



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Fräsbearbeitung von Wolframcarbid- Kobalt-Hartmetall mit CVD-D Diamantwerkzeugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI) unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Stephan Krall

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Luka Filipović B.Sc.

████████████████████

██

████████████████

St. Pölten, im September 2022

Luka Filipović

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

St. Pölten, im September 2022

Luka Filipović

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Vielen Dank an Herrn Stephan Krall und Herrn Dominik Strasser für die fachliche Betreuung der Diplomarbeit. Einen wichtigen Beitrag leistete auch Herr Jens Brier bei der Einschulung an der Maschine mit seinem umfassenden fachlichen Wissen im Bereich des Schleifens. Weiters möchte ich mich bei Herrn Yilmaz Güzel bedanken, der mir während unseres Studiums eine große Stütze war. Nicht zuletzt gebührt ein ganz spezieller Dank meiner Familie und meiner Freundin für die bedingungslose Unterstützung während meines Studiums.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von Fräsversuchen an einem Hartmetallwerkstück die optimale Bearbeitungsparameter für die spanende Bearbeitung von Hartmetallen zu ermitteln. Bei den untersuchten Parametern handelt es sich um die Schnittgeschwindigkeit, die Vorschubgeschwindigkeit, die Drehzahl, die Schnitttiefe sowie die Fräserüberdeckung. Des Weiteren wurden die Zerspankräfte, der Verschleiß und die Oberflächenrauheiten analysiert und ausgewertet. Die herkömmliche Vorgehensweise bei der Bearbeitung von Hartmetallen bezieht sich auf die Grünlingsbearbeitung vor dem Sintern sowie auf das Schleifen bzw. das Erodieren danach. Mittels der Fräsbearbeitung können die Nachbearbeitungskosten sowie die Bearbeitungsdauer stark reduziert werden, sodass die erzeugten Werkstücke wirtschaftlicher hergestellt werden können.

Bei der Analyse der Fräsparameter haben sich einige Werte ergeben, die äußerst vielversprechend sind. So konnte die Bearbeitungsdauer beim Hauptversuch im Vergleich zum Schleifprozess um das ca. 30-fache reduziert werden. Anstatt 15 h, die der Schleifprozess für die zu bearbeitende Fläche üblicherweise benötigt, wurden beim Fräsen für ein Spanvolumen von 500 mm^3 nur ca. 31 min benötigt. Außerdem wurden Oberflächenrauheiten von $R_a \leq 0,4 \text{ }\mu\text{m}$ und $R_z \leq 3 \text{ }\mu\text{m}$ erreicht, was eine weitere Nachbearbeitung vereinfacht. Es konnte gezeigt werden, dass die spanende Bearbeitung von Hartmetallen mit geeigneten Parametern möglich ist und immense Vorteile in Bezug auf Bearbeitungsdauer und Oberflächengüte hat.

Abstract

This work aims to determine optimum machining parameters for the machining of hard metals by means of milling tests on a hard metal workpiece. The investigated parameters are cutting speed, feed rate, rotational speed, depth of cut and cutting overlap. The conventional approach to machining hard metals refers to green machining before sintering and grinding or eroding afterwards. Furthermore, cutting forces, wear and surface roughness were analysed and evaluated. By means of milling, the post-machining costs as well as the machining times can be significantly reduced, which makes the produced workpieces more economical.

During the analysis of the milling parameters, some parameters turned out to be extremely promising. For example, the machining time for the main test was reduced by a factor of about 30 compared to the grinding process. Instead of 15 h required by the grinding process for the surface to be machined, only approx. 31 min were required for milling, for a chip volume of 500 mm³. In addition, surface roughness of $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$ and $R_z \leq 3 \mu\text{m}$ were achieved, which virtually eliminates the need for further reworking. It could be shown that the machining of hard metals with appropriate parameters is possible and has immense advantages in terms of machining times and surface quality.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Hartmetall	3
2.1.1	Hartmetallsorten	7
2.1.2	Hartmetalleigenschaften	9
2.1.3	Komponenten der Hartmetalle und ihre Eigenschaften	13
2.2	Strategien zur Hartmetallbearbeitung	13
2.2.1	Grünlingsbearbeitung von Hartmetallen	14
2.2.2	Hartmetallbearbeitung mittels funkenerosivem Abtragen	15
2.2.3	Hartmetallbearbeitung mittels Schleifen	17
2.2.4	Schwingungsunterstütztes Hartmetallzerspanen	18
2.3	Anforderungen an die Hartmetallzerspanung	20
2.3.1	Schneidstoffe für die Hartmetallzerspanung	20
2.3.2	Maschinenanforderungen für die Hartmetallzerspanung	22
2.3.3	Schnittdaten für die Zerspanung von Hartmetallen	23
2.3.4	Weitere Einflussfaktoren bei der Zerspanung von Hartmetallen	23
2.3.5	Grenzen der Hartmetallzerspanung	23
3	Zielsetzung	25
4	Methodische Vorgehensweise	26
4.1	Bearbeitungsstrategie	27
4.1.1	Verwendetes Material	28
4.1.2	Verwendete Maschine	30
4.1.3	Für den Fräsversuch verwendete Werkzeuge	30
4.1.4	Für den Schleifversuch verwendete Werkzeuge	33
4.2	Auswertemethoden	34
4.2.1	Auswertemethoden der Zerspankräfte	34
4.2.2	Auswertemethoden zur Bestimmung der Oberflächenrauheiten	35
4.2.3	Auswertemethoden zur Verschleißmessung	37
5	Zerspanungsversuche	39
5.1	Bearbeitungsstrategie	39

5.2	Beschreibung des Versuchsablaufs	41
5.3	Versuchsaufbau	42
5.4	Fräsversuche	46
5.4.1	Bearbeitungsablauf.....	46
5.4.2	Schnittparameter	47
5.5	Schleifversuche.....	49
5.5.1	Bearbeitungsablauf.....	49
5.5.2	Schnittparameter	50
6	Ergebnisse	52
6.1	Ergebnisse der Fräsversuche	52
6.1.1	Ergebnisse der Kraftmessungen	52
6.1.2	Rauheitsanalysen der drei Schnitttiefen	55
6.1.3	Verschleißanalysen der Fräswerkzeuge.....	61
6.1.4	Ermittlung der optimalen Bearbeitungsparameter	65
6.2	Ergebnisse aus den Schleifversuchen	67
6.2.1	Ergebnisse der Kraftmessungen	67
6.2.2	Rauheitsanalysen der drei Schnitttiefen	67
6.3	Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifbearbeitung	73
6.3.1	Bearbeitungsdauer der Fräs- und Schleifbearbeitung	73
6.3.2	Gegenüberstellung des Zeitspanvolumens bei der Fräs- und der Schleifbearbeitung.....	75
6.3.3	Oberflächengüten der Fräs- und Schleifbearbeitung.....	76
6.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	78
7	Zusammenfassung und Ausblick	84
7.1	Zusammenfassung.....	84
7.2	Ausblick.....	85
	Literaturverzeichnis	86
	Abbildungsverzeichnis.....	89
	Tabellenverzeichnis.....	93

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
Co	Kobalt
CVD	Chemical Vapor Deposition
d.h.	das heißt
et al.	und andere
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
HIP	heißisostatisches Pressen
HM	Hartmetall
HV	Härte nach Vickers
i.d.R	in der Regel
IFT	Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
inkl.	inklusive
min	Minuten
MKD	monokristalliner Diamant
Mo	Molybden
MTM	Methods-Time Measurement
Nb	Niob
NC	Numerical Control
ND	Naturdiamant
Ni	Nickel
PCBN	polykristallines kubisches Bornitrid
PKD	polykristalliner Diamant
Sek.	Sekunden
Std.	Stunden
Stk.	Stück
Ta	Tantal
TiC	Titankarbid
TiN	Titannitrid
VAM	vibrationsunterstützte Bearbeitung
vgl.	vergleiche
WC	Wolframcarbid
wt%	Gewichtsprozent
z.B.	zum Beispiel

Symbolverzeichnis

a_e	Schnittbreite	mm
a_p	Schnitttiefe	mm
E	E-Modul	kN/mm ²
f	Vorschub	mm
F_f	Vorschubkraft	N
F_{fN}	Vorschubnormalkraft	N
f_n	Vorschub pro Umdrehung	mm/U
F_p	Passivkraft	N
F_x	Kraftkomponente in x-Richtung	N
F_y	Kraftkomponente in y-Richtung	N
f_z	Zahnvorschub	mm
i	Anzahl der Schnitte	
K_{Ic}	Bruchzähigkeit	MPa*m ^{1/2}
L	Arbeitsweg	mm
n	Drehzahl	U/min
Q	Zerspanvolumen	mm ³ /min
R_a	Mittenrautiefe	μm
R_z	Rautiefe	μm
t_h	Hauptzeit	s
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
$\sigma_{B,R}$	Biegebruchfestigkeit	N/mm ²
σ_D	Druckfestigkeit	N/mm ²
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K
ρ	Dichte	kg/dm ³

1 Einleitung

Hartmetalle lassen sich heutzutage aufgrund ihrer Härte und Zähigkeit als Werkzeuge für die Bearbeitung von Halbzeugen und Fertigzeugen nicht mehr wegdenken. Durch die Gleichmäßigkeit des Gefüges infolge der pulvermetallurgischen Herstellung, ihrer hohen Härte, Druckfestigkeit sowie Warmverschleißfestigkeit werden sie anderen Schneidstoffen oft vorgezogen. Zudem lassen sich Hartmetalle durch die gezielte Änderung des Hartstoff- und Bindemittelanteils mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen [2].

Abbildung 1 zeigt die Verschleißfestigkeit und Härte aufgetragen gegenüber der Zähigkeit und der Biegefestigkeit von Schneidstoffen. Zu erkennen ist, dass Feinkornhartmetalle einem idealen Schneidstoff am nächsten kommen. Der Einsatzbereich von Hartmetallen ist breit gefächert, von Verschleißteilen über die spanlose Formgebung bis hin zur Zerspanung, dem größten Einsatzgebiet mit über 50 % [1, 3].

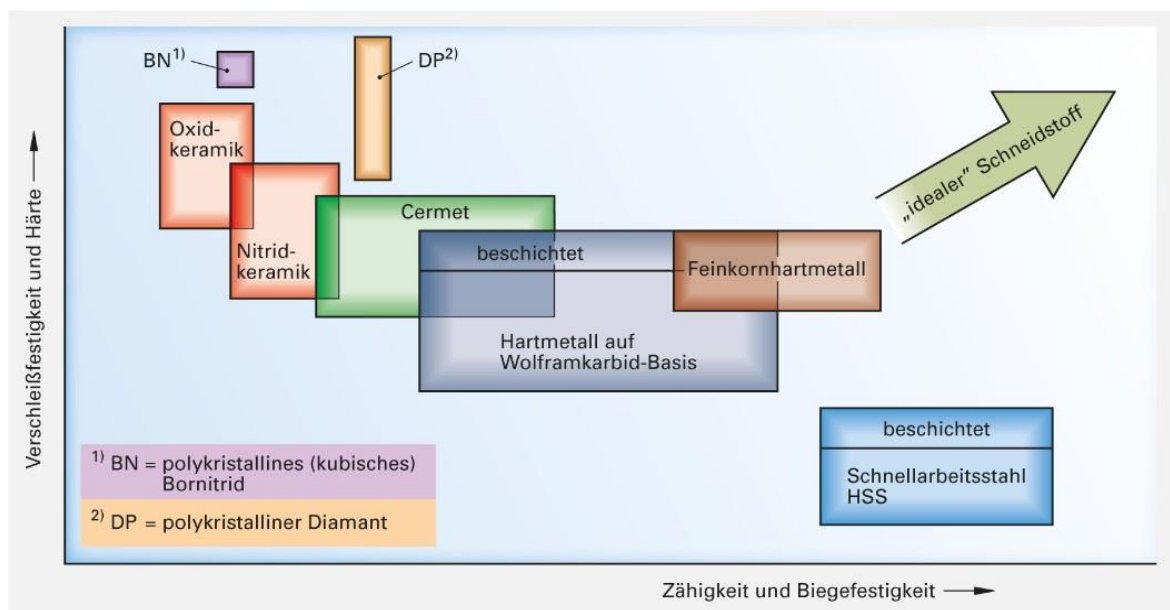


Abbildung 1: Schematische Einteilung der Schneidstoffe nach den Kriterien Verschleißfestigkeit und Zähigkeit [1]

Bei Hartmetallen handelt es sich um Verbundwerkstoffe, welche aus mindestens zwei unterschiedlichen Phasen, dem Hartstoff aus kovalenten Carbiden wie Wolframcarbide (WC) sowie der metallischen Binderphase aus Kobalt (Co), bestehen können [3]. Die Bearbeitung von Hartmetallen erfolgt vorwiegend durch Erodieren oder Schleifverfahren. Jedoch sind diese Verfahren aufgrund der aufwendigen Elektrodenherstellung (Negativformen) und der Nachbearbeitung sehr zeitintensiv, was wiederum zu hohen Gesamtkosten führt. Die spanende Bearbeitung von Hartmetallen mit geometrisch definierter Schneide bietet eine höhere Oberflächenqualität als das Erodieren. Aufnahmen, die unter dem Rasterelektronenmikroskop gemacht wurden, und Querschliffe zeigen, dass beim

Erodieren eine weiße Randschicht mit geringfügigen Beschädigungen entsteht. Sie muss bei einem Nachbehandlungsverfahren wegpoliert werden. Ferner bietet das Fräsen gegenüber dem Schleifen eine hohe Zeitersparnis sowie ein hohes Zeitspanvolumen (siehe Abbildung 2) [4, 6].

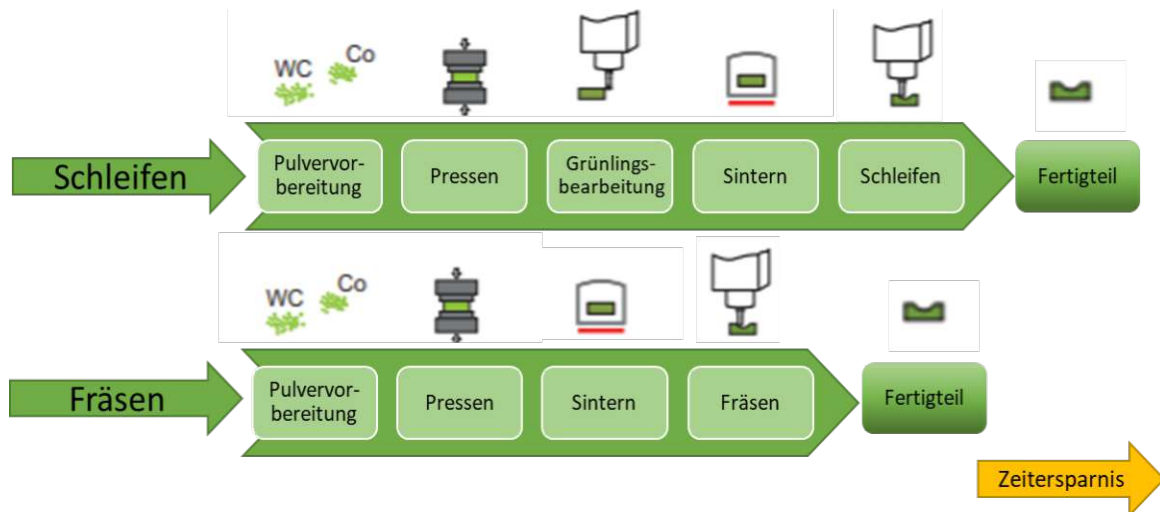


Abbildung 2: Zeitersparnis einer Fräsbearbeitung gegenüber einer typischen Schleifbearbeitung [6]

Die spanende Bearbeitung von Hartmetallen ist infolge der hohen Härte des Werkstoffes eine sehr große Herausforderung. Wie gut ein Hartmetall zerspant werden kann, hängt vom Aufbau sowie vom Anteil der Binderphase und von der durchschnittlichen Korngröße der WC-Körner ab. Überdies hat die Homogenität der Gefügestruktur einen hohen Einfluss auf die Standzeit der Werkzeuge [5, 6]. In Kapitel 2 wird ein Überblick über die Arten von Hartmetallen, die derzeitigen Bearbeitungsstrategien und den Stand der Technik gegeben. So werden nicht nur die Hartmetallsorten und ihre Eigenschaften, sondern auch die Schneidstoffe, mit denen sie zerspant werden können, beschrieben. Um Hartmetalle wirtschaftlich zerspant zu können, müssen Werkzeugmaschinen bestimmte Anforderungen, wie etwa eine hohe Präzision und Steifigkeit sowie eine hohe Dämpfung erfüllen. Für den praktischen Teil dieser Arbeit werden Vorversuche zur Ermittlung der optimalen Fräsparameter sowie Schleifversuche zur Gegenüberstellung durchgeführt. Dabei werden die Zerspankräfte, die Oberflächenrauheiten und der Verschleiß untersucht. Ferner wird der wirtschaftliche Aspekt anhand eines Standzeitversuchs untersucht.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über das Thema der Hartmetallzerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide gegeben. Es werden die Erzeugung von Hartmetall und die beeinflussenden Parameter, die für die typischen Merkmale des Verbundstoffes stehen, erläutert. Zudem werden aktuelle Bearbeitungsstrategien wie das Erodieren und Schleifen betrachtet. Außerdem werden die Schneidstoffe, die zur Bearbeitung von Hartmetallen geeignet sind, definiert und die Grenzen der Bearbeitung aufgezeigt.

2.1 Hartmetall

Hartmetall wurde 1923 zum Patent angemeldet und 1927 in Leipzig unter dem Namen „WIDIA“ (**Wie Diamant**) als Hochleistungsschneidstoff vorgestellt. Das war für die damalige Zeit eine revolutionäre Entwicklung, da die zwei- bis dreifachen Schnittgeschwindigkeiten bei den gleichen Spanungsquerschnitten gegenüber dem bis dato verwendeten Schnellarbeitsstahl erreicht werden konnten. Die Auflistung in Tabelle 1 zeigt einige wichtige Meilensteine zur Entwicklung von Hartmetall [2]. Der Trend liegt in den letzten Jahren bei der Entwicklung von Hartmetallen mit Nanokorngrößen, welche für das PCB-Mikrobohren und Stanzwerkzeuge eingesetzt werden. Des Weiteren wird an Hartmetallen mit einem geringen Binderanteil und einem gezielt einstellbaren, inhomogenen Gefügebau geforscht [7].

Tabelle 1: Zeittafel zur Hartmetallentwicklung [2, 7]

1923	Patent für die Herstellung von WC-Co-HM, K. Schröter
1927	Frühjahresmesse Leipzig: 1. WC-Co-Hm Hersteller Krupp, Bezeichnung „WIDIA“
1928	Gründung der Firma Carboloy (General Electric) für den Vertrieb in den USA
1931	WC-TiC-Co-Hartmetall
1934	TiC-Mo ₂ C-Ni (1. Cermet-Generation) Hersteller Plansee, Bezeichnung „Titanit S“
1937	Titanit (Plansee), Böhlerit (Böhler)
1942	Gründung der Firma Coromant (Sandvik)
1968/69	Einführung beschichteter Hartmetalle
1970	Feinstkornhartmetalle
1973	Spinodal-Hartmetall (1. Cermet mit TiN)
seit 1973/74	forcierte Entwicklung der Cermets
1993	Ultrafeinkorn- und nanokristalline Hartmetalle
ab 1993	Forschung an Nanohartmetallen im Bereich von 0,2 µm
heute	Forschung an inhomogenem Gefügebau von Hartmetallen

Hartmetalle werden pulvermetallurgisch hergestellt, wobei der größte Anteil mit etwa 50 - 60 % für spanende Werkzeuge verwendet wird (siehe Abbildung 3). Die Umformtechnik beansprucht etwa 10 - 15 %. Fast 20 % werden im Bergbau sowie im Straßen- und Tunnelbau eingesetzt und der restliche Anteil entfällt auf Sonderanwendungen [8].

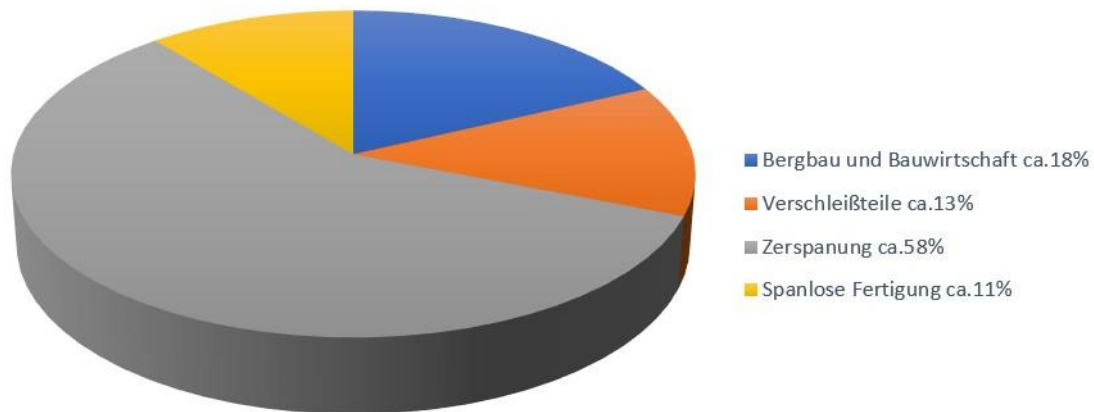


Abbildung 3: Einsatzgebiete für die Verwendung von Hartmetallen [5]

Die pulvermetallurgische Herstellung wird laut DIN 8580 der Kategorie des Urformens zugeordnet, genauer gesagt in das Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand. Das wird aus Abbildung 4 genau ersichtlich. Bei der Hartmetallherstellung wird im Wesentlichen zwischen der direkten und der indirekten Formgebung, der kombinierten Formgebung sowie Sonderverfahren, zu denen das Spritzgießen gehört, unterschieden. Welches der Verfahren angewendet wird, hängt zumeist von der Geometrie und der Stückzahl des zu fertigenden Produktes ab. Etwa zwei Drittel der Hartmetallerzeugnisse werden mittels direkter Formgebung hergestellt. Der Großteil davon entfällt auf Wendeschneidplatten. Komplexe Formteile, die eine geringe Stückzahl haben, wie Kolben, Schnecken, Walzringe etc., werden mittels indirekter Formgebung hergestellt. Bei der indirekten Formgebung sind weitere Bearbeitungsschritte wie das Bohren, das Fräsen, das Trennen oder das Drehen nötig. Die Halbzeuge liegen hierzu in vorgesinterter oder kaltisostatisch gepresster Form vor und sind durch ihre noch kreidige Konsistenz erkennbar [2, 9].

Hauptgruppe

Gruppen

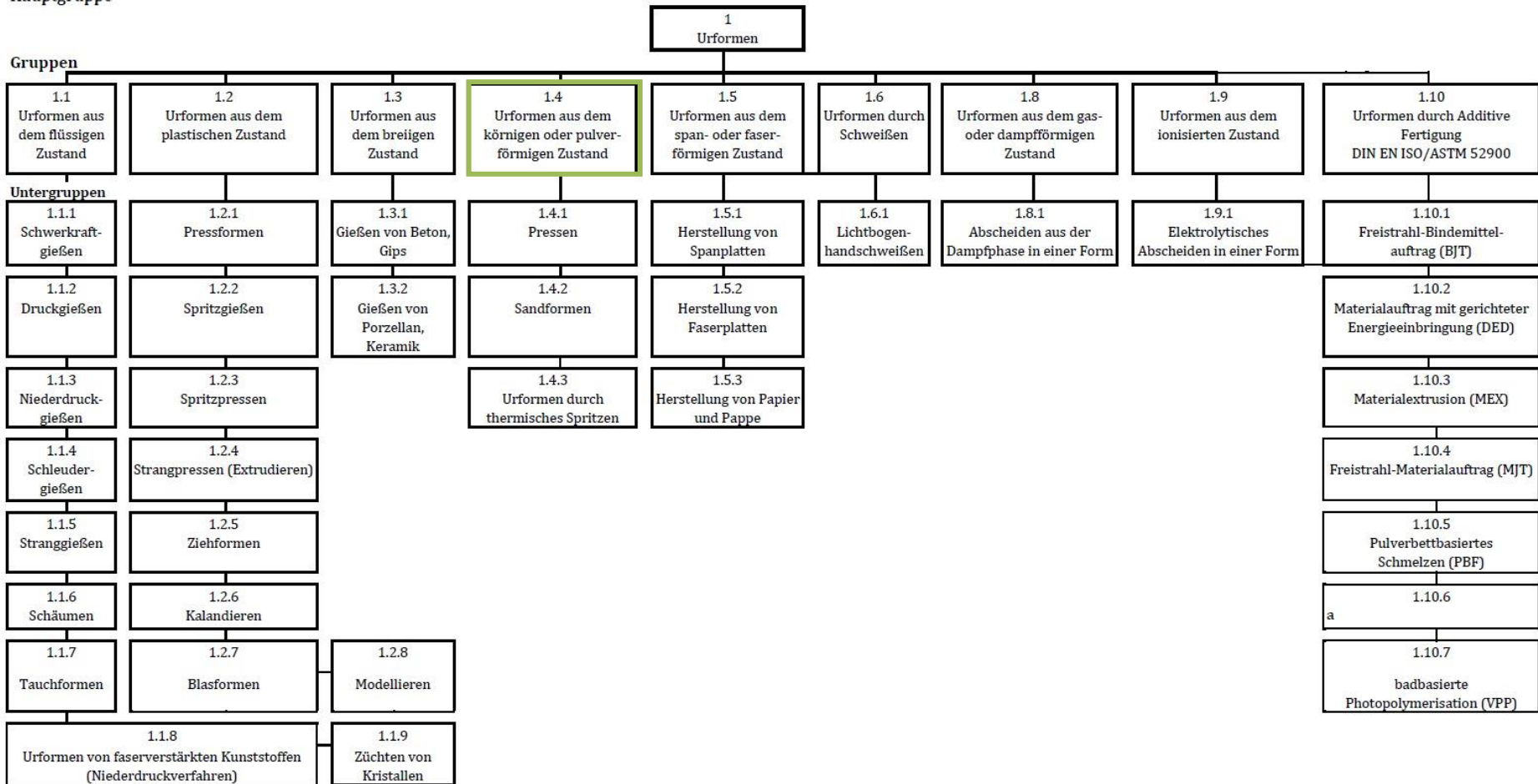


Abbildung 4: Untergruppen des Fertigungsverfahrens „Umformen“ [9]

Abbildung 5 zeigt ein typisches Schema der Hartmetallherstellung. Die einzelnen Komponenten werden in Mixern zu einer Charge homogenisiert. Beim darauffolgenden Nassmahlen dient die Mahlflüssigkeit dem Schutz vor Oxidation und gewährleistet eine optimale Dispergierung aller Komponenten in der Suspension. Nach dem Mahlen werden die Pulvermischungen für die darauffolgenden Formgebungsverfahren, wie z.B. Matrizenpressen, kaltisostatisches Pressen, Strangpressen oder Metall-Pulverspritzgießen noch aufbereitet [2].

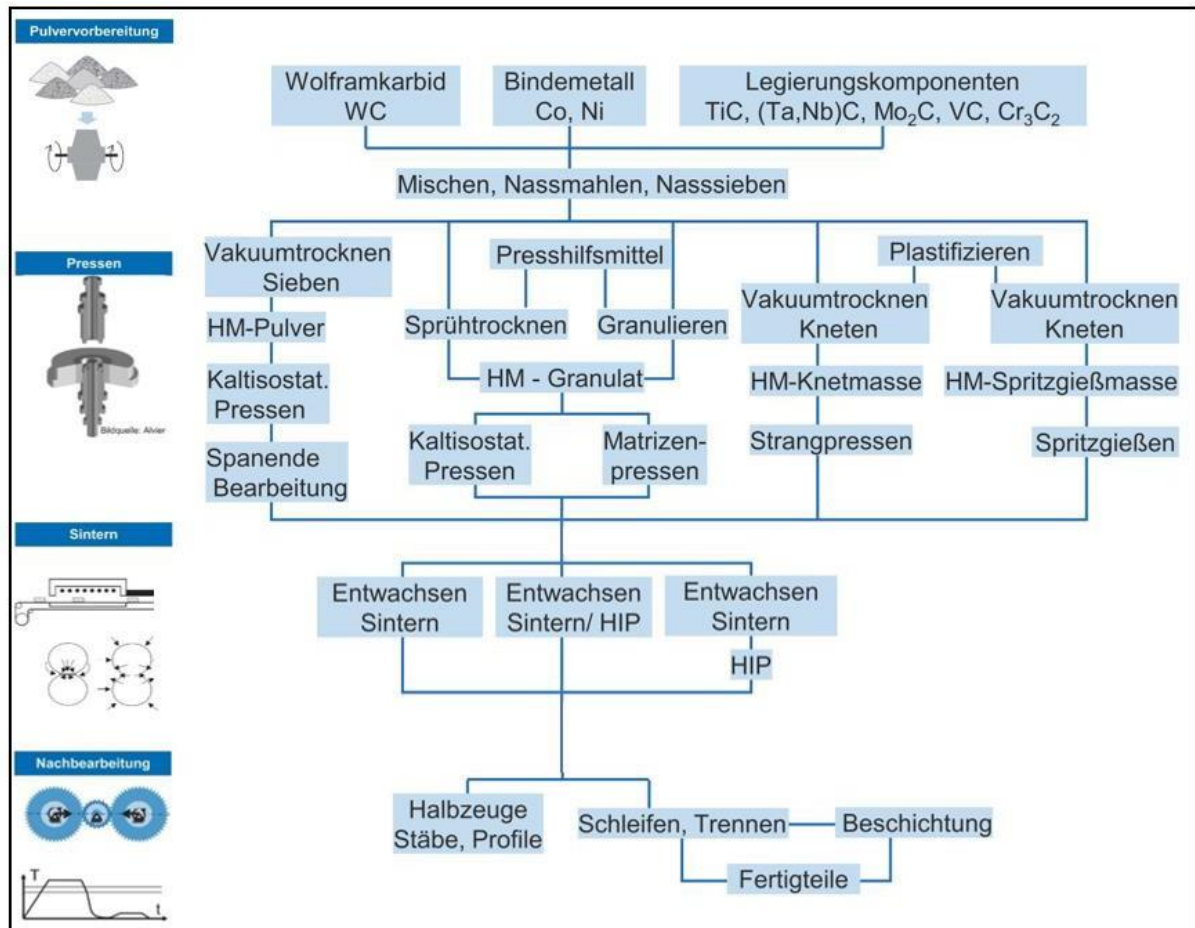


Abbildung 5: Schema zur Hartmetallerzeugung [2, 8]

Der Sintervorgang stellt in der Prozesskette der Hartmetallherstellung einen der wichtigsten Prozessschritte dar, da dem Bauteil hier die für die Funktionsfähigkeit notwendigen mechanisch-technologischen Eigenschaften verliehen werden. Das Sintern gehört nach DIN 8580 zu den Fertigungsverfahren der Stoffeigenschaftsänderung [9]. Unter Sintern wird ein thermisch aktivierter Materialtransport verstanden, bei dem gepresstes sowie lose gebundenes Pulverhaufwerk, auch Grünling oder Pressling genannt, zunehmend verdichtet wird. Das geschieht aufgrund von diffusionsgesteuerten Platzwechselfvorgängen. Dazu zählen die Oberflächen-, die Korngrenzen- sowie die Volumendiffusion. Bei Pulvermischungen mit stark unterschiedlicher Schmelztemperatur können auch flüssige Phasen auftreten. Zumeist treten beide Zustände in einem Sintervorgang

nebeneinander auf [8]. Der Schwund während des Sinterns der Bauteile liegt in der Regel bei 20 - 25 % und ist vom Gefüge und vom Kobaltgehalt anhängig [10]. Abbildung 6 zeigt die möglichen Volumenunterschiede, welche durch das Sintern entstehen können [11].

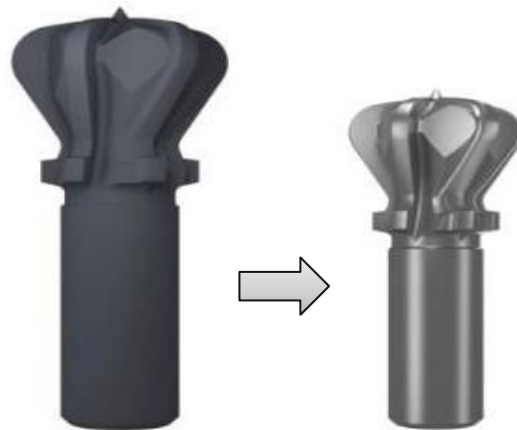


Abbildung 6: Volumenunterschiede durch Schwund beim Sintern von Hartmetallen [11]

2.1.1 Hartmetallsorten

Hartmetalle werden üblicherweise in drei Gruppen eingeteilt, und zwar in Hartmetalle auf der Basis von:

- WC-Co,
- WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co
- TiC/TiN-Co,Ni (Cermets)

Eine weitere Unterteilung kann mittels der Korngrößen erfolgen [12, 8].

Titancarbidfreie Hartmetalle: Die Hauptbestandteile dieser Hartmetalle sind Wolframcarbid, Kobalt und gegebenenfalls Kornwachstumshemmer. Die Bindergehalte liegen meist im Bereich von 3 - 13 wt % Co. Als Untergrenze gelten 0,5 wt %, als Obergrenze 30 wt %. Diese Hartmetallsorte zeichnet sich durch ihre hohe Zähigkeit im Vergleich zu ihrer Härte aus und ist besonders für eine hohe mechanische Beanspruchung geeignet. Jedoch ist ihre Warmfestigkeit im Vergleich zu WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co und Cermets geringer. Diese Gruppe wird oft auch als „K - Hartmetalle“ bezeichnet, da sie ehemals der Hauptanwendungsgruppe K nach ISO 513 entsprachen. Wenn sie beschichtet werden, lassen sie sich universell einsetzen. Besonders mittlere WC-Korngrößen kleiner 0,7 μm werden aufgrund ihrer guten Härte-Zähigkeits-Elastizitätsrelation und der daraus resultierenden hohen Kantenfestigkeit bei rundlaufenden Werkzeugen häufig verwendet [3, 12].

WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co: Dies sind Hartmetalle, die neben WC und Co einen hohen Gehalt an Mischkarbiden wie Ti-, Ta-, Nb- und/oder Zr-Karbid enthalten. Der Bindergehalt liegt meist im Bereich von 6 - 9 wt % Co, der Mischkarbidanteil bei 11 - 31 wt % (Ti, Ta, Nb)C und der Hartstoffanteil bei 60 - 82 wt % WC. Durch die Beigabe von Karbiden wird die Oxidationsfähigkeit und die Warmfestigkeit erhöht sowie die Kolkverschleißneigung gesenkt. Diese Hartmetalle werden auch „P-Hartmetalle“ genannt und wurden unbeschichtet für lang spanende Werkstoffe verwendet. Da durch die Zugabe von Karbiden jedoch auch die Bruchzähigkeit und die Kantenfestigkeit verringert werden, werden diese Hartmetalle bei rundlaufenden Werkzeugen nicht mehr verwendet. Als Wendeschneidplatten finden sie jedoch häufig Einsatz. Diese Hartmetalle werden meist beschichtet angewandt. Zudem haben sie gegenüber den beschichteten WC-Co-Hartmetallen den Vorteil, dass sie nach der Abnutzung der Beschichtung in der Spanablaufzone langsamer verschleifen, was dem Anwender mehr Zeit zum Reagieren und Tauschen der Werkzeuge gibt [2, 12].

TiC/TiN-Co,Ni: Diese auch als Cermets bekannten Hartmetalle auf Basis von TiCN mit Co und Ni als Bindephase, welche meist noch zusätzlich mit Mo₂C sowie WC legiert sind, zeichnen sich durch ihre hohe Wärmefestigkeit und eine äußerst geringe Kolkverschleißneigung aus. Der Anteil des Binders liegt bei 10 - 17 wt % Co/Ni, der des TiCN bei 82 - 89 wt %. Weitere Zusatznitride haben einen Anteil von 0,6 - 1 wt %. Diese Gruppe der Hartmetalle neigt jedoch stark zu Thermoschockrisen, da ihre Bruchzähigkeit und Wärmeleitfähigkeit viel geringer als die vergleichbarer WC-Co-Hartmetalle ist. Das ist besonders bei Bearbeitungen mit Kühlschmierstoffen problematisch. Als monolithische Werkzeuge sind sie zudem stärker bruchgefährdet als die zuvor angeführten Arten. In Europa findet ihre Anwendung am ehesten in der Feinbearbeitung statt [2, 12].

Bei der Zuordnung der Hartmetalle in die Anwendungsgruppen nach ISO 513 gilt, dass eine höhere Zähigkeit durch einen höheren Bindemetallgehalt und gröbere Hartstoffkorngrößen erreicht wird. Abbildung 7 zeigt die Zuordnung von WC-Co-Hartmetallen in die entsprechenden Anwendungsgruppen [12]. Je nach Einsatzzweck kommen gezielt abgestimmte Hartmetallsorten zur Anwendung. So kommt es in der Umformtechnik im Allgemeinen darauf an, dass die verwendeten Hartmetalle eine ausreichende Zähigkeit und eine hohe Verschleißfestigkeit haben. Binderfreie WC-Hartmetalle hingegen werden als Werkzeuge zum Glaspressen verwendet, um die Diffusion von Co in die Glasphase zu unterbinden [1, 8].

Anwendungsgruppe nach ISO 513	In Pfeilrichtung zunehmend	Zusammensetzung		Härte HV	Biegebruchfestigkeit MPa	Bruchzähigkeit MPa · m ^{0,5}	Elastizitätsmodul MPa	Wärme-dehnung µm/mK
		Co M%	WC-KG µm					
01		4... 5	0,2... 0,5	2000... 2100	3000... 3500			
05		6	0,5	1950	3000... 3700	8,0... 9,5		
10		7... 9	0,2... 0,7	1800... 1950	3000... 4000	9,0... 9,8		
20		6... 12	0,2... 1,3	1600... 1800	3000... 4000	9,5... 10		
30		8... 12	0,2... 1,0	1550... 1750	3500... 4000	10... 10,5		
40		10... 14	0,5... 1,0	1700... 1550	4000	10,5... 11		
50		> 10	0,5... 1,0	1600... 1400	4000	> 11		

Abbildung 7: Zusammensetzung von WC-Co-Hartmetallen für verschiedene Anwendungsgruppen nach ISO 513 [12]

2.1.2 Hartmetalleigenschaften

Die Eigenschaften von Hartmetallen lassen sich über die Zusammensetzung und die Herstellbedingungen in weiten Maßen beeinflussen. Die thermomechanischen Eigenschaften der Hartmetalle hängen nicht nur von den Volumenverhältnissen zwischen Hartstoffphasen und Bindemetall ab, sondern auch erheblich von den Kristallitgrößen der Hartstoffphasen [12]. Dies gilt es bei der Herstellung zu beachten. Der Einfluss der Karbidkorngröße auf die Eigenschaften der Hartmetalle wurde bereits sehr früh erkannt [2]. So liegen bei feinen Karbidkorngrößen im Allgemeinen höhere Härten vor, da durch die höhere spezifische Oberfläche bei gleichem Volumenanteil des Bindemetalls dieses feiner verteilt vorliegt. Dadurch sind diese Hartmetalle resistenter gegenüber plastischer Verformung. Aus Abbildung 8 wird das anhand eines Hartmetalls mit 6 % Kobaltanteil, bei dem dasselbe Pulvergemisch jedoch mit unterschiedlichen Korngrößen verwendet wird, ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass mit feineren Korngrößen sowohl die Härte als auch die Biegefestigkeit zunehmen, da sich das Bindemittel besser verteilen kann und das Wolfram dadurch besser umschließt. Zudem nimmt der Verschleiß sowohl mit dem Co-Gehalt als auch mit der WC-Korngröße zu [8, 13]. Um ein besseres Bruchverhalten und dadurch eine geringere elastische Steifigkeit zu erreichen, die sich positiv auf die Zerspanbarkeit auswirkt, können die Anteile der Bindemetalle erhöht werden [12]. Da bei Hartmetallen eine Korrelation zwischen der Härte und der Zähigkeit besteht, wurde dem durch die Entwicklung von Feinstkornhartmetallen erfolgreich entgegengewirkt [2, 8].

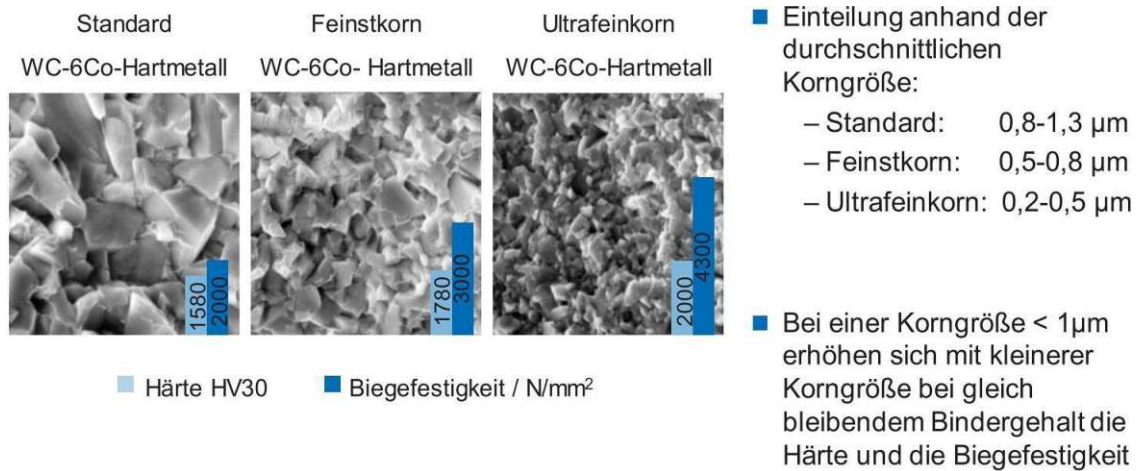


Abbildung 8: Einfluss der Karbidkorngröße auf die Härte und Biegefestigkeit von Hartmetallen [8]

Abbildung 9 zeigt, mit Ausnahme der Nanogröße, die Mikrostrukturen der einzelnen Korngrößen in einer Übersicht. Hier sind die Strukturen der einzelnen Korngrößen gut zu unterscheiden [14].

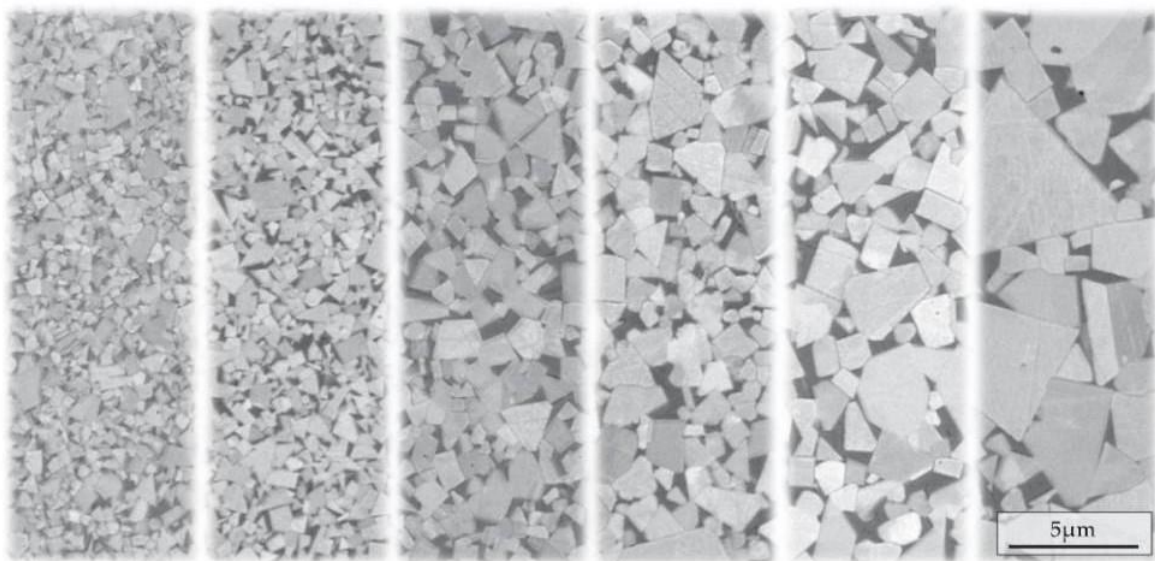



Abbildung 9: Mikrostrukturen der einzelnen Korngrößen nach dem Fachverband Pulvermetallurgie [14]

Tabelle 2 zeigt zudem einen Vorschlag des Arbeitskreises Hartmetall des Fachverbandes Pulvermetallurgie nach dem die Korngrößen genauer klassifiziert werden. Nach der bisherigen Methode werden WC-Co-Hartmetalle in lediglich Fein-, Feinst- und Ultrafeinkornhartmetalle unterteilt [8, 15]. Die DIN ISO 513 unterscheidet sogar nur zwischen Hartmetallen mit Korngrößen $\geq 1 \mu\text{m}$ (HW) und solchen mit WC-Korngrößen < 1 μm (HF) [15].

Tabelle 2: Klassifizierung von Korngrößen wie bisher und nach dem neuen Vorschlag [8, 15]

Bezeichnung	WC-Korngröße in μm
Ultrafein	0,2 - 0,5
Feinst	0,5 - 0,8
Fein	0,3 - 0,8



Bezeichnung	WC-Korngröße in μm
Nano	< 0,2
Ultrafein	0,2 - 0,5
Feinst	0,5 - 0,8
Fein	0,8 - 1,3
Mittel	1,3 - 2,5
Grob	2,5 - 6,0
Extragrob	> 6,0

Abbildung 10 zeigt Eigenschaften wie die Druckfestigkeit, die Härte, die Biegefestigkeit und die Verschleißfestigkeit in Abhängigkeit vom Kobaltgehalt, der Wolframcarbidgehalt sowie dem Mischkarbidanteil. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Kobaltgehalt und bei einer mittleren WC-Korngröße die Biegefestigkeit zunimmt. Die Härte und die Druckfestigkeit hingegen nehmen ab. Die Bruchzähigkeit sinkt mit zunehmendem Mischkarbidanteil. Bei der Korngröße, die für die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide relevant ist, steigen bei konstantem Binderanteil die Härte und die Biegefestigkeit mit sinkenden Wolframcarbidgehalten. Das lässt sich auf das Absinken der Übergangstemperatur zwischen einem spröden und einem duktilen Werkstoffverhalten begründen. Hier wird das Schermodul herabgesetzt und so können Versetzungen leichter entstehen. Außerdem steigt bei einem feinkörnigen Gefüge die Anzahl der Scherebenen, welche in günstiger Richtung der Schubbeanspruchung liegen. Durch die Verringerung der Korngröße wird die Biegefestigkeit aber auch die Härte gesteigert. Es fällt auf, dass die Biegefestigkeit bei mittleren Korngrößen des Wolframcarbides minimal ist, was sich durch die geringeren Größen der Fehlstellen bei einer kleinen Wolframcarbidgehalt begründen lässt. Aufgrund der geringen Größe der Fehlstellen ist die Rissentstehung in den Randzonen des Probenkörpers gehemmt und das Minimum liegt durch den geringen Widerstand gegenüber Rissentstehung und Rissausbreitung bei mittleren Korngrößen [2, 8].

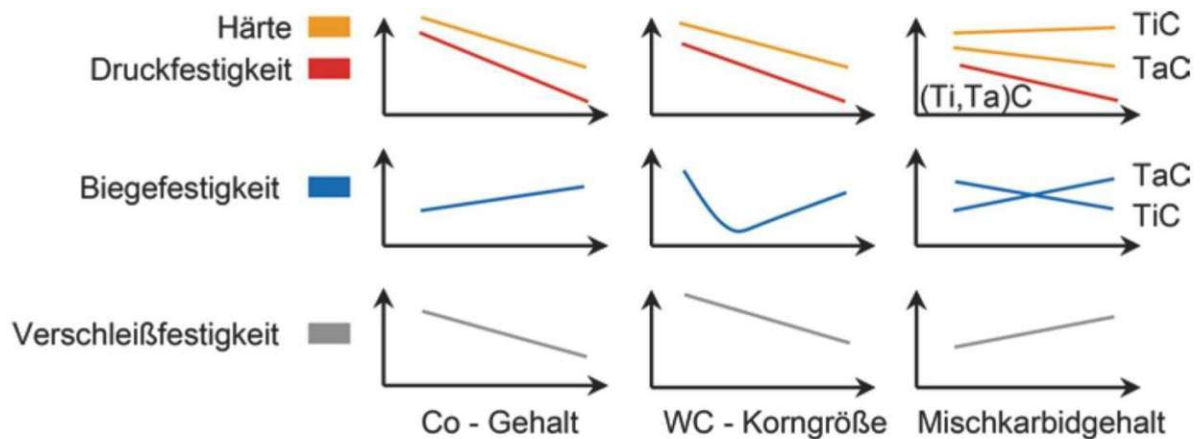


Abbildung 10: Härte, Druckfestigkeit, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit von Hartmetallen in Abhängigkeit Kobaltgehalt, Korngröße und Mischkarbidgehalt [2]

Hartmetalle können also entsprechend den verlangten Schneidstoffeigenschaften angepasst werden. Tabelle 3 liefert einen Überblick über die nötigen Anpassungen, um Eigenschaften wie die Verschleißfestigkeit und Zähigkeit zu erhöhen [8].

*Tabelle 3: Materialeigenschaften in Abhängigkeit von Komponentenanteilen**

hohe Verschleißfestigkeit	hohe Zähigkeit
Co-Gehalt ↓	↑ Co-Gehalt
WC-Korngröße ↓	↑ WC-Korngröße
Mischkarbidanteil ↑	↓ Mischkarbidanteil

* ↑ zunehmend, ↓ abnehmend

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Hartmetallarten. Es ist zu erkennen, dass die Dichte bei den titancarbidfreien Hartmetallen doppelt so groß ist wie die der Cermets. Die Härte, welche eine der maßgebendsten Eigenschaften bei Hartmetallen darstellt, ist aufgrund des hohen Wolframcarbidanteiles ebenfalls bei den titancarbidfreien Hartmetallen am höchsten. Zudem ist die Druckfestigkeit und auch der E-Modul gegenüber den anderen Hartmetallarten höher. Cermets haben jedoch eine deutlich höhere Biegefestigkeit als TiC/TiN-Co,Ni- und titancarbidfreie Hartmetalle, aber auch eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit [2].

Tabelle 4: Vergleich der Hartmetallarten anhand spezifischer Eigenschaften [2]

Sorten nach DIN ISO 513	Titancarbidfreie Hartmetalle		TiC/TiN-Co,Ni		WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co Cermets	
	HW-K05	HW-K40	HW-P10	HW-P30	HT-P05	HAT-P20
Co/Ni-Anteil (%)	4Co	12Co	9Co	11,5Co	10,4Co/Ni	16,7Co/Ni
Dichte (g/cm ³)	15,1	14,2	10,6	13	6,1	7
Härte HV 30	1730	1290	1560	1380	1650	1450
Druckfestigkeit (N/mm ²)	5700	4500	4500	4450	5000	4600
Biegefestigkeit (N/mm ²)	1600	2450	1700	2250	2000	2500
E-Modul (10 ³ *N/mm ²)	650	580	520	560	460	440
Wärmeleitfähigkeit (W*m ⁻¹ *K ⁻¹)	80	65	25	60	9,8	15,7

2.1.3 Komponenten der Hartmetalle und ihre Eigenschaften

In diesem Kapitel soll auf die typischen Hartmetallkomponenten und ihren Einfluss auf Hartmetalle eingegangen werden. So stellt Monowolframkarbid eine der wichtigsten Hartstoffphasen dar. Da WC in Co löslich ist, resultiert daraus eine hohe innere Binde- und Kantenfestigkeit der reinen WC-Co-Hartmetalle. Zudem ist WC verschleißfester als TiC und TaC. Jedoch ist es aufgrund der Lösungs- und Diffusionsfreudigkeit bei höheren Temperaturen nur begrenzt einsetzbar. Da TiC eine geringe Diffusionsneigung aufweist, hat es eine niedrige Binde- und Kantenfestigkeit, jedoch eine hohe Warmverschleißfestigkeit. Aus diesem Grund sind Hartmetalle mit einem hohen Titankarbidanteil spröde und bruchanfällig. Ihr bevorzugtes Einsatzgebiet ist die Zerspanung von Stahlwerkstoffen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. In Kombination mit Wolframkarbid bildet es ein Mischkarbid. In geringen Mengen wirkt sich TaC kornverfeinernd aus, dadurch werden die Zähigkeit und die Kantenfestigkeit verbessert. Zudem fällt die innere Bindefestigkeit nicht so stark ab wie bei TiC. Niobkarbid (NbC) tritt wie TaC als Mischkristall in Hartmetallen auf und hat dementsprechend ähnliche Wirkungen. Titanitrid (TiN) ist jene Komponente, die bei Cermets die Eigenschaften am stärksten bestimmt. In Stahl besitzt TiN eine höhere Diffusionsbeständigkeit als TiC. Durch den Stickstoff wird eine Steigerung der Verschleißfestigkeit bewirkt und zudem wird das Kornwachstum gehemmt. Stickstoffhaltige Cermets haben üblicherweise ein sehr feines Korngefüge. Außerdem lassen sich TiC und TiN im festen Zustand lückenlos ineinander mischen. Als Bindemittel für Hartmetalle ist Kobalt bisher unübertroffen. Dies ist der guten Löslichkeit von WC in Kobalt sowie der guten Benetzbarkeit der Wolframkarbidkristalle durch die schmelzflüssige WC-Co-Bindephase zuzuschreiben. Bei Cermets wird Ni aufgrund seiner besseren Benetzbarkeit und Verformbarkeit als Binder eingesetzt. Außerdem wird Kobalt beigegeben, um die Hochtemperatureigenschaften zu verbessern [2].

2.2 Strategien zur Hartmetallbearbeitung

Hartmetalle und Keramiken sind wichtige Substratmaterialien für eine Vielzahl von Schneid- und Formwerkzeugen. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Härte wird die endgültige Geometrie üblicherweise durch das Sintern vorgeformter Grünlinge, die Bearbeitung mit elektrischer Entladung (Erodieren), Schleifen und/oder Polieren erzeugt. Zudem können Verfahren wie das Honen, das Verrunden, das Sandstrahlen, die galvanische Beschichtung sowie das Vorbeloten angewendet werden. Eine Bearbeitung durch Fräsen ist aufgrund der verfügbaren Fräswerkzeuge zur Abtragung großer Materialmengen unwirtschaftlich [16, 17]. In den folgenden Kapiteln soll auf die aktuellen Strategien zur Hartmetallbearbeitung eingegangen werden. Es wird ein Überblick über Verfahren wie die Grünlingsbearbeitung, funkenerosives Abtragen, Schleifen und schwingungsunterstütztes Hartmetallzerspanen gegeben.

2.2.1 Grünlingsbearbeitung von Hartmetallen

Bei der Grünlingsbearbeitung von Hartmetallen kommen die gleichen spanenden Bearbeitungsverfahren wie bei kompakten Werkstoffen zum Einsatz. Auch hier sind die Bearbeitungskosten das entscheidende Kriterium für den Zerspanungsprozess. Sie werden durch die Schnittgeschwindigkeit, den Vorschub und ihre Korrelation mit der Werkzeuglebensdauer bestimmt. Des Weiteren sind bestimmte Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Oberflächen und der Kanten, welche durch Gratbildung oder Ausbrüche beeinträchtigt werden können, zu berücksichtigen. Im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen sind einige Besonderheiten zu beachten. So ist aufgrund der geringen Dichte und Festigkeit bei der Einspannung darauf zu achten, dass die Einspannkraft nicht zu groß sind, da sonst die Möglichkeit von Verformungen und Maßabweichungen besteht. Sollte eine Kühlung nötig sein, so ist bevorzugt mit Luft zu kühlen. Sollte jedoch eine Kühlflüssigkeit nötig sein, muss dieser ein Rostschutzmittel beigefügt werden. Nach der Bearbeitung müssen die Bauteile gewaschen und getrocknet werden. Hierbei werden Ultraschallreinigungsanlagen bevorzugt. Bei der Bearbeitung von Werkstücken mit niedrigen Dichten sind ein niedriger Vorschub und eine geringe Schnitttiefe notwendig, um Kantenausbrüche zu vermeiden [18].

In Abbildung 11 sind verschiedene Arten von Grünlingen zu sehen. Bei Hartmetallgrünlingen ist zu beachten, dass ihre Festigkeit kreideähnlich ist. Zudem sind die Komponenten stark vibrationsgefährdet und auch stoßempfindlich. Die Art der Bearbeitung hängt stark von der Werkstückgeometrie ab. Deshalb muss aufgrund der nötigen Spannflächen oft mit Materialübersatz gearbeitet werden. Die Staubentwicklung bei der Bearbeitung ist enorm. Aus diesem Grund sind öldichte Maschinen, aufwändige Abdichtungen der Maschinenkomponenten, leistungsfähige Absauganlagen und Filter zu verwenden. Die Schneidkosten bei der Bearbeitung von Hartmetallrohlingen sind etwa zehnmal so hoch wie die Kosten für die Bearbeitung von Stahl. Bei der Zerspanung höherfester Werkstoffe kommen neben Hartmetallen TiN-beschichtete, CBN- oder PCD-bestückte Werkzeuge zum Einsatz. Jedoch ist auch ihr Einsatz eingeschränkt, da bei CBN-Werkzeugen die Möglichkeit der chemischen Reaktion mit im Werkstück vorhandenen Metalloxiden (z. B. MnO, FeO) besteht und dadurch der Verschleiß verstärkt wird. Auch PCD wird nur in Ausnahmefällen verwendet, da er bei höheren Temperaturen im ablaufenden Span gelöst werden kann. Die Grünlingsbearbeitung bringt aufgrund der hohen Staubentwicklung, dem teilweise nötigen Materialübersatz sowie der vibrations- und stoßempfindlichen Werkstücke einige Herausforderungen mit sich, welche beim Prozess zu beachten sind [18, 19].



Abbildung 11: Verschiedene Grundformen von Hartmetallgrünlingen [19]

2.2.2 Hartmetallbearbeitung mittels funkenerosivem Abtragen

Das funkenerosive Abtragen zählt laut DIN 8580 zu den Fertigungsverfahren des Trennens. Es gliedert es sich ein in die Gruppe des thermischen Abtragens durch elektrische Funken [20]. Das Funkenerodieren ist ein Verfahren, bei dem Material durch thermische Erosionsmechanismen wie Schmelzen und Verdampfen entfernt wird. Eine Erodiermaschine ist sehr einfach und leicht zu bedienen. Mit der Funkenerosion können elektrisch leitende Werkstoffe unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Werkstücks bearbeitet werden, sodass die Formgebung moderner Werkstoffe mit hoher Härte, Zähigkeit und Festigkeit möglich wird. Dazu gehören Werkzeugstähle, Hartmetalle und leitfähige Keramiken. Daher ist der Einsatz der Funkenerosion zur Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe ein häufig genutztes Verfahren [21, 22].

In Abbildung 12 ist das Prinzip der Funkenerosion dargestellt. Der grundlegende Mechanismus der Funkenerosion ist von der kontrollierten Entladung von Elektrizität (Funken) abhängig, welche elektrisch leitendes Hartmetall abträgt. Während der Bearbeitung hat das Werkzeug keine Wechselwirkung mit dem Werkstück und hält einen Abstand ein, den man als „Funkenpalt“ bezeichnet. Wenn der Abstand zwischen den Funkenstrecken auf einen bestimmten Punkt reduziert wird, kann die Spannung das Dielektrikum ionisieren, wodurch ein Funke erzeugt wird. Wenn der Funke auftritt, schmilzt er eine geringe Menge des Werkzeugs und des Werkstücks, wodurch sich der Funkenpalt vergrößert und der folgende Funke am nächstgelegenen Spalt auftritt [23].

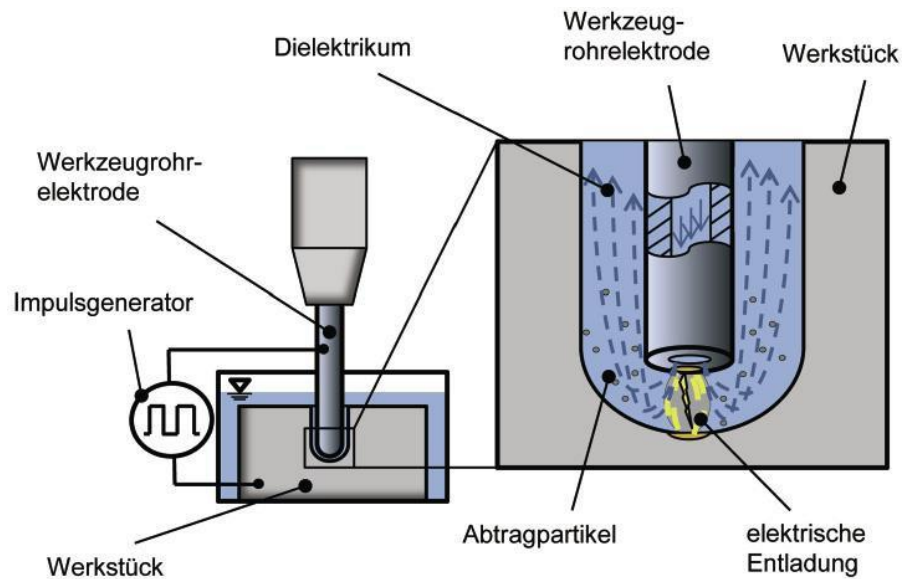


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Erodierprozesses [22]

Es gibt mehrere Arten des Erodierens, wie z.B. das Senkerodieren, das Drahterodieren, das Pulvererodieren oder das Trockenerodieren. Das Senkerodieren gilt als äußerst effizientes und unkonventionelles Verfahren zur Modellierung von Hartmetallen. Bei diesem Verfahren wird ein dielektrisches Medium zum Eintauchen von Werkstück und Werkzeug verwendet. Beim Drahterodieren handelt es sich um ein thermisches Bearbeitungsverfahren, bei dem der leitende Draht die Rolle der Kathode und das Werkstück die der Anode hat. Wird während des herkömmlichen Erodierverfahrens ein elektrisch leitendes oder halbleitendes Pulver in die dielektrische Flüssigkeit gemischt, wird das als „Pulvererodieren“ bezeichnet. Da beim herkömmlichen Erodierverfahren dielektrische Flüssigkeiten oder Öle verwendet werden und diese entsorgt werden müssen, wurde eine umweltfreundliche Bearbeitungstechnik entwickelt, bei der ein gasförmiges Dielektrikum als Ersatz für das flüssige Dielektrikum verwendet wird. Dieses Verfahren wird als „Trockenerodieren“ bezeichnet [23].

Die Effektivität des Erodierverfahrens mit Wolframkarbid wird anhand der Materialabtragsrate, der Oberflächengüte und des relativen Verschleißverhaltens des hergestellten Werkstücks bewertet. Kupfer-Wolfram als Werkzeugelektrode ist für das Erodieren von Wolframkarbid am besten geeignet. Die beste Bearbeitungsleistung wird im Allgemeinen mit dem Werkzeug als Kathode und dem Werkstück als Anode erzielt [24]. Die Vorteile des Erodierens sind komplexe erzeugbare Formen, gute Oberflächengüten, die Möglichkeit zur Bearbeitung sehr harter Materialien und die einfach zu bedienenden Maschinen. Nachteile des Verfahrens sind jedoch die lange Bearbeitungsdauer sowie die nötige Leitfähigkeit des zu bearbeitenden Materials.

2.2.3 Hartmetallbearbeitung mittels Schleifen

Die Bearbeitung durch Schleifen zählt laut DIN 8580 zu den Fertigungsverfahren des Trennens, und zwar gliedert es sich in die Gruppe „Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide“ ein. Hier wird ein Werkzeug verwendet, dessen Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidkeile sowie Lage der Schneiden zum Werkstück unbestimmt sind [20, 25]. Schleifverfahren werden bei erschwerten Arbeitsbedingungen zumeist dort angewendet, wo andere Verfahren wie z.B. das Drehen oder Fräsen wegen der Härte des zu zerspanenden Werkstückes an ihre Grenzen kommen. Da für die Bearbeitung von Hartmetallen nur ein begrenztes Spektrum an Fertigungsverfahren zur Verfügung steht, erfolgt die Fertigbearbeitung der Werkstücke zumeist im Schleifverfahren. Dabei ist das Verschleißverhalten der eingesetzten Schleifwerkzeuge für die Beurteilung des Schleifprozesses eine wichtige Bewertungsgröße. So haben sich Diamantschleifscheiben gegenüber den anderen Typen von Werkzeugen durchgesetzt. Des Weiteren sollte das Schleifwerkzeug durch die Wahl der Diamantkorngrößen, die Art der Bindung (Kunstharz-, Metallsinter-, keramische und galvanische) sowie die Kornkonzentrationen und die Einstellparameter immer an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. Auch die Kühlung spielt eine bedeutende Rolle. Wenn möglich, sollte immer gekühlt werden, wobei die Art der Kühlung (Öl, Emulsion, Wasser) entsprechend des Anwendungsfalles entschieden werden muss. Abbildung 13 zeigt die Unterschiede zwischen mangelnder und ausreichender Kühlung anhand von Schleifproben [10, 26, 27]. Im Allgemeinen sollen die verwendeten Schleifscheiben Eigenschaften wie eine hohe Bruchumfangsgeschwindigkeit, eine gute Wärmeleitfähigkeit, eine hohe Festigkeit des Grundkörpers, gute Dämpfungseigenschaften sowie eine gute Verschleißfestigkeit des Belages aufweisen [27].

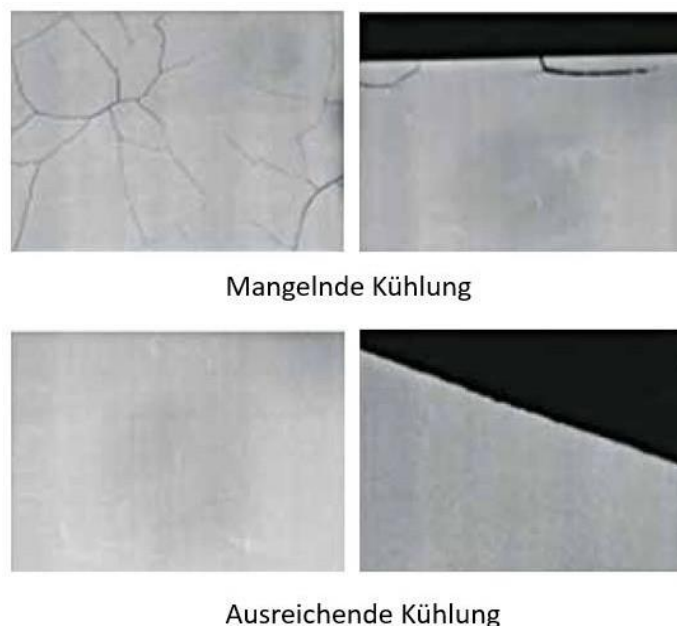


Abbildung 13: Auswirkungen der Kühlung beim Schleifen von Hartmetallen [10]

Des Weiteren ist das Verhältnis zwischen der Korngröße der Probe und der Korngröße des Schleifmittels äußerst wichtig, da die Korngröße die Härte bestimmt und daher die Verschleißfestigkeit beeinflusst. Die Oberflächenrauheit der geschliffenen Oberfläche ist abhängig von der Größe der WC-Körner im Hartmetall [28].

2.2.4 Schwingungsunterstütztes Hartmetallzerspanen

Bei der schwingungsunterstützten Bearbeitung wird die Präzisionsbearbeitung mit einer Werkzeugschwingung mit kleiner Amplitude kombiniert, um den Herstellungsprozess zu optimieren. Da Wolframcarbid typischerweise ein hartes und sprödes Material ist, ist seine duktile Bearbeitung durch die gewöhnliche Ultrapräzisionsschneidtechnologie aufgrund von Spröbruch im Werkstück und übermäßigem Werkzeugschaden äußerst schwierig [29, 30]. Zhang et al. haben die duktile Bearbeitung von gesintertem Wolframcarbid mithilfe der elliptischen Ultraschall-schwingungsschneidtechnologie untersucht. Sie konnten aufzeigen, dass im Vergleich zum herkömmlichen Zerspanen, bei dem sich die fertige Oberfläche stark verschlechtert, die Bearbeitung im duktilen Modus durch die Anwendung der elliptischen Schwingungsschneidtechnik erfolgreicher ist. Das wurde anhand einer Reihe von Nuten- und Hobelexperimenten mit Einkristall-Diamantwerkzeugen bewiesen. Zudem wurde klargelegt, dass das Bindemittelmaterial, die Korngröße, die Schneid-/Schwingungsbedingungen sowie die Kristallorientierung des Diamantwerkzeugs einen signifikanten Einfluss auf die Werkzeuglebensdauer und die bearbeitete Oberflächenqualität haben [29].

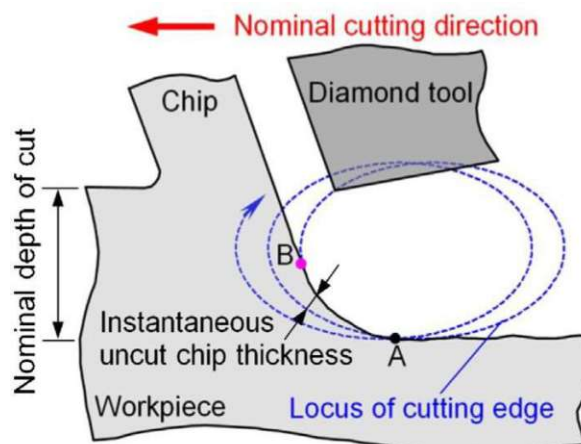


Abbildung 14: Elliptische Schwingungsbearbeitung [29]

Abbildung 14 zeigt ein Schema des elliptischen Schwingungsschneidprozesses. Das Diamantwerkzeug wird mit einer nominalen Schnittgeschwindigkeit zugeführt und die Werkzeugspitze im Allgemeinen so gesteuert, dass sie in der durch die nominale Schneidrichtung und die Schnitttiefe bestimmten Ebene elliptisch oszilliert. Bei den Versuchen war die Nennschnittgeschwindigkeit niedriger als die maximale Schwingungsgeschwindigkeit, um sicherzustellen, dass das Werkzeug in jedem

Schwingungszyklus vom Werkstück getrennt wird [29]. Der Zyklus der elliptischen Schwingung beginnt in Punkt A (siehe Abbildung 14). Das Material wird in Form eines Chips entfernt. Sobald die Tangente der Werkzeugbahn parallel zur Spanfläche verläuft, trennt sich das Schneidwerkzeug am Punkt B vom Span. Aufgrund des intermittierenden Prozesses kann eine Verringerung der Spanstärke und der Schnittkraft erreicht werden. Durch die Trennung des Schneidwerkzeuges vom Werkstück kann in jedem Schwingungszyklus durch Umgebungsluft oder Schneidflüssigkeit gekühlt werden. Das unterdrückt auch die Adhäsion zwischen Werkzeug und Werkstück. Der thermochemische Verschleiß wird effizient unterdrückt [29]. Um das elliptische Schwingungsschneiden und das herkömmliche Zerspanen vergleichen zu können, wurde ein bindemittelfreies Werkstück bearbeitet. Abbildung 15 zeigt Bilder, die mit einem Rasterelektronenmikroskop von der genuteten Oberfläche bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,2 \mu\text{m}$ gemacht wurden. Es ist erkennbar, dass die gebildete Nut beim herkömmlichen Zerspanen mit zahlreichen Spröddefekten gefüllt ist. Im Gegensatz dazu wird durch das elliptische Schwingungsschneiden eine glatte Oberfläche erzielt. Da bei dieser Methode keine spröden Risse und Unebenheiten auf der Oberfläche zu beobachten sind, kann die Bearbeitung im duktilen Modus erfolgreich eingesetzt werden [29].

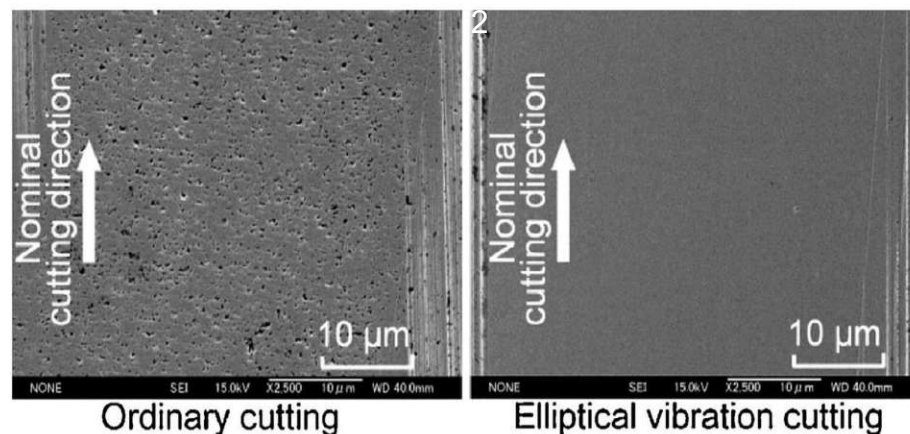


Abbildung 15: Unterschied zwischen einem normalen Schnitt (1) und einem Schnitt mit elliptischer Schwingung (2) [29]

Die schwingungsunterstützte Bearbeitung hat gegenüber herkömmlichen Präzisionsbearbeitungsverfahren deutliche Vorteile in einem weiten Bereich der Betriebsbedingungen wie z.B. der Schnitttiefe, Teilegrößen oder Werkzeug- und Arbeitsmaterialien. Einige dieser Vorteile sind [30]:

- reduzierte Werkzeugkräfte
- verlängerte Standzeit für Diamantwerkzeuge zur Bearbeitung von Eisenmetallen und für alle Arten von Werkzeugen zum Schneiden von Eisen- und Hartmetallen sowie spröden Materialien
- reduzierte Oberflächenrauheit und verbesserte Formgenauigkeit
- Größere Schnitttiefe für die duktile Bearbeitung spröder Materialien

2.3 Anforderungen an die Hartmetallzerspanung

Um Hartmetalle zerspanen zu können, müssen einige wichtige Punkte wie die Schneidstoffe, die nötigen Maschinen sowie die Schnittdaten und weitere Einflussfaktoren betrachtet werden. Die folgenden Kapitel behandeln diese Bereiche.

2.3.1 Schneidstoffe für die Hartmetallzerspanung

Um Hartmetalle zerspanen zu können, muss das Werkzeug, genauer gesagt die Werkzeugschneide, eine höhere Härte als das zu bearbeitende Material haben. Da Hartmetalle Härten von bis zu 2200 HV und Biegefestigkeiten von bis zu 4500 MPa aufweisen können, müssen spezielle Schneidstoffe verwendet werden, um sie zerspanen zu können. Aufgrund dieser mechanischen Eigenschaften kommen nur wenige Werkstoffe zur Bearbeitung infrage, dazu gehören [31, 32]:

- PKD (polykristalliner Diamant)
- CVD-(diamantbeschichtete Werkzeuge)

PKD (polykristalliner Diamant): Der polykristalline Diamant ist ein synthetisch hergestellter Diamantschneidstoff aus Monokristallen, der mittels Hochdruck-Hochtemperatur-Synthese erzeugt wird. Dabei lässt sich die gewünschte Korngröße beeinflussen. PKD kommt der Härte von monokristallinem Diamant (Naturdiamant) sehr nahe. Das erlaubt, mit ihm besonders abrasive Werkstoffe zu bearbeiten. Die geringere Härte lässt sich durch das beim Sintern aufgenommene Kobalt erklären, welches die Graphitisierung von Korngrenzen erleichtert. Die Graphitisierung durch Kobalt ist einer der wesentlichen Verschleißmechanismen, die auftreten können [12, 33].

CVD (polykristalliner Diamant): CVD-Diamant ist eine Dickschichtabscheidung, welche über das CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition) gewonnen wird. Aus der Gasphase kann Diamant ohne Druck abgeschieden werden. Das führt dazu, dass rein diamantene polykristalline Werkstoffe hergestellt werden können, ohne dabei die mechanischen und chemischen Eigenschaften durch Bindephasen zu verschlechtern. Sie sind aufgrund der geringen Wachstumsgeschwindigkeiten teurer als PKD. Bei der CVD-Dickschichtabscheidung sind Schichtdicken von 0,2 mm bis zu 1,0 mm möglich [12, 33].

Diese beiden Schneidstoffe haben so hohe Härten, dass sie die Anforderung der vierfachen Härte für die Zerspanung erfüllen. Es gilt, je härter das zu bearbeitende Material ist, desto schwieriger ist der Fräsprozess und umso geringer ist die Lebensdauer der verwendeten Werkzeuge [26, 31]. Abbildung 16 zeigt die Schneidstoffsorten im Vergleich zu ihrer Härte. Es ist zu erkennen, dass PKD eine Härte von 3500 - 5500 kg/mm² hat, wobei der Streubereich stark variiert. Naturdiamant liegt knapp hinter dem monokristallinen Diamant, welcher synthetisch hergestellt wird. Die zweithöchste Härte ist bei CVD-D mit über 9000 kg/mm² zu finden. Den höchsten Härtegrad erreicht Ultradiamant. Dabei werden mittels Lasersegmentiertechnik aus

Diamant-Rohlingen in einer definierten Orientierung einkristallige Elemente ausgelagert. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf dem Werkzeug aus Hartmetall mit CVD-Diamantbeschichtung. Bei günstigen Prozessbedingungen lassen sich quasikontinuierlich duktile Späne abheben. Das Schnittkraftniveau ist hoch und steigt mit zunehmendem Verschleiß der Schneiden erheblich an, wobei sich CVD-Diamant Werkzeuge hier besser verhalten als PCBN-Werkzeuge [33, 34]. Bei diamantbeschichteten HM-Werkzeugen wird die Einsatzdauer durch das Versagen der Beschichtung begrenzt, wohingegen bei PKD-Werkzeugen Verschleißmechanismen wie der Span- und Freiflächenverschleiß durch Abrasion zum Versagen führen [19, 31].

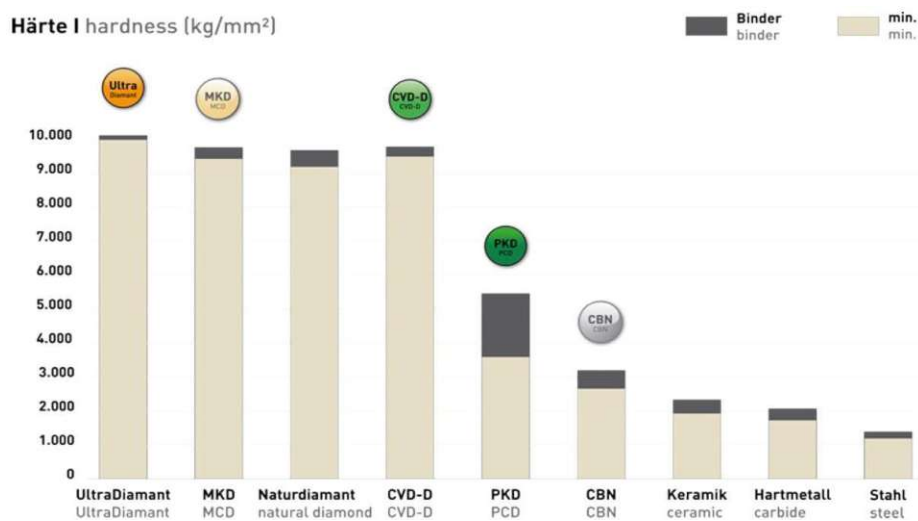


Abbildung 16: Schneidstoffsorten im Vergleich zu ihrer Härte [34]

Ein weiterer wichtiger Punkt, der die Prozessfähigkeit von Schneidstoffen bestimmt, ist die Warmhärte. Auch bei hohen Schneidkeiltemperaturen muss die Härte möglichst gleichbleiben, damit der Schneidstoff abrasivem Verschleiß und plastischen Verformungen standhält. In Abbildung 17 ist die Härte von Schneidstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Temperatur die Härte bei allen Schneidwerkstoffen abnimmt. Das ist bei Diamantschneidstoffen stark ausgeprägt. Bei Hartmetallen ist diese Härteabnahme moderater als bei den anderen Schneidwerkstoffen. Zwar hat Schnellarbeitsstahl ebenfalls eine geringe Härteabnahme bei Temperaturen bis zu 500 °C, allerdings ist der Härtegrad um einiges geringer als der von Hartmetallen. Nichtsdestotrotz ist die Härte von Diamant bei 500 °C immer noch um das etwa Vierfache höher als die von Hartmetall [2, 35].

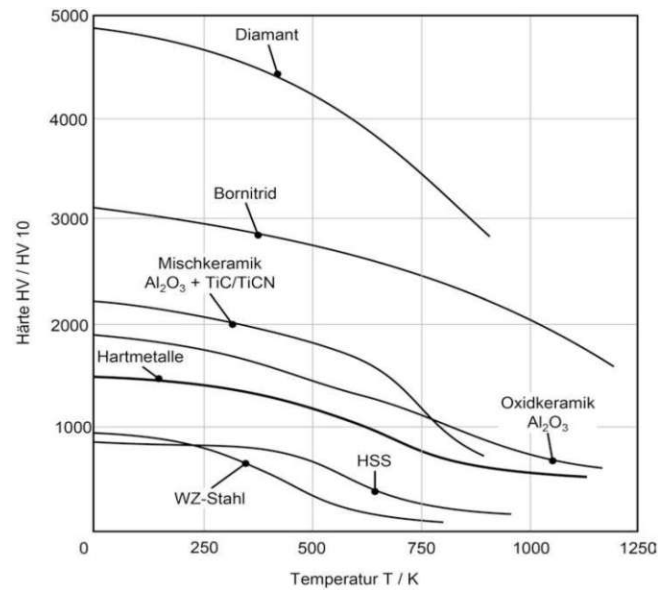


Abbildung 17: Vergleich der Warmhärten verschiedener Schneidwerkstoffe [2]

Folgende Anforderungen sollten Werkzeuge für die Hartmetallbearbeitung aufweisen [17]:

- eine hohe Verschleißfestigkeit und ein vorhersagbares Verschleißverhalten
- eine hohe Beschichtungshaftung auf dem Untergrund
- eine ausreichende Zähigkeit des Untergrundes
- eine optimierte Schneidkanten­geometrie

2.3.2 Maschinenanforderungen für die Hartmetallzerspanung

Für die Fräsbearbeitung von Hartmetallen müssen die verwendeten Maschinen spezifische Merkmale aufweisen, die für einen reibungslosen Ablauf unabdingbar sind. Die Maschinen müssen eine hohe Präzision, Steifigkeit und Dämpfung haben. Zudem ist die Regelfrequenz der Antriebe wichtig, da mit ihr Bahnabweichungen, die durch Zerspanungskräfte auftreten, schnell erkannt und korrigiert werden können. Die Firma Röders hat hierfür eigens 32-kHz-Regler entwickelt, durch die die Oberflächengüte gesteigert werden kann. Zur Steigerung der Präzision tragen Lineardirektantriebe bei, da sie im Unterschied zu Kugelrollspindeln keine federnden Zwischenglieder zwischen Antrieb und Achsposition aufweisen. Die Nullpunktstabilität ist ebenfalls äußerst wichtig. Um gleichmäßige geringe Spandicken und hohe Maßhaltigkeit zu gewährleisten, darf der Nullpunkt auch bei längeren Bearbeitungszeiten nicht wegdriften. Geringe Spandicken und minimale Vibrationen sind entscheidend für die Lebensdauer des Werkzeugs. Die hohe Nullpunktstabilität erfordert ein besonders komplexes Temperaturmanagement der Werkzeugmaschine [31].

2.3.3 Schnittdaten für die Zerspangung von Hartmetallen

Durch die Rücksprache mit dem Werkzeughersteller und eine extensive Recherche wurden verschiedene Parameterbereiche, bei denen die Zerspangung von Hartmetallen möglich ist, definiert. Zu beachten ist es jedoch immer, dass die Schnittdaten immer in Abhängigkeit vom Werkstoff gewählt werden müssen. Durch die weitere Optimierung der Parameter ist der Versuchsplan, welcher in Kapitel 5.4.2 gezeigt wird, entstanden. In Tabelle 5 sind die dafür verwendeten Werte sowie weitere Bearbeitungsparameter ersichtlich.

Tabelle 5: Parameterbereiche für die Zerspangung von Hartmetallen [10, 17, 37]

Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Vorschub f [mm/U]	Schnitttiefe a_p [mm]	Schnittbreite a_e [mm]	Drehzahl n [U/min]
70 - 160	0,005 - 0,025	0,005 - 0,2	0,005-1,22	12732 - 40000

2.3.4 Weitere Einflussfaktoren bei der Zerspangung von Hartmetallen

Kühlung

Um optimale Prozessbedingungen zu erfüllen, muss auf die Bearbeitungstemperatur geachtet werden. Ein wichtiger Teil des Temperaturmanagements ist der Kühlschmierstoff. So haben sich wässrige Kühlschmierstoff-Emulsionen aufgrund der Verdunstungskühlung, welche sich auf den Arbeitsraum und das Werkstück auswirkt, als schwer beherrschbar erwiesen. Ölkühlungen sind besser für die Bearbeitung geeignet [31].

CAD/CAM-Software

Um möglichst gute Schnittergebnisse zu erreichen, ist auch die verwendete CAD/CAM-Software wichtig. Eine gute Qualität der CAD-Daten ist erforderlich, durch die die Datenmenge der STL-Dateien steigt. Zudem sind CAM-Funktionen, welche den Vorschub beim Ein- und beim Ausfahren aus der Kontur reduzieren, vorteilhaft, um Ausbrüche zu vermeiden. Weitere wichtige Faktoren sind die Frässtrategie und die NC-Programmierung, welche hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenstellung optimiert werden sollten. Suboptimale Bahnverläufe, welche große Umschlingungen verursachen, sollten vermieden werden [31].

2.3.5 Grenzen der Hartmetallzerspangung

Limitierungen beim Fräsen ergeben sich zum einen daraus, dass sich große Abtragsmengen, die sich aus dem Einsatz der verfügbaren Fräswerkzeuge ergeben, als unwirtschaftlich erweisen, zum anderen können sich kleine negative Radien als schwer bearbeitbar herausstellen, da der Radius des Fräswerkzeuges einen direkten Einfluss auf den Radius des zu bearbeitenden Werkstückes hat. Des Weiteren müssen die verwendeten Werkzeuge wegen der mechanischen Eigenschaften und der Härten der Hartmetallsorten etwa viermal härter sein als das zu spanende Werkstück. Deshalb

eignen sich nur wenige Schneidstoffe, wie z.B. PKD und CVD-D. Das Fräsen von Hartmetallen mit Härten über 1000 HV führt bereits nach kurzen Standwegen durch das Abplatzen der Beschichtung oder dem frühzeitigen Schneidkantenbruch zu Werkzeugausfällen. Da Umformprozesse immer anspruchsvoller werden und sehr harte Materialien verwenden, treten schnell Limitierungen bei der Bearbeitung auf [10, 17]. Eine Studie von Ottersbach et al. hat sich mit der Zerspanbarkeit von Hartmetallen mit unterschiedlichem Kobaltgehalt beschäftigt. Die Ergebnisse der Studie besagen, je höher der Kobaltanteil im Gefüge eines Hartmetalls ist, desto leichter lässt es sich zerspanen bzw. werden duktile Späne erreicht [36].

3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Definition von Bearbeitungsparametern bzw. Strategien, bei denen die spanende Bearbeitung von Hartmetall mittels definierter Schneide effektiv eingesetzt werden kann. Zudem soll Wissen im Bereich der Fräsbearbeitung von Hartmetallen erworben werden und etwaige Vorteile gegenüber den derzeit üblichen Bearbeitungsstrategien herausgearbeitet werden. Dafür werden in einem praktischen Teil Fräs- und Schleifversuche mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Die ermittelten Fräsparameter werden anhand ihrer Schnittparameter und erzeugten Oberflächengüten den Schleifversuchen gegenübergestellt, um so geeignete Einflussgrößen für die optimierte Zerspanung von Hartmetallen zu ermitteln.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Hartmetallfräsens. Zu diesem Zweck wird ein Standzeitversuch mit den ermittelten optimalen Parametern durchgeführt und die Werte mit typischen Schleifparametern verglichen. Anhand der Ergebnisse soll gezeigt werden, dass das Hartmetallfräsen unter bestimmten Bedingungen und bei ausgewählten Materialzusammensetzungen einen Vorteil gegenüber den herkömmlichen Verfahren bietet. Das bearbeitete Versuchsmaterial ist ein titancarbidfreies Hartmetall, welches aufgrund des hohen Kobaltbinderanteils im Verhältnis zu seiner Härte sehr zäh ist und hohe mechanische Beanspruchungen erträgt.

4 Methodische Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise sowie das bei den Versuchen verwendete Material, das Werkzeug und die Maschine beschrieben. Die zu ermittelnden Daten werden vorab definiert und die Auswertemethode der aufgenommenen Werte aufgezeigt. Zu den ermittelten Prozessdaten zählen:

- der Verschleiß
- die Oberflächengüte
- die Zerspankraft

Sie werden anhand der Schnitttiefe, der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubes bewertet. Um bei den durchgeführten Versuchen die Wirtschaftlichkeit der Zerspanbarkeit von Hartmetallen quantifizieren zu können, wurden zunächst die zu ermittelnden Ergebnisparameter definiert. Dabei wurden spezifische Grenzwerte, bis zu denen zerspannt werden kann, ohne dass das Werkzeug Gefahr läuft, zerstört zu werden, festgelegt.

Für den praktischen Teil dieser Diplomarbeit wurden mehrere Fräs- und Schleifversuche mit unterschiedlichen Parametern am Standort des Instituts für Fertigungstechnik und Photonische Technologien in Wien ausgeführt. Durch die Vielzahl unterschiedlicher Parameter konnten optimale Prozessparameter für die Zerspannung von Hartmetall mit einem Kobaltanteil von 12 % ermittelt werden. Beim Vergleich der Fräsdaten mit den Schleifdaten fällt auf, dass die Zerspankräfte nur geringe Auswirkungen auf den Verschleiß des Werkzeuges haben und dieser eher von der Technologie des Werkzeugsystems sowie der Beschichtung des Werkzeuges abhängt. Des Weiteren wurde mit den ermittelten optimalen Fräswerten eine Standzeitbearbeitung durchgeführt, um zusätzlich Aussagen über die Wirtschaftlichkeit des Hartmetallfräsens zu ermitteln. Dabei wurde das Material stirnflächig in mehreren Bahnen zerspannt, bis die vorher definierte Verschleißmarkenbreite erreicht wurde. Danach wurde der Verschleiß analysiert und für jede der fünf Schneiden ausgewertet.

4.1 Bearbeitungsstrategie

Für die Versuche wurden eigens Versuchspläne, welche aus Kapitel 5.4.2 und Kapitel 5.5.2 ersichtlich werden, erstellt. Zuerst wurden die Fräsversuche mit zueinander variierenden Schnittparametern der Schnittgeschwindigkeit, des Vorschubs und der Schnitttiefe durchgeführt. Dabei wurde der Versuchsplan vollständig abgefahren und die zu Beginn des Kapitels 4 genannten Prozessdaten aufgenommen. Bei allen Prozessen wurde ein Hartmetallwürfel bahnweise mit einer radialen Werkzeugüberdeckung von $a_e = 30\%$ bearbeitet. Dadurch lässt sich typisches Besäumen nachstellen. Nach jeder einzelnen Bahn wurden die Prozessdaten aufgenommen und die Schnittparameter verändert, um alle Parametervariationen laut Versuchsplan abfahren zu können. Danach wurden die ermittelten Daten aufbereitet und analysiert, um daraus die optimalen Bearbeitungsparameter abzuleiten. Bei den Schleifversuchen wurden, wie auch bei den Fräsversuchen, die ermittelten Daten aufbereitet und anschließend analysiert. Die beiden Verfahren wurden einander danach gegenübergestellt.

Nach den Schleifversuchen wurde der Standzeitversuch mit den zuvor ermittelten optimalen Fräsparametern absolviert. Dabei wurde nach jeder zehnten Bahn der Fräser auf die vorab definierte Verschleißmarkenbreite untersucht. Nach zurückgelegten 5.500 mm war die definierte Verschleißgröße erreicht und der Versuch wurde beendet. Die Ergebnisse des Versuches wurden analysiert und einer typischen Schleifoperation gegenübergestellt. Abbildung 18 zeigt den Versuchsaufbau mit den verwendeten Schnittparametern.

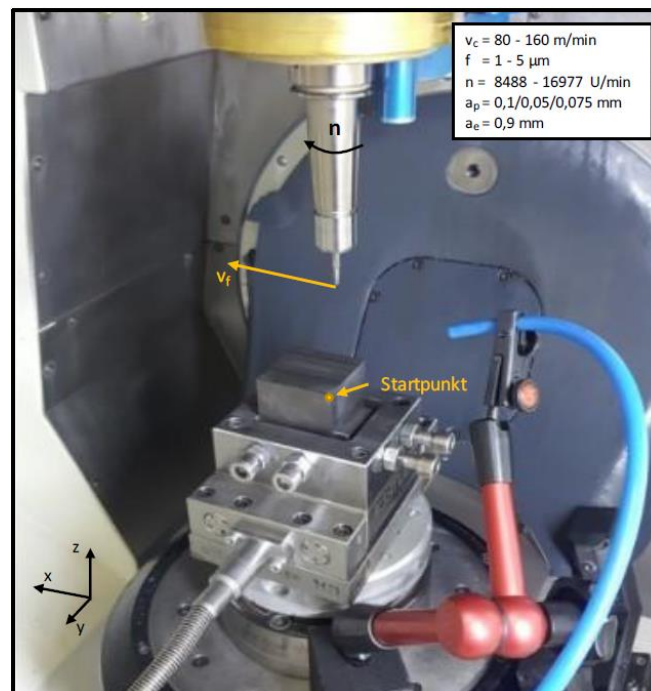


Abbildung 18: Versuchsaufbau mit den für die Fräsversuche verwendeten Schnittparametern

4.1.1 Verwendetes Material

Bei dem für die Versuche verwendeten Material handelt es sich um eine Hartmetallsorte der Firma Boehlerit GmbH & Co. KG. Die Sorte mit Namen „GB20“ wird zum Umformen, zum Schneiden sowie für Warmarbeiten verwendet. Die Rohmaße der angelieferten Blöcke waren ca. 50 mm x 50 mm x 50 mm. Abbildung 19 zeigt den Kubus vor und nach der Bearbeitung.

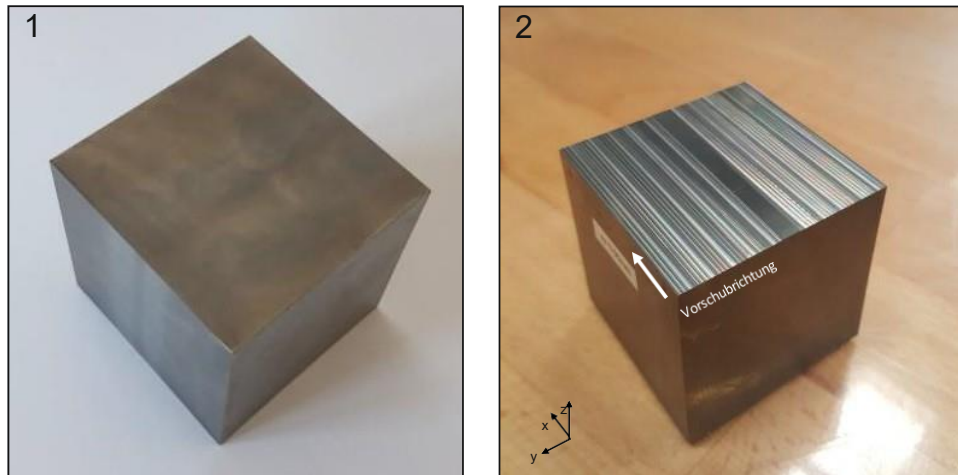


Abbildung 19: Hartmetallwürfel vor der Fräsbearbeitung (1) und nach der Fräsoption (2)

Die meisten Hartmetallsorten unterscheiden sich durch ihren Wolframkarbidanteil, ihren Kobaltanteil, zusätzliche Legierungselemente und ihr Einsatzgebiet. Bei GB20 handelt es sich um ein sogenanntes Mittelkorn, welches als Universalsorte für den Schnittbau verwendet wird. Die für die Versuche gewählte Hartmetallsorte überzeugt durch ihre hohe Härte sowie Zähigkeit. Für die Fräsbearbeitung wurde der Kubus zusätzlich mehrmals plangeschliffen, da die zu bearbeitenden Ebenen herstellbedingt nicht exakt parallel bzw. rechtwinklig zueinanderstanden. So konnten mögliche Bearbeitungsungenauigkeiten und daraus resultierende Abweichungen verringert werden [37].

Abbildung 20 zeigt die Eigenschaften von GB20. Hier werden die Härte sowie die Bruchzähigkeit unterschiedlicher Korngrößen dem Kobaltgehalt gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang muss auch der Streubereich der Körner berücksichtigt werden, weshalb das Material GB20 nicht genau auf der Linie liegt. Anhand der Abbildung ist gut zu erkennen, dass mit zunehmendem Kobaltanteil die Härte sinkt und die Bruchzähigkeit zunimmt, was wiederum Auswirkungen auf die Zerspanbarkeit des Materials hat. Es ist zu erkennen, dass GB20 hinsichtlich der Härte und der Bruchzähigkeit im mittleren Bereich liegt. Das für die Versuche verwendete Material GB20 liegt in einem günstigen Zerspanbereich, was sich durch den hohen Kobaltanteil von ca. 12 % erklären lässt [37, 38].

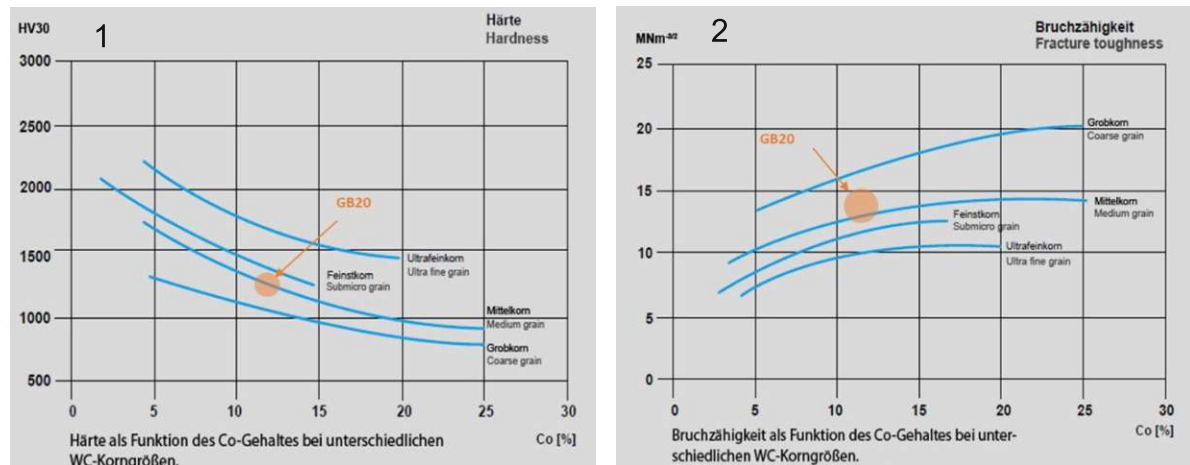


Abbildung 20: Hartmetallkornsorten, Kobaltgehalt in Abhängigkeit zur Härte (1) sowie zur Bruchzähigkeit (2) [37]

In Tabelle 6 werden die Eigenschaften des für den Versuch gewählten Hartmetalls dargestellt. Auffällig ist der hohe Kobaltgehalt sowie die Härte von 1.275 HV 30. Außerdem ist zu erkennen, dass der E-Modul etwa dreimal so groß ist wie bei herkömmlichem Stahl.

Tabelle 6: Eigenschaften der Hartmetallsorte GB20 [37]

Korngröße	2,5 μm	Härte ISO 3878	1.275 HV30
ISO 513	K40	Druckfestigkeit ISO 4506	4.800 N/mm ²
Wolframcarbide	87,8 %	Bruchzähigkeit K _{IC}	15,5 MNm ^{-3/2}
Kobalt	12 %	E-Modul ISO 3312	585 kN/mm ²
Andere	<0,2 %	Wärmedehnungskoeffizient	5,5 $10^{-6}/\text{K}$
Dichte ISO 3369	14,3 g/cm ³	Biegebruchfestigkeit ISO 3327	3.000 N/mm ²

4.1.2 Verwendete Maschine

Bei den Versuchen wird ein Bearbeitungszentrum des Typs „Ultrasonic 30 linear“ der Firma DMG Mori verwendet. Es zeichnet sich durch seinen hohen Drehzahlbereich und seine Wiederholpräzision bedingt durch Linearantriebe aus. Tabelle 7 zeigt die Maschinendaten im Überblick [39].

Tabelle 7: Maschinendaten des Bearbeitungszentrums „DMG Mori Ultrasonic 30 linear“ [39]

max. Spindeldrehzahl	40.000 min ⁻¹
max. Spindeldrehzahl Ultrasonic	30.000 min ⁻¹
max. Werkstückgröße	max. Ø 250 mm
Vorschubgeschwindigkeit	12.000 mm/min
Leistung	15,2 kW
max. Tischbelastung (5 Achs)	80 kg
Arbeitsbereich	max. 300/320/280 mm (X/Y/Z)
Achsenanzahl	5 (X/Y/Z/B: ±120°/C: 360°, max. 100 min ⁻¹)
Spannsystem	HSK-E40
CNC-Steuerung	Siemens Sinumerik 840D
Baujahr	2015

Die Maschine wird sowohl für die Fräs- als auch für die Schleifversuche verwendet, da sie einerseits für die Kühlung mittels Druckluft andererseits auch für herkömmliche Kühlschmiermittel geeignet ist. Für die Versuche ist eine Maschine gewählt worden, die für mehrere Bearbeitungsprozesse geeignet ist, um zu zeigen, dass die Bearbeitung von Hartmetallen keine Sondermaschinen benötigt. Da die Maschine ein integriertes Werkzeugvermessungssystem besitzt, konnte das Werkzeug nach dem Ausspannen in der Maschine vermessen und referenziert werden. Dadurch war kein aufwendiges externes Werkzeugvermessen nötig und die damit einhergehende Prozessdauer stark verkürzt worden. Bei den Versuchen sind Drehzahlen von 39.789 min⁻¹ erreicht worden. Die hohe Drehzahl ist ein weiterer Grund, warum diese Maschine für die Versuche verwendet worden ist.

4.1.3 Für den Fräsversuch verwendete Werkzeuge

Bei dem zum Einsatz gekommenen Werkzeug handelt es sich um einen CVD-D-Schafffräser der Firma Tirotool. Das Einsatzgebiet dieser Werkzeuge erstreckt sich vom Schruppen bis zum Finish aller NE-Metalle, von Edelmetalllegierungen, von Hartmetalle und von Keramikgrünlingen. Die Beschichtung des Fräasers hat einen 99,9%igen Diamantanteil und hat weder eine Hartmetallunterlage noch eine metallische Bindephase. Sie zeichnet sich durch ihre gute Bruchzähigkeit sowie ihre schartenfreien Schneidkanten aus. Der Werkzeugdurchmesser der verwendeten Fräser beträgt $d = 3$ mm.

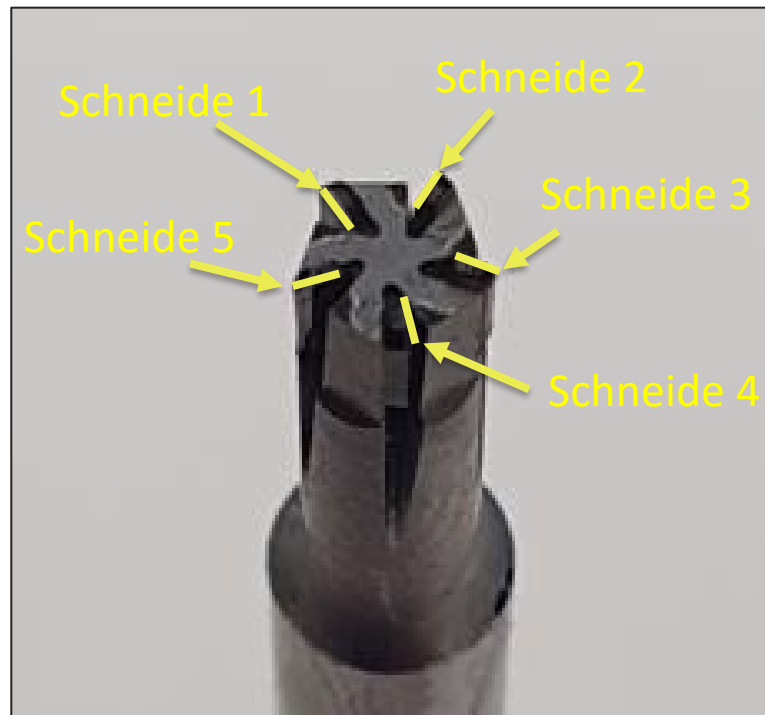


Abbildung 21: Schneiden des Fräswerkzeuges

Die genaue Bezeichnung des zum Einsatz gekommenen Fräswerkzeuges ist „VZSMT-HL-D03-LC015-09-LC045-ER03-Z5“. Der Fräser besitzt fünf Schneiden, welche in Abbildung 21 gekennzeichnet sind. Die Schneiden wurden vor dem Start der Versuche eindeutig markiert, um sie jederzeit voneinander unterscheiden zu können [40].

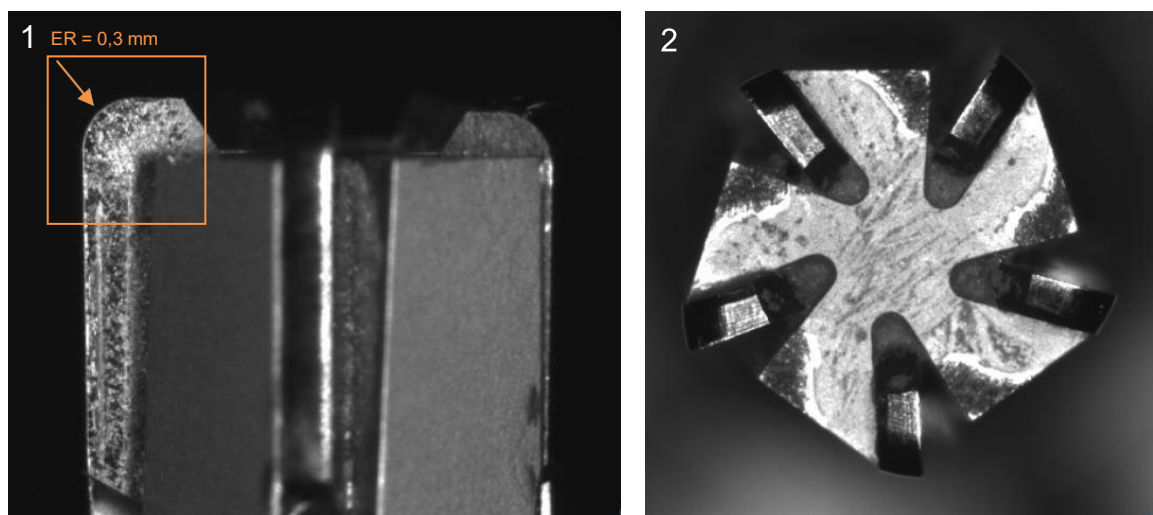


Abbildung 22: Mit der Universalmessmaschine Zoller Smartcheck 600 aufgenommene Schneidkantenbilder - Frontalansicht (1) und stirnseitige Ansicht (2)

Um einen noch besseren Blick auf den Zustand die Schneiden zu erhalten, wurden sie genauer betrachtet. Abbildung 22 zeigt eine Frontalansicht der Schneide mit Blick auf die Spanfläche und eine stirnseitige Ansicht aller fünf Schneiden, aufgenommen mit

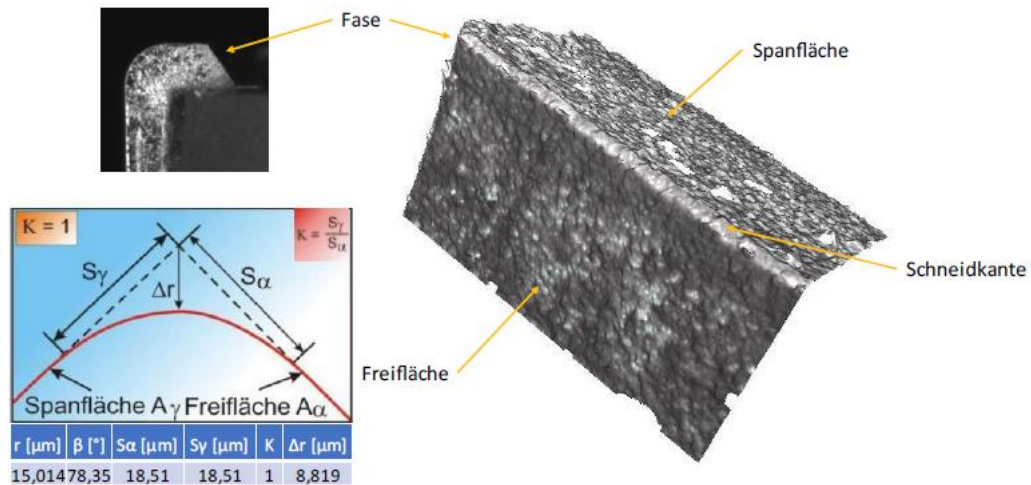


Abbildung 23: Dreidimensionale Schneidkantenaufnahme der Schneide 1 des Fräasers mittels Alicona Infinite Focus [41]

der Universalmessmaschine Zoller Smartcheck 600. Für die Verschleißuntersuchung wurde der eingezeichnete Bereich genauer betrachtet. Zusätzlich zur Untersuchung mit der Messmaschine wurde Schneide 1 des Fräasers dreidimensional vermessen (siehe Abbildung 23), um Informationen über Schneidkantenwerte wie den Schneidkantenabstand Δr bzw. den Schneidkantenradius r zu erhalten [41].



Abbildung 24: Werkzeugaufnahme HSK-E40 des Fräasers

Abbildung 24 zeigt den Fräser eingespannt in der Werkzeugaufnahme nach einem Bearbeitungszyklus. Bei der Werkzeugaufnahme handelt es sich um einen HSK-E40-Hohlschaftkegel. Eine Vermessung des Rundlaufes wurde nicht durchgeführt. Aufgrund der Bearbeitung ist die Werkzeugaufnahme mit einer feinen Schicht von Hartmetallspänen bedeckt.

4.1.4 Für den Schleifversuch verwendete Werkzeuge

Um einen möglichst guten Vergleich zur Hartmetallbearbeitung mittels Fräsen zu erhalten, wurde der in Abbildung 25 gezeigte Schleifstift für die Schleifvorversuche verwendet. Der Durchmesser des Werkzeuges beträgt wie beim Fräs Werkzeug $d = 3 \text{ mm}$. Das Schleifmaterial ist Diamant mit einer galvanischen Nickelbindung der Firma Hoffman Group mit der Bezeichnung „DZY-A 3,0-4/3-36 D126“ [42].



Abbildung 25: Für die Schleifvorversuche verwendetes Werkzeug

In Tabelle 8 sind die Werkzeugdaten des Schleifwerkzeuges DZY-A 3,0-4/3-36 D126 nochmals übersichtlich dargestellt [43].

Tabelle 8: Werkzeugdaten des verwendeten Schleifwerkzeuges [42]

Werkzeug DZY-A 3,0-4/3-36 D126

Schleifmittel	Kopf- \varnothing	Kopflänge	Gesamtlänge	Schaft- \varnothing	Korngröße	Produktart
Diamant	3 mm	4 mm	40 mm	3 mm	125 μm	Schleifstift

4.2 Auswertemethoden

In diesem Kapitel wird auf die Methoden zur Auswertung der ermittelten Prozessdaten wie der Zerspankraft, der Oberflächengüte sowie des Verschleißes eingegangen. Es wird definiert, welche Messungen durchgeführt werden und wie hoch die tolerierbaren Grenzen der Messbereiche bei der Verschleißmessung des Standzeitversuches sein dürfen.

4.2.1 Auswertemethoden der Zerspankräfte

Für die Kraftaufnahmen wird ein stationäres Mehrkomponenten-Dynamometer des Typs 9129 AA der Firma KISTLER verwendet, welches sich durch seine kleine Bauhöhe, den großen Messbereich und nur sehr geringe Temperaturfehler auszeichnet. Die Kräfte werden zunächst mittels Software aufgezeichnet und danach aufbereitet, um schlüssige Werte in Diagrammform zu erhalten [44].

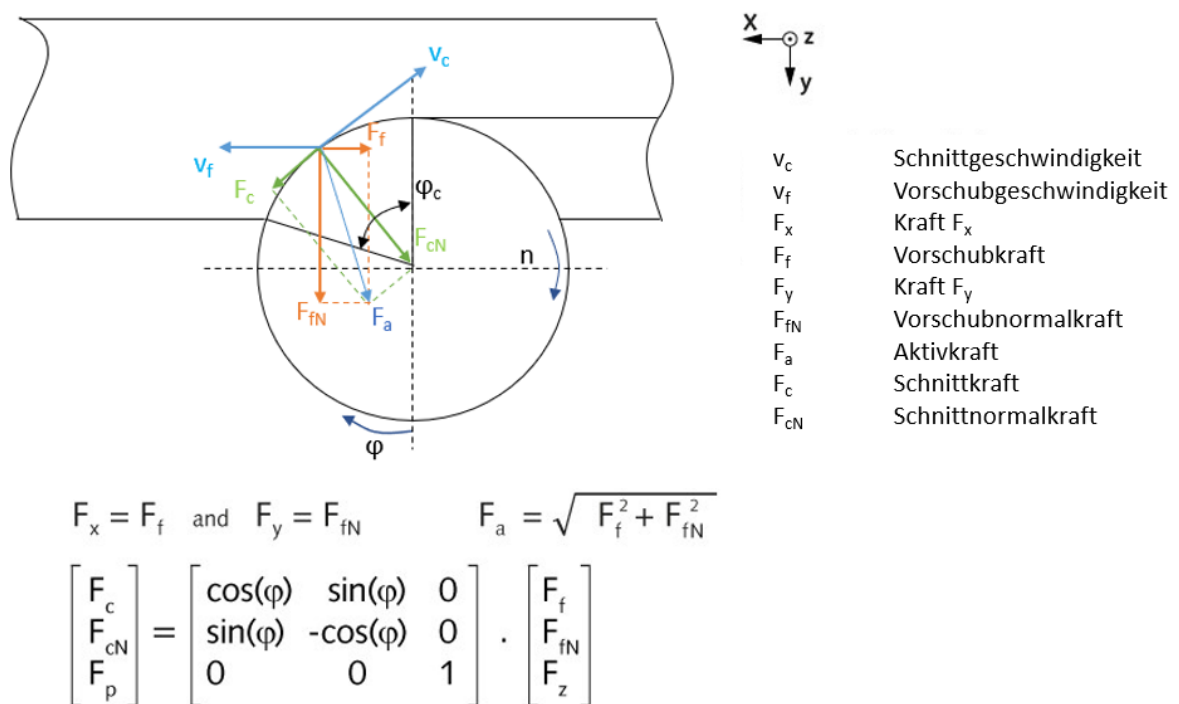


Abbildung 26: Mit dem Mehrkomponenten-Dynamometer ermittelbare Kräfte [45]

In Abbildung 26 sind die Kräfte, welche mit dem stationären Mehrkomponenten-Dynamometer aufgenommen werden können, grafisch dargestellt. Es lassen sich die orthogonalen Kraftkomponenten, und zwar die Vorschubkraft F_f , die Vorschubnormalkraft F_{fN} und die Passivkraft F_p bestimmen. Durch die Ermittlung der oben genannten Zerspankräfte lassen sich auch weitere Kräfte wie die Aktivkraft F_a

berechnen [45]. Die so bestimmten Kräfte werden einander mit allen verwendeten Vorschüben und Schnittgeschwindigkeiten gegenübergestellt (siehe Abbildung 27). Dadurch ist es möglich die einzelnen Parameter gezielt zu vergleichen.

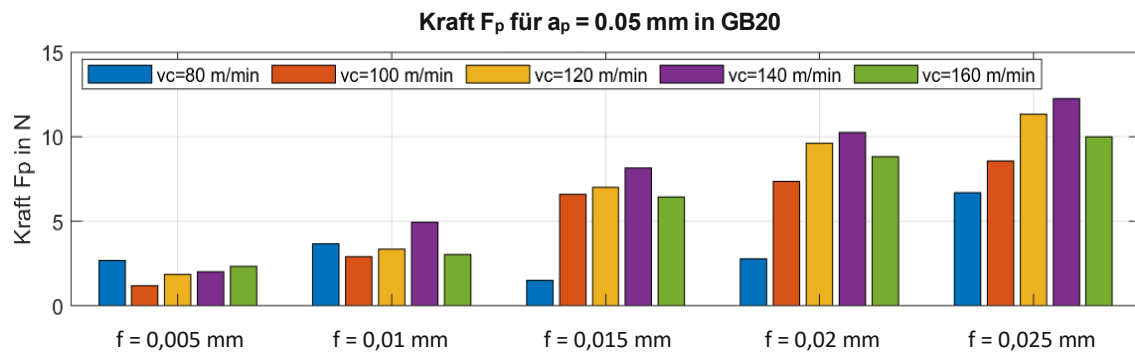


Abbildung 27: Auszug der Zerspankräfte für den Vorversuch mit einer Schnitttiefe von $a_p = 0,05$ mm

4.2.2 Auswertemethoden zur Bestimmung der Oberflächenrauheiten

Die Oberflächengüte ist eines der wichtigsten Kriterien der Zerspanung. Daher wird bei den bearbeiteten Flächen die Rauheit mittels Abformverfahren ermittelt. Dabei wird eine Abformmasse mithilfe einer Dosiereinheit auf die vorher mit Alkohol gereinigte Fläche aufgetragen und danach unter dem Mikroskop analysiert. Für die Reinigung wird 70%iger Alkohol und eine feine Bürste verwendet. Abbildung 28 zeigt die verwendeten Arbeitsmittel.



Abbildung 28: Arbeitsmittel für die Aufnahme der Oberflächenrauheiten mittels Abformmasse

Zusätzlich wird die Abformmasse mit einem Gewicht beschwert, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Kunststoffes zu erreichen. Das Beschweren mit einem Gewicht erleichtert das Abnehmen der Probe, da die Masse nach wenigen Minuten aushärtet und sich ansonsten nur äußerst schwer vom Material lösen lässt. In der Bilderserie, die in Abbildung 29 gezeigt wird, ist der gesamte Ablauf der Oberflächenuntersuchung dargestellt, beginnend vom Auftragen der Paste bis hin zum Abziehen. Für die Auswertung der durch das Abformen ermittelten Oberflächen wird ein 3D- Messsystem verwendet.



1. Auftragen der Masse 2. Gewicht zur Beschwerung 3. Gleichmäßige Verteilung der Masse 4. Fertig Abgeformtes Stück

Abbildung 29: Bilderserie der Oberflächenaufnahme mittels Abformmasse

In Abbildung 30 ist die Oberflächengüte der verschiedenen Bahnen mithilfe des hochauflösenden Mikroskops Alicona Infinite Focus dargestellt. Gezeigt werden die bearbeiteten Bahnen einer Schnitttiefe, wobei eine Bahnbreite 0,9 mm und die Gesamtbreite von 50 mm beträgt. Das entspricht einer Überdeckung von 30 % bei einem Fräsdurchmesser von $d = 3$ mm. Für die Ermittlung der einzelnen Oberflächenrauheiten der abgefahrenen Bahnen wird die Auswertesoftware des Mikroskops verwendet. Dabei werden Bearbeitungsfilter über die aufgenommenen Bilder gelegt, um die farblichen Abgrenzungen der Aufnahme zu zeigen. Dadurch werden die einzelnen Bahnen der Ebene deutlich sichtbar.

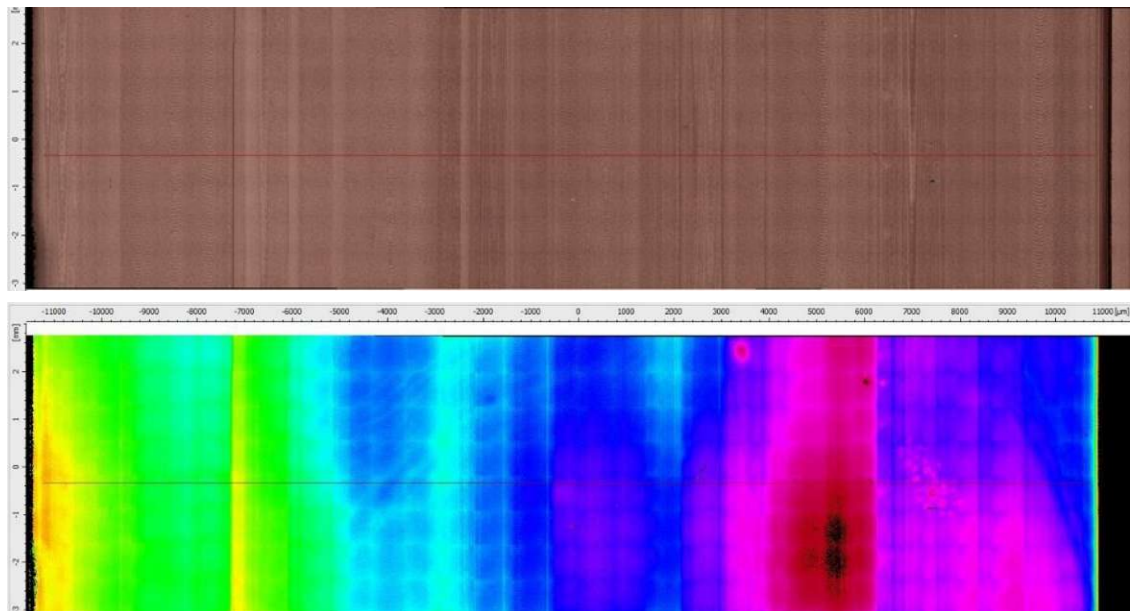


Abbildung 30: Oberflächenprofil der abgefahrenen Bahnen einer Schnitttiefe

Für die Ermittlung der Rauheitswerte wird eine Gerade in die Bahn gelegt und daraus der Mittelwert der Rauheiten bestimmt. Abbildung 31 zeigt den so ermittelten Rauheitswert in μm über die gesamte Würfellänge. Anhand dieser Grafik werden die einzelnen Oberflächenrauheiten der abgefahrenen Bahnen ausgewertet.

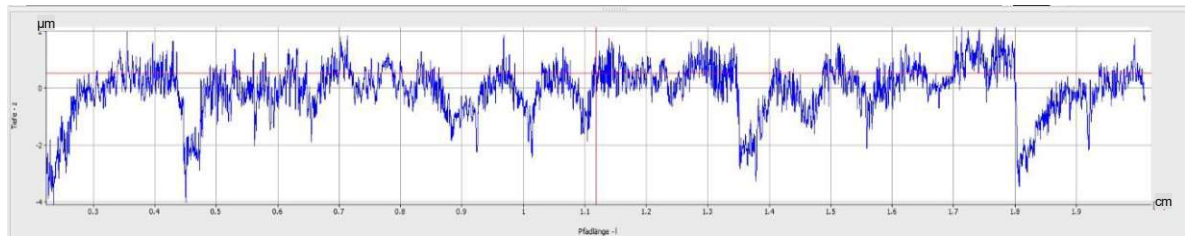


Abbildung 31: Rauheitsprofil der zerspannten Oberflächen

4.2.3 Auswertemethoden zur Verschleißmessung

Für die Auswertung des Verschleißes werden mehrere Aufnahmen der Schneidkanten mit Augenmerk auf unterschiedliche Bereiche gemacht. Die Schneidkantenbilder werden nach einer definierten Anzahl von Schnitten aufgenommen, um so den graduellen Verschleiß bzw. etwaige Ausbrüche des Fräsers sofort erkennen und aufzunehmen zu können. Für eine eindeutige Beschreibung des Standvermögens müssen immer die Standbedingungen, die Standkriterien und die Standgrößen angegeben werden. Unter dem Begriff des Standvermögens wird die Fähigkeit eines Wirkpaares, einen bestimmten Zerspanvorgang durchzustehen, verstanden. Das Standvermögen ist von der Schneidhaltigkeit des Werkzeuges, der Zerspanbarkeit des Werkstückes und den Standbedingungen abhängig [46].

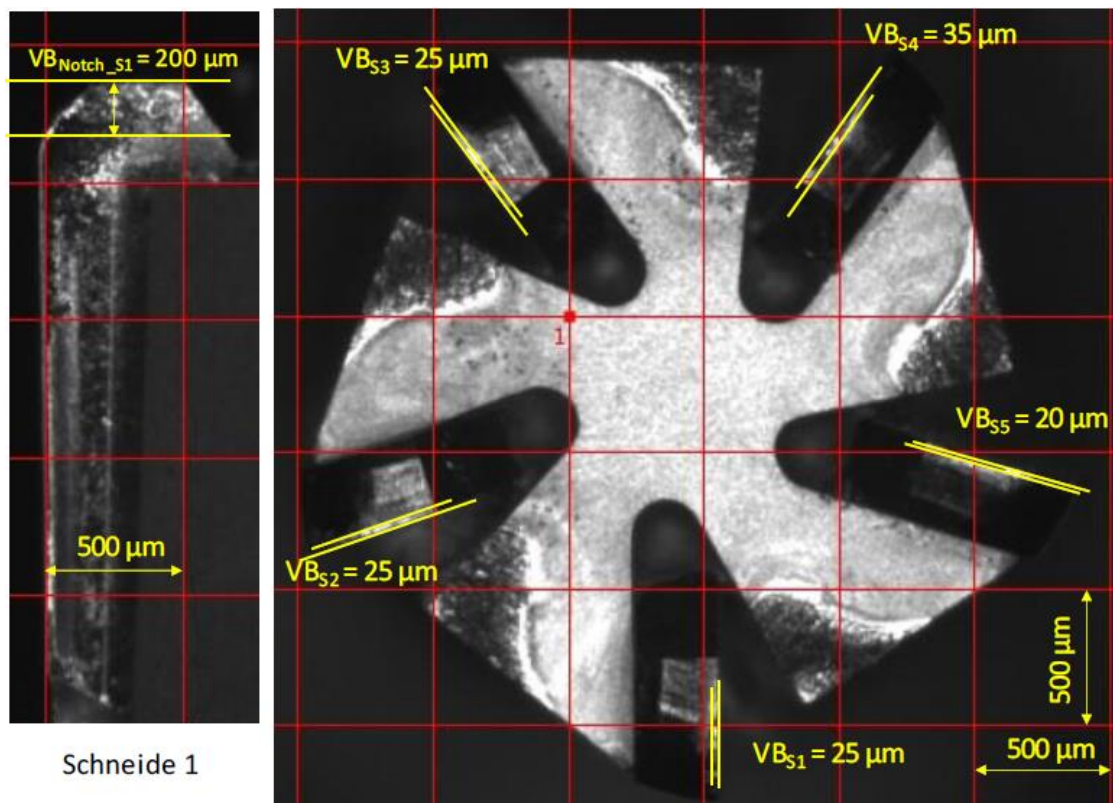


Abbildung 32: Verschleißmessung der Stirnseite sowie Verschleißmessung der Schneide 1 nach 500 mm

Die Beurteilung des Standvermögens für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in dieser Arbeit anhand der Standgröße der Standzeit durchgeführt. Im Index werden das Standkriterium und die Standbedingung angezeigt. Das wird beispielhaft in Gleichung (1) aufgezeigt [2].

$$T_{v_c 140; VB 0,1} = 31 \text{ min} \quad (1)$$

Die vorgegebenen Größen sind die Schnittgeschwindigkeit v_c , als Standbedingung und die Verschleißmarkenbreite VB als Standkriterium [46]. Die ermittelten Verschleißmarkenbreiten VB und Ausbrüche VB_{Notch} der Schneiden sind in Abbildung 32 zu sehen. Die Schneiden werden in Folge einmal frontal und einmal seitlich betrachtet, um einen Vergleich zwischen den einzelnen Schneidkanten zu erhalten (siehe Abbildung 33). Das wird mit dem optischen Mikroskops Zoller Smartcheck 600 durchgeführt. Hier wird auch die maximal zulässige Verschleißmarkenbreite von $VB = 100 \mu\text{m}$ definiert [47]. Bei Erreichen dieser Breite wird der Versuch beendet, da ab dieser Breite die Gefahr des Werkzeugversagens deutlich zunimmt. Es wird zudem die maximale Ausbruchgröße $VB_{\text{Notch}} = 250 \mu\text{m}$ definiert. Da das Werkzeugversagen bei dünn-schichtigen CVD-Diamanten überwiegend auf Schichtabplatzungen und Ausbrüche zurückzuführen ist, muss bei der Analyse der Schneiden darauf besonders geachtet werden. Zudem hat der Einfluss des Schichtwerkstoffes und der Schichtherstellung eine Auswirkung auf das Einsatzverhalten der CVD-diamantbeschichteten Werkzeuge [48]. Da die seitlichen Ansichten aufgrund der Lage des Verschleißes keine relevanten Aussagen liefern, werden für die weitere Analyse des Verschleißes nur die Frontansicht der Spanfläche und die stirnseitige Ansicht des Werkzeuges verwendet.

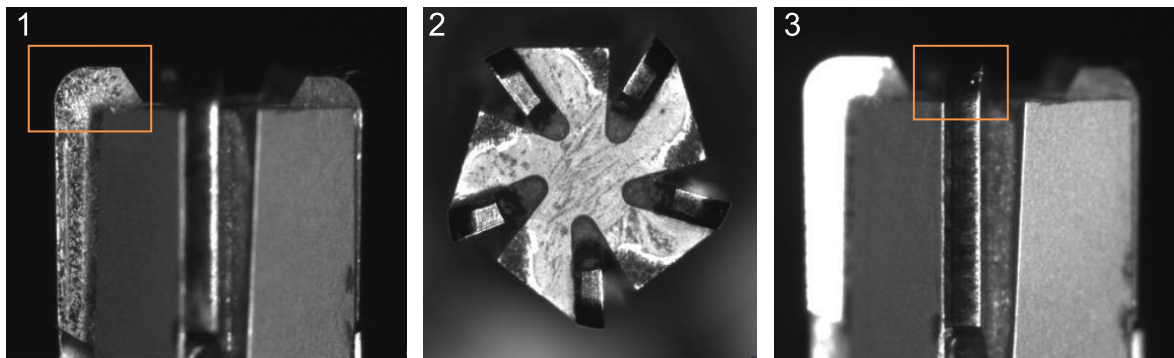


Abbildung 33: frontale (1), stirnseitige (2) und Seitenaufnahmen (3) mit dem Zoller Smartcheck 600

5 Zerspanungsversuche

Im Folgenden wird auf die Bearbeitungsstrategie, das Material, die Schnittparameter, die Maschine, die Werkzeuge und die Auswertemethoden genauer eingegangen. Des Weiteren werden der Versuchsaufbau und der Bearbeitungsablauf detailliert erklärt und gezeigt, wie die Kräfte während des Versuches gemessen werden. Auf die Oberflächenanalyse zur Bestimmung der Rauheiten sowie die Verschleißaufnahmen des Fräasers wird ebenfalls eingegangen.

5.1 Bearbeitungsstrategie

In Abbildung 34 ist links ein 3D-Modell für die Fräsbearbeitung sowie rechts der dabei zurückgelegte Weg dargestellt. Es wird immer eine Bahn abgefahren und der Fräser wieder auf den nächsten Startpunkt geführt. Bei der Zerspanung wurde das Verfahren des Stirnfräsens angewendet. Dabei wird mittels Gleichlaufräsen zerspant.

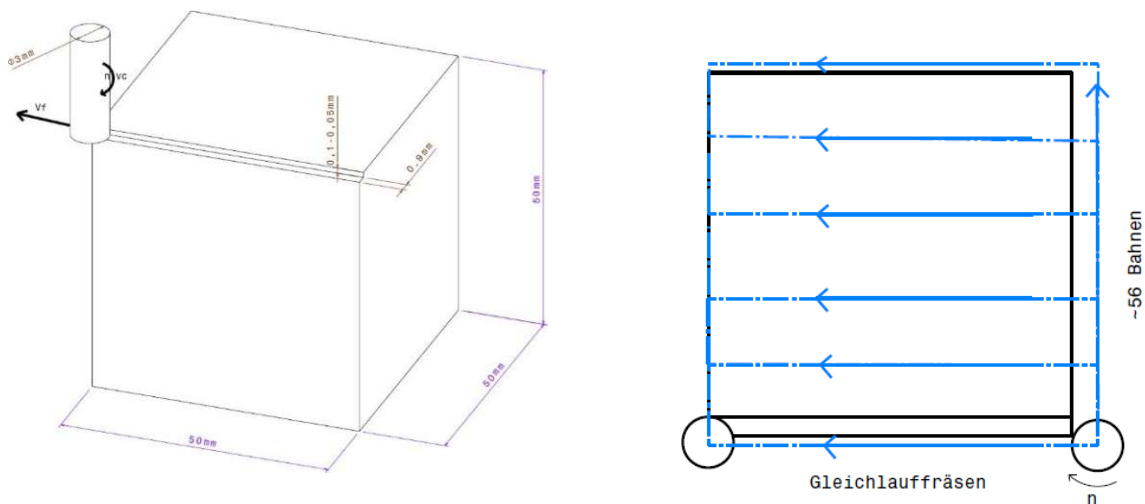
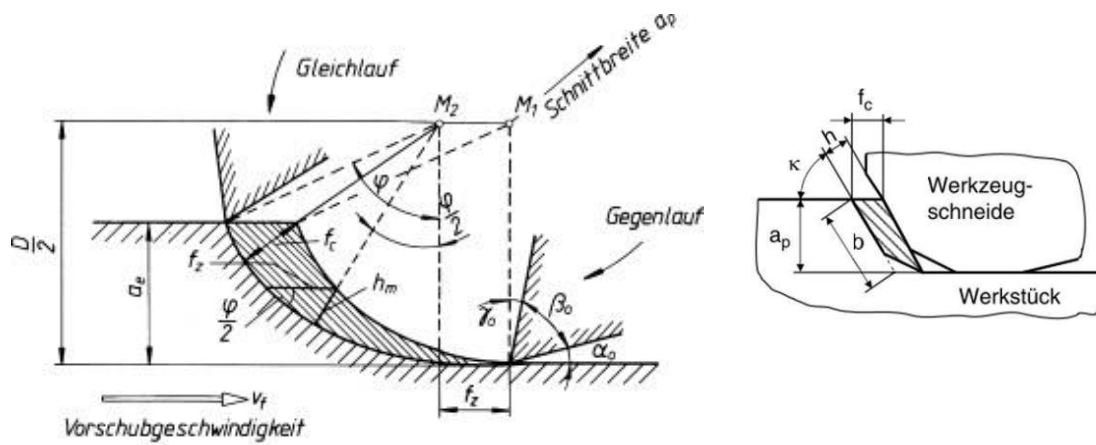


Abbildung 34: Dreidimensionales Modell (links) und der Bearbeitungsweg (rechts) der Fräsbearbeitung

Abbildung 35 zeigt schematisch, wie die Späne entstehen sowie einige der relevanten Parameter wie die Spanndicke und die Schnittbreite. Da die Zustellbreite a_e sowie Zustelltiefe a_p klein sind und es sich um ein äußerst sprödes Material handelt, entstehen bei der Zerspanung hauptsächlich Reißspäne [2, 49].



- $\overline{M_1 M_2}$ ergibt Zahnvorschub f_z
 h_m Mittenspannungsdicke beim halben Vorschubrichtungswinkel $\varphi/2$
 a_e Schnitttiefe
 f_c Schnittvorschub

Abbildung 35: Ermittlung der Spanwerte beim Gleichlaufräsen [35, 49]

In Tabelle 9 sind die mittleren Spannungsdicken bei den verwendeten Parametern aufgeführt. Für die Ermittlung der Werte wurde Gleichung (2) verwendet. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Spanbreite nur wenige Mikrometer beträgt. Das liegt einerseits an dem geringen Vorschub, andererseits an dem Verhältnis der Überdeckung zum Schneiddurchmesser [49].

Tabelle 9: Ermittlung der Mittenspannungsdicke h_m

κ_w [°]	d [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]	h_m [mm]
90	3	0,9	0,001	0,00048966
90	3	0,9	0,002	0,00097932
90	3	0,9	0,003	0,00146899
90	3	0,9	0,004	0,00195865
90	3	0,9	0,005	0,00244831

$$h_m = f_z * \sqrt{\frac{a_e}{d}} * \sin \kappa_w = \quad (2)$$

- h_m mittlere Spannungsdicke [mm]
 a_e radiale Zustellbreite [mm]
 f_z Zahnvorschub [mm]
 d Werkzeugdurchmesser [mm]
 κ_w Einstellwinkel [°]

5.2 Beschreibung des Versuchsablaufs

Nachfolgend wird der gesamte Ablauf des Versuches detailliert beschrieben. Nachdem der Fräser vermessen und in die Maschine eingespannt worden ist, wird die Kraftaufnahme vorbereitet. Dabei wird die Messung abgeglichen und darauf geachtet, dass bei der Kraftermittlung keine Abweichung entsteht. Das kann durch Vibrationen in der Nähe des Kraftaufnehmers passieren. Bei einer Abweichung der Messwerte wird die Messung erneut abgeglichen. Das geschieht so lange, bis die Abweichung ausgeglichen ist. Danach wird die Druckluftkühlung eingeschaltet und der Prozess gestartet. Der Fräser fährt auf die Startparameter und bleibt dort aufgrund der manuell auf Null gesetzten Vorschubgeschwindigkeit stehen. Nun wird die Messung des Mehrkomponenten-Dynamometers von Kistler gestartet und die Vorschubgeschwindigkeit zügig erhöht. Sobald der Fräser die Bahn abgefahren hat und zum Ausgangspunkt zurückgekehrt ist, wird die Messung des Dynamometers gestoppt und der Datensatz gesichert.

Danach werden die Schnittparameter geändert und der Prozess wird wiederholt. Das wird so lange gemacht, bis laut Versuchsplan eine neue Drehzahl verwendet werden muss. Bevor mit der neuen Drehzahl gearbeitet werden kann, wird der Fräser ausgespannt, sodass mit dem Mikroskop die vorgesehenen Verschleißbilder aufgenommen werden können. So wird der gesamte Prozess für eine Schnitttiefe durchgeführt. Sobald eine Schnitttiefe abgefahren ist, wird der Hartmetallwürfel mit Alkohol und Bürste sorgfältig gereinigt. Nach der Reinigung wird die Abformmasse auf die bearbeitete Fläche aufgetragen und mit einem Gewicht beschwert. Wenige Minuten später wird die Masse abgezogen und für die Oberflächenmessung bereitgestellt. Beim Auftragen der Abformmasse wird der Würfel nicht aus der Vorrichtung genommen, um ein nochmaliges Antasten bzw. Geradestellen der Ebene zu vermeiden. Dadurch ist das Abziehen der Formmasse etwas schwieriger, da sie äußerst fest an der Oberfläche klebt. Nachdem eine Schnitttiefe abgefahren worden ist, werden die nachfolgenden Schnitttiefen nach demselben Prozessschema abgearbeitet und die Werte aufgenommen, um diese danach auszuwerten.

Im Gegensatz zu den Fräsversuchen wird bei den Schleifversuchen auf eine Verschleißmessung verzichtet und anstelle von Druckluft mit Kühlschmiermittel gekühlt. Der sonstige Ablauf des Prozesses ist größtenteils gleich.

5.3 Versuchsaufbau

Sowohl der Vorversuch als auch der Standzeitversuch haben den gleichen Grundaufbau. Das wiederum vereinfacht den ganzen Prozessablauf. Der Computertisch mit der Messhardware für die Aufnahme der Kräfte ist neben der Maschine platziert, von dort aus sind die Kabel der Messkraftdose in den Maschinenraum geführt worden (siehe Abbildung 36).

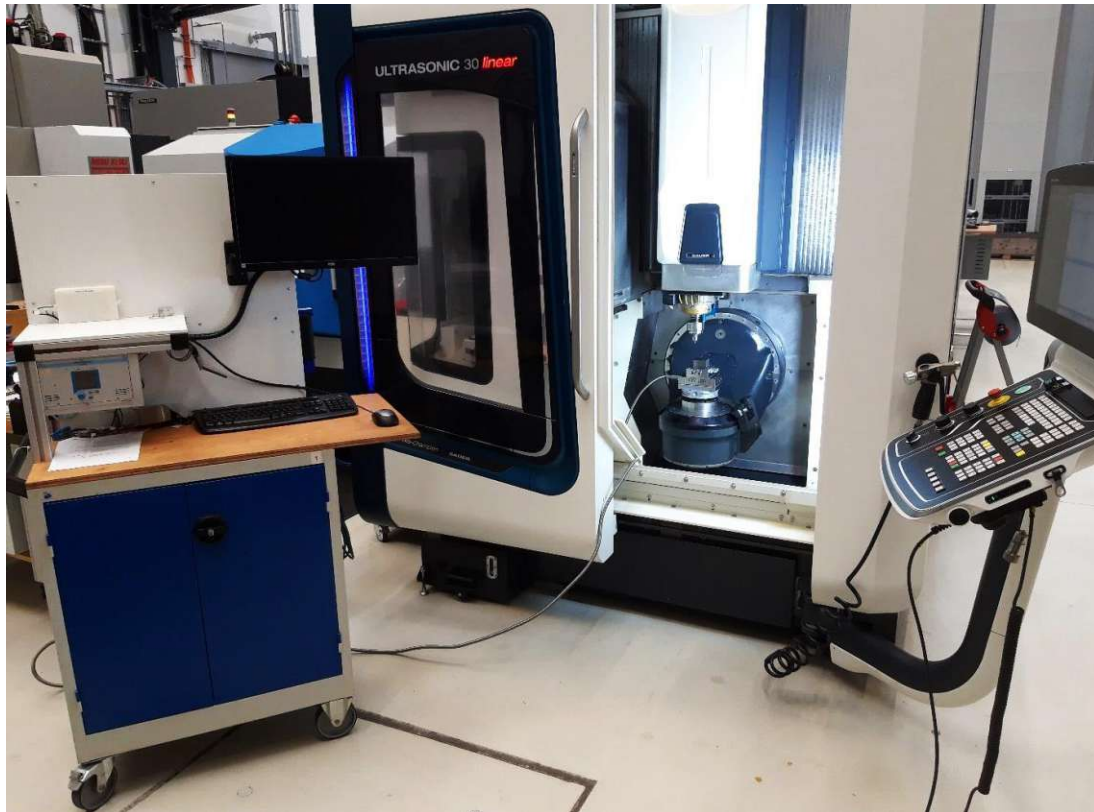


Abbildung 36: Positionierung der Messhardware vor der Maschine für die Vor- bzw. Hauptversuche der Fräs- und Schleifbearbeitung

Das Innere des Bearbeitungsraumes des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 37 dargestellt. Der Aufbau besteht grundsätzlich aus der Messkraftdose inklusive der Verkabelung, welche mit einer eigens hergestellten Grundplatte verschraubt ist, aus der Würfelhalterung, welche mit der Messkraftdose verschraubt ist, und aus der magnetischen Halterung der Luftkühlung, in welcher der Druckluftschlauch eingesetzt ist.

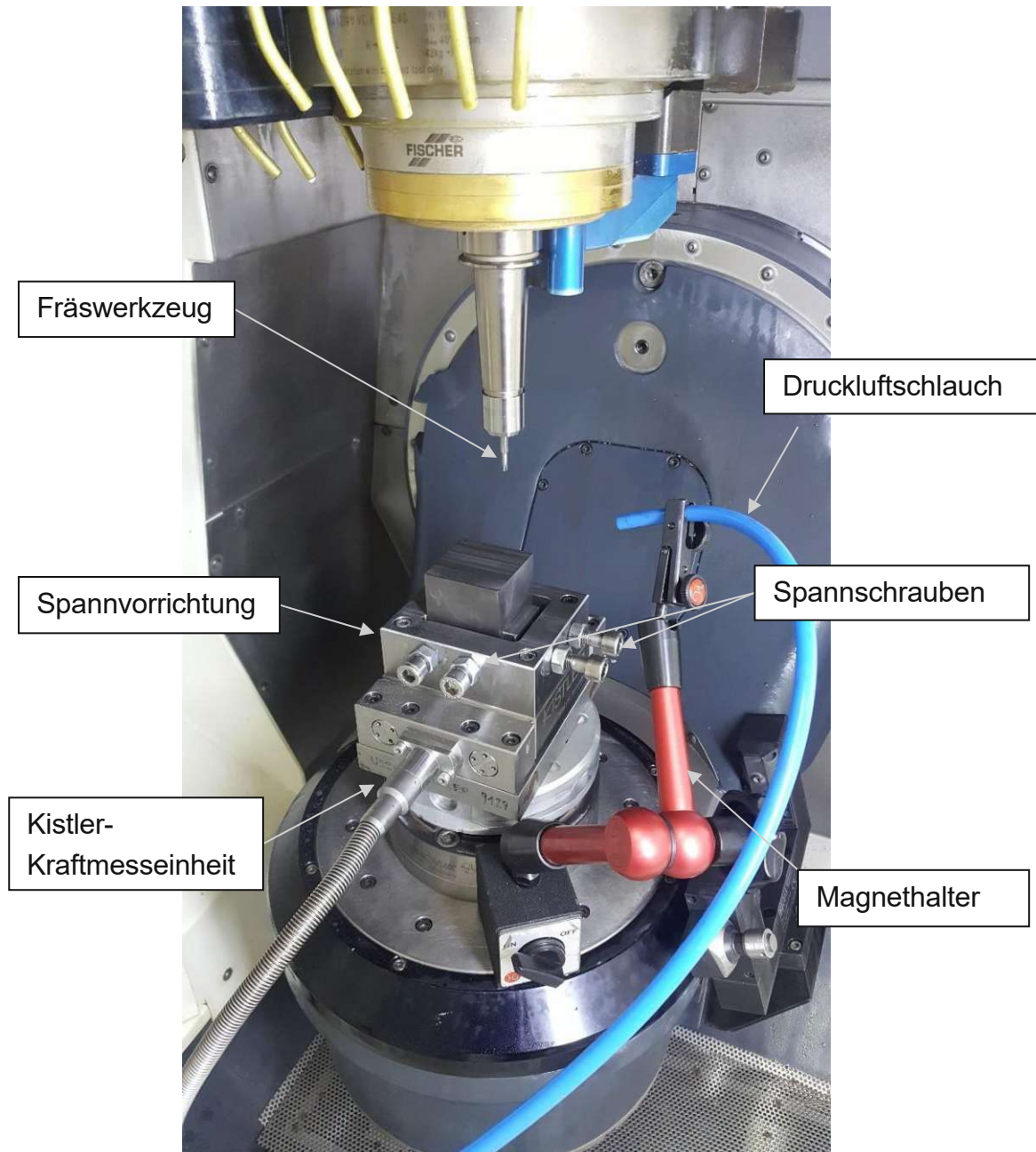


Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Fräsvorversuche und die Standzeitversuche

Die Grundplatte der Kistler-Messkraftdose und die Spannvorrichtung des Hartmetallwürfels sind eigens für die Versuche konstruiert und hausintern gefertigt worden. Diese zusammengeschrubte Vorrichtung ist ebenfalls in Abbildung 37 zu sehen. Für die Befestigung des Würfels werden vier Schrauben, welche paarweise versetzt sind, verwendet. Die Herausforderung bei der Montage des Versuchsaufbaues ist die Positionierung des Druckluftschlauches und die Verkabelung der Messkraftdose. Da beide von außerhalb der Maschine in den Bearbeitungsraum geführt werden, müssen sie so positioniert werden, dass sie den Bearbeitungsprozess nicht beeinträchtigen. Der Druckluftschlauch wird durch einen Spalt in der Maschinentür geführt. Der Aufbau der Vorrichtung sowie der Messwerkzeuge wird in Abbildung 38 verdeutlicht. Abbildung 38 zeigt die Maschinengrundplatte auf der die

eigens hergestellte Befestigungsplatte für die Kistler-Kraftmessdose, und die Messkraftdose selbst aufgebracht werden. Bei der Befestigung der Messkraftdose muss darauf geachtet werden, dass sie möglichst gleichmäßig verschraubt wird, um keine Schäden an den Kontakten zu erzeugen.

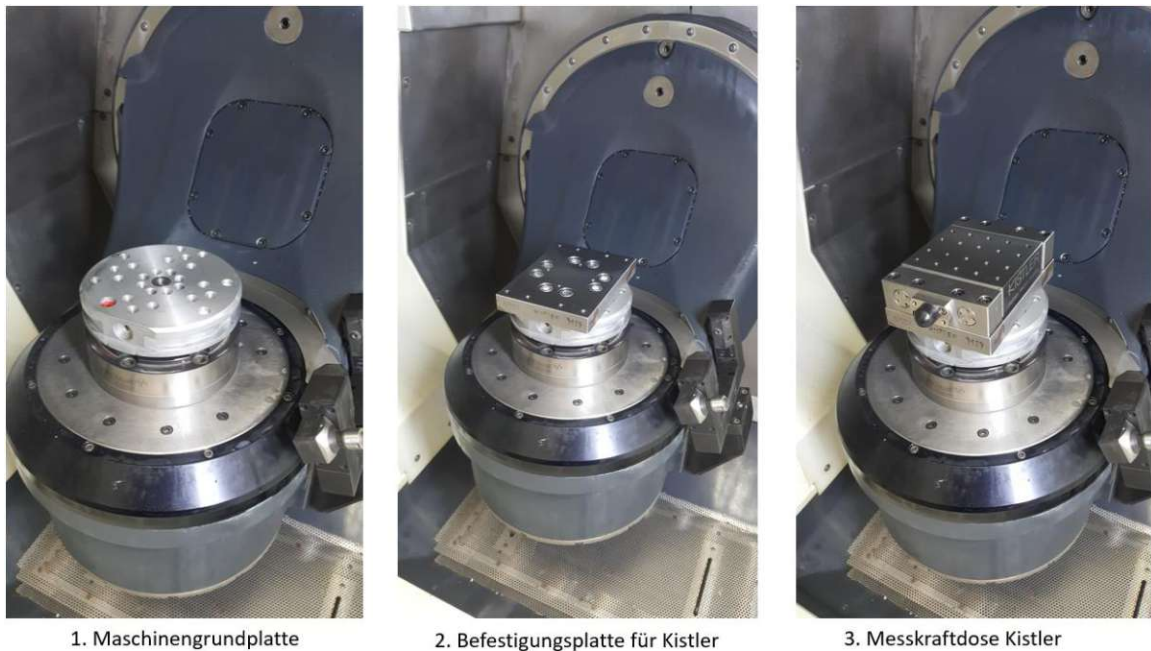
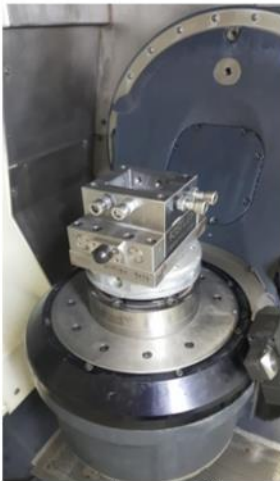


Abbildung 38: Montageablauf für die Befestigung der Würfelhalterung inklusive der Messplatte

Abbildung 39 zeigt die Halterung des Hartmetallwürfels mit dem eingesetzten Würfel. Zur Befestigung des Würfels dienen vier Schrauben, welche ihn paarweise gegen die Vorrichtung drücken. Auf den beiden Fotos rechts in Abbildung 39 ist die Befestigung der Verkabelung der Messkraftdose und der Aufbau des Druckluftschlauches mittels magnetischer Vorrichtung zu sehen. Bei der Positionierung des Druckluftschlauches und der magnetischen Vorrichtung, welche ihn fixiert, ist darauf geachtet worden, dass sie das integrierte Werkzeugvermessungssystem nicht blockieren, und der Fräser jederzeit in der Werkzeugmaschine vermessen werden kann. Zudem wird die zu bearbeitende Fläche des Würfels vor dem Start abgetastet, um eine mögliche Winkelabweichung durch das Einspannen bzw. Ungenauigkeiten der Vorbearbeitung, zu vermeiden.



4. Halterung Würfel



5. Würfel befestigt



6. Messkraftdose angeschlossen



7. Luftkühlung montiert

Abbildung 39: Montageablauf für die Befestigung der Würfelhalterung inklusive Druckluftzufuhr

5.4 Fräsversuche

In den folgenden Kapiteln wird auf den Bearbeitungsablauf, die Schnittparameter und das Zeitspanvolumen der Fräsversuche eingegangen.

5.4.1 Bearbeitungsablauf

Für die Vorversuche wird der Hartmetallwürfel bahnenweise abgefräst. Bei jeder Bahn werden die Kräfte mit der Kistler-Messkraftdose aufgenommen. Zudem werden die Schneidkanten des Fräasers nach einer festgelegten Bahnanzahl mit dem Zoller Smartcheck 600 aufgenommen. Am Ende einer Bahn wird ein spezifischer Parameter, der Zahnvorschub f_z , verändert und der Prozess erneut gestartet. Nach Beendigung der zu fahrenden Bahnen, welche im Versuchsplan definiert worden sind, wird mittels einer Dosiereinheit eine Abformmasse auf die bearbeitete Fläche aufgetragen, um danach die Oberflächengüte bestimmen zu können. Davor muss der Würfel gründlich mit Alkohol gereinigt werden, um etwaige Spanrückstände oder Verschmutzungen zu entfernen. Bei der Bearbeitung wird mit einer Fräserüberdeckung $a_e = 30\%$ zerspant. Zudem wird bei der Bearbeitung das Gleichlaufräsen angewendet. Bei jeder Bahn wird der Fräser zuerst wenige Millimeter vor dem Bauteil positioniert, damit genügend Zeit ist, die Kraftmessung zu starten. Sobald die Messung gestartet ist, wird der Vorschub auf 100% gedreht und der Fräser geht kurz darauf in Eingriff. Mit der Druckluftkühlung wird kontinuierlich ein nicht gekühlter Luftstrom auf den Fräser und die zu bearbeitende Stelle gelenkt.

5.4.2 Schnittparameter

Die Vorversuche werden in den drei Schnitttiefen $a_p = 0,05$ mm, $a_p = 0,075$ mm und $a_p = 0,1$ mm durchgeführt. Tabelle 10 zeigt, dass alle fünf Bahnen die Schnittgeschwindigkeit um $v_c = 20$ m/min erhöht wird. Zusätzlich wird bei jeder Bahn der Zahnvorschub um $f_z = 0,001$ mm erhöht. Nachdem ein Drehzahlbereich abgefahren worden ist, wird der Fräser ausgespannt und eine Verschleißaufnahme durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeiten v_c liegen zwischen 80 m/min und 160 m/min und der Vorschub f_z zwischen 0,005 mm und 0,025 mm. Die Überdeckung des Werkzeuges wird mit $a_e = 30$ %, das entspricht 0,9 mm radialer Zustellung, angenommen, um so auch ein mögliches Konturfräsen einzubeziehen.

Tabelle 10: Versuchsplan der Fräsvorversuche aller drei Schnitttiefen

abgefahrte Schnitttiefen des Vorversuchplanes					Schnitttiefen		
Werkzeug VZSMT-HL-D03-LC015-09-LC045-ER03-Z5					$a_p = 0,05$ mm	$a_p = 0,075$ mm	$a_p = 0,1$ mm
Fräs- \emptyset (mm)	Zähnezahl z	Schnittgeschwindigkeit v_c (m/min)	Drehzahl n (U/min)	Vorschub je Zahn f_z (mm)	Vorschub f (mm)	radiale Zustellung a_e (mm)	Notiz
3	5	80	8488	0,001	0,005	0,9	
3	5	80	8488	0,002	0,01	0,9	
3	5	80	8488	0,003	0,015	0,9	
3	5	80	8488	0,004	0,02	0,9	
3	5	80	8488	0,005	0,025	0,9	Messung
3	5	100	10610	0,001	0,005	0,9	
3	5	100	10610	0,002	0,01	0,9	
3	5	100	10610	0,003	0,015	0,9	
3	5	100	10610	0,004	0,02	0,9	
3	5	100	10610	0,005	0,025	0,9	Messung
3	5	120	12732	0,001	0,005	0,9	
3	5	120	12732	0,002	0,01	0,9	
3	5	120	12732	0,003	0,015	0,9	
3	5	120	12732	0,004	0,02	0,9	
3	5	120	12732	0,005	0,025	0,9	Messung
3	5	140	14854	0,001	0,005	0,9	
3	5	140	14854	0,002	0,01	0,9	
3	5	140	14854	0,003	0,015	0,9	
3	5	140	14854	0,004	0,02	0,9	
3	5	140	14854	0,005	0,025	0,9	Messung
3	5	160	16977	0,001	0,005	0,9	
3	5	160	16977	0,002	0,01	0,9	
3	5	160	16977	0,003	0,015	0,9	
3	5	160	16977	0,004	0,02	0,9	
3	5	160	16977	0,005	0,025	0,9	Messung

Um die bestmöglichen Schnittparameter für die wirtschaftliche Fräsbearbeitung zu ermitteln, wird ein breites Spektrum abgefahren. Die Schnittparameter werden durch den Werkzeughersteller grob ausgelegt und daraus ist der Versuchsplan ausgearbeitet worden. Abbildung 40 zeigt die verwendeten Parameter als 3D-Diagramm. Der Vorschub wird der Drehzahl gegenübergestellt, um so das Zeitspanvolumen aufzeigen zu können. Das ist für die Zustelltiefe von $a_p = 0,1$ mm durchgeführt worden, da diese am wirtschaftlichsten ist. Es folgt die hierfür verwendete Gleichung (3) [12]:

$$Q = a_p * a_e * v_f = a_p * a_e * n * f_n \quad (3)$$

Q	Zeitspanvolumen [mm ³ /min]
a_e	Zustellbreite [mm]
a_p	Zustelltiefe [mm]
n	Drehzahl [U/min]
v_f	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]
f_n	Vorschub pro Umdrehung [mm/U]

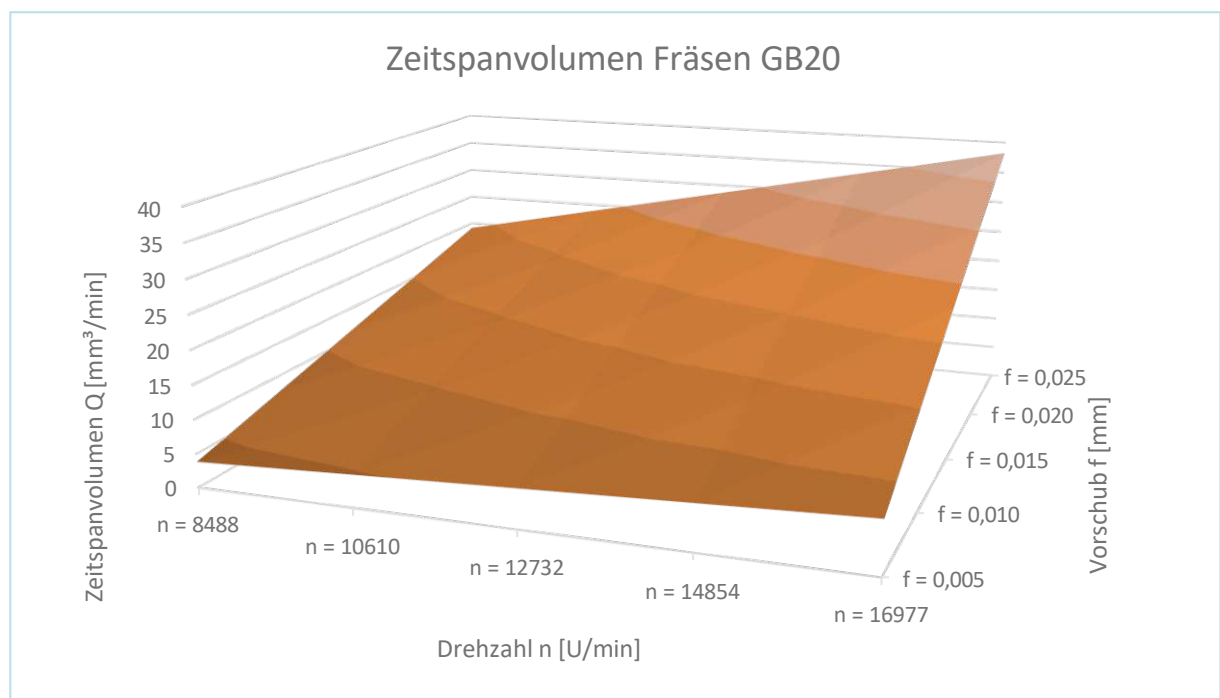


Abbildung 40: Schnittparameter der Fräsvorversuche bei einer Zustelltiefe von $a_p = 0,1$ mm gegenüber dem Zeitspanvolumen

5.5 Schleifversuche

Im Folgenden wird auf den Bearbeitungsablauf, die Schnittparameter und das Zeitspanvolumen der Schleifversuche eingegangen.

5.5.1 Bearbeitungsablauf

Für den Bearbeitungsablauf der Schleifbearbeitung sind einige Anpassungen nötig. Der Ablauf ist der Fräsbearbeitung sehr ähnlich, jedoch gibt es einige grundlegende Veränderungen. So wird mit einer Emulsion gekühlt, anstatt wie beim Fräsen mit Luft (siehe Abbildung 41). Das Kühlmittel wird über mehrere Düsen verteilt, welche direkt auf das Fräswerkzeug und die Berührungspunkte des Materials und Werkzeuges zielen. Des Weiteren werden keine Schneidkantenaufnahmen gemacht, da das aufgrund des verwendeten Schleifstiftes nicht relevant ist. Auch für diese Versuche wird zunächst eine ebene Bearbeitungsfläche erzeugt, da es hier schon bei geringsten Abweichungen zum Brechen des Werkzeuges kommt. Nach der Vorbereitung der Ebene wird, wie auch bei den Fräsversuchen, die Ebene mittels Maschinentzyklus und Abtastvorgang ausgerichtet.



Abbildung 41: Schleifbearbeitung des Materials GB20 mit Kühlschmiermittel

5.5.2 Schnittparameter

Auch hier werden, ähnlich wie bei den Fräsversuchen, drei Schnitttiefen, und zwar $a_p = 0,001$ mm, $a_p = 0,002$ mm und $a_p = 0,003$ mm abgefahren. Tabelle 11 zeigt, dass nach jeder fünften Bahn die Schnittgeschwindigkeit um $v_c = 25$ m/min erhöht wird. Zudem wird nach jeder Bahn der Vorschub f um $0,001$ mm erhöht. Die Schnittgeschwindigkeiten v_c liegen im Bereich 275 m/min bis 375 m/min und die Vorschübe f zwischen $0,001$ mm und $0,005$ mm. Die höchste Drehzahl wird mit nahezu der maximal möglichen Drehzahl der Maschine bei $n = 39.789$ U/min erreicht. Die Werte werden eigens für eine Konturbearbeitung angenommen, um sie so möglichst gut mit einer ähnlichen Fräsbearbeitung gleichsetzen zu können. Die verwendeten Bearbeitungsparameter sind anhand von Erfahrungswerten sowie durch Vorversuche am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien in Wien erarbeitet worden, um so einen möglichst optimalen Vergleich zum konventionellen Fräsen zu erzielen. Für die Schleifbearbeitung ist ebenfalls ein 3D-Diagramm entworfen worden (siehe Abbildung 42) dargestellt.

Tabelle 11: Versuchsplan der Schleifvorversuche aller drei Schnitttiefen

abgefahrte Schnitttiefen dieses Vorversuchsplanes			Schnitttiefen		
Werkzeug DZY-A 3,0-4/3-36 D126			$a_p = 1 \mu\text{m}$	$a_p = 2 \mu\text{m}$	$a_p = 3 \mu\text{m}$
Schleifstift- \varnothing [mm]	Schnittgeschwind- igkeit v_c [m/min]	Drehzahl n [U/min]	Vorschub f [mm]	Vorschubgeschw. v_f [mm/min]	radiale Zustellung a_e [mm]
3	275	29178	0,001	29,2	0,9
3	275	29178	0,002	58,4	0,9
3	275	29178	0,003	87,5	0,9
3	275	29178	0,004	116,7	0,9
3	275	29178	0,005	145,9	0,9
3	300	31831	0,001	31,8	0,9
3	300	31831	0,002	63,7	0,9
3	300	31831	0,003	95,5	0,9
3	300	31831	0,004	127,3	0,9
3	300	31831	0,005	159,2	0,9
3	325	34484	0,001	34,5	0,9
3	325	34484	0,002	69,0	0,9
3	325	34484	0,003	103,5	0,9
3	325	34484	0,004	137,9	0,9
3	325	34484	0,005	172,4	0,9
3	350	37136	0,001	37,1	0,9
3	350	37136	0,002	74,3	0,9
3	350	37136	0,003	111,4	0,9
3	350	37136	0,004	148,5	0,9
3	350	37136	0,005	185,7	0,9
3	375	39789	0,001	39,8	0,9
3	375	39789	0,002	79,6	0,9
3	375	39789	0,003	119,4	0,9
3	375	39789	0,004	159,2	0,9
3	375	39789	0,005	198,9	0,9

Auch hier werden die verwendeten Schleifparameter gegenübergestellt, um das Zerspanvolumen darstellen zu können. Das wird für die maximale Zustelltiefe von $a_p = 0,001$ mm gemacht. Die hierfür verwendete Gleichung (3) wurde bereits im Rahmen der Fräsversuche erläutert.

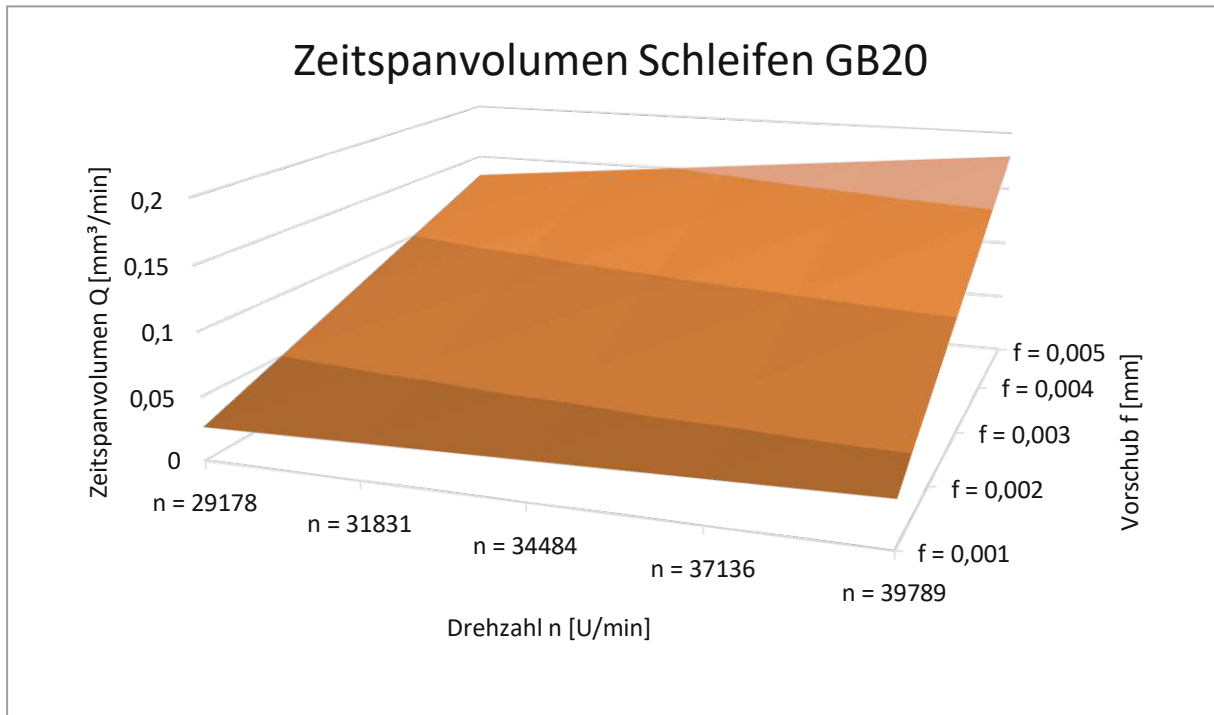


Abbildung 42: Schnittparameter der Schleifvorversuche bei einer Zustelltiefe von $a_p = 0,003$ mm gegenüber dem Zeitspanvolumen

6 Ergebnisse

Nachfolgend werden Ergebnisse der Verschleiß-, Oberflächen-, und Zerspankraftmessungen sowie die Ergebnisse der Fräs- und Schleifversuche dargestellt und erläutert. Des Weiteren werden die Prozessparameter einander gegenübergestellt, um so weitere Aussagen zur Wirtschaftlichkeit treffen zu können.

6.1 Ergebnisse der Fräsversuche

Hier werden die Messergebnisse der Zerspankraftanalyse, der Oberflächenrauheit und der Verschleißanalyse der Fräsversuche präsentiert. Die Ergebnisse werden ausgewertet, um daraus den optimalen Parameter für die Zerspanung von GB20 zu ermitteln.

6.1.1 Ergebnisse der Kraftmessungen

Die Ordinate zeigt die Höhe der aufgetretenen Vorschubkraft F_f , der Vorschubnormalkraft F_{fN} sowie der Passivkraft F_p der abgefahrenen Schnittgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Vorschüben,

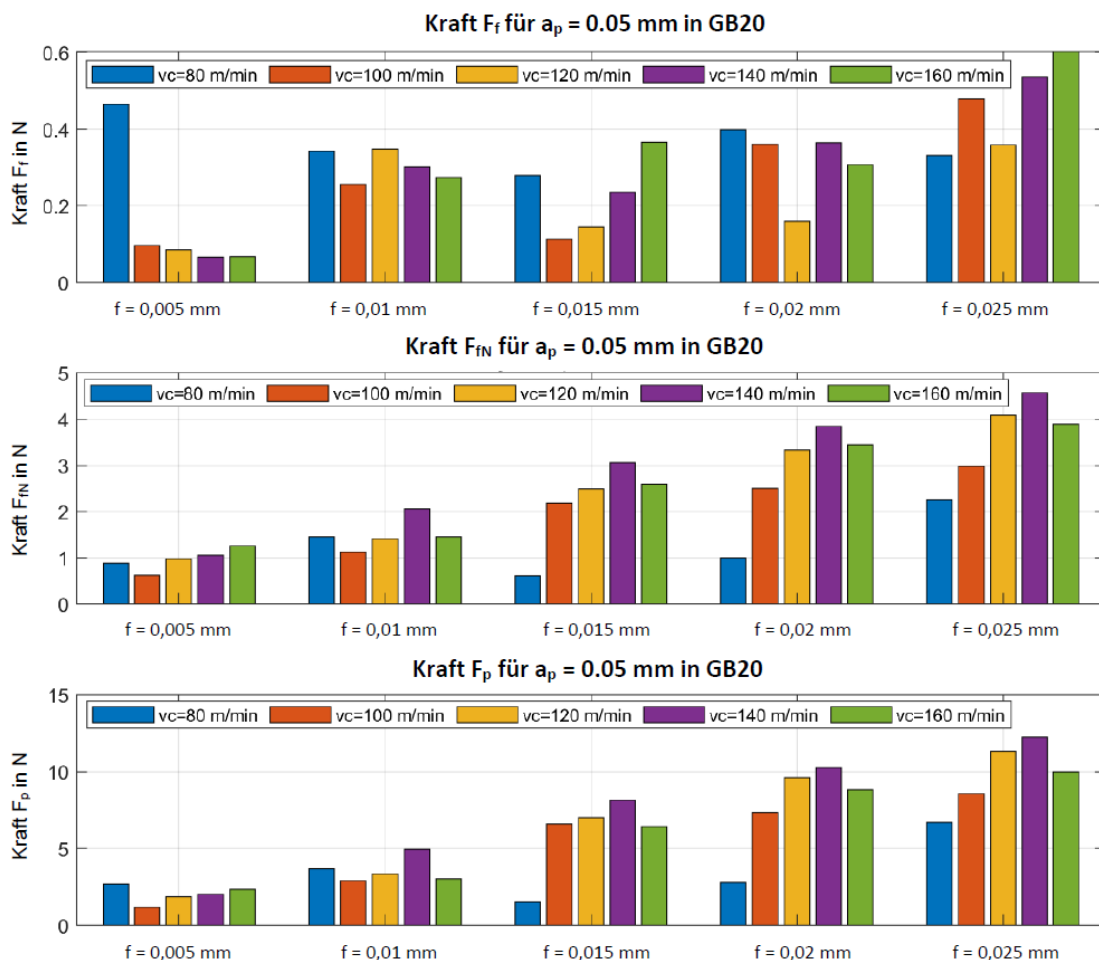


Abbildung 43: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,05$ mm

welche verwendet wurden. Die folgenden Abbildungen zeigen eine direkte Gegenüberstellung der verwendeten Parameter, durch die die Unterschiede zwischen den Zerspankräften der einzelnen Aufnahmen sehr gut ersichtlich werden. Abbildung 43 zeigt die Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,05$ mm. Auffällig ist, dass die maximal auftretende Passivkraft bei ca. $F_p = 12$ N liegt. Das entspricht einem kleinen Wert, der bei der geringen Schnitttiefe jedoch durchaus plausibel ist. Zudem ist bei der Vorschubkraft F_f ($f = 0,005$ mm, $v_c = 80$ m/min, blau) ein erhöhter Wert im Vergleich zu den anderen Schnittgeschwindigkeiten zu erkennen. Er resultiert wahrscheinlich aus einer Unebenheit in der bearbeiteten Ebene. In Abbildung 44 sind die Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,075$ mm abgebildet. Hier fällt auf, dass sich die Vorschubkraft F_f bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 100$ m/min über dem Vorschub äußerst konstant verhält. Die anderen Kräfte, mit Ausnahme die bei $v_c = 80$ m/min und $f = 0,01$ mm, weisen einen linearen Verlauf auf.

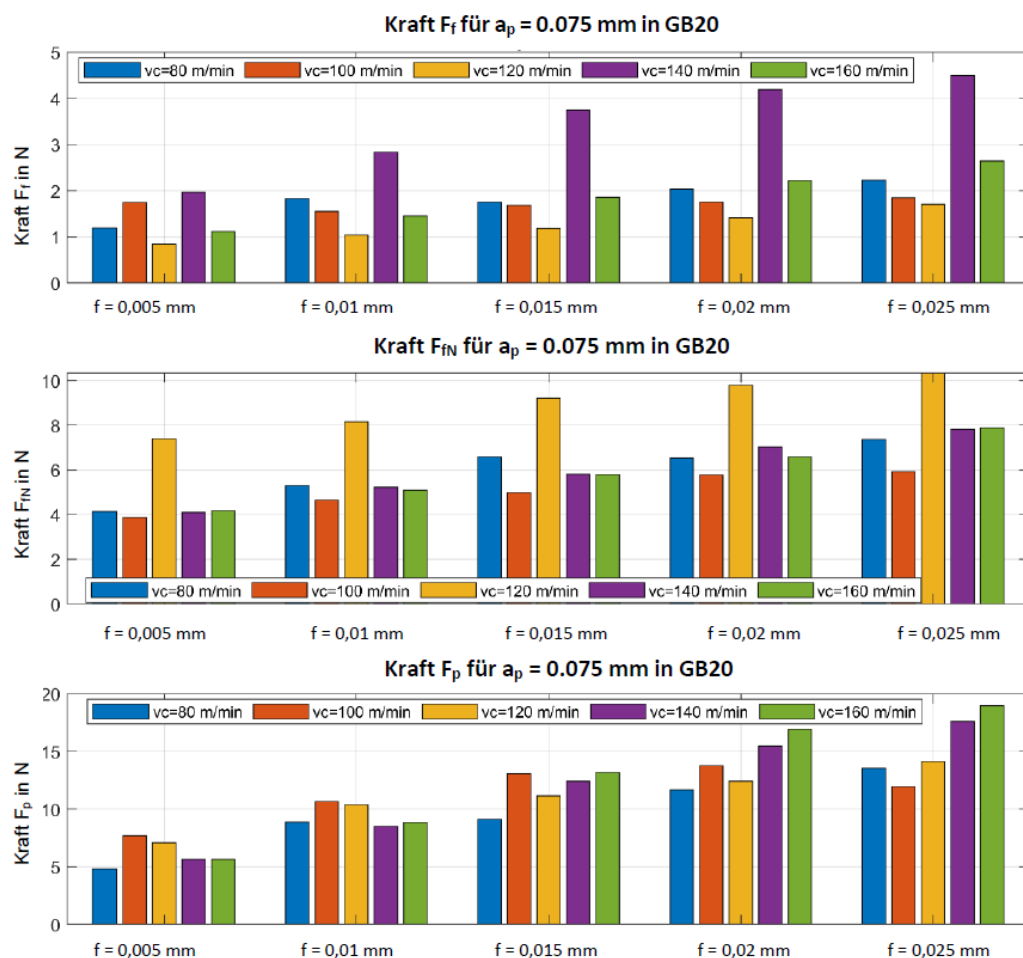


Abbildung 44: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,075$ mm

Eine weitere Auffälligkeit ist, dass sich bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 140$ m/min die Vorschubkraft bei einem Vorschub von $f = 0,005$ mm gegenüber einem Vorschub von $f = 0,025$ mm mehr als verdoppelt. Des Weiteren fällt bei der Kraftanalyse der Schnitttiefe $a_p = 0,075$ mm auf, dass sich die Kräfte bei einer

Schnittgeschwindigkeit $v_c = 160$ m/min am konstantesten Verhalten, da sie einen überwiegend linearen Verlauf haben. Abbildung 45 zeigt die Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,1$ mm. Es sticht hervor, dass die Vorschubkraft F_f bei den niedrigen Schnittgeschwindigkeiten hoch ist. Zudem ist bei Schnittgeschwindigkeiten v_c ab 120 m/min die Vorschubkraft F_f durchaus gering und konstant über dem Vorschub. Bei der Vorschubnormalkraft F_{fN} sind die Kräfte über dem Vorschub linear und weisen keine Ausbrüche auf. Das wird bei der Passivkraft F_p ebenfalls ersichtlich.

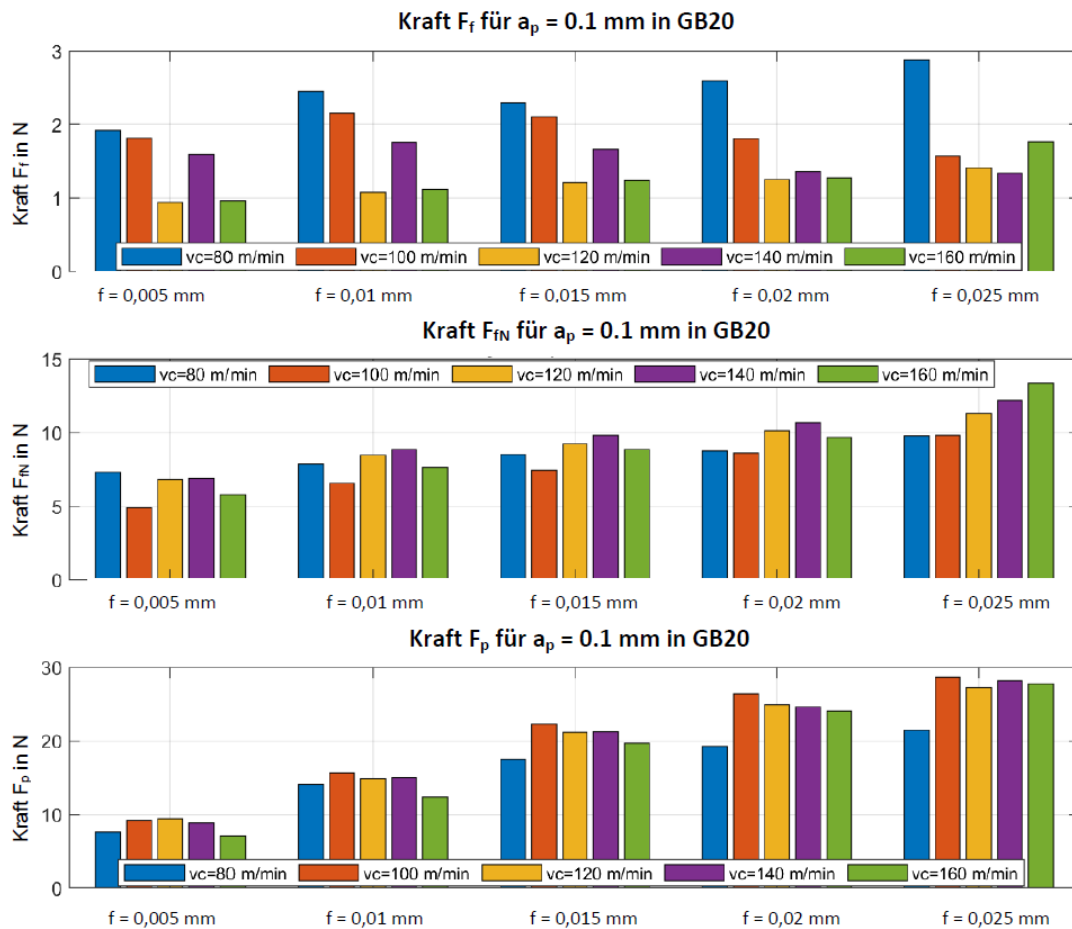


Abbildung 45: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,1$ mm

Bei allen drei Schnitttiefen ist auffällig, dass die Passivkraft F_p sich linear zum Vorschub verhält. Des Weiteren sind die ermittelten Kräfte im Vergleich zum herkömmlichen Zerspanen sehr gering, was sich auf die geringe Schnitttiefe zurückführen lässt. Überdies gibt es bei gewissen Parametern Peaks der Vorschubkraft F_f bzw. der Vorschubnormalkraft F_{fN} . Durch die Ausbrüche können diese Werte bei der Suche nach dem optimalen Parameter nur eingeschränkt betrachtet werden.

6.1.2 Rauheitsanalysen der drei Schnitttiefen

Die ermittelten Rauheitswerte werden, wie in Kapitel 4.2.2 bereits beschrieben, erfasst, manuell aus den Diagrammen ausgelesen und den entsprechenden Bearbeitungsparametern Schnittgeschwindigkeit und Vorschub zugeordnet. Danach werden sie in grafischer Form dargestellt (siehe Abbildung 46). Für alle Versuche werden der Mittenrauwert R_a und die Rautiefe R_z ermittelt. es zeigt sich, dass die erreichte Oberflächengüte im schlechtesten Fall im Bereich von $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 4 \mu\text{m}$ liegt. Der Durchschnitt liegt bei $R_a \leq 0,3 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 2,5 \mu\text{m}$.

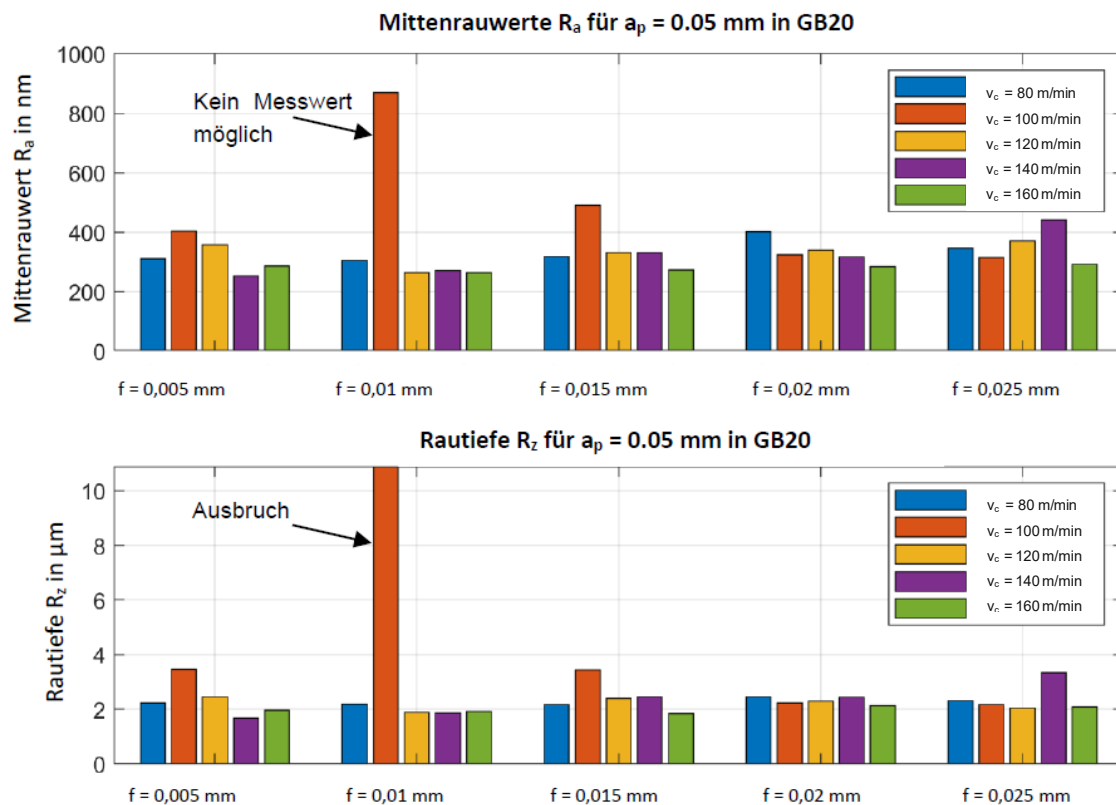


Abbildung 46: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,05 \text{ mm}$

Bei der Auswertung der Schnitttiefen von $a_p = 0,05 \text{ mm}$ springt ins Auge, dass es bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 100 \text{ m/min}$ und einem Vorschub von $f = 0,01 \text{ mm}$ einen Ausbruch gibt. Das kann daran liegen, dass beim Abformprozess nicht alle Verschmutzungen entfernt wurden oder das beim Abziehvorgang noch nicht die gesamte Masse ausgehärtet war. Eine weitere Möglichkeit für den erhöhten Rauheitswert wäre, dass aufgrund der Bearbeitungsparameter beim Bearbeitungsprozess ein abgenommener Span zwischen Fräser und Material eingeklemmt wurde und die Oberfläche beschädigt hat. Des Weiteren ist aus dem Diagramm zu erkennen, dass sich die Oberflächenrauheit auch mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit konstant verhält bzw. sich bei bestimmten Parametern sogar etwas verbessert. Abbildung 47 zeigt die Oberflächenrauheiten bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,075 \text{ mm}$. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 80 \text{ m/min}$ und einem Vorschub von $f = 0,015 \text{ mm}$ sowie bei $v_c = 140 \text{ m/min}$ und $f = 0,02 \text{ mm}$ gibt

es Peaks. Bei dieser Zustelltiefe ist die Oberflächengüte in einem Bereich von $R_a \sim 0,2 \mu\text{m}$ bis $0,45 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \sim 1,5 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$, wenn die Peaks nicht mit einbezogen werden. Bei der Rautiefe ist zu erkennen, dass beinahe alle Werte sich nur um $0,5 \mu\text{m}$ unterscheiden. Das lässt darauf schließen, dass auch bei höheren Werten äußerst gute Oberflächengüten erzielt werden können.

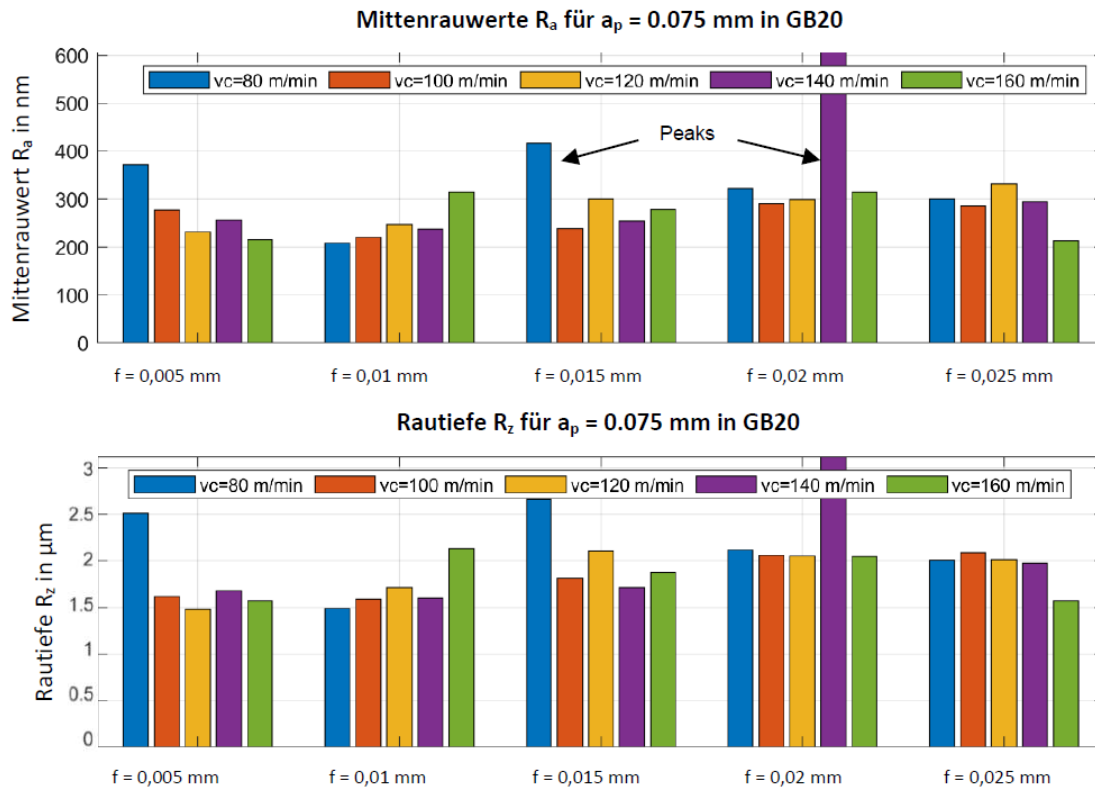


Abbildung 47: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,075 \text{ mm}$

Bei den Versuchen mit einer Schnitttiefe $a_p = 0,1 \text{ mm}$ liegen die Oberflächengüten in einem Bereich von $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 3 \mu\text{m}$, wobei die besten Werte im Bereich von $R_a \sim 0,2 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \sim 1,5 \mu\text{m}$ liegen (siehe Abbildung 48). Die Versuche mit dieser Schnitttiefe haben im Vergleich zu den Versuchen mit den anderen beiden Schnitttiefen eine breite Streuung. Hier ist kein linearer Zusammenhang zwischen Vorschub und Schnittgeschwindigkeit zu erkennen. Es fällt auf, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$ bei Erhöhung des Vorschubes der Mittenrauwert R_a zunimmt und ab einem Vorschub von $f = 0,02 \text{ mm}$ wieder abnimmt. Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Messwerte, kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit meist eine Verbesserung der Oberflächengüte einhergeht.

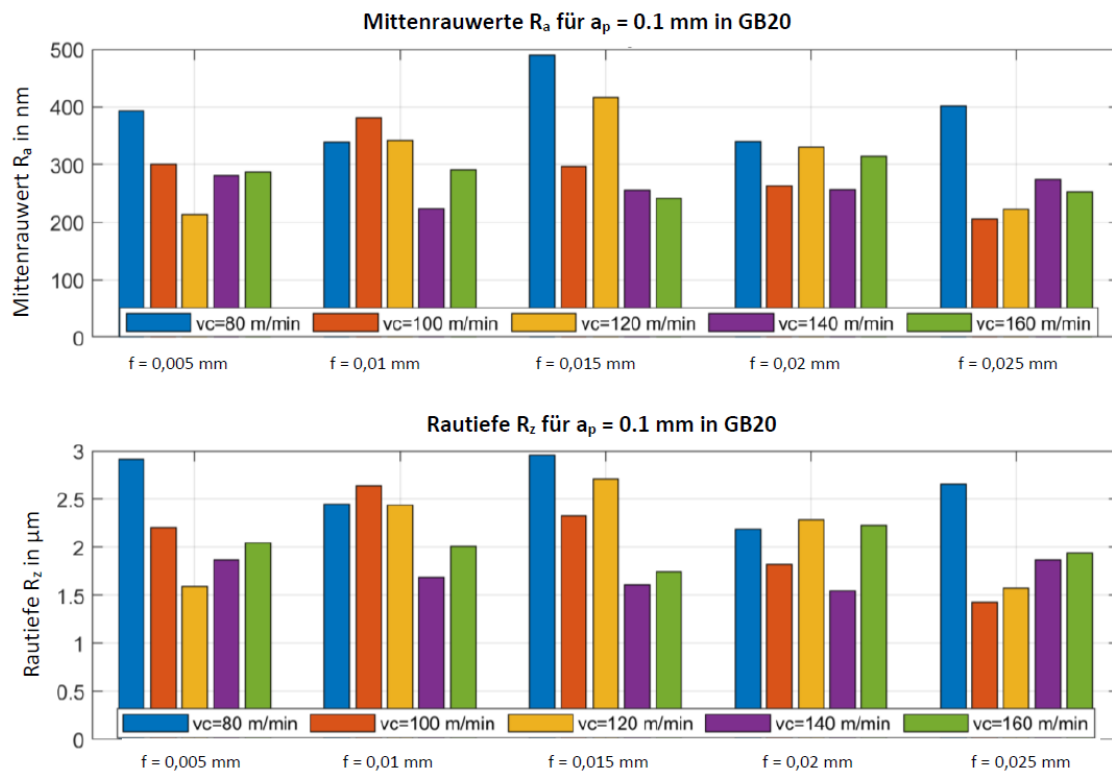


Abbildung 48: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm

Um den Unterschied zwischen den einzelnen Schnitttiefen besser herausarbeiten zu können, werden zusätzlich Vergleichsplots angefertigt. Die folgenden Abbildungen zeigen einen direkten Vergleich der Rautiefe R_z sowie der Mittenrauwerte R_a der drei Schnitttiefen bei den verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten. Hierfür werden Box-Plots der unterschiedlichen Parameter erstellt, bei denen die Verteilung und etwaige Ausreißer der Rauheiten erkennbar werden. Sie liefern einen guten Überblick darüber, welche Oberflächengüten bei den unterschiedlichen Zustelltiefen a_p erreicht werden können und bei welchem Mittelwert sie liegen. Abbildung 49 erklärt die mit einem Box-Plot darstellbaren Werte.

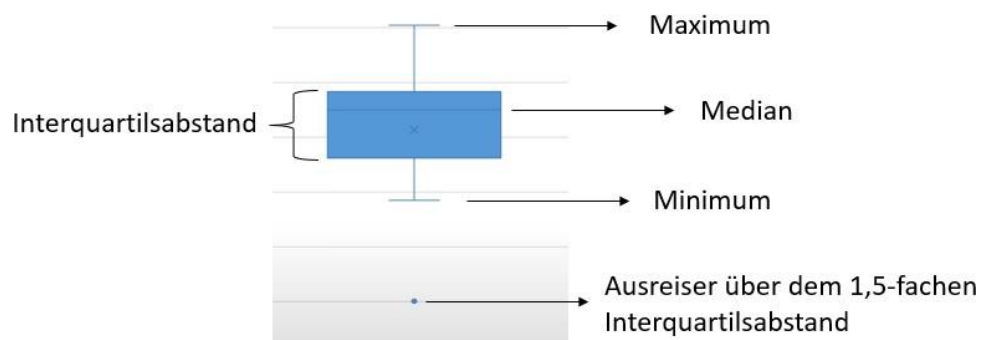


Abbildung 49: Aufbau eines Box-Plots

So können die optimalen Parameter weiter eingrenzt werden. Abbildung 50 zeigt, dass bei einer Schnitttiefe $a_p = 0,05$ mm und einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 100$ m/min die Streuung am stärksten ist.



Abbildung 50: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes

In Abbildung 51 ist zu erkennen, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 140$ m/min und einer Schnitttiefe $a_p = 0,075$ mm bzw. $a_p = 0,1$ mm die Rautiefe R_z keine große Streuung aufweist.

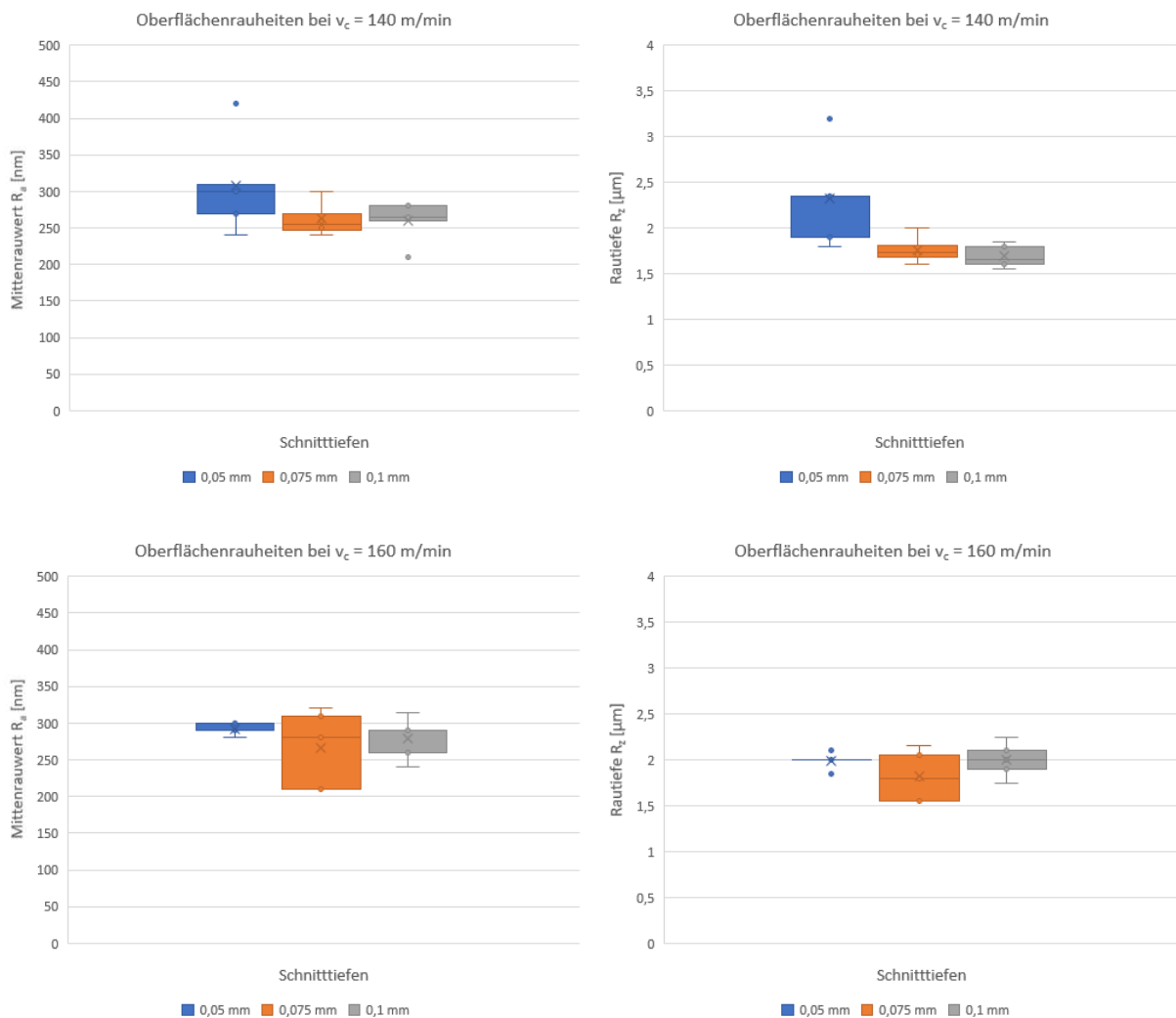


Abbildung 51: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes

Abbildung 52 zeigt die ermittelten Rauheiten bei einer Zustelltiefe $a_p = 0,1$ mm in Gegenüberstellung zu den verwendeten Schnittgeschwindigkeiten und Vorschüben. Es fällt auf, dass bei den höchsten Parametern die gemessenen Rauheiten überaus vielversprechend sind. Zudem sind bei Schnittgeschwindigkeiten $v_c = ab$ 100 m/min und Vorschüben f ab = 0,025 mm die Rauheitswerte durchaus gleich. Das führt dazu, dass die Wahl der Parameter sich eher an der Wirtschaftlichkeit im Sinne der Bearbeitungsgeschwindigkeit als an der Oberflächenqualität ausrichtet.

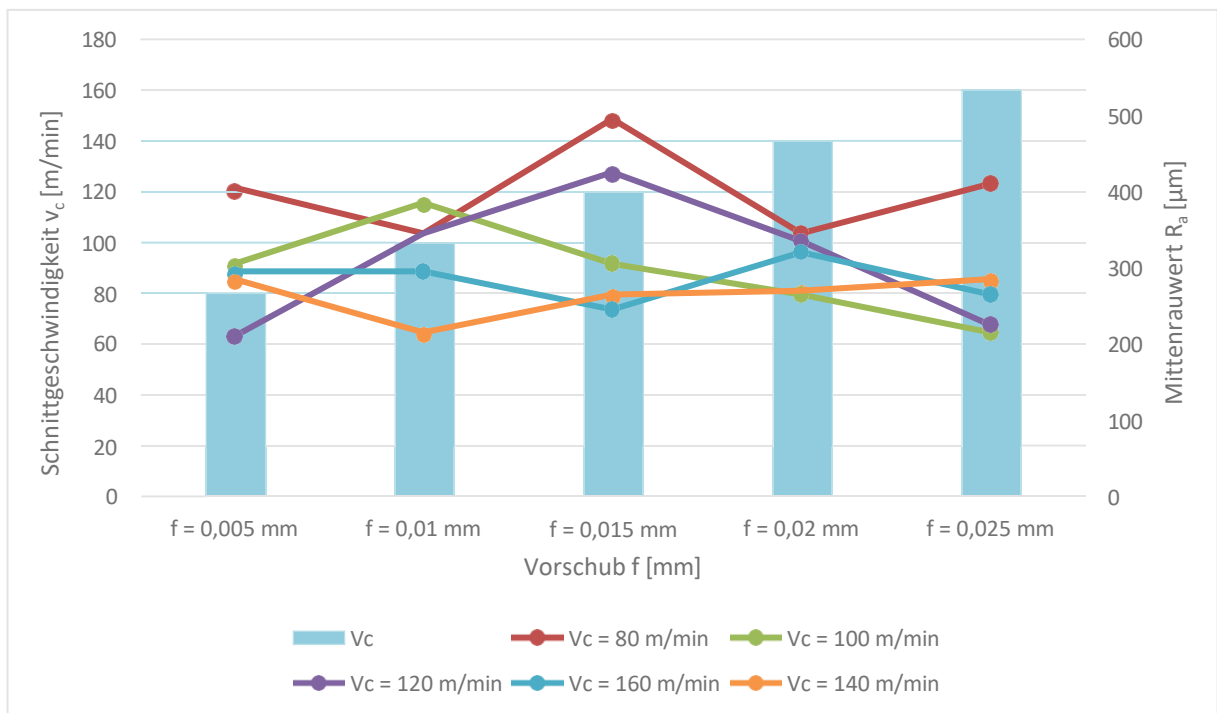


Abbildung 52: Gegenüberstellung der Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe zu den ermittelten Rauheitswerten beim Fräsen mit $a_p = 0,1$ mm

6.1.3 Verschleißanalysen der Fräswerkzeuge

Im Folgenden wird auf den Verschleiß der Fräuserschneiden während der Vorversuche eingegangen. Für die Analyse werden alle fünf Schneiden des Fräasers frontal sowie seitlich abgebildet, um den sich akkumulierenden Verschleiß möglichst gut zu dokumentieren. Dadurch soll einem vorzeitigen Werkzeugversagen durch zu starken Verschleiß vorgebeugt werden. Nach einer bestimmten Anzahl von Bahnen wird zudem eine stirnseitige Ansicht aller Schneiden aufgenommen. Da es mehrere hundert Aufnahmen der einzelnen Schneiden und Schnitttiefen gibt, soll das Augenmerk auf die Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm gelegt werden. Diese Schnitttiefe hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Bei den Vorversuchen ist keine explizite Verschleißmessung der Schneiden durchgeführt worden, da der Verschleiß aller fünf Schneiden hier sehr gering ist und die vordefinierte Verschleißmarkenbreite $VB = 100 \mu\text{m}$ bzw. $VB_{\text{Notch}} = 250 \mu\text{m}$ nicht erreicht hat. Abbildung 53 zeigt in einer Bilderserie den zeitlichen Verschleiß der ersten Schneide der Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm nach einer bestimmten Anzahl von abgefahrenen Bahnen. Die Schneide wurde frontal mit Fokus auf die Spanfläche abgebildet.

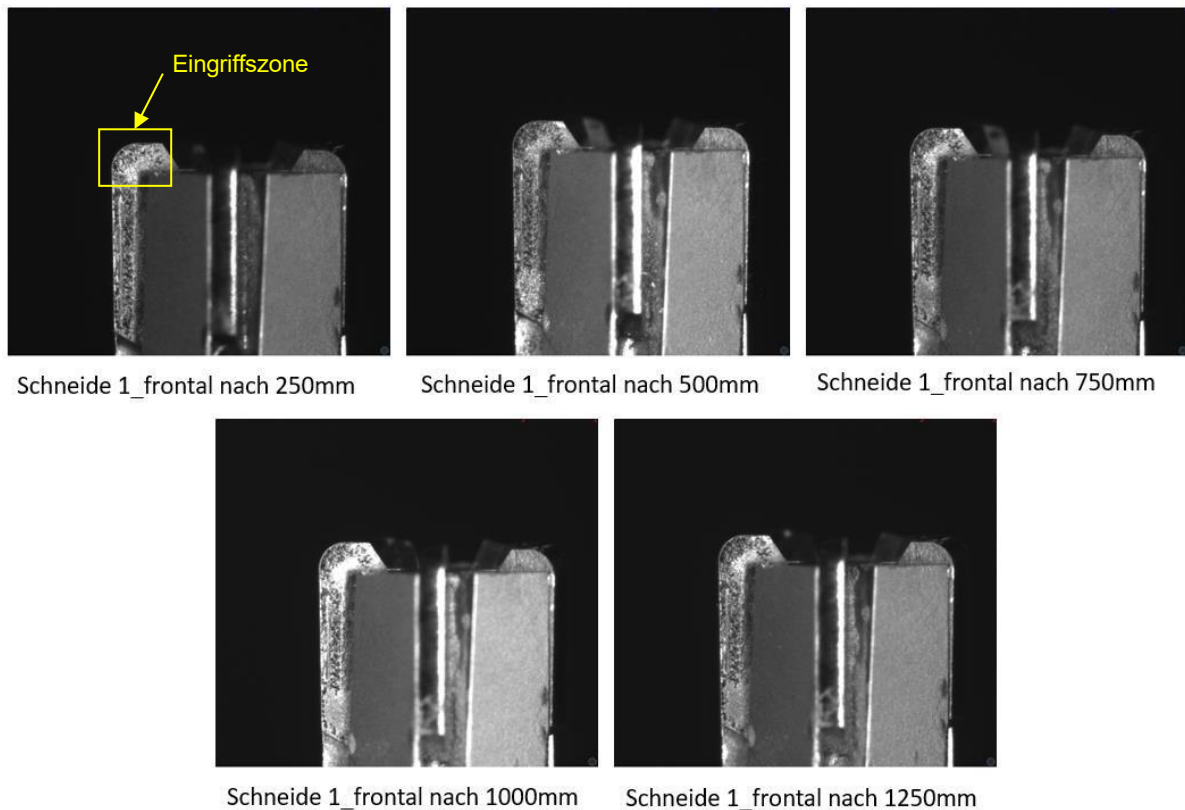
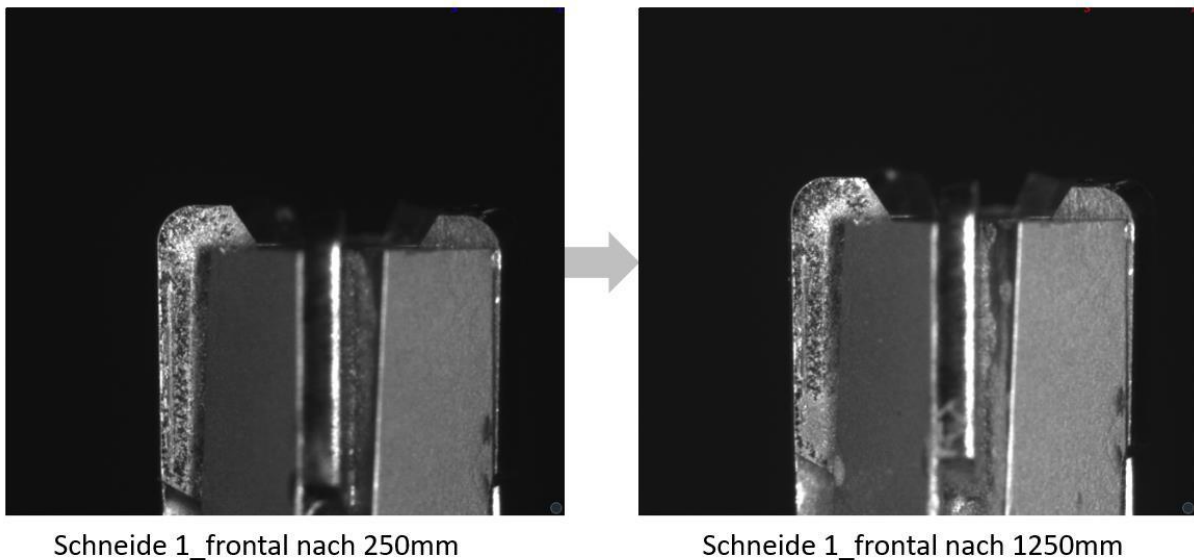


Abbildung 53: Zeitlicher Verschleiß der Schneide 1 nach einer bestimmten Anzahl von zurückgelegten Millimetern

Die Herausforderung bei den Aufnahmen liegt in der Ermittlung der passenden Lichtverhältnisse, da für jede Schneide die Verhältnisse eigens angepasst werden müssen.



Schneide 1_frontal nach 250mm

Schneide 1_frontal nach 1250mm

Abbildung 54: Schneide 1 nach abgefahrenen 250 mm (links) im direkten Vergleich dazu nach 1250 mm (rechts)

Um ein genaueres Bildes zum Verschleiß zu erhalten, wird Schneide 1 des Versuches mit der Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm genauer betrachtet. Abbildung 54 zeigt die Schneide nach abgefahrenen 250 mm im Vergleich zu abgefahrenen 1250 mm. Da die Zustelltiefe bei den Versuchen im Zehntelbereich gelegen hat, ist es nicht verwunderlich, dass der größte Verschleiß im Bereich vor der Schneidenecke auftritt. Zudem ist mit unterschiedlichen Schnittparametern gefahren worden. In Abbildung 55 ist zu sehen, dass gegen Ende der Vorversuche eine Vielzahl von kleineren Ausbrüchen entstanden ist. Jedoch sind mit der Universalmesmaschine Zoller Smartcheck 600 keinerlei große Ausbrüche bzw. Risse zu erkennen. Das spricht für die Qualität des verwendeten Werkzeuges.

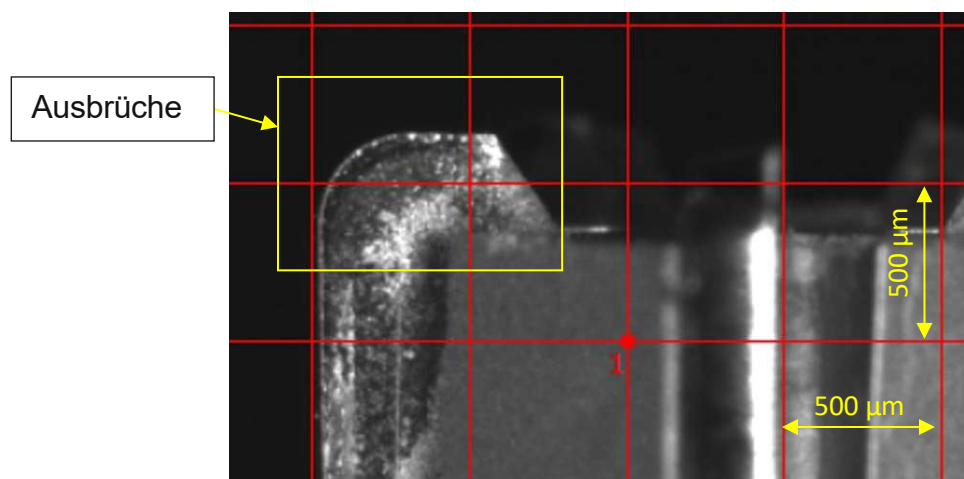


Abbildung 55: Ausbrüche der Schneidkante an Schneide 5 nach Beendigung des Versuches mit der Zustelltiefe $a_p = 0,1$ mm

Das Raster, das in Abbildung 55 zu sehen ist, hat eine Breite von 0,5 mm. So wird nochmals die geringe Größe der Ausbrüche klar, welche im Bereich von $VB_{\text{Notch}} < 20 \mu\text{m}$ liegen. In Abbildung 56 liegt der Fokus der Aufnahme auf der Freifläche der Schneide. Hier konnte aufgrund der Lichtverhältnisse und der Position des Verschleißes die Abnutzung nicht eindeutig sichtbar gemacht werden. Deshalb soll darauf nicht weiter eingegangen werden.

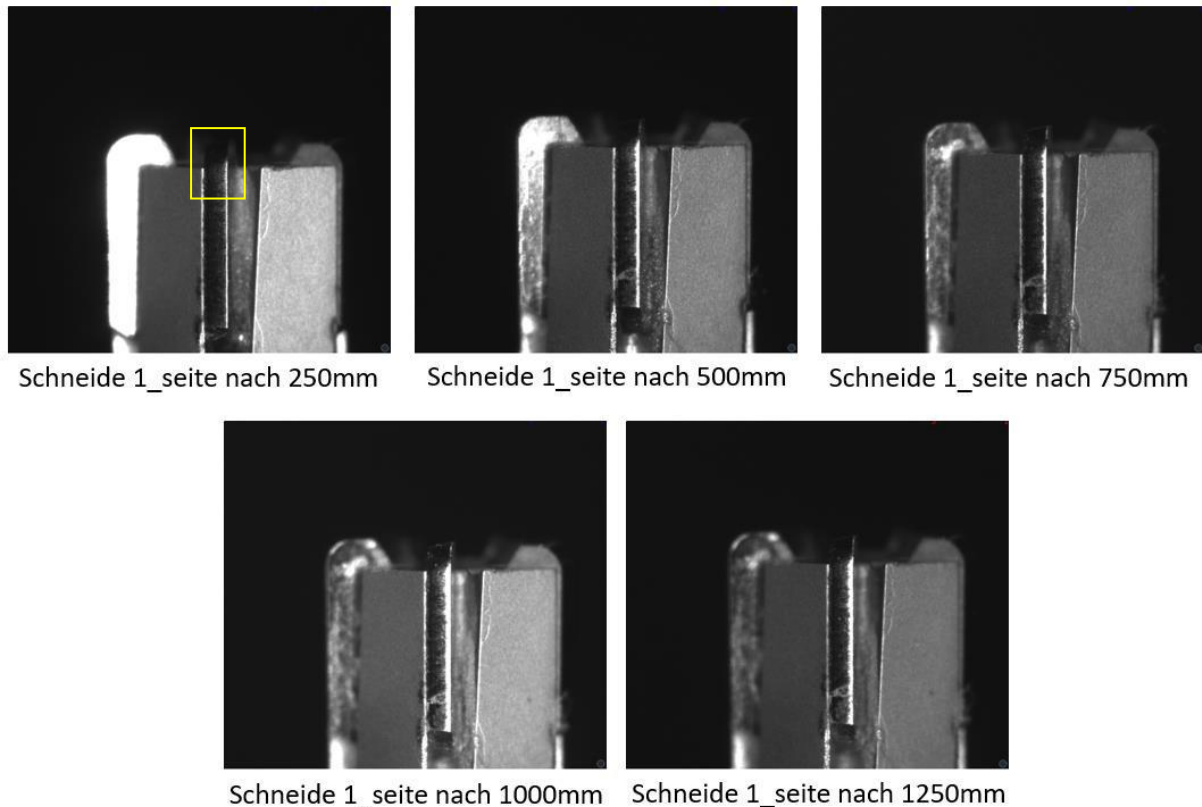
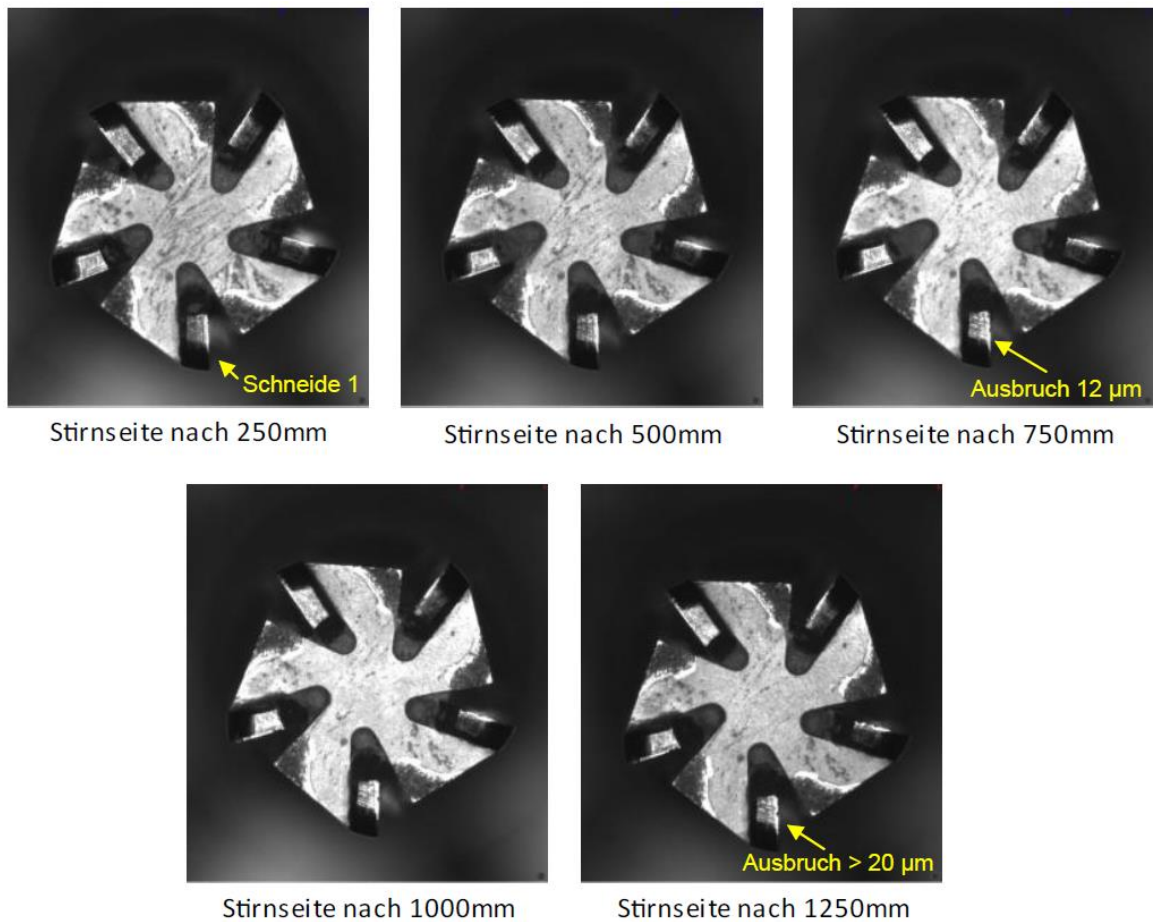


Abbildung 56: Bilderserie der stirnseitigen Ansicht nach einer gewissen Anzahl von abgefahrenen Millimetern

Für einen direkten Vergleich aller fünf Schneiden wurde zusätzlich eine stirnseitige Ansicht des Werkzeuges aufgenommen. Die Schneiden verlaufen dabei immer im Uhrzeigersinn und starten unten mit der ersten Schneide. In Abbildung 57 ist die Entwicklung des Verschleißes der Schneide am deutlichsten erkennbar. Hier ist auch zu erkennen, dass es nach 750 mm Standweg schon zu Ausbrüchen kommt. Grundsätzlich ist auf den Aufnahmen, die mit dem Zoller Smartcheck 600 gemacht worden sind zu sehen, dass der Verschleiß bei den Versuchen ein moderates Maß hat. Das lässt sich einerseits auf die Qualität des Schneidwerkzeuges zurückführen, andererseits auf die geringe Schnitttiefe bei der Bearbeitung bzw. die kurze Eingriffsdauer sowie die alternierenden Schnittparameter. Auch trotz der unterschiedlichen Schnittparameter ist der Verschleiß noch äußerst gering. Ab einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 120 \text{ m/min}$ werden die ersten Ausbrüche sichtbar. Das kann der stirnseitigen Ansicht in Abbildung 57 nach 750 mm Standweg entnommen werden. Der Hauptverschleiß ist an der ersten und dritten Schneide ausgeprägter als an den anderen drei Schneiden. Des Weiteren sind die Schneidecke und die

Freifläche, welche in Abbildung 57 zu sehen sind, am meisten vom Verschleiß betroffen. Folglich müssen bei der Bearbeitung diese beiden Stellen besonders



betrachtet werden.

Abbildung 57: Bilderserie der stirnseitigen Ansicht nach einem gewissen zurückgelegten Standweg

6.1.4 Ermittlung der optimalen Bearbeitungsparameter

Für die Ermittlung der optimalen Bearbeitungsparameter werden nun erneut alle Ergebnisse betrachtet und analysiert. Um die Kraftmesswerte vergleichen zu können, werden die Schnittkrafteergebnisse einander ein weiteres Mal gegenübergestellt (siehe Abbildung 58). Da das Ziel dieser Arbeit das Sammeln von Wissen zur Hartmetallzerspanung sowie die Ermittlung möglicher Fräsparmeter für die Bearbeitung von Hartmetallen im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit ist, wird die Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm als Basis für die weitere Betrachtung verwendet.

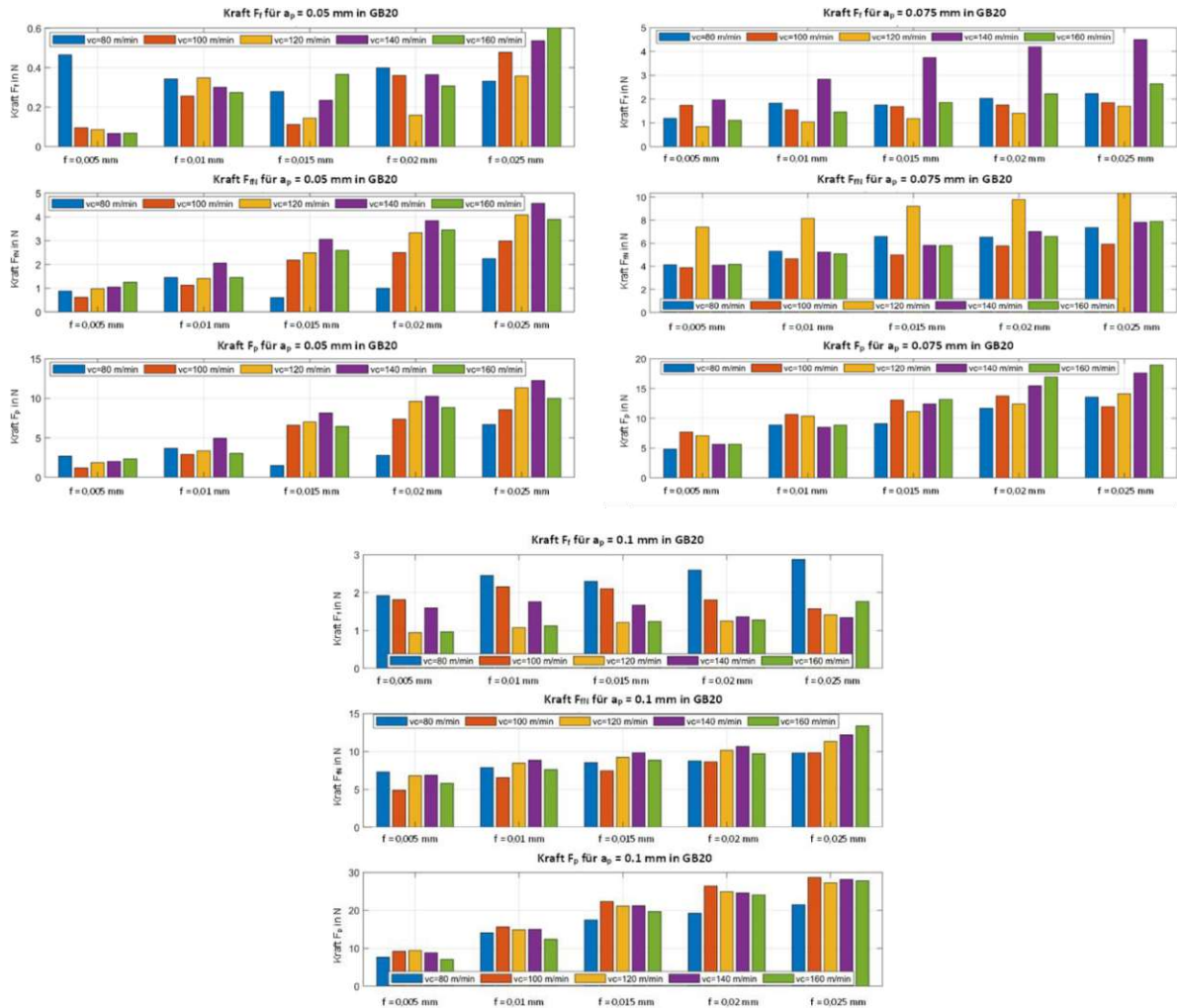


Abbildung 58: Gegenüberstellung der Kraftplots aller drei Schnitttiefen in Abhängigkeit von der Vorschubkraft F_f , der Vorschubnormalkraft F_{TN} und der Passivkraft F_p

Die Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 80$ m/min und $v_c = 100$ m/min entfallen, da sie im Vergleich zu den anderen Schnittgeschwindigkeiten bei der Vorschubkraft F_f zu hohe Peaks haben. Zudem ist bei höheren Schnittgeschwindigkeiten kein überaus hoher Anstieg der Zerspankräfte zu sehen, weshalb diese zu bevorzugen sind.

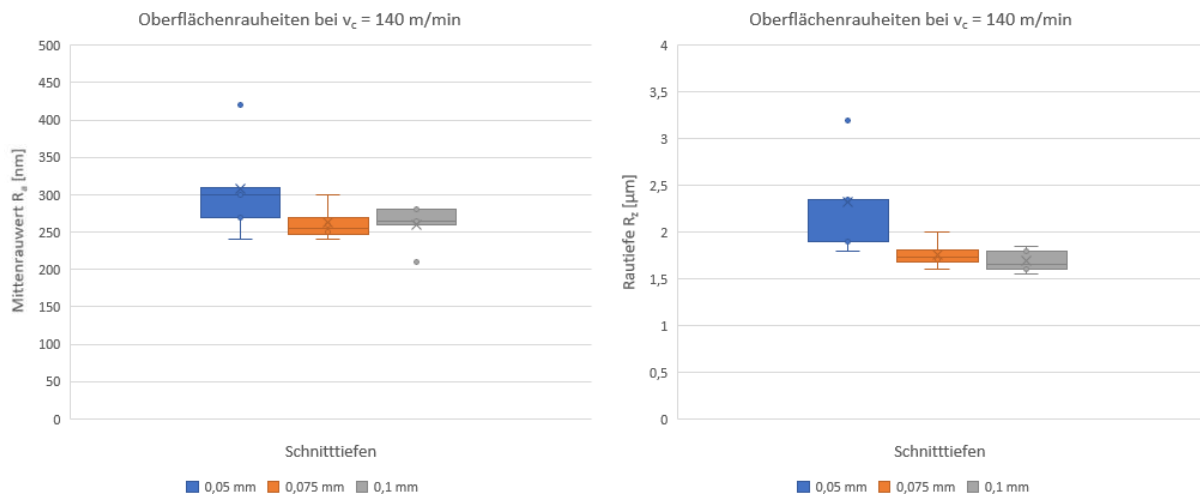


Abbildung 59: Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 140$ m/min

Die Oberflächenanalyse der Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm zeigt, dass die erzeugten Oberflächengüten über die gesamte Schnittbreite bei $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 3 \mu\text{m}$ liegen. Bei der Parametereinstellung $v_c = 140$ m/min und einem Vorschub $f = 0,015$ mm bzw. einem Vorschub $f = 0,02$ mm werden sogar Oberflächengüten von $R_a \leq 0,25 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 1,5 \mu\text{m}$ erreicht (siehe Abbildung 59). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Verschleißanalyse werden als optimale Werte für die Zerspanung von Hartmetallen mit einem Kobaltanteil von ca. 12 % die in Tabelle 12 angegebenen Parameter definiert.

Tabelle 12: Optimale Parameter für die Fräsbearbeitung von Hartmetallen mit einem ca. 12 %igen Co-Anteil mittels CVD-D-Werkzeug

Parameterbezeichnung	Parameterwert	Einheit
Schnittgeschwindigkeit v_c	140	[m/min]
Vorschub f	0,015	[mm]
Drehzahl n	14.854	[U/min]
Radiale Schnittbreite a_e	0,9	[mm]
Schnitttiefe a_p	0,1	[mm]

6.2 Ergebnisse aus den Schleifversuchen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Schleifvorversuche dargestellt und ausgewertet. Wie bei den Fräsversuchen werden die Zerspankräfte und die Oberflächenrauheiten aufgenommen. Bei den verwendeten Bearbeitungsparametern werden für das Schleifen von Hartmetallen typische Werte verwendet, welche in Kapitel 5.5.1 der Tabelle 11 entnommen werden können. Auf eine Verschleißaufnahme wird verzichtet.

6.2.1 Ergebnisse der Kraftmessungen

Für die Kraftanalyse wird ein stationäres Dynamometer verwendet, mit welchem sich Vorschubkraft F_f , Vorschubnormalkraft F_{fN} und Passivkraft F_p ermitteln lassen. Zudem wird ein modifizierter Versuchsaufbau wie in Kapitel 5.3 verwendet.

Die Kräfte aller drei Schnitttiefen sind jeweils kleiner als 5 N, was sich mit der geringen Zustelltiefe $a_p = 1 - 3 \mu\text{m}$ erklären lässt. Da die ermittelten Kräfte zu gering sind, um sie auswerten bzw. dem Fräsen gegenüberstellen zu können, liefern die Kraftaufnahmen keine relevanten Aussagen. Aufgrund des Prozesses und des zu bearbeitenden Materials sind größere Schnitttiefen, um größere Kräfte zu erhalten, nicht möglich, da die Schleifstifte bei zu hoher Belastung zerbrechen.

6.2.2 Rauheitsanalysen der drei Schnitttiefen

Für die Rauheitsanalysen wird dieselbe Methode wie schon bei den Fräsversuchen verwendet. Mittels Abformmasse werden Abdrücke genommen und mit dem Alicona Edge Master analysiert. Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse der Rauheitsanalysen für eine Schnitttiefe $a_p = 1 \mu\text{m}$. Es fällt auf, dass bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 300 \text{ m/min}$ mit zunehmendem Vorschub bis $f = 0,003 \text{ mm}$ die Oberflächengüte zunimmt. Bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 325 \text{ m/min}$ verschlechtert sich die Oberflächengüte jedoch mit zunehmendem Vorschub. Die Rauheitswerte der Mittenrauwerte liegen bei ca. $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$. Die Rautiefe liegt bei ungefähr $R_z \leq 4 \mu\text{m}$.

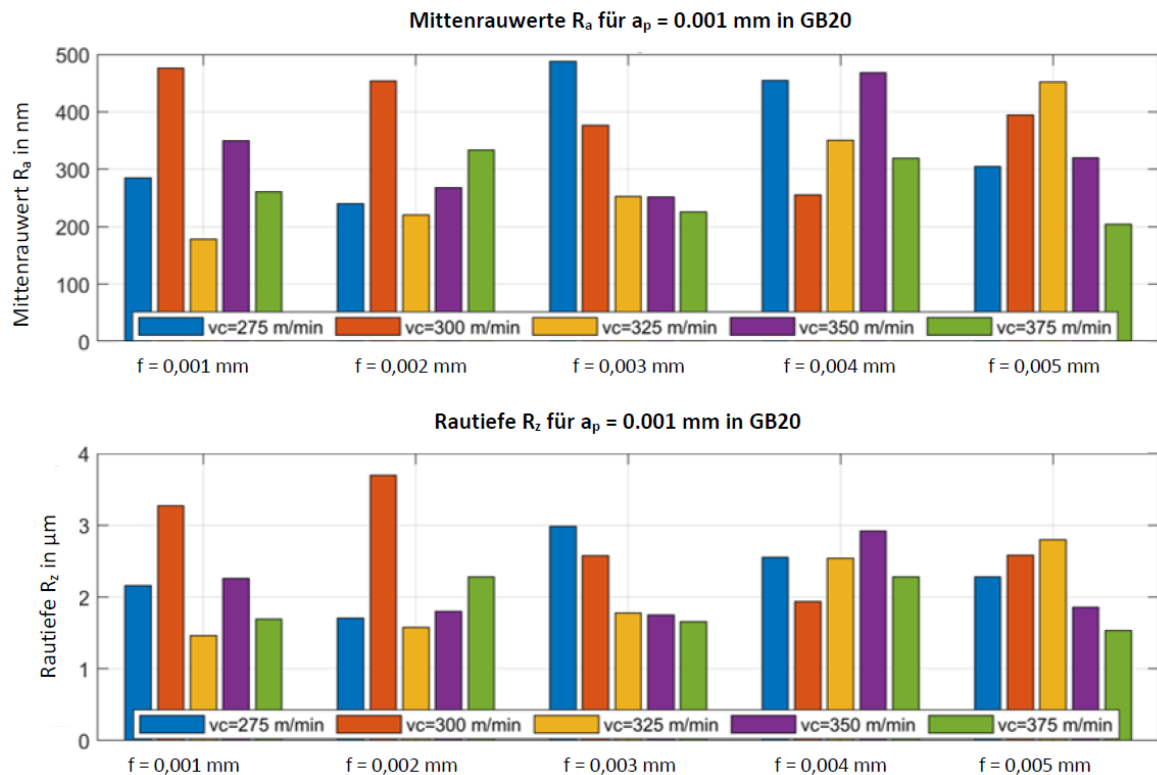


Abbildung 60: Mittenrauwerte R_a und Rautiefe R_z der Schleifvorversuche für die Schnitttiefe $a_p = 0,001$ mm

In Abbildung 61 werden die Ergebnisse der Rauheitsanalyse bei der Schnitttiefe $a_p = 3 \mu\text{m}$ dargestellt. Bei dieser Auswertung fällt auf, dass bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 300$ m/min die Oberflächenrauheiten ansteigen bis sie schließlich bei einem Vorschub $f = 0,004$ mm drastisch sinken, um dann wiederum bei Erhöhung des Vorschubes anzusteigen. Bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 375$ m/min ergeben sich konstante Rauheitswerte, im Gegensatz zu den anderen Schnittgeschwindigkeiten. Die höchsten Rauheitswerte werden bei den beiden niedrigsten Schnittgeschwindigkeiten und dem Vorschub $f = 0,003$ mm erzielt. Die Mittenrauwerte liegen bei $R_a \leq 0,53 \mu\text{m}$ und die Rautiefen bei $R_z \leq 4 \mu\text{m}$. Die folgenden Abbildungen zeigen einen direkten Vergleich der Rautiefe R_z und dem Mittenrauwert R_a der beiden Schnitttiefen $a_p = 1 \mu\text{m}$ sowie $a_p = 3 \mu\text{m}$ bei den verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten.

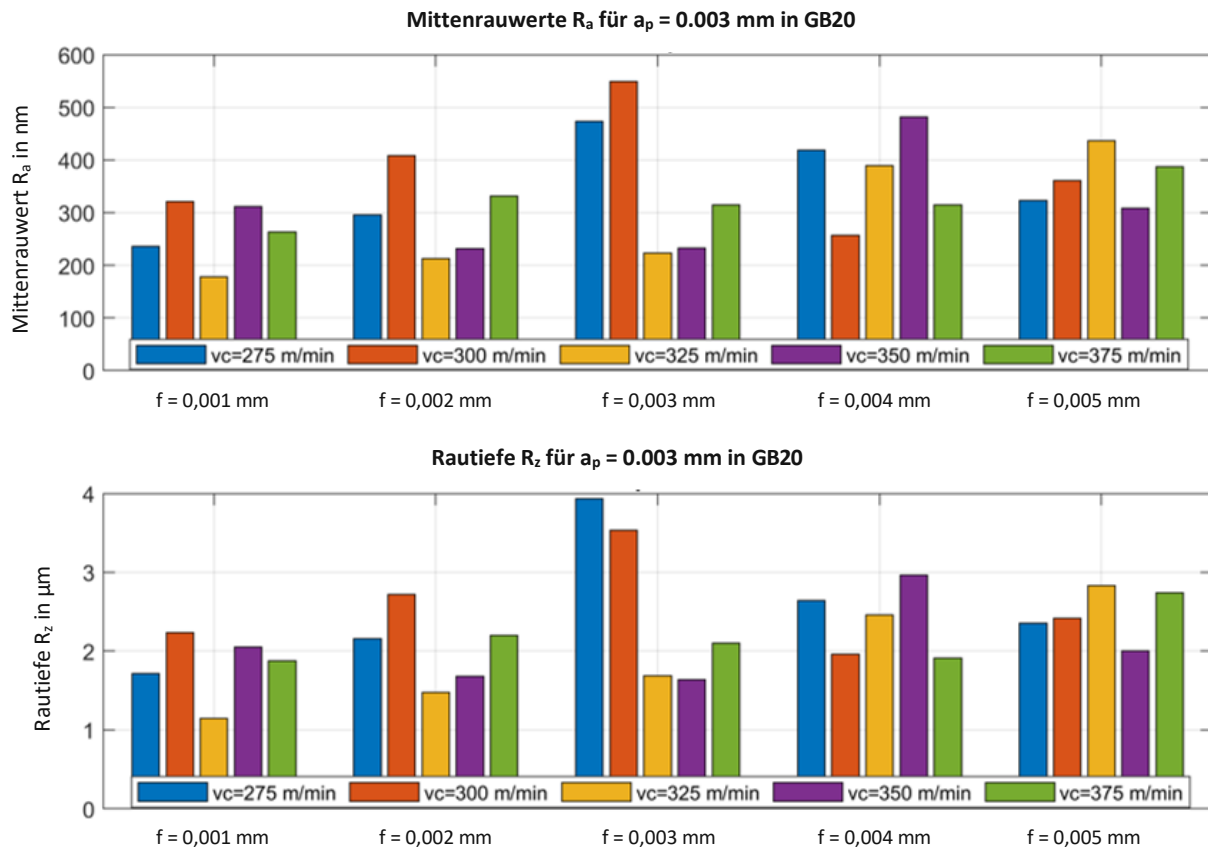


Abbildung 61: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z der Schleifvorversuche für die Schnitttiefe $a_p = 0,003$ mm

Des Weiteren werden auch hier Box-Plots der unterschiedlichen Parameter erstellt, in denen die Verteilung und etwaige Ausreißer bei den Rauheiten erkannt werden können. Sie liefern einen guten Überblick, welche Oberflächengüten bei den unterschiedlichen Schnitttiefen erreicht werden können und bei welchen Mittelwerten sie liegen. So ist in Abbildung 62 zu erkennen, dass bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 325$ m/min und der Schnitttiefe $a_p = 0,003$ mm die Rautiefe R_z eine große Streuung aufweist. Wohingegen bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 350$ m/min und der Schnitttiefe $a_p = 0,003$ mm der Streubereich am geringsten ist. Im Ganzen fällt auf, dass bei einer Schnitttiefe $a_p = 0,003$ mm die Streuung im Mittel geringer ist als jene bei einer Schnitttiefe $a_p = 0,001$ mm. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse in Abbildung 63, ist zu erkennen, dass es mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit vermehrt zu Ausreißern kommt und daher eine geringere Schnittgeschwindigkeit für eine bessere Oberflächengüte zu empfehlen ist.

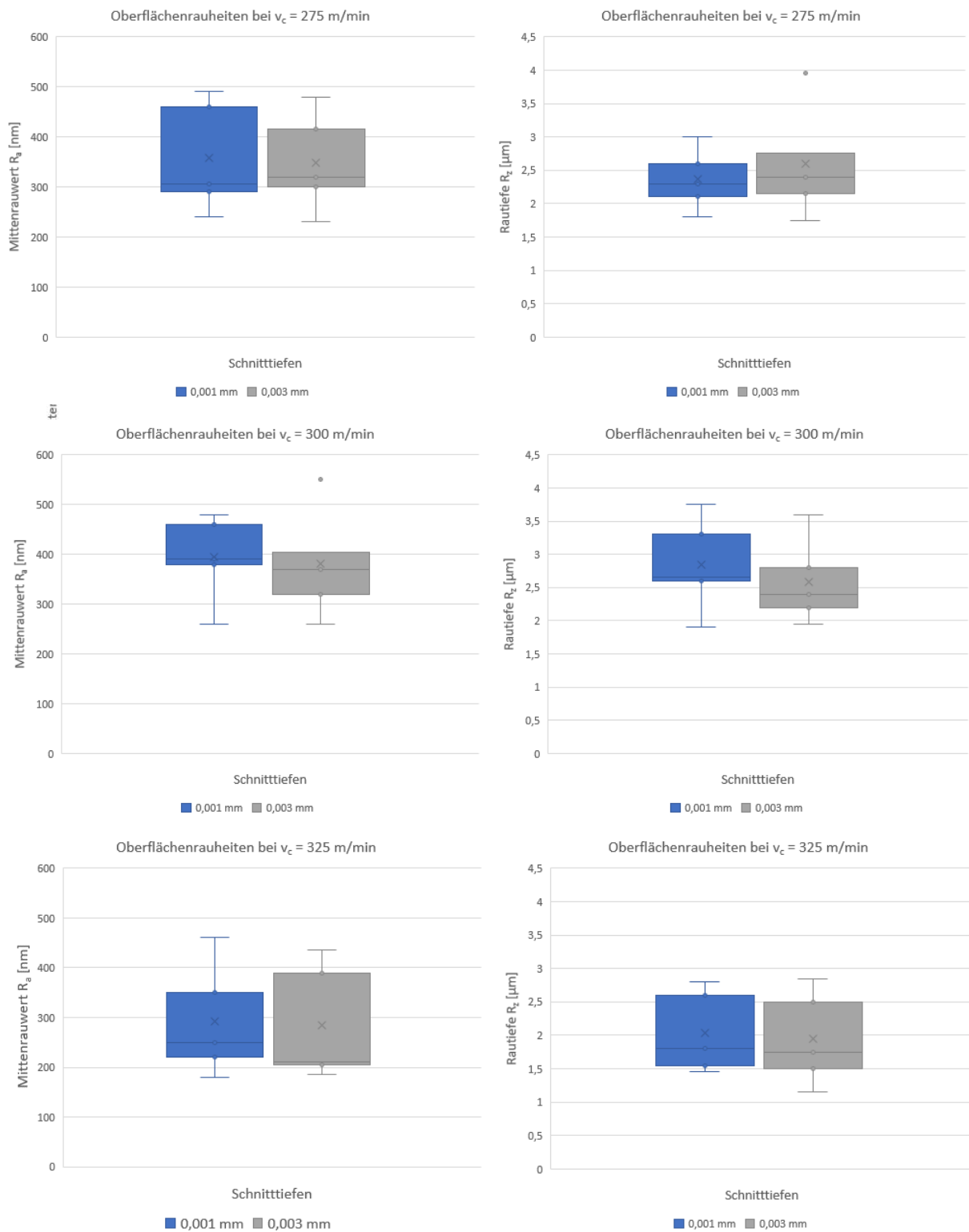


Abbildung 62: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der zwei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes

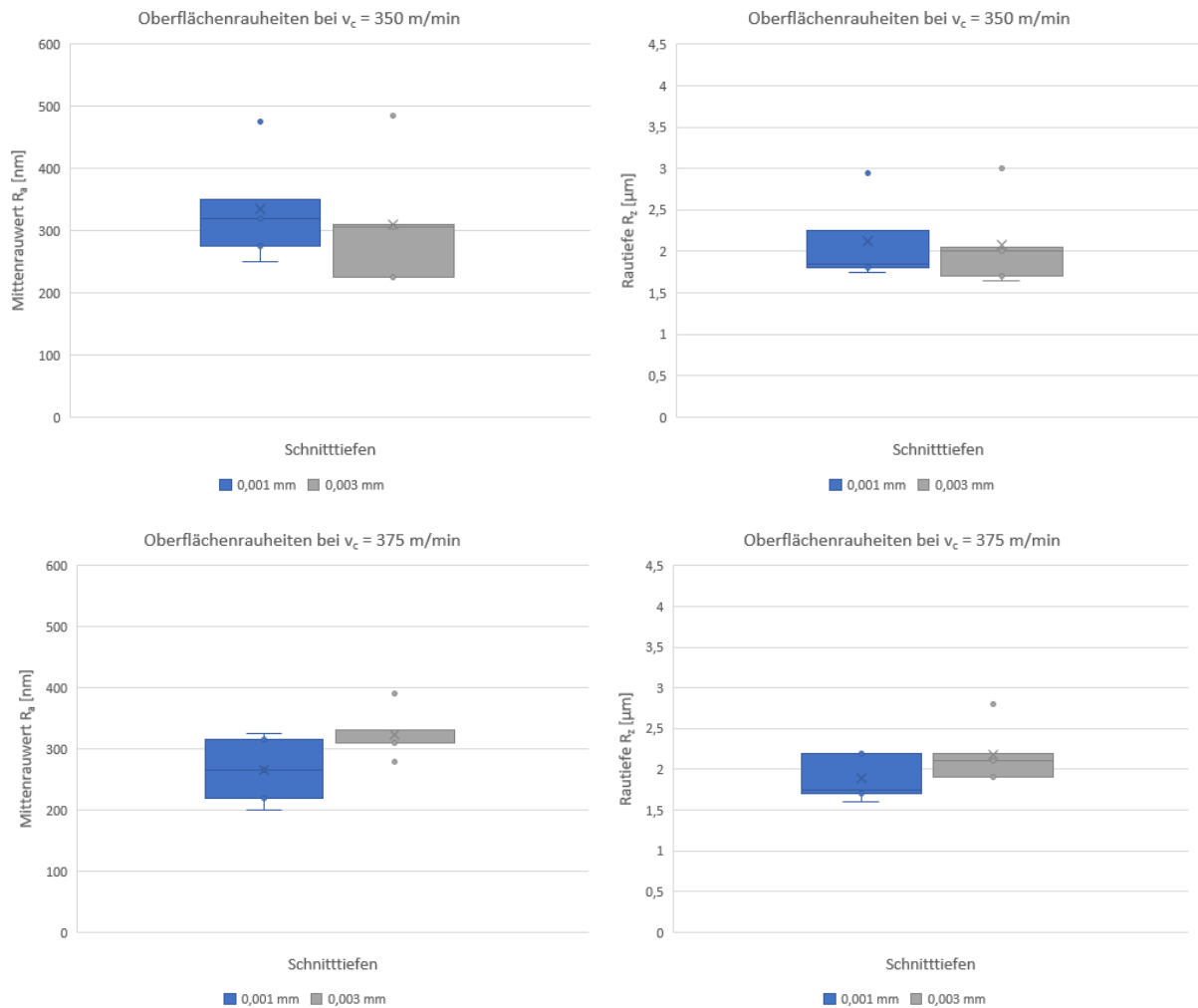


Abbildung 63: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der zwei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes

Wie schon bei den Fräsergebnissen wird eine Gegenüberstellung der ermittelten Rauheiten bei der maximalen Zustelltiefe $a_p = 0,003$ mm zu den verwendeten Schnittgeschwindigkeiten und Vorschüben erstellt. In Abbildung 64 ist zu erkennen, dass bei niedrigen Schnittparametern tendenziell bessere Oberflächengüten erzielt werden können und bei zunehmender Schnittgeschwindigkeit und Vorschub die Rauheit zunimmt. Wieder zeigt sich, dass bei den höchsten Parametern die Streuung der einzelnen Rauheiten überaus gering ist.

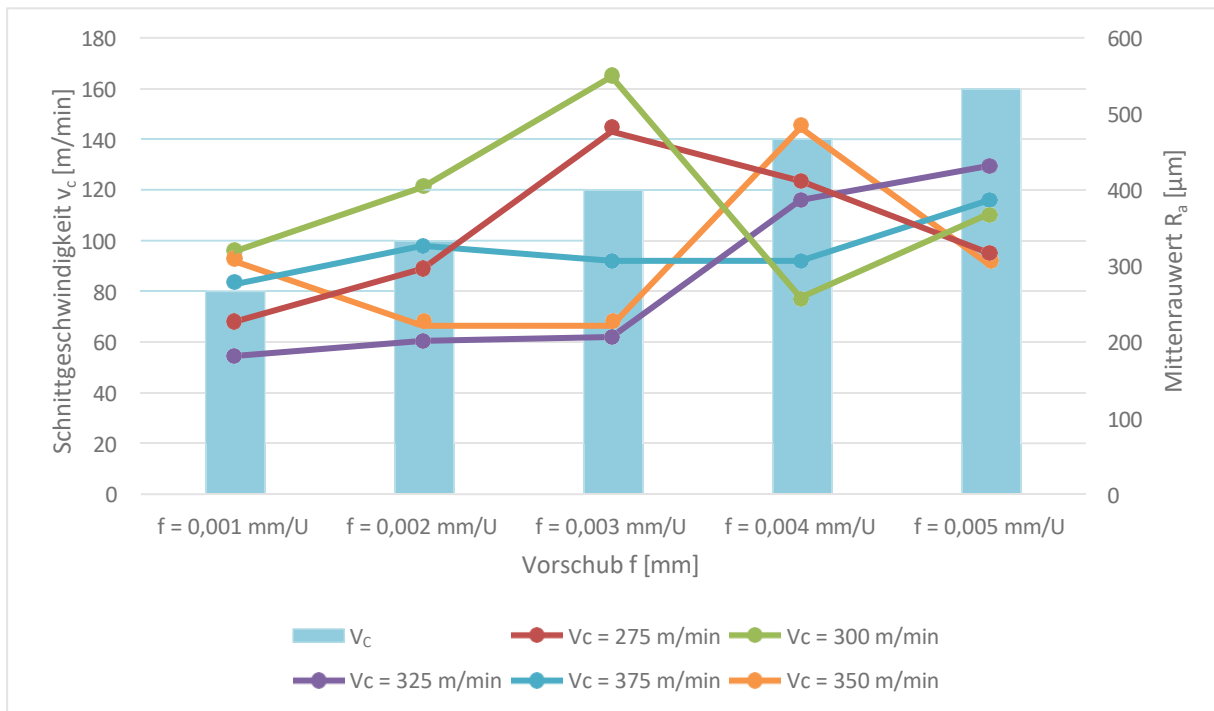


Abbildung 64: Gegenüberstellung der Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe zu den ermittelten Rauheitswerten beim Schleifen mit $a_p = 0,003$ mm

6.3 Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifbearbeitung

Nachfolgend werden die Bearbeitungsdauer, die Werkzeugparameter und die Oberflächengüten der Fräs- und der Schleifbearbeitung einander gegenübergestellt und die jeweiligen Verfahren beurteilt.

6.3.1 Bearbeitungsdauer der Fräs- und Schleifbearbeitung

Bei der Gegenüberstellung der beiden Bearbeitungen wird zunächst die Bearbeitungsdauer betrachtet. Dabei wird die Hauptnutzungszeit gemäß Gleichung (4) ermittelt [49]. Abbildung 65 zeigt die ermittelten Bearbeitungsdauern der Parameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschub aus den Fräsvorversuchen. Bei den niedrigsten Parametern ($v_c = 80$ m/min, $f = 0,005$ mm, $a_p = 0,1$ mm, $a_e = 0,9$ mm) liegt die Hauptzeit bei ca. 70 s für das Bearbeiten einer Bahn von 50 mm, wohingegen bei den höchsten Parametern ($v_c = 160$ m/min, $f = 0,025$ mm, $a_p = 0,1$ mm, $a_e = 0,9$ mm) die Hauptzeit um ca. 90 % auf knapp 8 s reduziert wurde.

$$t_h = \frac{L \cdot i}{v_f} \quad (4)$$

- t_h Hauptnutzungszeit [min]
- L Arbeitsweg [mm]
- v_f Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]
- i Anzahl der Schnitte

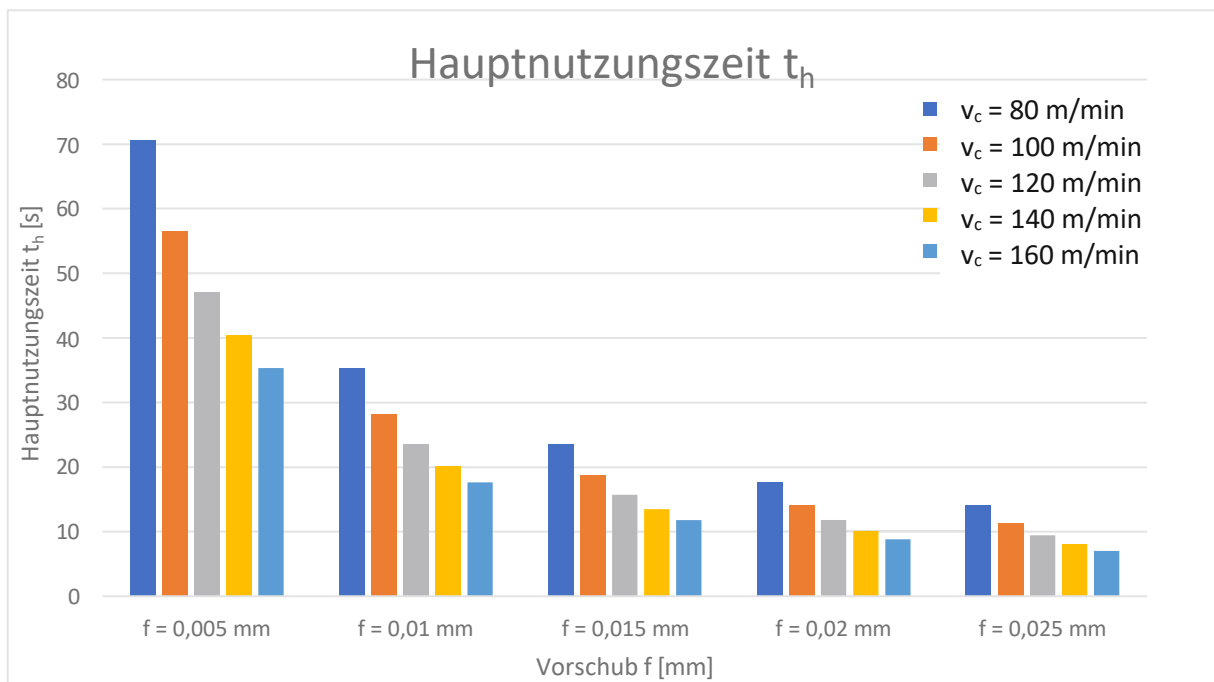


Abbildung 65: Hauptzeiten t_h der Fräsversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern

Bei Betrachtung der Schleifparameter in Abbildung 66 ist zu erkennen, dass die Hauptzeit beim Schleifen für alle Parameter zwischen 105 s und 15 s liegt. Werden nun die höchsten Parameter beim Fräsen ($v_c = 160$ m/min, $f = 0,025$ mm) mit denen beim Schleifen ($v_c = 375$ m/min, $f = 0,005$ mm) verglichen (siehe Abbildung 65), so ist die Hauptzeit t_h beim Fräsen um 53 % geringer als beim Schleifen. Es ist also erkennbar, dass mit den gewählten Parametern eine Fräsbearbeitung eine geringere Bearbeitungsdauer als ein Schleifprozess aufweist. Jedoch darf der Vorschub der Schleifbearbeitung nicht außer Acht gelassen werden. Die Vorschubgeschwindigkeiten sind um den Faktor zehn niedriger, da sowohl durch die Maschine als auch durch den Prozess Limitierungen gegeben sind. Die Schnittgeschwindigkeit ist jedoch knapp drei Mal so hoch. Zudem ist auch die Schnitttiefe $a_p = 1 - 3$ μm um ca. den Faktor zehn geringer. Es ist zu erkennen, dass bei langsamen Parametern beide Verfahren etwa die gleiche Hauptzeit aufweisen, mit zunehmendem Vorschub das Fräsen jedoch seine Überlegenheit zeigt.

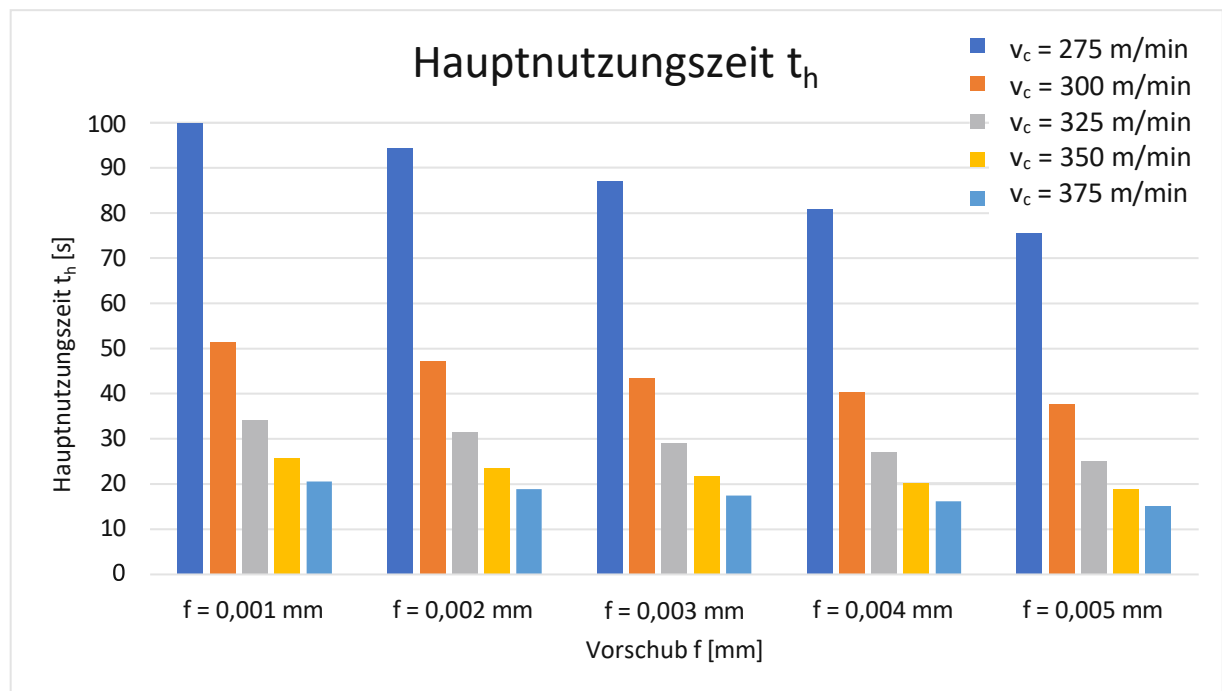


Abbildung 66: Hauptzeiten t_h der Schleifversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern

6.3.2 Gegenüberstellung des Zeitspanvolumens bei der Fräs- und der Schleifbearbeitung

Bei der weiteren Gegenüberstellung der beiden Bearbeitungsarten soll auch auf die Werkzeugparameter eingegangen werden. So zeigt Abbildung 67 einen direkten Vergleich des Zeitspanvolumens Q in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern für die Schnitttiefen beim Fräsen bei $a_p = 0,1$ mm sowie für das Schleifen bei $a_p = 0,003$ mm. Das maximale Zeitspanvolumen mit den verwendeten Parametern liegt beim Fräsen bei $Q_{\max_Fräs} = 37,197$ mm³/min. Das ist eine Steigerung um das 200-fache im Vergleich zum Schleifen, bei dem das Zeitspanvolumen bei $Q_{\max_Schleif} = 0,179$ mm³/min liegt. Das zeigt, dass eine Fräsbearbeitung von Hartmetallen ein viel höheres Zeitspanvolumen und dadurch eine höhere Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Gesamtkosten liefert.

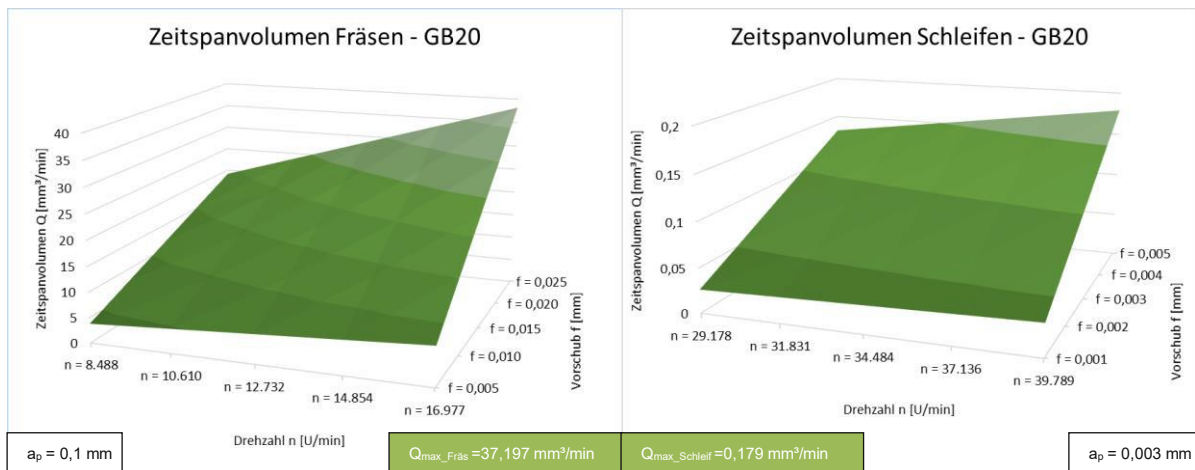


Abbildung 67: Zeitspanvolumen der Fräs- und Schleifversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern

6.3.3 Oberflächengüten der Fräs- und Schleifbearbeitung

Um eine noch klarere Aussage der Gegenüberstellung der Ergebnisse zu erreichen, werden die höchsten Bearbeitungsparameter in Abbildung 68 einander gegenübergestellt. Auffällig ist, dass sich die Prozessparameter zwar unterscheiden, die Oberflächenrauheiten jedoch durchaus im selben Bereich liegen. Einzig durch den Streubereich der einzelnen Werte lassen sich etwaige Unterschiede feststellen. Diese sind jedoch über den gesamten zu zerspanenden Bereich zu betrachten. Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass sich mit dem Fräsen von Hartmetallen dieselben Oberflächengüten erreichen lassen wie mit dem Schleifen.

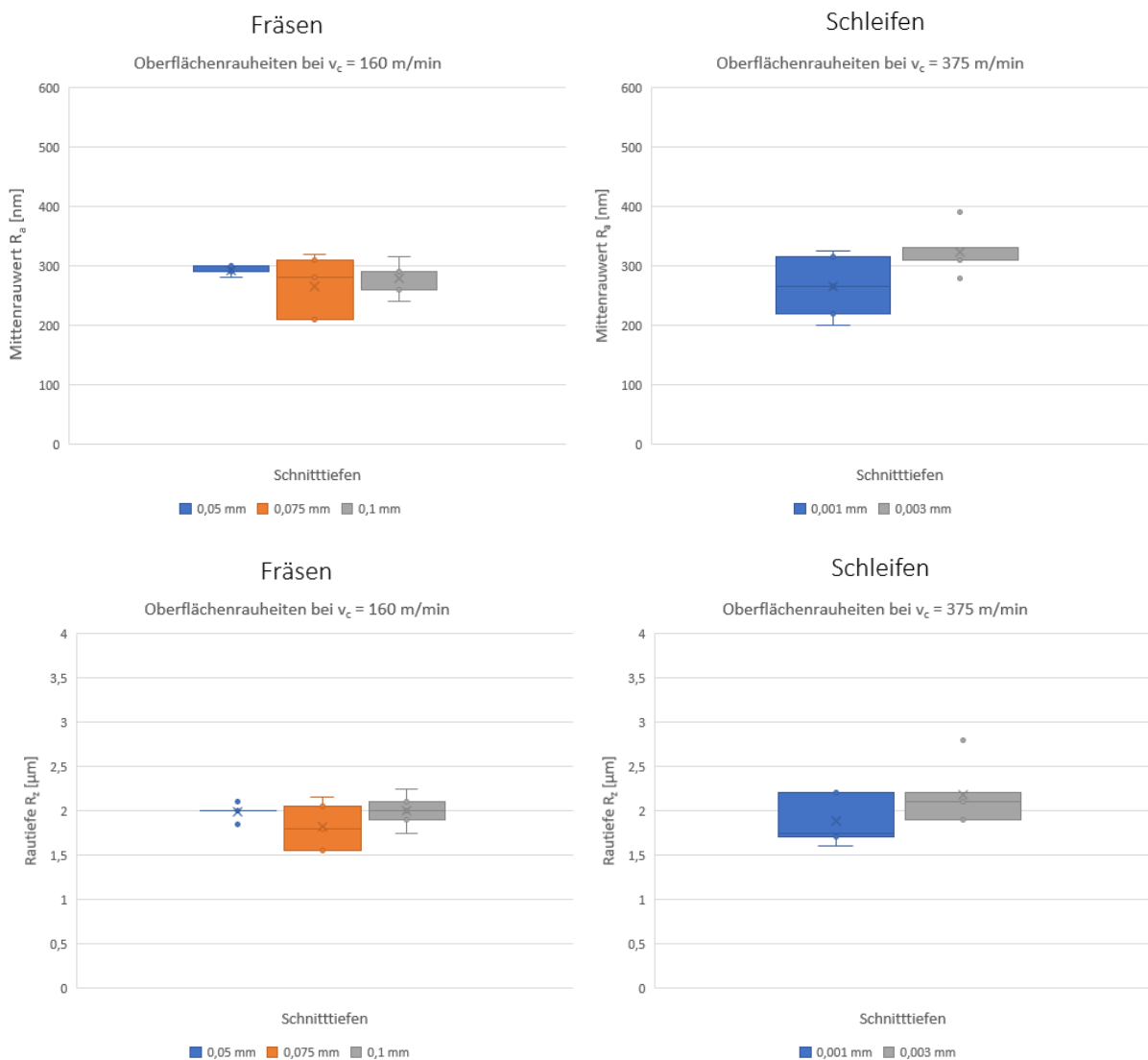


Abbildung 68: Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifbearbeitung der höchsten Bearbeitungsparameter von zwei Rauheitsergebnissen

Die Ergebnisse der Oberflächenrauheitswerte für die Fräs- und Schleifbearbeitung sind in Tabelle 13 dargestellt. Für die Auswertung werden jeweils die maximalen und die mittleren Rauheiten verwendet. Aus dieser Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass sich die maximalen Rauheiten kaum unterscheiden. Beim Vergleich der einzelnen Parameter zeigt sich, dass bei einigen das Fräsen und bei einigen das Schleifen leicht bessere Oberflächenrauheitswerte erbringt, aber die Unterschiede sind sehr gering.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifergebnisse der Oberflächenrauheiten R_a und R_z

Schnitttiefen	Fräsbearbeitung			Schleifbearbeitung	
	0,1 mm	0,075 mm	0,05 mm	0,001 mm	0,003 mm
R_a	$\leq 0,5 \mu\text{m}$	$\leq 0,42 \mu\text{m}$	$\leq 0,4 \mu\text{m}$	$\leq 0,5 \mu\text{m}$	$\leq 0,53 \mu\text{m}$
R_z	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 3 \mu\text{m}$	$\leq 4 \mu\text{m}$	$\leq 4 \mu\text{m}$	$\leq 4 \mu\text{m}$
R_{a_Mittel}	$\sim 0,3 \mu\text{m}$	$\sim 0,28 \mu\text{m}$	$\sim 0,3 \mu\text{m}$	$\sim 0,3 \mu\text{m}$	$\sim 0,3 \mu\text{m}$
R_{z_Mittel}	$\sim 2 \mu\text{m}$	$\sim 1,8 \mu\text{m}$	$\sim 2 \mu\text{m}$	$\sim 2 \mu\text{m}$	$\sim 2 \mu\text{m}$

6.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel soll auf die Wirtschaftlichkeit der Hartmetallzerspanung eingegangen werden. Dafür wird ein Standzeitversuch mit dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Hartmetallwürfel aus GB20 durchgeführt. Für die Zerspanung werden die ermittelten optimalen Parameter, die in Kapitel 6.1.4 dargestellt worden sind, verwendet. Sie sind in Tabelle 14 nochmals angegeben.

Tabelle 14: Bearbeitungsparameter für den Frässtandzeitversuch

Schnitttiefe a_p [mm]	Fräser- Ø d [mm]	Schnittgeschw. v_c [m/min]	Drehzahl n [U/min]	Zahnvorschub f_z [mm]	Vorschub f [mm]	Vorschubgeschw. v_f [mm/min]
0,1	3	140	14854	0,003	0,015	222,8

Ziel dieses Versuches ist die Ermittlung der Standzeit des Werkzeuges um daraus einen Rückschluss auf die Wirtschaftlichkeit zu ziehen. Es wird eine Seite des Würfels mit den oben aufgeführten Parametern vollständig bearbeitet und nach einem zurückgelegtem Standweg von 500 mm wird der Verschleiß mit dem Zoller Smartcheck 600 aufgenommen. Nach der vollständigen Bearbeitung einer Schnittebene wird der gesamte Prozess ein weiteres Mal durchgeführt. So werden insgesamt über 110 Bahnen zu je 50 mm abgefahren, welche zusammen einem Spanvolumen von ca. 500 mm³ entsprechen. Dabei werden insgesamt elf Messungen durchgeführt. Der Fokus der Aufnahmen liegt auf der stirnseitigen Ansicht, bei der der Unterschied zwischen allen fünf Schneiden zu sehen ist. Zudem lässt sich so auch die Verschleißmarkenbreite VB direkt vergleichen. Des Weiteren werden Aufnahmen der Spanfläche durchgeführt, da hier etwaige Ausbrüche der Beschichtung direkt erfasst werden können. In Abbildung 69 ist die Verschleißentwicklung der Schneide 1 nach einer bestimmten Anzahl an abgefahrenen Bahnen zu sehen.

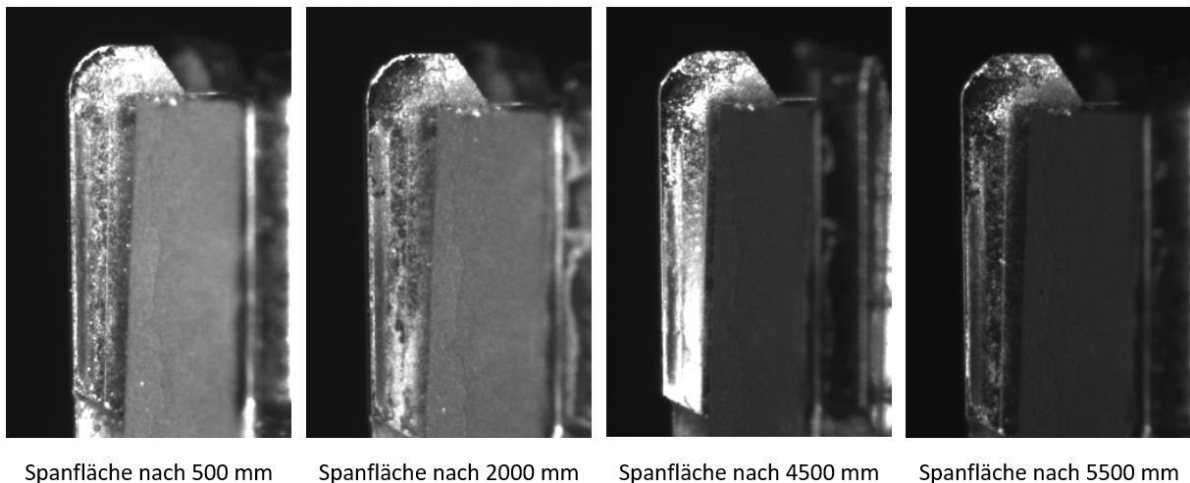
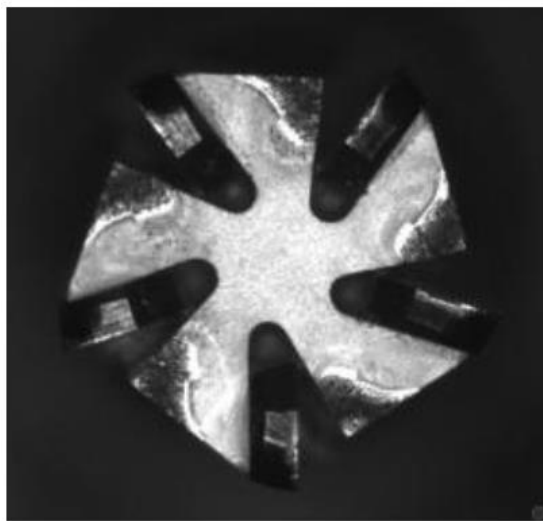
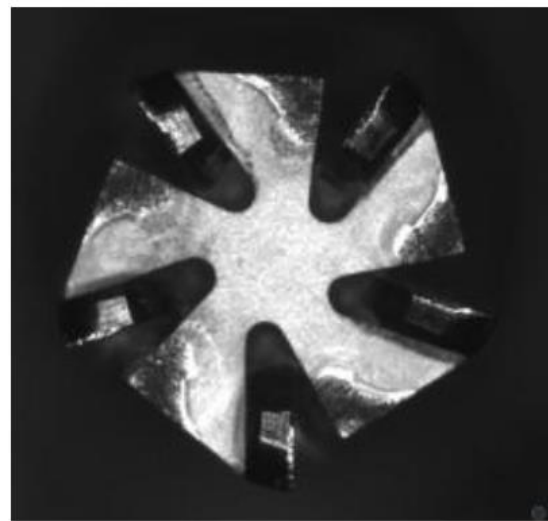


Abbildung 69: Verschleißentwicklung an der Spanfläche der Schneide 1 nach einer bestimmten Anzahl von abgefahrenen Bahnen

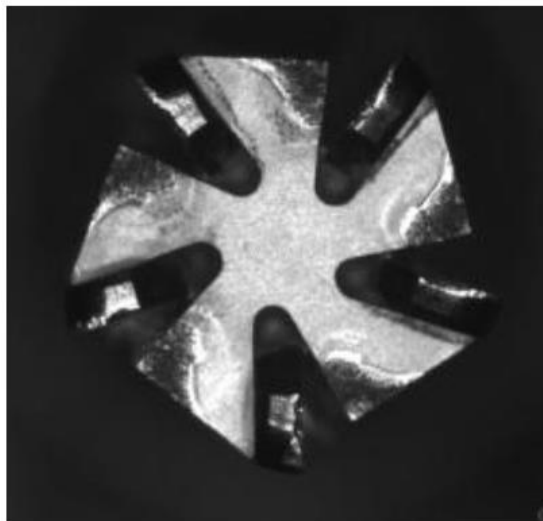
Der graduell entstehende Verschleiß und die zunehmenden Ausbrüche sind gut zu erkennen. Abbildung 70 zeigt die Verschleißmarkenentwicklung aller fünf Schneiden ebenfalls nach einer bestimmten Anzahl von Bahnen. Um die Ergebnisse des Standzeitversuches zu quantifizieren, werden die Verschleißmarkenbreite VB sowie die Ausbrüche VB_{Notch} bei der letzten Messung genau aufgenommen. Für die Standzeit werden die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 140 \text{ m/min}$ und die zulässigen Verschleißmarkenbreiten $VB_{\text{Zul}} = 100 \mu\text{m}$ und $VB_{\text{Notch_Zul}} = 250 \mu\text{m}$ als vorgegebene Größen definiert. In Abbildung 71 und Abbildung 72 sind die mithilfe dieser Versuche ermittelten Werte dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ausbrüche aller Schneiden im Bereich von $VB_{\text{Notch}} = 150 - 280 \mu\text{m}$ liegen.



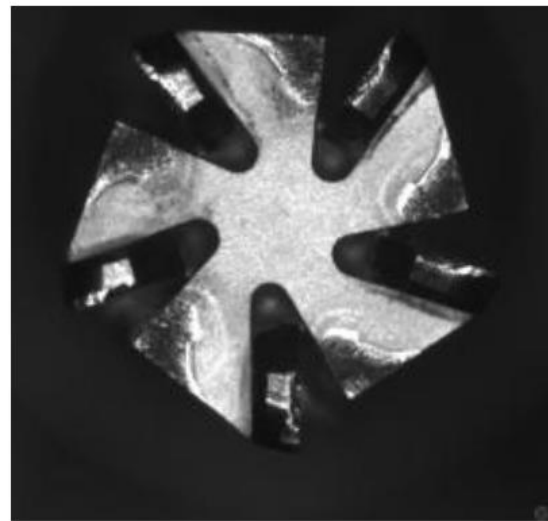
Stirnseite nach 500 mm



Stirnseite nach 2000 mm



Stirnseite nach 4500 mm



Stirnseite nach 5500 mm

Abbildung 70: Stirnseitige Ansicht der Schneiden während des Standzeitversuches

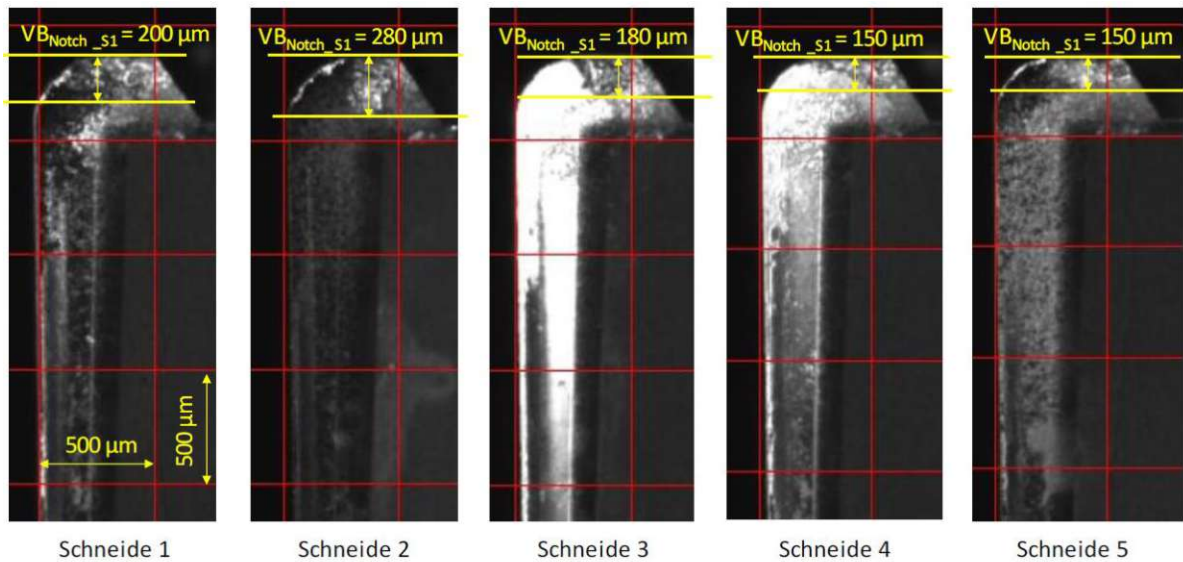


Abbildung 71: Verschleißausbrüche aller fünf Schneiden nach abgefahrenen 5.500 mm

Es kommt schon nach wenigen Bahnen zu kleineren Ausbrüchen aufgrund der Härte des Werkstoffes. Das ist in Abbildung 69 gut zu erkennen. Diese bleiben konstant, bis ein Standweg von knapp 2.000 mm abgefahren worden ist. Danach entstehen, wie es die Aufnahmen zeigen, größeren Ausbrüchen. Daraus lässt sich schließen, dass bis zu diesem Punkt ein Zerspanen ohne größere Komplikationen bzw. Prozessverschlechterungen möglich ist.

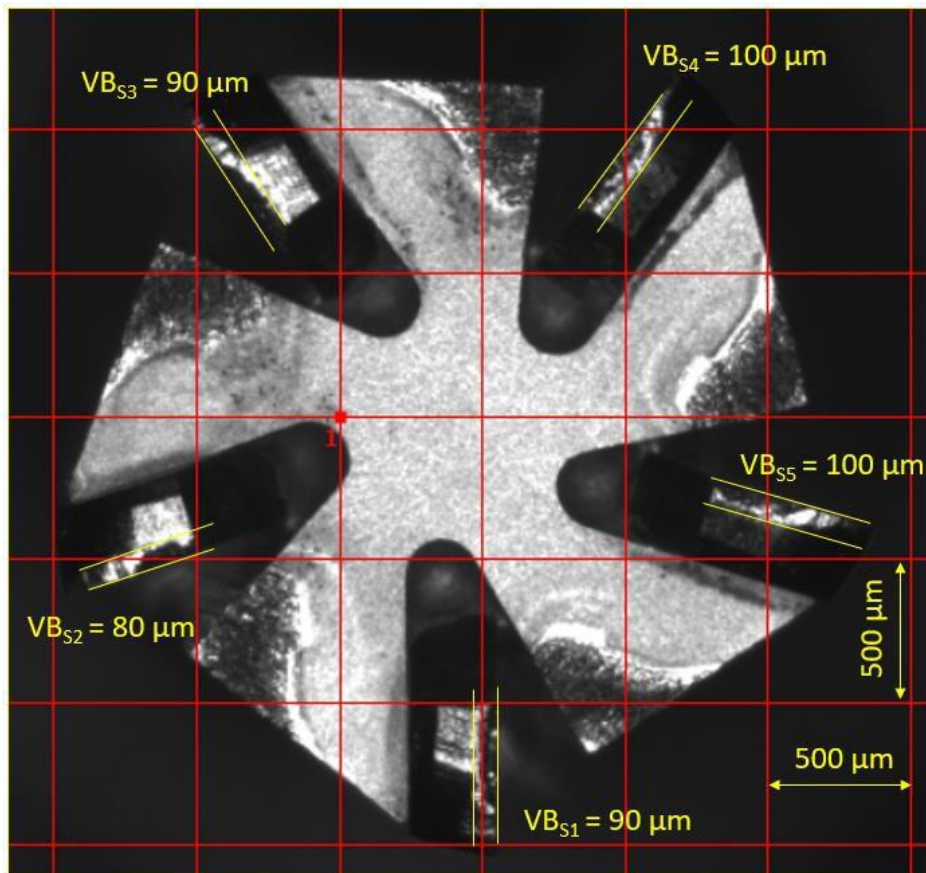


Abbildung 72: Aufnahme der Verschleißmarkenbreite VB aller fünf Schneiden nach abgefahrenen 5.500 mm

Bei der weiteren Bearbeitung entstehen größere Ausbrüche und der Verschleiß nimmt drastisch zu, liegt aber noch in einem akzeptablen Bereich. Nach über 110 Bahnen, was einem abgefahrenem Standweg von 5.500 mm entspricht, wird die vordefinierte Verschleißmarkenbreite erreicht und der Standversuch beendet. Es ist zu erkennen, dass die Verschleißmarkenbreite VB über die Schneiden verteilt im einem Bereich von 80 μm bis 100 μm liegt. Um die Verschleißentwicklung der Schneiden genauer zu betrachten, wurden die Verschleißausbrüche VB_{Notch} aller fünf Schneiden einander gegenübergestellt und analysiert (siehe Abbildung 73). Es fällt auf, dass es bei einigen Schneiden nach 1.500 mm abgefahrenem Standweg zu besonders starken Ausbrüchen bzw. Abplatzern der Beschichtung kommt. Dadurch wird eine neue Schneidkante gebildet, durch die die Oberflächengüte kurzfristig wieder verbessert wird. Das hält jedoch nur kurz an und der Verschleiß nimmt schnell wieder zu.

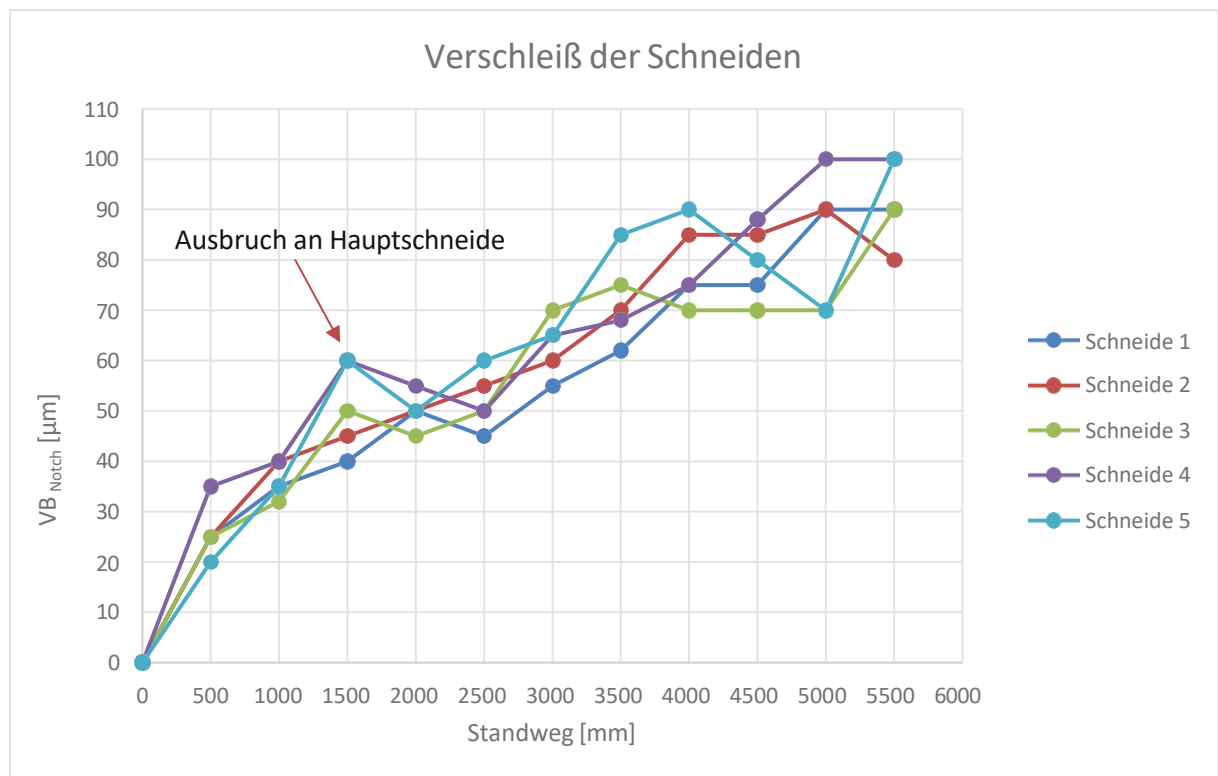


Abbildung 73: Verschleißmarkenbreite VB über den Standweg aller fünf Schneiden beim Standzeitversuch

Um eine detaillierte Aussage über die Höhe des Verschleißes zu erhalten, wird der Fräser mit dem Mikroskop Alicona Infinite Focus genauer untersucht. Hier werden, wie bereits in Kapitel 4.1.3, dreidimensionale Aufnahmen der Schneiden gemacht und anschließend mit einer Software typische Schneidkantenparameter ermittelt (siehe Abbildung 74). Erst anhand der dreidimensionalen Aufnahme wird der tatsächliche Verschleiß deutlich. Es ist zu sehen, dass sich die Schneidkante schon um mehrere Mikrometer verschoben hat.

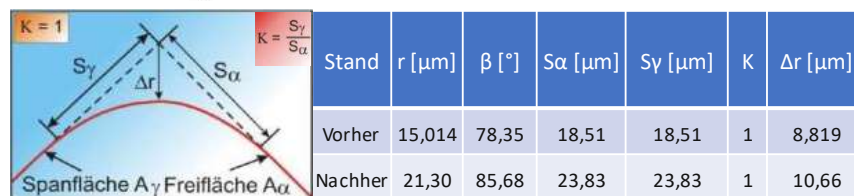
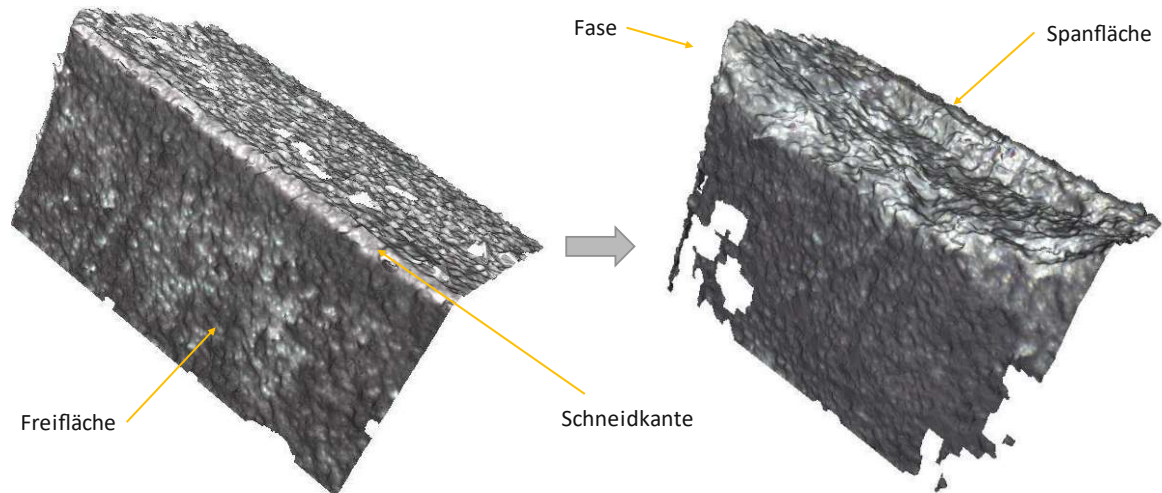


Abbildung 74: Dreidimensionale Schneidkantenaufnahme der Schneide 1 des Fräasers [41]

Die durch den Hauptversuch ermittelte Standzeit $T_{v_c, 140; v_B 0,1}$ beträgt 31 min. Das entspricht einem abgetragenen Spanvolumen von ca. 500 mm³ bei zurückgelegten 5.500 mm. Wenn der Verschleiß des Werkzeuges minimiert werden soll und nur bis zu einem Standweg von ca. 2.000 mm zerspant wird, ergibt sich dennoch ein Spanvolumen von 180 mm³, welches in einer Zeit von ca. 12 min zerspant werden würde. Um nun eine konkrete Aussage über die Wirtschaftlichkeit zu erhalten, wird die Hauptzeit für eine typische Bearbeitung mit Gleichung (5) und (6) ermittelt. Mit den höchstmöglichen Schleifparametern an der gleichen Maschine ($f = 0,005$ mm, $v_c = 375$ m/min, $a_p = 3$ μm) würde die Bearbeitung desselben Spanvolumens mit denselben Parametern wie aus dem Hauptversuch (500 mm³) etwa 926,3 min dauern. Das entspricht einer Bearbeitungsdauer von mehr als 15 h und einer 30-fachen Steigerung der Bearbeitungszeit beim Schleifen im Gegensatz zum Fräsen.

$$t_{h_Fräs} = \frac{L}{v_f} * i = \frac{50 \text{ mm}}{159,2 \text{ mm/min}} * 110 = 31,4 \text{ min} \quad (5)$$

$$t_{h_schleif} = \frac{L}{v_f} * i = \frac{50 \text{ mm}}{198,9 \text{ mm/min}} * 3685 = 926,3 \text{ min} \quad (6)$$

- t_h Hauptzeit in min
- L Arbeitsweg in mm
- i Anzahl der Schnitte
- v_f Vorschubgeschwindigkeit in mm/min

Daraus lässt sich folgern, dass das Zerspanen von Hartmetallen ein enormes Einsparpotential in Bezug auf die Maschinenzeit liefert. Aus diesem Grund sind relevante Werte wie die Werkzeugkosten und die Personalkosten so gut wie möglich approximiert und in Tabelle 15 dargestellt worden. Auf die Maschinenkosten und die Materialkosten wird hierbei nicht genauer eingegangen, obwohl die Maschinenkosten etwas differieren, da bei der Bearbeitung mittels Fräsen als Kühlmittel Druckluft zum Einsatz kam. Bei der Schleifbearbeitung ist Kühlschmiermittel verwendet worden, welches einen höheren Einfluss auf die Gesamtherstellkosten hat. Die Kühlschmierstoffkosten liegen in der Regel zwischen 7 % und 17 % der Gesamtkosten. Es ist zu erkennen, dass die Fräsbearbeitung trotz hoher Werkzeugkosten eine Kostenersparnis von bis zu 30 % bedeutet [1].

Tabelle 15: Übersicht der approximierten Kosten der beiden Prozesse

Kosten	Fräsen	Schleifen
Werkzeugkosten [€]	800	11,55
Personalkosten [€/h]	80	80
Bearbeitungsdauer [h]	0,5	15
Gesamtkosten [€]	840	1.211,55

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit sind anhand von Fräsversuchen an einem Hartmetallwerkstück mit einem 12%igen Kobaltanteil mehrere Schnittparameter geprüft worden, um zu ermitteln, bei welchen Parametern die Zerspaltung von Hartmetallen möglich ist. Dabei ist ein fünfschneidiger CVD-D-Fräser der Firma Tirotol sowie ein Hartmetallmaterial der Firma Boehlerit GmbH & Co. KG zum Einsatz gekommen. Folgende Parameterbereiche sind bei den Versuchen verwendet worden:

- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 80 - 160 \text{ m/min}$
- Vorschub $f = 0,001 - 0,005 \text{ mm}$
- Schnitttiefe $a_p = 0,05 - 0,1 \text{ mm}$
- Schnittbreite $a_e = 0,9 \text{ mm}$
- Drehzahl $n = 8.488 - 16.977 \text{ U/min}$

Zusätzlich zu den Fräsversuchen sind auch Schleifversuche durchgeführt worden, da das Schleifen bei der Hartmetallbearbeitung eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren ist. Es konnte gezeigt werden, dass die Zerspaltung von Hartmetallen eine alternative Möglichkeit zu den bisherigen Verfahren darstellt. So konnte ein Hartmetallwerkstoff, welcher eine Härte von über 1.250 HV 30 aufweist, erfolgreich zerspant werden. Es sind zudem die optimalen Parameter für eine Bearbeitung von Hartmetallen mit einem Kobaltanteil von ca. 12 % ermittelt worden. So haben sich eine Schnittgeschwindigkeit $v_c = 140 \text{ m/min}$ und eine Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 222,5 \text{ mm/min}$ bei einer Schnittbreite $a_e = 0,9 \text{ mm}$ und einer Schnitttiefe $a_p = 0,1 \text{ mm}$ als am effizientesten erwiesen. Bei diesen Parametern liegen die Oberflächengüten bei $R_a \leq 0,25 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. $R_z \leq 1,5 \text{ }\mu\text{m}$. Durch die Gegenüberstellung des Fräsens mit dem Schleifen konnte deutlich gemacht werden, dass die Oberflächengüten beim Schleifen keinen signifikanten Mehrwert bringen. So sind die beiden Verfahren hinsichtlich der erreichbaren Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z gleichzustellen. Zudem ist das Zeitspanvolumen beider Verfahren betrachtet worden. Aus ihm ist zu erkennen, dass eine Fräsbearbeitung ein 200-fach höheres Volumen in derselben Zeit abträgt wie eine typische Schleifbearbeitung. Mit der Durchführung eines Standzeitversuches konnte zudem der Verschleiß sowie die maximale Einsatzdauer des CVD-D-Werkzeuges ermittelt werden. Bei diesem Versuch ist eine Standzeit von über 31 min bei einem zerspannten Volumen von ca. 500 mm^3 erreicht worden. Neben einem starken Freiflächenverschleiß an den Schneiden, sind zudem immer größer werdende Ausbrüche nach einer definierten Anzahl an zurückgelegten Bahnen aufgetreten. Bis zu einem Standweg von 2.000 mm, das entspricht einer Bearbeitungsdauer von 12 min, ist der Verschleiß noch moderat, danach nimmt er aufgrund der steigenden thermischen und mechanischen Belastungen rapide zu. Aufgrund der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass die Zerspaltung von

Hartmetallen mittels Fräsprozess möglich ist und sie gegenüber den derzeitigen Verfahren viele Vorteile in Bezug auf Schnitttiefe, Bearbeitungszeit sowie Oberflächengüte bietet. Kritisch sind jedoch die hohen Werkzeugkosten zu sehen. Zwar sind sie in Bezug auf die Gesamtkosten der Bearbeitung noch immer günstiger als das Schleifen, könnten aber für Unternehmen abschreckend wirken.

7.2 Ausblick

Aufgrund der Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen werden konnten, nämlich dass sich Hartmetalle erfolgreich mittels Fräsbearbeitung zerspanen lassen, sollten in Hinblick auf die Zerspanung von Hartmetallen durch Fräsprozesse weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Zunächst sollten weitere Hartmetalle mit unterschiedlichen Kobaltanteilen zerspant werden. Dabei sollte mit höheren Kobaltanteilen gestartet werden, da mit einem zunehmenden Kobaltanteil die Härte des Werkstoffes sinkt. Des Weiteren sollte der Einfluss von Kühlmitteln auf die Zerspanung eruiert werden, da bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit nur mit nichtgekühlter Druckluft gearbeitet wurde. Durch die Recherche hat sich herausgestellt, dass wässrige Kühlschmierstoff-Emulsionen zu schwer beherrschbaren Temperaturschwankungen führen, weshalb Ölkühlungen besser geeignet sind. Da in dieser Arbeit der Verschleiß anhand der Verschleißmarkenbreite sowie der Ausbruchgröße aufgenommen wurde, sollten in weiteren Untersuchungen Schädigungsmechanismen wie Oxidations- und Diffusionsvorgänge betrachtet werden. Des Weiteren sollten die Oberflächengüten und die Bearbeitungsdauern auch mit Prozessen wie dem Erodieren verglichen werden, da diese ebenfalls zu sehr häufig verwendeten Verfahren zur Bearbeitung von Hartmetallen zählen. In Bezug auf die CVD-Werkzeuge sollten Untersuchungen mit größeren Werkzeugdurchmessern durchgeführt werden. Dabei können die hier ermittelten optimalen Parameter in Bezug auf Schnittbreite und Drehzahl als Basis verwendet werden. Es sollten auch weitere CVD-Werkzeuge mit unterschiedlicher Zusammensetzung erprobt werden. Das Zerspanen von Hartmetallen bietet enorme Vorteile gegenüber den bisherigen Verfahren und mit zunehmender Werkzeugentwicklung wird es in Zukunft eine bedeutende Rolle in der Bearbeitung von Hartmetallen einnehmen.

Literaturverzeichnis

- [1] Burmester, J., Dillinger, J., Escherich, W., *et al.*: 'Fachkunde Metall' (Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co.KG, Haan-Gruiten, 2018, 58th edn.)
- [2] Klocke, F.: 'Fertigungsverfahren 1' (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018)
- [3] Martin Hattenberger: 'Wolframcarbide-Cobalt-Compositpulver für die Hartmetallherstellung', 2007
- [4] '<https://www.form-werkzeug.de/a/article/article-213453>: gelesen am 24.09.2020'
- [5] 'https://www.maschinewerkzeug.de/werkzeuge/uebersicht/artikel/hartmetall-fraesen-1127982.html?article.page=2&survey_1127982.current-step=1&_req_id=31588940695783:52B4505904BB95009A2DBAAC7244EB0BC7ECAB91: gelesen am 24.09.2020'
- [6] Goetz, Daniela, Klaus Vollrath: 'Optimiertes Zerspanen von Hartmetallen', 2019
- [7] Walter Lengauer*: 'Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis: Hartmetalle: Stand heute und morgen', November 2006
- [8] Klocke, F.: 'Pulvermetallurgie', in Klocke, F. (Ed.): 'Fertigungsverfahren 5' (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015), pp. 39–114
- [9] 'DIN 8580 Urformen: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung', 2020
- [10] CERATIZIT: 'Hartmetall ist Vertrauenssache', 2018
- [11] '<https://www.ceratizit.com/de/unternehmen/passionforcedcarbide/>: gelesen am 24.09.2020'
- [12] Werner Degner, Hans Lutze, Erhard Smejkal, Uwe Heisel, Johannes Rothmund: 'Spanende Formung; Theorie - Berechnung - Richtwerte', 2019
- [13] Saito, H., Iwabuchi, A., Shimizu, T.: 'Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide', *Wear*, 2006, 261, (2), pp. 126–132
- [14] García, J., Collado Ciprés, V., Blomqvist, A., Kaplan, B.: 'Cemented carbide microstructures: a review', *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 80, pp. 40–68
- [15] Höring, B.: 'DIN ISO 513: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen', 2014
- [16] '<https://www.ceratizit.com/de/unternehmen/innovation-technologie/der-werkstoff-hartmetall/>: gelesen am 24.09.2020'
- [17] Bergs, T., Richter, V., Ottersbach, M., Pötschke, J., Hochmuth, C., Busch, K.: 'Tool Technologies for Milling of Hardmetals and Ceramics', *Procedia CIRP*, 2016, 46, pp. 299–302
- [18] Andreas Benner: 'Zerspanung warmkompaktierter Sinterstähle im Grün- und Sinterzustand', 2003

- [19] Hubert Winkler: 'Fertigungstechnik: Das Fachmagazin für die zerspanende Industrie', *FERTIGUNGSTECHNIK*, 2014
- [20] 'DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen', 2003
- [21] Lin, Y.-C., Hwang, L.-R., Cheng, C.-H., Su, P.-L.: 'Effects of electrical discharge energy on machining performance and bending strength of cemented tungsten carbides', *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206, (1-3), pp. 491–499
- [22] 'https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2013/07/06_w_schimmelpfennig_erosion_07j2013/06_w_schimmelpfennig_erosion_07j2013.php: gelesen am 24.11.2020'
- [23] Bhadauria, G., Jha, S.K., Roy, B.N., Dhakry, N.S.: 'Electrical-Discharge Machining of Tungsten Carbide (WC) and its composites (WC-Co) – A Review', *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5, (11), pp. 24760–24769
- [24] S.H. Lee, X.L.*P.: 'Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide', 1999
- [25] 'DIN 8589-0: Fertigungsverfahren Spanen', 2003
- [26] 'https://www.ceratizit.com/de/unternehmen/innovation-technologie/der-werkstoff-hartmetall/bearbeitung-von-hartmetall/: gelesen am 24.09.2020'
- [27] Maldaner, J.: 'Verbesserung des Zerspanverhaltens von Werkzeugen mit Hartmetall-Schneidelementen durch Variation der Schleifbearbeitung' (Kassel Univ. Press, Kassel, 2008)
- [28] J.B.J.W. Hegemana, J.Th.M. De Hosson a,*, G.deWithb: 'Grinding of WC–Co hardmetals', 2000
- [29] Zhang, J., Suzuki, N., Wang, Y., Shamoto, E.: 'Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond', *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214, (11), pp. 2644–2659
- [30] Brehl, D.E., Dow, T.A.: 'Review of vibration-assisted machining', *Precision Engineering*, 2008, 32, (3), pp. 153–172
- [31] 'https://www.mt-metallhandwerk.de/werkzeuge-optimiertes-zerspanen-von-hartmetallen/150/65476/: gelesen am 24.09.2020'
- [32] Liu, K., Wang, H., Zhang, X.: 'Ductile Mode Cutting of Brittle Materials' (Springer Singapore, Singapore, 2020)
- [33] Kieninger Technologie: 'Diamant-und CBN-Schafffräser', 2015
- [34] 'https://diamond-toolingsystems.com/schneidstoffe/cvd-d-: diamant/: gelesen am 24.11.2020'
- [35] Denkena, B., Tönshoff, H.K.: 'Spanen' (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011)

- [36] Ottersbach, M., Zhao, W.: 'Experimental Investigations on the Machinability of Tungsten Carbides in Orthogonal Cutting with Diamond-coated Tools', *Procedia CIRP*, 2016, 46, pp. 416–419
- [37] BOEHLERIT GmbH & Co. KG: 'Hartmetall Verschleißschutz & Halbzeuge', 2018
- [38] Dominik Strasser: 'Fräsbearbeitung von Hartmetall mit geometrisch bestimmter Schneide', 2021
- [39] DMG MORI: 'Ultrasoundic Datenblatt', 2021
- [40] TiroTool Werkzeugsysteme GmbH: 'Tirotool Werkzeuge', 2012
- [41] Heckmann, L.: 'Systematische Analyse der Schneidkantenarchitektur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode' (Univ. Press, Kassel, 2010)
- [42] Hoffman Group: 'Datenblatt Schleifstifte', 2021
- [43] '<https://www.haefeli.swiss/de/spezialthemen/korngroessen> gelesen am 10.03.2022'
- [44] Kistler Gruppe: 'Datenblatt, Mehrkomponenten-Dynamometer Typ 9129AA', 2021
- [45] Kistler: '<https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/zerspantkraftmessung-beim-frasen/>: gelesen am 24.11.2021'
- [46] 'DIN 6583: Begriffe der Zerspantechnik: Standbegriffe', 1981
- [47] Eberhard Paucksch: 'Prinzipien der Spanbildung und Zerspanbarkeit', 2008
- [48] 'Untersuchungen zum Fräsen mit CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen' (Shaker, Aachen, 2004)
- [49] Böge, W.: 'Fräsen', in Böge, A., Böge, W. (Eds.): 'Handbuch Maschinenbau' (Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017), pp. 1289–1298

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Einteilung der Schneidstoffe nach den Kriterien Verschleißfestigkeit und Zähigkeit [1].....	1
Abbildung 2: Zeitersparnis einer Fräsbearbeitung gegenüber einer typischen Schleifbearbeitung [6].....	2
Abbildung 3: Einsatzgebiete für die Verwendung von Hartmetallen [5].....	4
Abbildung 4: Untergruppen des Fertigungsverfahrens „Umformen“ [9].....	5
Abbildung 5: Schema zur Hartmetallerzeugung [2, 8].....	6
Abbildung 6: Volumenunterschiede durch Schwund beim Sintern von $WC-Co$ -Hartmetallen [11].....	7
Abbildung 7: Zusammensetzung von $WC-Co$ -Hartmetallen für verschiedene Anwendungsgruppen nach ISO 513 [12].....	9
Abbildung 8: Einfluss der Karbidkorngröße auf die Härte und Biegefestigkeit von Hartmetallen [8].....	10
Abbildung 9: Mikrostrukturen der einzelnen Korngrößen nach dem Fachverband Pulvermetallurgie [14].....	10
Abbildung 10: Härte, Druckfestigkeit, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit von Hartmetallen in Abhängigkeit Kobaltgehalt, Korngröße und Mischkarbidgehalt [2].....	11
Abbildung 11: Verschiedene Grundformen von Hartmetallgrünlingen [19].....	15
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Erodierprozesses [22].....	16
Abbildung 13: Auswirkungen der Kühlung beim Schleifen von Hartmetallen [10].....	17
Abbildung 14: Elliptische Schwingungsbearbeitung [29].....	18
Abbildung 15: Unterschied zwischen einem normalen Schnitt (1) und einem Schnitt mit elliptischer Schwingung (2) [29].....	19
Abbildung 16: Schneidstoffsorten im Vergleich zu ihrer Härte [34].....	21
Abbildung 17: Vergleich der Warmhärten verschiedener Schneidwerkstoffe [2].....	22
Abbildung 18: Versuchsaufbau mit den für die Fräsversuche verwendeten Schnittparametern.....	27
Abbildung 19: Hartmetallwürfel vor der Fräsbearbeitung (1) und nach der Fräsoperation (2).....	28
Abbildung 20: Hartmetallkornsorten, Kobaltgehalt in Abhängigkeit zur Härte (1) sowie zur Bruchzähigkeit (2) [37].....	29
Abbildung 21: Schneiden des Fräswerkzeuges.....	31
Abbildung 22: Mit der Universalmessmaschine Zoller Smartcheck 600 aufgenommene Schneidkantenbilder - Frontalansicht (1) und stirnseitige Ansicht (2).....	31
Abbildung 23: Dreidimensionale Schneidkantenaufnahme der Schneide 1 des Fräasers mittels Alicona Infinite Focus [41].....	32
Abbildung 24: Werkzeugaufnahme HSK-E40 des Fräasers.....	32
Abbildung 25: Für die Schleifvorversuche verwendetes Werkzeug.....	33

Abbildung 26: Mit dem Mehrkomponenten-Dynamometer ermittelbare Kräfte [45] ...	34
Abbildung 27: Auszug der Zerspankräfte für den Vorversuch mit einer Schnitttiefe von $a_p = 0,05$ mm.....	35
Abbildung 28: Arbeitsmittel für die Aufnahme der Oberflächenrauheiten mittels Abformmasse	35
Abbildung 29: Bilderserie der Oberflächenaufnahme mittels Abformmasse.....	36
Abbildung 30: Oberflächenprofil der abgefahrenen Bahnen einer Schnitttiefe	36
Abbildung 31: Rauheitsprofil der zerspannten Oberflächen	37
Abbildung 32: Verschleißmessung der Stirnseite sowie Verschleißmessung der Schneide 1 nach 500 mm.....	37
Abbildung 33: frontale (1), stirnseitige (2) und Seitenaufnahmen (3) mit dem Zoller Smartcheck 600	38
Abbildung 34: Dreidimensionales Modell (links) und der Bearbeitungsweg (rechts) der Fräsbearbeitung	39
Abbildung 35: Ermittlung der Spanwerte beim Gleichlaufräsen [35][49].....	40
Abbildung 36 Positionierung der Messhardware vor der Maschine für die Vor- bzw. Hauptversuche der Fräs- und Schleifbearbeitung.....	42
Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Fräsvorversuche und die Standzeitversuche	43
Abbildung 38: Montageablauf für die Befestigung der Würfelhalterung inkl. Messplatte.....	44
Abbildung 39: Montageablauf für die Befestigung der Würfelhalterung inklusive. Druckluftzufuhr	45
Abbildung 40: Schnittparameter der Fräsvorversuche bei einer Zustelltiefe von $a_p = 0,1$ mm gegenüber dem Zeitspanvolumen	48
Abbildung 41: Schleifbearbeitung des Materials GB20 mit Kühlschmiermittel	49
Abbildung 42: Schnittparameter der Schleifvorversuche bei einer Zustelltiefe von $a_p = 0,003$ mm gegenüber dem Zeitspanvolumen.....	51
Abbildung 43: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,05$ mm.....	52
Abbildung 44: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,075$ mm.....	53
Abbildung 45: Kräfteplots der Zerspankräfte bei einer Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm.....	54
Abbildung 46: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,05$ mm	57
Abbildung 47: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,075$ mm	56
Abbildung 48: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z für die Schnitttiefe $a_p = 0,1$ mm	57
Abbildung 49: Aufbau eines Box-Plots	57

<i>Abbildung 50: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes</i>	58
<i>Abbildung 51: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes</i>	59
<i>Abbildung 52: Gegenüberstellung der Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe zu den ermittelten Rauheitswerten beim Fräsen mit $a_p = 0,1$ mm</i>	60
<i>Abbildung 53: Zeitlicher Verschleiß der Schneide 1 nach einer bestimmten Anzahl von zurückgelegten Millimetern</i>	61
<i>Abbildung 54: Schneide 1 nach abefahrenen 250 mm (links) im direkten Vergleich dazu nach 1250 mm (rechts)</i>	62
<i>Abbildung 55: Ausbrüche der Schneidkante an Schneide 5 nach Beendigung des Versuches mit der Zustelltiefe $a_p = 0,1$ mm</i>	62
<i>Abbildung 56: Bilderserie der stirnseitigen Ansicht nach einer gewissen Anzahl von abefahrenen Millimetern</i>	63
<i>Abbildung 57: Bilderserie der stirnseitigen Ansicht nach einem gewissen zurückgelegten Standweg</i>	64
<i>Abbildung 58: Gegenüberstellung der Kraftplots aller drei Schnitttiefen in Abhängigkeit von der Vorschubkraft F_f, der Vorschubnormalkraft F_{fN} und der Passivkraft F_p</i>	65
<i>Abbildung 59: Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der drei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 140$ m/min</i>	66
<i>Abbildung 60: Mittenrauwerte R_a und Rautiefe R_z der Schleifvorversuche für die Schnitttiefe $a_p = 0,001$ mm</i>	68
<i>Abbildung 61: Mittenrauwert R_a und Rautiefe R_z der Schleifvorversuche für die Schnitttiefe $a_p = 0,003$ mm</i>	69
<i>Abbildung 62: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der zwei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes</i>	70
<i>Abbildung 63: Gegenüberstellung aller Mittenrauwerte R_a und Rautiefen R_z der zwei Schnitttiefen für die Schnittgeschwindigkeiten des Versuchsplanes</i>	71
<i>Abbildung 64: Gegenüberstellung der Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe zu den ermittelten Rauheitswerten beim Schleifen mit $a_p = 0,003$ mm</i>	72
<i>Abbildung 65: Hauptzeiten t_h der Fräsversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern</i>	73
<i>Abbildung 66: Hauptzeiten t_h der Schleifversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern</i>	74
<i>Abbildung 67: Zeitspanvolumen der Fräs- und Schleifversuche in Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern</i>	75
<i>Abbildung 68: Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifbearbeitung der höchsten Bearbeitungsparameter von zwei Rauheitsergebnissen</i>	76
<i>Abbildung 69: Verschleißentwicklung an der Spanfläche der Schneide 1 nach einer bestimmten Anzahl von abefahrenen Bahnen</i>	78

<i>Abbildung 70: Stirnseitige Ansicht der Schneiden während des Standzeitversuche..</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 71: Verschleißausbrüche aller fünf Schneiden nach abgefahrenen 5.500 mm.....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 72: Aufnahme der Verschleißmarkenbreite VB aller fünf Schneiden nach abgefahrenen 5.500 mm</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 73: Verschleißmarkenbreite VB über den Standweg aller fünf Schneiden beim Standzeitversuch</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 74: Dreidimensionale Schneidkantenaufnahme der Schneide 1 des Fräsers mittels Alicona Infinite Focus [41].....</i>	<i>82</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zeittafel der Hartmetallentwicklung [2],[7].....</i>	<i>3</i>
<i>Tabelle 2: Klassifizierung von Korngrößen bisher sowie nach dem neuen Vorschlag [8],[15]</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 3: Materialeigenschaften in Abhängigkeit von Komponentenanteilen.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 4: Vergleich der Hartmetallarten anhand spezifischer Eigenschaften [2].....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 5: Parameterbereiche für die Zerspanung von Hartmetallen [10],[17],[37] ...</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 6: Eigenschaften der Hartmetallsorte GB20 [37]</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 7: Maschinendaten DMG Mori Ultrasonic 30 linear [39].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 8: Werkzeugdaten des verwendeten Schleifwerkzeuges [42].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 9: Ermittlung der Mittenspannungsdicke h_m.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 10: Versuchsplan der Fräsvorversuche aller drei Schnitttiefen.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 11: Versuchsplan der Schleifvorversuche aller drei Schnitttiefen</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 12: Optimale Parameter für die Fräsbearbeitung von Hartmetallen mit einem ca. 12 % Co-Anteil mittels CVD-D Werkzeug</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 13: Gegenüberstellung der Fräs- und Schleifergebnisse der Oberflächenrauheiten R_a und R_z.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabelle 14: Bearbeitungsparameter für den Frässtandzeitversuch</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 15: Übersicht der approximierten Kosten der beiden Prozesse.....</i>	<i>83</i>