20	8
53	Tungaloy TPW13	SWMT1304PDPR-MJ	PVD	190	35	80	32