

Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen

Von der Fakultät Maschinenbau der TU Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Tobias Heymann

aus Dortmund

2015

Datum der Einreichung:	10. Oktober 2014
Datum der mündlichen Prüfung:	09. März 2015
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D. Biermann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. F. Barthelmä PD Dr.-Ing. Dipl.-Inform. A. Zabel

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8027-8778-2

Danksagung

Zu viele Menschen, zu wenig Platz.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Meinem Doktorvater, dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, danke ich für die stetige Förderung und persönliche Unterstützung sowie das mit entgegengebrachte Vertrauen. Seine Offenheit habe ich stets sehr geschätzt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Barthelmä möchte ich für die Übernahme der Mitberichterstattung, die wertvollen Hinweise und die ermutigenden Worte danken, weiterhin auch Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther für den Vorsitz des Prüfungsausschusses. PD Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel danke ich ebenfalls für die Mitberichterstattung, die Zusammenarbeit am ISF und die Anregungen in Bezug auf die vorliegende Arbeit.

Mein Dank gilt weiterhin allen ehemaligen Kollegen und Mitarbeitern des ISF. Die stets angenehme Arbeitsatmosphäre und kollegiale Zusammenarbeit werde ich in guter Erinnerung behalten. Besonders hervorheben möchte ich hier die „Schleifer“ des ISF deren Zusammenhalt ich auch über die Tätigkeit am ISF hinaus sehr genossen habe und die mir in stetiger Erinnerung bleiben wird. Stellvertretend sollen hier Dr. Thomas Mohn, Dr. Markus Feldhoff, Robert Aßmuth, Mark Wolf und Sebastian Schumann genannt werden.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Jörg Eichmann der in vielen Stunden an der Maschine und auch darüber hinaus eine große Hilfe gewesen ist. Ebenso Michael Kater der mich im Bereich der Messtechnik unterstützt hat.

Ohne die Unterstützung der studentischen Hilfskräfte, Studien- und Diplomarbeiten wäre die Durchführung der umfangreichen Forschungsarbeiten nicht möglich gewesen. Die Studentischen Hilfskräfte Alexander Ott, Robert Aßmuth, Christoph Speckenheuer, Sebastian Goeke, Nikolas Beer, Rebecca Folle sowie die Diplom- und Studienarbeiter Dominik Weßel und Armin Nematolani sollen hervorgehoben genannt werden

Frau Tatjana Gluth sowie den Herren Dr. Thomas Mohn, Mark Wolf sowie Dr. Markus Feldhoff danke ich darüber hinaus für die kritische Durchsicht meines Manuskriptes und die damit verbundene konstruktive Kritik.

Meinen Eltern, Friedhelm und Christel, möchte ich in besonderer Weise danken. Dafür, dass sie immer da sind und mir meinen beruflichen Werdegang bis hin zur Promotion überhaupt erst ermöglicht haben. Meinem Bruder Matthias danke ich für seine Feundschaft die mir stets den nötigen Halt gibt.

Tobias Heymann

Reutlingen, im März 2015

Kurzfassung

Gerade vor dem Hintergrund stetig steigender Forderungen hinsichtlich erreichbarer Bauteilqualitäten und Prozesseffizienz nehmen Vollhartmetallzerspanwerkzeuge eine immer wichtigere Rolle im Bereich der spanenden Fertigungstechnologien ein. Zur Erzeugung leistungsfähiger Zerspanwerkzeuge, die den gestiegenen Ansprüchen gerecht werden, muss die schleiftechnische Herstellung optimiert werden. Ein wesentliches, die Qualität und Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallzerspanwerkzeugen erzeugendes Gestaltelement stellt die Spannung dar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung von wendelförmigen Spannuten in Vollhartmetallrohlingen, durchgeführt im Tiefschliff mit hybridgebundenen Diamantschleifscheiben, und mit einer darauf aufbauenden Oberflächenfeinstbearbeitung mithilfe von elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben durch das Polierschleifen.

Eine umfassende Analyse der Wirkmechanismen sowie eine Analyse der Prozessparameter und des Schleifergebnisses bilden das Grundgerüst der Untersuchungen. So wurden unterschiedliche Werkzeugspezifikationen auf ihre Eignung hinsichtlich einer Leistungssteigerung des Tiefschleifprozesses untersucht. Sowohl die resultierenden Prozesskräfte als auch die Bauteilqualität nach dem Schleifprozess wurden betrachtet. Darauf aufbauend fand eine Anpassung der Kühlschmierstoffzuführstrategie, sowie eine Begutachtung möglicher Gefügeschädigungen des Hartmetalls statt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Tiefschleifprozesses wurde ein Prozessmodell für die Polierschleifbearbeitung mithilfe von elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben entwickelt. Zunächst wurden die mechanischen Eigenschaften des Bindungssystems eingehend analysiert und als Ausgangsbasis für die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen genutzt. Die wesentlichen Prozessgrößen Arbeitseingriff, Schleifscheibenbindungshärte, Vorschubgeschwindigkeit sowie seitliche Zustellung wurden bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Prozess und die resultierenden Ergebnisse untersucht.

Die Zielsetzung der Untersuchungen bestand in einer Verbesserung der Oberflächengüte und damit einhergehend ein verbessertes Einsatzverhalten der Zerspanwerkzeuge. Als Verifizierung der Schleifuntersuchungen wurden aus diesem Grunde abschließend Vollhartmetallbohrwerkzeuge mit zuvor ermittelten optimalen Prozessparametern gefertigt und eingesetzt. So konnte aufgezeigt werden, dass das Polierschleifen wirtschaftlich anwendbar ist und Vorteile im Einsatz von Vollhartmetallwerkzeugen erzeugt.

Eine Übertragung der Erkenntnisse auf die Bearbeitung der Freiflächen an Vollhartmetallbohrwerkzeugen bildet den Abschluss der Arbeit und zeigt das enorme Potenzial gerade der Polierschleifbearbeitung auf.

Abstract

Against the background of increasing demands on achievable component quality and process efficiency, solid carbide cutting tools became more and more important in the field of metal cutting technologies. In order to generate efficient cutting tools that meet the increased demands, grinding of these tools must be optimized. The chip flute represents an important the quality and performance generating form element. The present work deals with the creep feed grinding of helical chip flutes with hybrid bonded diamond grinding wheels. Subsequent to these investigations, a polishing process with elastically bonded diamond grinding wheels of the chip flutes is developed.

A comprehensive analysis of the mechanisms of action as well as an analysis of the process parameters and the grinding results is carried out. Different grinding wheel specifications were examined for their suitability in terms of performance improvement of the creep feed grinding process. Both the resultant process forces as well as the quality of the component after the grinding process were considered. With reference to these investigations, an adaptation to coolant supply methods with different nozzle types took place as well as a consideration of possible structural damage of the solid carbide blanks.

Based on the knowledge of the creep feed grinding process, a process model for the polishing using elastically bonded diamond grinding wheels is developed. First, the mechanical properties of the binding system were adequately analyzed and used as a basis for subsequent experiments. The main process variables such as grinding wheel bond hardness, depth of cut and feed rate were examined for their effects on the process and the resulting outcomes. The aim of research was to improve the surface quality of the chip flute and, subsequently, an improved operational behaviour of cutting tools. A verification of the grinding tests is finally made with cutting tools produced with previously determined optimal process parameters.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen.....	III
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	3
2.1 Herstellung und Eigenschaften von Hartmetall	3
2.2 Schleifbearbeitung von Hartmetallen	5
2.2.1 Grundlegende Erkenntnisse	5
2.2.2 Schleifen von Hartmetall-Zerspanwerkzeugen.....	6
2.2.3 Bedeutung der Temperaturen	10
2.2.4 Bedeutung des Kühlschmierstoffes	13
2.2.5 Schleifscheibenkonzepte zur Hartmetallbearbeitung	15
2.3 Werkzeugpräparation	20
2.3.1 Verfahren zur Nachbehandlung der Spannuten.....	20
2.3.2 Polierschleifen von Spannuten	23
2.3.3 Grundlagen zum Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben.....	24
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4. Experimentelle Randbedingungen	29
4.1 Versuchswerkstoffe	29
4.2 Werkzeuge	30
4.2.1 Schleifscheiben	30
4.2.2 Polierschleifscheiben.....	30
4.3 Versuchsmaschinen	31
4.3.1 Schütte 305micro	31
4.3.2 Chiron FZ 12 S Magnum	32
4.4 Mess- und Analysetechniken	33
4.4.1 Wirkleistungsmessung	33
4.4.2 Beurteilung der Oberflächengüte der Bohrernuten	34
4.4.3 Beurteilung des radialen Schleifscheibenverschleißes	35
4.4.4 Rasterelektronenmikroskopie	36
4.4.5 Streifenlichtmikroskopie	36
5. Bohrernutenschleifen	37
5.1 Einfluss der wesentlichen Prozessparameter auf den Nutenschleifprozess.....	38
5.1.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit	38

5.1.2	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	43
5.1.3	Einfluss der Kühlschmierstoffzuführstrategie	46
5.1.4	Einfluss der Hartmetallsorte	51
5.1.5	Einfluss der Prozessparameter auf die Bauteilrandzone	53
5.1.6	Zusammenfassende Darstellung des Nutenschleifprozesses.....	55
6.	Prozessentwicklung für die Polierschleifbearbeitung von wendelförmigen Bohrernuten mit elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben	58
6.1	Beurteilung der relevanten Prozesskenngrößen	59
6.2	Mechanische Eigenschaften der eingesetzten elastischen Bindungssysteme	60
6.3	Grundlegende Betrachtung des Polierschleifens mit elastischen Schleifscheibenbindungssystemen.....	63
6.4	Einfluss des Vorbearbeitungszustandes durch das Schleifen.....	68
6.5	Aufbau eines grundlegenden Prozessmodells	69
6.6	Einfluss der seitlichen Zustellung a_p auf das Prozessergebnis	81
6.7	Übertragung des Prozessmodells durch Variation des Drallwinkels	89
7.	Einsatzverhalten polierter Bohrwerkzeuge	94
7.1	Verfahrenserweiterung	98
8.	Zusammenfassung und Ausblick	101
9.	Literaturverzeichnis	104

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
B	Bor
CAD	Computer aided design
CBN	Kubisches Bornitrid
CNC	Computer numerical control
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapor Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
HD	Hochdruck
HM	Hartmetall
HV	Härteprüfung nach Vickers
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
KSS	Kühlschmierstoff
Mo	Molybdän
NC	Numerical control
ND	Niederdruck
Ni	Nickel
PVD	Physical Vapor Deposition
SiC	Siliziumkarbid
Sn	Zinn
TiC	Titankarbid
TU	Technische Universität
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VHM	Vollhartmetall
WC	Wolframkarbid
Zn	Zink

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_e	mm	Arbeitseingriff
a_p	mm	Eingriffsbreite der Schleifscheibe in Werkzeugachsrichtung
A_{wKg}	mm ²	Geometrisch ideale Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück
b_K	mm	Breite des Kopfes
b_S	mm	Schleifscheibenbreite
b_{Steg}	mm	Breite des Stegs
D	mm	Materialdicke
d_S	mm	Schleifscheibendurchmesser
d_W	mm	Werkstückdurchmesser
E	kN/mm ²	Elastizitätsmodul
F	mm	Vorschub
F_a	N	Schleifaxialkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_n	N	Schleifnormalkraft
F'_n	N/mm	Bezogene Schleifnormalkraft
F''_n	N/mm ²	Kontaktflächenbezogene Schleifnormalkraft
F_t	N	Schleiftangentialkraft
G		Schleifverhältnis, Abtragsverhältnis
h_{cu}		Einzelkornspanungsdicke
l_N	mm	Nutlänge
l_R	mm	Werkstücklänge
L_b	mm	Bohrtiefe
L_f	mm	Bohrweg
$L_{ges.}$	mm	Proben-Gesamtlänge
L_{Steg}	mm	Steglänge
M_b	Nm	Bohrmoment
N		Anzahl an Stromleiterwindungen
n_{max}	min ⁻¹	Maximale Drehzahl der Schleifspindel
n_s	min ⁻¹	Schleifscheibendrehzahl
n_w	min ⁻¹	Werkstückdrehzahl
P	bar	Druck

p_{dcc}	bar	Kühlschmierstoffdruck an der Pumpe gemessen
P	kW	Wirkleistung
P_c	kW	Schleifleistung
P_{max}	kW	Maximale Antriebsleistung der Schleifspindel
Q	l/min	Kühlschmierstoffvolumenstrom
Q'_w	mm ³ /mms	Bezogenes Zeitspanvolumen
Δr_s	μm	Radialer Schleifscheibenverschleiß
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_{max}	μm	Maximale Rautiefe
R_s	μm	Kantenschartigkeit
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
s_α	μm	Materialabtrag an der Freifläche
s_γ	μm	Materialabtrag an der Spanfläche
S	mm	Strecke
S_{Sensor}		Empfindlichkeit des Stromsensors
T	sek	Zeit
T	°C	Temperatur
T_m	°C	Schmelzpunkt
$u(z)$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffes
$U_{\text{Mess-lin}}$	V	Spannung am linearen Messwertausgang
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_w	mm/s	Werkstückgeschwindigkeit axial
V	l/min	Volumenstrom
V_w	mm ³	Zerspanvolumen
V_{Zug}	mm/min	Zuggeschwindigkeit
Z		Zähnezahl
Λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
$\nu_{40^\circ\text{C}}$	mm ² /s	Viskosität bei einer Temperatur von 40 °C
ρ_{Drall}	°	Drallwinkel
ρ	g/cm ³	Dichte
Γ	°	2. Freiwinkel
Φ	°	1. Freiwinkel
X	°	Vorhaltewinkel

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund einer energieeffizienten Produktion stehen auch spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie beispielsweise das Bohren und Fräsen im Fokus von Optimierungsarbeiten. Um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit dieser Prozesse und die resultierenden Ergebnisse hinsichtlich Bauteilqualitäten weiter steigern zu können, haben sich in den letzten Jahren Vollhartmetallschaftwerkzeuge gegenüber denen aus Schnellarbeitsstahl in vielen Bereichen durchgesetzt. Gerade die Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen ist im Vergleich mit stetig wachsenden Herausforderungen verbunden. Weiterentwicklungen im Bereich der Werkzeugschleifmaschinen, der zur Anwendung kommenden Schleifsoftware, aber insbesondere im Bereich der Hartmetallherstellung und der Schleifscheibentechnologie, haben dazu beigetragen, die Schleifprozesse leistungsfähiger zu machen.

Bei der Herstellung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen und hier besonders bei der Herstellung von Bohrwerkzeugen kommt der Erzeugung der Spannuten eine besondere Bedeutung zu. So handelt es sich bei der Nut um ein Merkmal, das durch seine Gestalt die Stabilität und das dynamische Verhalten des fertigen Zerspanungswerkzeuges maßgeblich beeinflusst. Ebenso wird durch die Gestalt der Spannute die Form der Hauptschneiden, Nebenschneiden und so, auch durch die Art des Spanabtransportes, die Leistungsfähigkeit des Zerspanungswerkzeuges determiniert. Das größte Zerspanvolumen aller durchzuführenden Schleifoperationen zur Erzeugung des fertigen Werkzeuges sowie eine damit einhergehende große mechanische und thermische Belastung stellen weitere Charakteristika des Schleifens der Spannuten dar. So bietet sich gerade hier die Möglichkeit, verbunden mit neuen Schleifscheibentechnologien, den sogenannten hybriden Bindungssystemen, Potenziale für mögliche Prozessverbesserungen zu erschließen. Im Vergleich zu konventionellen Kunstharzbindungssystemen wird hier angestrebt, durch die sinnvolle Kombination unterschiedlicher Bindungssysteme wie beispielsweise metallischer und Kunstharzsysteme die möglichen bezogenen Zeitspanvolumina bei einer gleichzeitig verbesserten Schleifscheibenstandzeit und einem günstigeren Abrichtverhalten deutlich zu steigern. Bei der Optimierung von Schleifprozessen, insbesondere aber bei der Erzeugung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen, muss insbesondere wegen der komplexen zu fertigenden Strukturen, der hohen Anforderungen an Maß- und Formgenauigkeiten und Oberflächengüten ein ganzheitlicher Optimierungsansatz verfolgt werden, der neben der Schleifscheibe auch möglichst alle weiteren Einflussfaktoren beinhaltet. Aus diesem Grund wird innerhalb der Arbeit die Eignung unterschiedlicher hybrider Bindungssysteme vor allem im Hinblick auf eine Verkürzung der Schleifzeiten bei gleichbleibenden Oberflächengüten analysiert. Zusätzlich wird sich der Thematik einer optimalen Versorgung des Schleifprozesses mit Kühlschmierstoff durch eine Anpassung der Zuführungsdüsen gewidmet und abschließend werden durch die Variation der Hartmetallzusammensetzung die Erkenntnisse auf ein breites Werkstoffspektrum übertragen.

Neben der originären schleiftechnischen Herstellung der Zerspanwerkzeuge bekommen die Verfahren der Schichtvor- und Nachbehandlung eine immer größer werdende Bedeutung. Schwer zerspanbare Materialien, die erhöhte Anforderungen stellen, aber auch der Versuch, die Prozesszeiten zu reduzieren und damit die Effizienz von Zerspanprozessen zu verbessern, sind hier Antrieb für Weiterentwicklungen. Wird bislang hierbei üblicherweise

noch von der Schneidkantenpräparation gesprochen, bietet sich durch eine gezielte Schichtvorbehandlung in Form einer Anpassung der Oberflächentopografie der Spannuten eine Möglichkeit, die Ausgangsbasis für den nachfolgenden Beschichtungsprozess zu optimieren und hierdurch die Leistungsfähigkeit, aber insbesondere die Prozesssicherheit der Zerspanwerkzeuge, zu steigern. Das Polierschleifen mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben bildet dabei eine Alternative zu den Verfahren Schleppscheifen, Magnetfinishen und Strahlspanen. Der Vorteil besteht in der Möglichkeit einer weitreichenden Anpassung der Prozessparameter und somit der resultierenden Oberflächentopografie an den Anwendungsfall und der gezielten Bearbeitung auch einzelner Werkzeugflächen und -kanten. Zusätzlich ergeben sich wirtschaftliche Vorteile durch geringe Investitionskosten, eine geringere Durchlaufzeit zur Herstellung der Zerspanwerkzeuge und durch die Vergleichbarkeit zum Schleifen, Synergien das Prozessverständnis betreffend. Da zu der Thematik des Polierschleifens mithilfe elastisch gebundener Diamantschleifscheiben nur wenige Quellen existieren, soll hier am Anwendungsfall der Spannuten ein grundlegendes Prozessmodell entwickelt, angewendet und validiert werden.

So soll, ausgehend von der Analyse des Nutenschleifprozesses und der darauf aufbauenden Polierschleifbearbeitung, umfangreiches grundlegendes Wissen zur Herstellung und Optimierung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen aufgebaut werden. Das erlangte Wissen wird abschließend in Einsatzversuchen von Bohrwerkzeugen angewendet und validiert.

2. Stand der Technik

2.1 Herstellung und Eigenschaften von Hartmetall

Erstmals 1923 von der Firma Osram durch K. Schröter bei der Entwicklung von Leuchtstoffen als Nebenprodukt erfunden und patentiert, stellt gesintertes Hartmetall derzeit den wohl bedeutendsten Rohstoff für die Herstellung von Hochleistungs-Zerspanwerkzeugen dar. Neben der Verwendung in Zerspanwerkzeugen halten Hartmetalle heutzutage Einzug in vielfältigen Anwendungen wie beispielsweise in der Umformtechnik als Ziehringe, Matrizen zum Strangpressen und Tiefziehen sowie im Bergbau in Schrämmmeißeln und Kernbohrwerkzeugen [Ger10].

Hartmetalle lassen sich in die Gruppe der Verbundwerkstoffe einordnen. Oftmals wird innerhalb der Literatur jedoch keine einheitliche Zuordnung durchgeführt. So gliedern sich die Hartmetalle strenggenommen in die Werkstoffgruppe der Cermets, Verbundwerkstoffe aus keramischer Hartstoffphase und metallischer Binderphase, ein. Als Hartstoffe werden gewöhnlich Stoffe mit einer Härte von über 1000 HV bezeichnet. In der Werkstoffgruppe der Cermets sind dabei insbesondere die Silizide, Boride, Nitride, Oxide und Karbide der Metalle Zirkonium, Hafnium, Vanadium, Tantal, Chrom, Niob, Molybdän, Titan und Wolfram von Bedeutung. Heutzutage werden Verbunde, bestehend aus Titancarbid und Titanitrid, gemeinhin als Cermets verstanden. Der Begriff Hartmetall hingegen wird üblicherweise für Verbunde aus Wolframkarbidhartstoffphase und Kobaltbinderphase verwendet. Die Verteilung der Verbunde im Hartmetall ist üblicherweise 70 bis 97 % Hartstoffphase und 3 bis 30 % Binder-Phase [Ger10]. Die Hartstoffphase wird dabei im Werkstoffverbund von der so genannten Binderphase, vor allem Kobalt (Co), ähnlich einem Hartlot, welches sich als dünner Film zwischen die Hartstoffkörner legt, zusammengehalten [Sche88]. Kobalt eignet sich aufgrund hoher Zähigkeit in Verbindung mit hoher Warmfestigkeit und der besonders großen Adhäsionskräfte zu Wolframkarbid (WC) in besonderem Maße für diese Aufgabe. Weniger häufig und vor allem in Bereichen anzutreffen, in denen Kobalt aus medizinischen Gründen nicht zum Einsatz kommen kann, sind Titancarbid-Nickel (TiC-Ni) -Sorten [Fri02, Kol92].

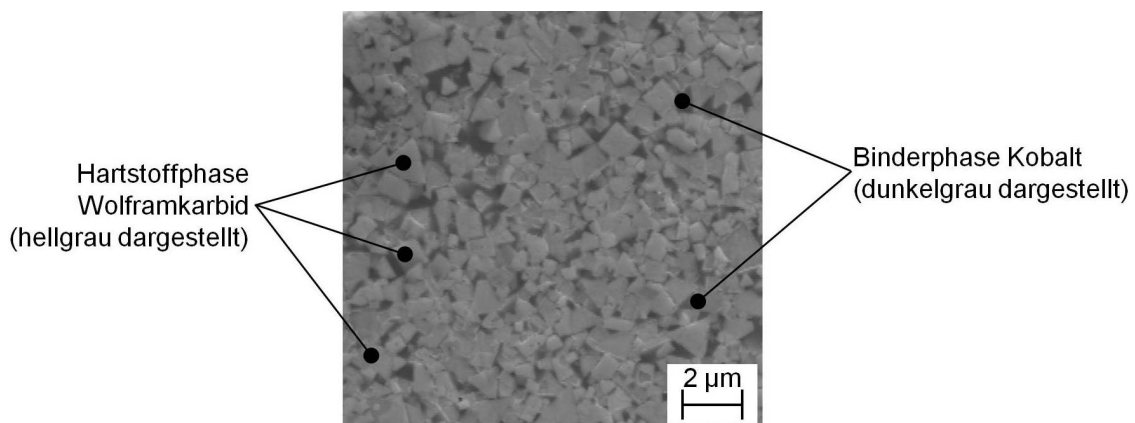


Abbildung 2-1: Gefügebau eines WC-Co-Hartmetalls

Die Produktion von Hartmetall ist geprägt durch eine aufwändige Prozessfolge, in der das Material auf pulvermetallurgischem Wege hergestellt wird. Zu den wichtigsten Prozessschritten zählen laut *Gernsheimer, Schedler* und *Friemuth* die im Folgenden dar-

gestellten. Zunächst werden bei der Korngrößeneinstellung die Rohstoffpulver in Kugelmøhlen mit Hilfe von Hartmetallkugeln unter gleichzeitiger Zugabe von Lösungsmitteln und Paraffinwachs auf die Zielkorngröße gemahlen. Durch einen anschließenden Trocknungsprozess werden die Lösungsmittel entfernt und rieselfähige Pulver gewonnen. Im nachgelagerten Formgebungsprozess wird versucht, die Geometrie der Endprodukte, wie beispielsweise Wendeschneidplatten oder Rundmaterial, möglichst endkonturnah zu pressen. Komplexe Formen werden dabei oftmals z. B. durch Strangpressverfahren hergestellt. Die so hergestellten, noch nicht gesinterten „Grünlinge“ können bei Bedarf spanend nachbearbeitet werden. Insbesondere während dieses Herstellungsschrittes ist die Berücksichtigung der Schwindung des Materials durch das Sintern von etwa 25 % des Ausgangsvolumens zu berücksichtigen. In dem letzten Produktionsschritt werden durch den stattfindenden Sinterprozess bei unterschiedlichen Temperaturniveaus zunächst Press- und Plastifizierungsmittel ausgeheizt, bevor bei etwa 1350 bis 1500 °C das Bindematerial zu schmelzen beginnt und dabei die Hartstoffkörner gleichmäßig überzieht [Ger10]. Während des Sintervorgangs erfolgt im Allgemeinen eine Verdichtung des Materials, die in der zuvor beschriebenen Schwindung resultiert [Kol92, Sche88]. Im Anschluss an den Herstellprozess des Hartmetalls schließt sich in der Regel eine Bearbeitung durch schleifende Fertigungsverfahren an, um die gewünschten Endkonturen, wie beispielsweise Zerspanwerkzeuge, zu erzeugen [Fri02].

Der Aufbau von Hartmetallen kann über eine Vielzahl an Einflussgrößen variiert werden. *Maldaner* ebenso wie *Friemuth* wiesen eine Abhängigkeit der Eigenschaften und Einsatzgebiete von Hartmetallen von deren jeweiligen Gefügeaufbauten nach [Mal08, Fri02]. Wichtigstes Merkmal, welches die Eigenschaften maßgeblich beeinflusst, ist die mengenmäßige Verteilung zwischen Hartstoffphase und Binderphase. Forschungsarbeiten belegen, dass mit sinkendem Hartstoffanteil sowohl Härte als auch Verschleißbeständigkeit sinken. Mit wachsendem Binderanteil hingegen nimmt die Zähigkeit zu, damit einhergehend tritt eine Minderung der Sprödbrechempfindlichkeit ein [Ger10, HHW01]. *Von Brevern* stellte in seinen Untersuchungen den Kobaltgehalt von Hartmetallen als wesentlichen Einflussfaktor auf das Trennverhalten im Zerspanprozess heraus [Bre96]. Neben der Zusammensetzung sind die Korngröße und Korngrößenverteilung der Hartstoffkörner wichtige eigenschaftsbestimmende Größen von Hartmetallen [HHW01, Mal08]. Mit sinkender Korngröße steigen im Allgemeinen Härte und Verschleißbeständigkeit. Allerdings sinkt die Biegebruchfestigkeit und Schlagfestigkeit [Ger10, Fri02]. Neben den hier aufgeführten wesentlichen Einflussgrößen existiert noch eine Reihe weiterer Größen, die den Gefügeaufbau von Hartmetallen determinieren wie die Benetzbarkeit der Hartstoffkörner, die Löslichkeit der Hartstoffphase im Binder, die Schichtdicke der Binder-Phase, der Anteil an Porosität und Fehlstellen sowie die Kornform der Hartstoffkörner [Sche88].

Unter Temperatureinfluss kann es im Hartmetall aufgrund der stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu heterogenen Ausdehnungen der Verbundpartner Wolframkarbid und Kobalt kommen. Dieser Effekt kann in ungünstigen Eigenspannungsverhältnissen und einer Mikrorissbildung im Material resultieren [WJS⁺00, Wil98]. Auf den Einfluss der Prozesstemperaturen bei einer schleifenden Bearbeitung von Hartmetallen wird an dieser Stelle auf Kapitel 2.2.3 verwiesen.

Zurückliegende Forschungsarbeiten zeigen, dass die Hauptverschleißmechanismen von Hartmetallen zum einen durch Mikroabrasion, erkennbar durch einen Austrag der Binderphase zwischen den Wolframkarbidkörnern, und zum anderen durch WC-Korn-

ausbruch sowie Werkstoffermüdung und Spröbruch gekennzeichnet sind [BBQ⁺10, SLJ07]. Hartmetalle besitzen aufgrund ihrer Verbundstruktur ein stark variierendes Bruchverhalten. *Eyrish* beschreibt vier unterschiedliche Formen, den transkristallinen Bruch, den duktilen Bruch durch die Kobaltbereiche, den Grenzflächenbruch entlang der Phasengrenzen zwischen Wolframkarbid und Kobalt sowie den Grenzflächenbruch entlang der Korngrenzen zwischen Wolframkarbidkorn und Wolframkarbidkorn [Eyr09].

2.2 Schleifbearbeitung von Hartmetallen

2.2.1 Grundlegende Erkenntnisse

Aufgrund der zuvor genannten Besonderheiten von Hartmetallen, insbesondere wegen ihrer im Vergleich zu anderen Werkstoffen hohen Härte und daraus resultierenden schlechten Zerspanbarkeit, werden diese Materialien fast ausschließlich durch schleifende Fertigungsverfahren und hier üblicherweise mit Diamant als Abrasivmedium bearbeitet. Die Zerspanung ist dabei nach *König* gekennzeichnet durch den gleichzeitigen Eingriff einer Vielzahl von Kornspitzen mit meist negativen Spanwinkeln, was in einer erhöhten Reib- und Verformungsarbeit resultiert [KK05]. Die Spanbildung kann laut *Hegemann et al.* als ein Ausbrechen und Pulverisieren von Wolframkarbidkörnern beschrieben werden [HHW01]. Die Schleifbearbeitung von Hartmetallen unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Angefangen bei der Prozessführung über die Zusammensetzung des Hartmetalls, hat die Schleifscheibenzusammensetzung einen ebenso großen Einfluss wie auch die Kühlschmierstoffversorgung des Prozesses. Einen zusätzlichen und nicht vernachlässigbaren Faktor stellt die Werkzeugmaschine dar. *Busch* stellte überdies in Ritz- und Verschleißuntersuchungen von Hartmetallen einen Zusammenhang zwischen der Hartmetallsorte und dem Verschleiß der analysierten Schleifscheiben heraus [Bus68]. *Von Brevern* zeigte darüber hinaus, dass eine niedrige Härte von Hartmetallen nicht zwangsläufig zu einer besseren Schleifbarkeit führt [Bre07]. Bezüglich der Auswirkungen der Schleifscheibenzusammensetzungen auf sowohl das Bearbeitungsergebnis als auch die resultierenden Prozesskräfte beim Einsatz kunstharzgebundener Schleifscheiben existiert eine Vielzahl an Forschungsergebnissen. Exemplarisch seien an dieser Stelle *Lierse* und *Würz* genannt. Sie stellten die Reduktion der während des Schleifprozesses auftretenden Kraftkomponenten in Normal- wie auch Tangentialrichtung mit kleiner werdender Korngröße, bei ansonsten gleichbleibenden Schleifscheibenspezifikationen, heraus [Lie98, Wür11].

Allgemein kann festgestellt werden, dass eine schleifende Bearbeitung oftmals Eigenspannungen in den randzonennahen Schichten von geschliffenen Oberflächen verursacht, welche die mechanischen Eigenschaften des Werkstückmaterials signifikant beeinflussen können. Der in der Randzone vorherrschende Eigenspannungszustand und insbesondere dessen Verteilung sind aufgrund der im Einsatz auftretenden Lastspannungen und deren Überlagerung mit den Eigenspannungen für die Bauteilbetriebsfestigkeit von entscheidender Bedeutung. Dabei können Zugeigenspannungen in Bauteilrandschichten bei Biege- oder Torsionsbelastungen, wie sie unter anderem in Zerspanwerkzeugen auftreten, durch ein örtliches Überschreiten der Fließgrenze in Rissbildungen oder in Bruchversagen resultieren [BW04]. Demgegenüber führen Druckeigenspannungen, insbesondere in Zerspanwerkzeugen, zu einer erhöhten Beständigkeit gegen Rissbildung [UB10]. Sowohl *Weinert et al.* als auch *Friemuth* stellten in ihren Arbeiten heraus, dass nach einer schleifenden Bearbeitung von Hartmetall in dessen Randzone überwiegend ein Druckeigenspannungszustand vorherrscht. Erklärt wird dies durch seitlich der Schleifriefen hervorgerufene Zonen

plastischer Verformung, die zu Druckeigenspannungen in der Werkstückrandzone führen. *Friemuth* stellte dabei einen Bezug zwischen der Höhe der Druckeigenspannungen und der mittleren Einzelkornspannungsdicke h_{cu} heraus, wohingegen *Weinert et al.* die Schleiftemperaturen als ursächlich erklären. So werden die mechanisch bedingten Druckeigenspannungen durch die thermisch verursachten Zugspannungen abgebaut [WSW96, Fri02, WJS⁺00]. Oftmals werden Hartmetall-Zerspanwerkzeuge nach dem Schleifen durch einen Beschichtungsprozess hinsichtlich der Werkzeugstandzeiten zusätzlich optimiert. Auch dieser nachgelagerte Prozessschritt kann jedoch zu einer Änderung der Spannungszustände in den Werkzeugen führen. *Uhlmann und Bryne* zeigten, dass eine Diamantbeschichtung, aufgebracht mittels CVD-Verfahren, zu einer starken Abnahme der Druckeigenspannungen innerhalb der Werkzeugrandzonen führt. Diese Abnahme der Druckspannungen wurde auch auf die Temperaturen, in diesem Fall während des Beschichtungsprozesses, zurückgeführt [UB10]. Neben dem CVD-Verfahren, welches mit sehr hohen Temperaturen von bis zu $T = 1100\text{ °C}$ arbeitet, wird für die Beschichtung von VHM-Werkzeugen mehrheitlich das PVD-Verfahren verwendet. Dieses zeichnet sich durch im Vergleich geringere Prozesstemperaturen und die Möglichkeit, sehr dünne Schichten von 3 bis 6 μm Dicke aufzutragen, aus [KK08, Schu94, TK93].

Der Randzonenzustand von Zerspanwerkzeugen kann auch über die Betrachtung der Eigenspannungen hinaus als außerordentlich wichtig eingestuft werden. Statische und zyklische Biege- und Torsionsbelastungen sowie Wälzbelastungen wirken sich in der Bauteilrandschicht am stärksten aus und ein Versagen in Form von Rissbildung geht in den meisten Fällen von der Bauteiloberfläche aus [BW04]. In diesem Zusammenhang sind besonders die Arbeiten von *Hegemann et al.* und *Shafir et al.* zu nennen. Sie wiesen auf geschliffenen Hartmetalloberflächen eine Schicht von etwa 1,5 μm Dicke, bestehend aus plastisch deformierten und fragmentierten WC-Körnern, zusammengehalten von Kobalt, nach. Bei einer Analyse der untersuchten Schleifprozesse zeigte sich außerdem, dass die Relation zwischen WC-Korngröße und Diamantkorngröße wesentlich für das Abtragsverhalten im Schleifprozess verantwortlich ist. Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass es bei der Bearbeitung mit gröberen Diamantkörnungen zu Rissbildung innerhalb der WC-Körner kam [SLJ07, HHW01].

Bei detaillierten Untersuchungen zeigte sich, dass durch eine schleifende Bearbeitung und insbesondere auch beim Tiefschleifen keine Gefügeveränderungen in Hartmetallen hervorgerufen werden. Sowohl die Prozessführung als auch die Schleifscheibenspezifikation, die Hartmetallsorte und das Kühlschmierstoffkonzept üben hier keinen erkennbaren Einfluss aus [Hüb11, Mal08].

2.2.2 Schleifen von Hartmetall-Zerspanwerkzeugen

Die spanende Fertigung mit geometrisch bestimmter Schneide stellt in vielen Fällen einen der letzten Bearbeitungsschritte in der Wertschöpfungskette von Werkstücken und Komponenten dar. Gerade dort ist es aus diesem Grunde von besonderer Bedeutung, dass die eingesetzten Zerspanwerkzeuge durch eine hohe Qualität, sichergestellt durch optimierte Schleifprozesse, eine ausreichende Prozessstabilität im Einsatz gewährleisten. In vielen Anwendungen haben sich aus diesem Grund Vollhartmetallwerkzeuge gegenüber den Alternativen aus Schnellarbeitsstahl oder Cermet durchgesetzt. Bei der Schleifbearbeitung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen werden in der Regel drei Fertigungsschritte voneinander

unterschieden: die Umfangsbearbeitung, die Stirnbearbeitung und die Nutbearbeitung [BWH13a, Hey12a].

Von den drei beschriebenen Fertigungsschritten nimmt die Nutherstellung eine besondere Bedeutung ein. Gekennzeichnet durch einen Längs-Umfangs-Planschleifprozess mit komplexen Eingriffsbedingungen zwischen Werkstück und Schleifscheibe, beeinflusst dieser Fertigungsschritt nicht nur unmittelbar den entstehenden Werkzeugquerschnitt, sondern darüber hinaus auch die Form der Hauptschneide und die Qualität der Spanflächen sowie der Nebenschneiden am Werkzeug. Das bedeutet, dass auch die später entstehende Spanform unmittelbar von der Nutgestalt beeinflusst wird [Fel11]. Gerade den Werkzeugquerschnitt stellen sowohl *Mourek* als auch *Schulz und Emrich* als besonders bedeutsam im Hinblick auf die Spanbildung, die dynamischen Eigenschaften und die Stabilität der erzeugten Werkzeuge heraus [Mou11, SE00, YS11]. Eine Vergrößerung der Spannuten um 8 %, unabhängig von der Ausgangsgestalt, bewirkt laut *Abele und Fujara* ein verbessertes Spanabtransportvermögen der Nut, da diese Vergrößerung mit einer Reduzierung der Reibung zwischen Span und Werkzeug einhergeht [AF10]. Das Schleifen von Spannuten in Vollhartmetallwerkzeugen wird heutzutage üblicherweise mit dem sogenannten Tiefschleifen durchgeführt. Hierbei wird das gesamte abzutragende Aufmaß mit einem Überschliff entfernt. **Abbildung 2-2** zeigt die komplexen Eingriffsverhältnisse beim Schleifen von Spannuten auf. Der Prozess ist gekennzeichnet durch eine Überlagerung der Bewegung der rotierenden Schleifscheibe, die in Werkstückachsrichtung verfahren wird, und der Rotationsbewegung des Werkzeugrohlings. Der Drallwinkel wird dabei durch das Verhältnis der zuvor beschriebenen Bewegungen festgesetzt. Das Querschnittsprofil des entstehenden Zerspanwerkzeuges wird demgegenüber von dem Profil und der Position der Schleifscheibe in Relation zum Werkstück definiert. Während der Fertigung wird die Schleifscheibe üblicherweise in einem Winkel zur Werkstückachse angestellt, der größer als der zu fertigende Drallwinkel ist. Durch diesen Vorhaltewinkel wird ein Materialabtrag an der Hinterseite der Schleifscheibe vermieden [DTD06].

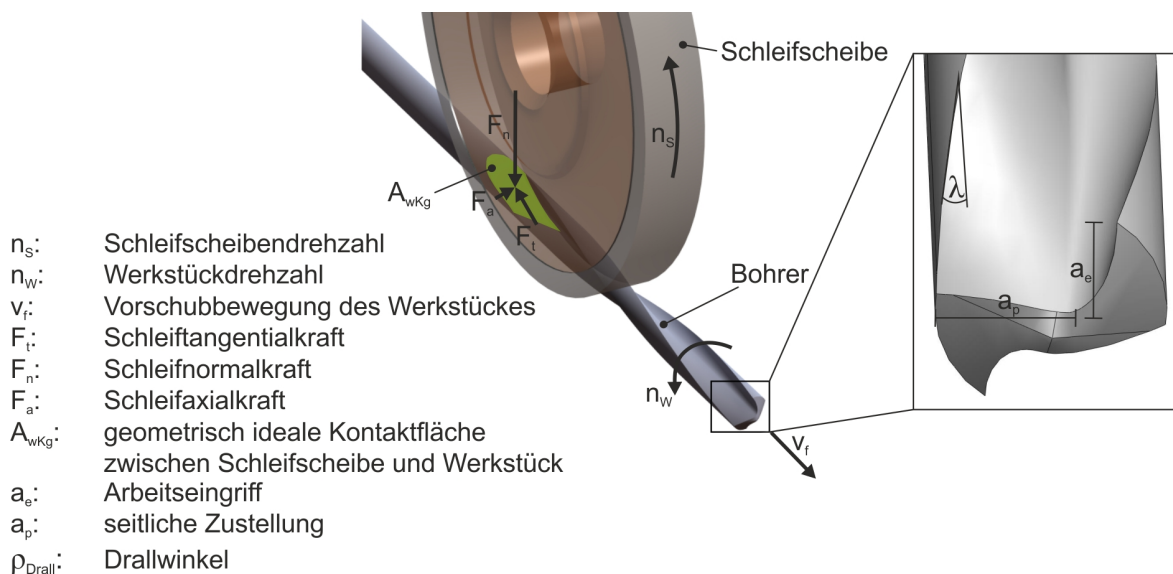


Abbildung 2-2: Eingriffsverhältnisse beim Nutenschleifen von Wendelbohrern

Neben der Gestalt der Nut ist der Drallwinkel λ eine wesentliche, die Nut beschreibende Größe. Durch die großen abzutragenden Volumina und die beim Tiefschleifen im Verhältnis zum Pendelschleifen langsamen Vorschubgeschwindigkeiten ergeben sich mitunter lange

Schleifzeiten. So stellte *Friemuth* fest, dass ca. 50 - 70 % der Schleifzeit von Wendelbohrern für das Nutenschleifen aufgewendet werden müssen [Fri02]. Die Ergebnisse von *von Mackensen* belegen darüber hinaus, dass nur ca. 5 % der Nutenschleifkosten durch Schleifscheibenkosten verursacht werden [Mac07]. Somit kommt der Schleifzeit eine besondere Bedeutung zu. Bisherige Forschungsarbeiten belegen die geringen Vorschubgeschwindigkeiten, die mit den überwiegend eingesetzten kunstharzgebundenen Schleifscheiben erreicht werden können. So realisierte *Peters* bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 3,8$ mm eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_w = 10$ mm/min [Pet05]. *Von Brevern* erreichte bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 1$ mm eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_w = 60$ mm/min [Bre96].

Neben den Prozessparametern beim Schleifen ist der Zustand der eingesetzten Schleifscheiben als besonders wichtig zu erachten. *Tönshoff et al.* stellten fest, dass beim Schleifen von Zerspanwerkzeugen allgemein und insbesondere bei dem Schleifen der Spannuten besonders hohe Anforderungen an die Schleifscheibenkontur zu stellen sind. Schon geringe Abweichungen können hier zu vollkommen veränderten Nutformen führen und das spätere Einsatzverhalten der Werkzeuge maßgeblich beeinflussen. Somit kommt auch der Überwachung des Schleifscheibenverschleißes eine wichtige Rolle zu. Forschungsarbeiten belegen, dass das Schleifen von Hartmetallen durch einen hohen mikro- und makrogeometrischen Schleifscheibenverschleiß, ausgelöst durch die hohe Beanspruchung der Schleifkörner, geprägt ist [TFH00, BH12b]. Dass es zu unterschiedlichen Kraftniveaus beim Einsatz der geschliffenen Zerspanwerkzeuge in Abhängigkeit der gewählten Schleifparameter kommt, stellte *Hübner* für Schafffräswerkzeuge heraus [Hüb11].

Die Gestaltung der Spannuten muss sich bei der Werkzeugauslegung immer in das Gesamtumfeld einfügen. So vereinigt die komplexe Gestalt von Bohrwerkzeugen eine Reihe von Konflikten für die Design-Zielvorgaben. In diesem Zusammenhang sind die Form der Schneidkante, die Winkel am Schneidteil; die Steifigkeit des Werkzeuges; die Verschleißbeständigkeit; ein zentrischer Lauf; eine ausreichende Wärmeabfuhr; die entstehende Spanform am Schneidkeil; die Spanführung im Werkzeug; sowie KSS-Zu- und Abfuhr und zu guter Letzt die Herstellbarkeit der Werkzeuge zu nennen [Tön97, AF10].

Es wird vielfach versucht, durch simulative Methoden den Schleifprozess zu optimieren. In diesem Zusammenhang haben sich sowohl die Simulation der Prozesstemperaturen als auch die Simulation der auftretenden Werkstückbelastungen als sinnvoll herausgestellt, um Schleifprozesse im Allgemeinen zu optimieren. Gerade bei den im Werkzeugschleifprozess oft eingesetzten Werkzeugrohlingen mit großem L/D-Verhältnis ist die Vorhersage der zu erwartenden Abdrängungen des Rohlings und eine darauf aufbauend angepasste Zustellung der Schleifscheibe hilfreich, um Konturfehler am Werkstück zu minimieren [DTD06, BH12a, BH12b]. Auch *Hübner* trägt mit seinen Ergebnissen, einer positionsabhängigen Darstellung der schleiftechnischen Kenngrößen beim Nutenschleifen zu einem Verständnis der kinematischen Verhältnisse beim Spannuten Schleifen bei [Hüb11].

Besonderheiten des Tiefschleifens

Wie zuvor bereits erläutert, werden die Spannuten von Vollhartmetallwerkzeugen entweder im sogenannten Tiefschleifverfahren oder im Pendelschliff erzeugt, wobei hier das Tiefschleifen das gebräuchlichere der beiden Verfahren darstellt. Nach DIN 8589 Teil 11 ist das Tiefschleifen ein Prozess, bei dem hohe Arbeitseingriffe und relativ niedrige Vorschubgeschwindigkeiten gewählt werden [DIN84]. Die bisher vorliegenden Unter-

suchungsergebnisse zu dieser Thematik beschränken sich zum Großteil auf die Analyse von an Wendeschneidplatten durchgeführten Versuchen. Eine umfassende Beschreibung der die komplexen Eingriffsverhältnisse beim Nutenschleifen von Schaftwerkzeugen abbildenden Besonderheiten wurde bislang nur grundlegend mithilfe von Multidexelmodellen innerhalb von geometrisch-kinematischen Simulationen durchgeführt [DD09, PKD⁺09]. Im Folgenden sollen zunächst die Verfahrensvarianten Pendelschleifen und Tiefschleifen voneinander abgegrenzt werden, um die Merkmale des Tiefschleifens herauszustellen.

Gegenüber dem Pendelschleifen zeichnet sich das Tiefschleifen, auch Vollschnitt- oder Kriechgangschleifen genannt, durch den Abtrag des gesamten Zerspanvolumens mit meist nur einem Überlauf aus. Durch diese Vorgehensweise wirken sich erzeugte Schleiffehler unmittelbar auf die Werkstückqualität aus. Demgegenüber wird beim Pendelschleifen mit Arbeitseingriffen von bis zu $a_e = 0,01$ mm und hohen Vorschubgeschwindigkeiten von v_w bis zu 20.000 mm/min gearbeitet, wobei der Gesamtarbeitseingriff in mehreren Überschliffen erreicht wird [OF86, Gra01].

Zusammenfassend lassen sich die Vorteile des Tiefschleifens wie folgt darstellen: Durch einen großen Arbeitseingriff lassen sich große Zeitspanvolumina realisieren [Boo95]. Es entsteht durch eine Vermehrung aktiver Schneiden am Zerspanprozess [Moh78], trotz mit steigendem Arbeitseingriff zunehmender Gesamt-Normalkraft, zunächst eine niedrigere Einzelkornbelastung [OF86, TK76] und damit einhergehend eine höhere rauheitsbezogene Werkstückqualität [Taw90]. Als Nachteile des Tiefschleifens müssen die höhere Gesamtschleifkraft, ein dadurch höherer Energiebedarf und die aus diesem höheren Energiebeziehungsweise Leistungsbedarf unmittelbar resultierenden hohen Temperaturen in der Kontaktzone genannt werden [Boo95, Taw90]. Den Einfluss eines steigenden Arbeitseingriffs auf die bezogene Schleifnormalkraft, das Schleifverhältnis sowie die kontaktfächenbezogene Schleifnormalkraft verdeutlicht **Abbildung 2-3**.

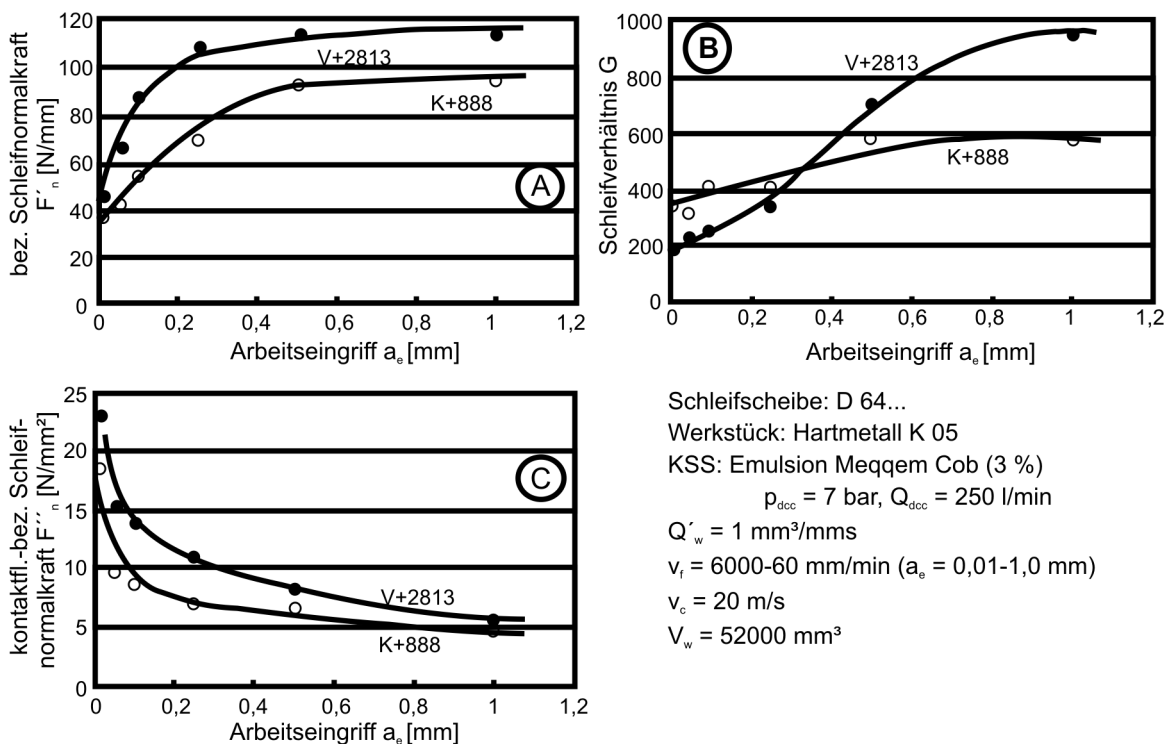


Abbildung 2-3: Einfluss des Arbeitseingriffs auf die bezogenen Schleifnormalkräfte und das Schleifverhältnis [CB96a]

Clausen und von Brevern stellten in ihren Untersuchungen heraus, dass sich durch die mit steigendem Arbeitseingriff größer werdende Kontaktlänge zwischen Schleifscheibe und Werkstück auch die einzelnen Schleifkörner länger im Eingriff befinden. Diese Tatsache resultiert in einem, mit dem Pendelschleifen verglichen, abnehmenden Arbeitseingriff je Korn und damit einhergehend geringerem Schleifscheibenverschleiß [CB96a]. Der Schleifscheibenverschleiß muss beim Tiefschleifen generell kritisch betrachtet werden. Neben dem radialen Schleifscheibenverschleiß muss auch der Verschleißzustand der Scheibenprofile kontrolliert und durch frühzeitiges Konditionieren der Schleifscheibe nachjustiert werden. Andernfalls kann es zu einer Abweichung der Gestalt der Spannuten kommen, deren Form direkt von den Schleifscheibenradien abhängt [APF⁺07]. Hinzu kommt, dass auch die Korngröße wesentlichen Einfluss auf die Oberflächenqualität der geschliffenen Spannuten und insbesondere die Ausbrüche entlang der Schneidkante hat. Hier konnte festgestellt werden, dass eine gröber werdende Körnung zu vermehrten Ausbrüchen entlang der Schneidkante führt [Bre08a].

Neben vergleichenden Untersuchungen zwischen Tiefschleifen und Pendelschleifen für die Herstellung von Spannuten an Zerspanwerkzeugen war auch die Prozessstrategie Untersuchungsgegenstand diverser Forschungsarbeiten. So stellte *Graf* fest, dass sich das Gleichlaufschleifen zur Bearbeitung von Hartmetallen aufgrund eines günstigeren Kraftverlaufes besser eignet [Gra01]. Dass eine hohe Schnittgeschwindigkeit zu einer höheren Wärmeentwicklung während des Schleifprozesses führt und dies mitunter in einer besseren plastischen Verformbarkeit des Hartmetalls durch das Schleifkorn resultiert, wurde von *Weinert* in [WSW96] dokumentiert. Ebenso wesentlich erwies sich die Spanflussrichtung der Schleifriefen auf das Einsatzverhalten von Hartmetallwendeschnidplatten. In Abhängigkeit der Richtungen stellte sich mitunter ein vollkommen unterschiedliches Verschleißverhalten ein, wobei in Spanflussrichtung liegende Schleifriefen zu verbessertem Verschleißverhalten führten [WWS95].

2.2.3 Bedeutung der Temperaturen

Die vorherrschenden Prozesstemperaturen sind beim Tiefschleifen von Hartmetallen von besonderer Bedeutung: zum einen aufgrund der mit dem Tiefschleifen in den Schleifprozess eingebrachten großen Energiemenge und zum anderen durch die Besonderheiten des Hartmetalls, welches wegen seiner Verbundstruktur mitunter empfindlich auf Temperaturbeaufschlagungen reagiert. Bei Sichtung der vorliegenden Forschungsarbeiten zu dem Thema der Temperaturentstehungen und -auswirkungen beim Schleifen kann festgestellt werden, dass aufgrund zum Teil stark unterschiedlicher Schleifscheibenspezifikationen und Kühlschmierstoffarten sowie -zuführungsmöglichkeiten eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur schwer möglich ist.

Das Wissen um die maximalen Prozesstemperaturen und deren Verteilung im Werkstück ist besonders wichtig. Schon *Weinert et al.* haben bei der Schleifbearbeitung von Freiflächen an Hartmetallwendelbohrern beobachtet, dass sich die thermische Belastung wesentlich gravierender auf das Einsatzverhalten auswirkte als die rein mechanische [WS03, Schn99]. So ist es besonders wichtig, im Hinblick auf die entstehenden Temperaturen optimale Bearbeitungsparameter auszuwählen, da die Prozessgrenzen oftmals durch eine thermische Überbeanspruchung gesetzt werden [JS06, WJS01, Hey12b]. Jedoch sind die Temperaturen auch im Hinblick auf die für die Hartmetallbearbeitung überwiegend genutzten Diamantschleifscheiben kritisch zu bewerten. Hier können zu hohe Temperaturen zu einer

Schädigung der Diamantkörner und damit zu übermäßigem Schleifscheibenverschleiß führen. Dabei beeinflusst eine Vielzahl an Einflussgrößen die Temperaturen während des Schleifens. Die Schleifparameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Schnittgeschwindigkeit und Arbeitseingriff sind hier wesentliche Größen. Darüber hinaus spielt die Art, Menge und Zuführungsart des Kühlschmierstoffes, die Schleifscheibenspezifikationen sowie der zu bearbeitende Werkstoff eine wichtige Rolle. So wurde in [WS03], [Hey12b], [Schn99] und [Schu05] von *Weinert und Schulte* sowie *Heymann* dokumentiert, dass sowohl eine steigende Schnittgeschwindigkeit als auch eine steigende Vorschubgeschwindigkeit in einem Anstieg der thermischen Bauteilbelastungen resultieren. Neben den Prozesseinstellgrößen ist der Verschleißzustand der eingesetzten Schleifscheibe für einen thermisch stabilen Prozess nicht vernachlässigbar. Kommt es anstelle von Kornsplitterung und dem Ausbrechen einzelner Körnern vermehrt zu einem Abstumpfen der Schneiden, hat dies eine höhere Reibung und somit unmittelbar höhere Temperaturen innerhalb der Kontaktzone zur Folge [Boo95].

Wie zuvor erläutert, stellt die thermische Schädigung einen wesentlichen, die Bauteilqualität beeinflussenden Faktor dar. Die Erkenntnis der vorherrschenden Temperaturen und deren Verteilung im Werkstück ist daher außerordentlich wichtig. Unter anderem *Lowin* erkannte, dass die Auswirkungen von Temperatur, Maß- und Formabweichungen, Gefügeveränderungen und -umwandlungen eine ungünstige Beeinflussung des Eigenspannungszustandes, Rissbildung, chemische Reaktionen und Diffusionsvorgänge sein können [Low80, SN06, WBH06]. Doch muss in diesem Zusammenhang immer das Gesamtsystem, welches am Zerspanvorgang beteiligt ist, Berücksichtigung finden. Damit gehen neben dem thermomechanischen Belastungskollektiv auch weniger offensichtliche Parameter wie beispielsweise die Nachgiebigkeit des Systems Werkzeug-Schleifscheibe-Schleifmaschine in die Betrachtung ein [WSN⁺05].

Wohl der wichtigste Parameter zur Abschätzung der Prozesstemperaturen und ihrer Verteilungen ist derjenige Energieanteil der gesamten aufgewendeten Schleifenergie, der in das Werkstück eingeht. Dieser Energieanteil verhält sich in Abhängigkeit der Prozessgrößen stark variabel. Allgemein kann festgestellt werden, dass ungefähr 90 % der aufgewendeten Schleifenergie durch Reibung in Wärme umgewandelt wird. Somit werden nur 10 % für Spandeformation und Scherarbeit verwendet [MG07, Sto97, WBH06]. Die eingebrachte Wärme kann dabei über die Späne, den Kühlschmierstoff und auch über die Schleifscheibe und das Bauteil aus der Kontaktzone abgeführt werden. Hierbei ist die Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit der am Prozess beteiligten Wirkpartner von besonderer Wichtigkeit [KB97b, WJS01]. Über die Verteilung der Energieanteile gibt es stark variierende Angaben. *Malkin und Guo* sowie *Wang und Kuo* gehen davon aus, dass insbesondere beim Tiefschleifen nur ein geringer Anteil von ungefähr 5 % der Schleifwärme in das Bauteil fließt [MG07, WK04]. *Dederichs* geht beim Flachsleifen hingegen davon aus, dass 11 bis 35 % in das Werkstück und 60 bis 80 % der Wärme mit den Spänen abgeführt wird. Bei diesen Untersuchungen wird jedoch der Schleifscheibe keine besondere Aufmerksamkeit gewidmet. *Lowin* geht von 35 bis 80 % Wärmefluss in das Bauteil aus. Etwa 50 % werden laut seiner Aussage mit dem Kühlschmierstoff abgeführt [Low80].

Die Wärmeabfuhr der erzeugten Schleiftemperaturen ist insbesondere beim Tiefschleifen von Hartmetallen als kritisch zu sehen [CB96a]. Aufgrund der langen Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück kann von einer ungleichmäßigen Verteilung des Kühlschmierstoffes innerhalb der Kontaktzone ausgegangen werden. Zusätzlich zeigte sich in Unter-

suchungen, dass es während des Einlaufes der Schleifscheibe zu einem Anstieg der Temperaturen innerhalb des Bauteils kommt, bevor diese auf einem quasi-stationären Level verlaufen, bis dann kurz vor dem Auslauf ein Temperaturmaximum auftritt [AWB08]. Innerhalb der Kontaktzone kann vor allem in Vorschubrichtung nicht von einer gleichmäßigen Temperaturverteilung ausgegangen werden [Low80]. *Tönshoff und Kaiser* führten dazu in [TK76] detaillierte Untersuchungen durch. Sie fanden während Untersuchungen zum Tiefschleifen von Hartmetall der Sorte P10 und einem Arbeitseingriff von $a_e = 3,5$ mm heraus, dass die mittlere Schleiftemperatur mit zunehmender Spannungslänge zunächst ansteigt, bevor sie kurz vor Ende der Kontaktzone ihren Maximalwert erreicht und danach mit einsetzender Wirkung des Kühlschmierstoffes wieder abfällt. Dabei maßen sie unter Verwendung von Kühlschmierstoff Maximaltemperaturen im Werkstück von bis zu 600 °C. Die Resultate dieser Untersuchungen sind grafisch in **Abbildung 2-4** dargestellt. Diese Ergebnisse werden von den Untersuchungen *Wittmanns* unterstützt. Dieser stellte heraus, dass am Anfang der Kontaktzone der Kühlschmierstoff das größte Potenzial aufweist, Wärme aufzunehmen. Diese Fähigkeit sinkt mit länger werdender Kontaktzone deutlich [Wit07].

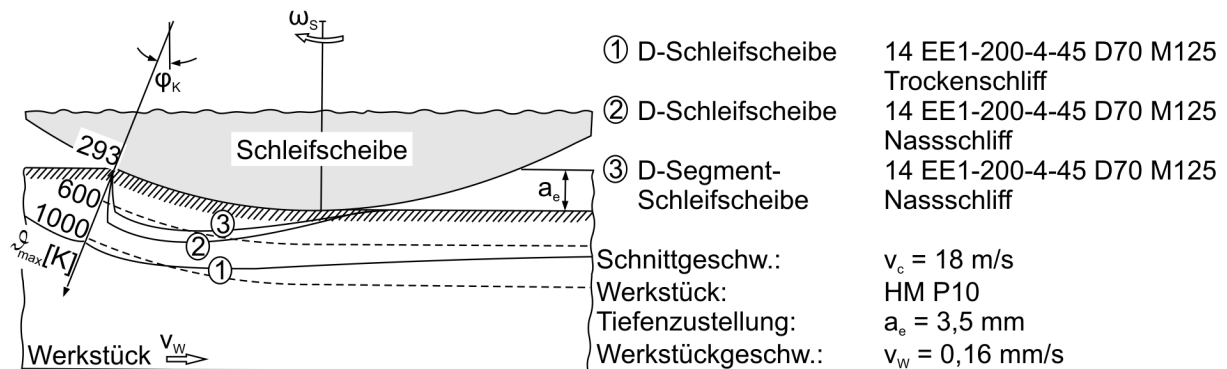


Abbildung 2-4: Mittlere Schleiftemperatur beim Tiefschleifen [TK76]

Über die Regulierung des Kühlschmierstoffes, das bedeutet insbesondere die Art, Menge und Zuführung, können die entstehenden Temperaturen stark beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird diese Thematik in Kapitel 2.2.4 näher ausgeführt. So verschiebt sich beispielsweise das Temperaturmaximum mit steigender Menge an Kühlschmierstoff auf der Werkstückoberfläche [AWB08]. Die Hauptwärme entsteht dabei unterhalb des Schneidkornes infolge Trennung und plastischer Werkstoffverdrängung. Weiterhin tritt Wärme in der Scher- und Reibzone zwischen Schneide und Span auf, wenn die Bindung über die Werkstückoberfläche reibt. Mit dem Verschleiß der Schleifscheibe und einem damit verbundenen Abflachen der Diamantkörner steigt die durch Reibung hervorgerufene Prozesswärme an [Boo95, Mak05]. *Lowin* hingegen vertritt die These, dass die Bindungsreibung nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil der entstehenden Wärme im Schleifprozess ausmacht [Low80].

Sowohl Werner und Minke als auch *Tawakoli* gehen davon aus, dass sich die im Vergleich zum Pendelschleifen verbesserte thermische Situation beim Tiefschleifen darauf zurückführen lässt, dass zwar die Wärmeeinwirkzeit im Vergleich 250 bis 1.000 mal länger ist und eine insgesamt größere Gesamtwärmemenge je Werkstückoberfläche in das Bauteil fließt. Der Wärmefluss pro Oberflächeneinheit ist dabei jedoch stark reduziert. Dies bewirkt zusammenfassend, dass die Wärmeeinwirkung beim Tiefschleifen durch einen lang andauernden, aber pro Oberflächeneinheit relativ geringen Wärmefluss gekennzeichnet ist.

Eine geringere Randzonentemperatur, aber auch die Erwärmung tieferer Werkstückbereiche auf höhere Temperaturen sind die Folge [WM81, Taw90, MG07].

2.2.4 Bedeutung des Kühlschmierstoffes

Dem Thema des Kühlschmierstoffes und insbesondere dessen optimaler Zuführung zur Wirkstelle kommt beim Werkzeugschleifen eine enorme Bedeutung zu. Speziell die Operationen, in denen mit großen Materialabtragsraten im Tiefschleifverfahren gearbeitet wird, wie beispielsweise das Nutenschleifen von Spannuten, sind hier bedeutsam. Um den Nachteilen des Tiefschleifens, die in einer höheren mittleren Schleiftemperatur und größeren Schleifkräften bestehen, entgegenzuwirken und somit eine negative Veränderung der Oberflächenrandzonen in Form von Eigenspannungen zu vermeiden, ist eine effektive Kühlschmierstoffversorgung unabdingbar [MG07, Gra01, WJS01, Schu05, BWG09]. An dieser Stelle ist es wichtig anzumerken, dass nur derjenige Anteil an Kühlschmierstoff zur Schmierung der Wirkstelle beiträgt, der direkt durch die Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück transportiert wird [KB97a, KB97b]. Neben der schon angesprochenen Aufgabe des Kühlschmierstoffes, die Reibung im Schleifspalt zu reduzieren [KB97a, MGE92], sind weitere in dem Abtransport der Späne, der Reinigung der Schleifscheibe, der Kühlung von Werkzeug, Werkstück, Maschine und den Spänen zu sehen [Hör03, Taw90]. Somit ergibt sich an den Kühlschmierstoff ein komplexes Aufgabenfeld.

Oftmals werden Schleifmaschinen, die Tiefschleifoperationen ausführen sollen, mit Kühlschmierstoffanlagen ausgerüstet, die hohe Volumenströme und Drücke gewährleisten, um auch innerhalb dieser Prozesse große Abtragsleistungen zu realisieren. So werden leistungsstarke Pumpen, große Kühlschmierstoffreservoirs und leistungsfähige Filteranlagen benötigt, die wiederum Wärme produzieren und somit eine Temperierung des Kühlschmierstoffes nötig machen können. Möchte man nun den Einsatz von Kühlschmierstoff optimieren, ist die Zufuhr ein wesentlicher Faktor, um dies zu erreichen. Durch eine effektive und an die Schleifoperation angepasste Benetzung der Schleifscheibe lassen sich hohe Volumenströme zum Teil verringern [WMW06, WG08]. Somit ist die wichtigste Aufgabe einer bedarfsgerechten Kühlschmierung eine angepasste Versorgung des Schleifspaltes und damit einhergehend die Vermeidung sowohl von Unter- als auch von Überversorgung. In der Praxis und den vorliegenden Forschungsarbeiten wird dies in den meisten Fällen über eine Änderung der Düsenaustrittsöffnung, Düsenart und Düsenposition realisiert [BWG09]. In den meisten Anwendungsfällen haben sich die sogenannten Freistrahls- und Schuhdüsen etabliert. Bei der Kühlschmierstoffzuführung mittels Freistrahldüse wird der Kühlschmierstoffstrahl tangential an die Schleifscheibe gerichtet. Die so benetzte Schleifscheibe schleppt diesen dann mit in die Kontaktzone. Die einfache Einrichtung und Vielseitigkeit machen diesen Düsentyp, insbesondere beim Werkzeugschleifen, zu dem am häufigsten eingesetzten. Nachteilig ist, dass der Kühl- und Schmierbedarf durch ein Überangebot an Kühlschmierstoff abgedeckt wird. So stellten *Wittmann et al.* fest, dass mit steigendem Volumenstrom, bis zur Überschreitung eines bestimmten Grenzvolumenstromes, hier grundsätzlich eine Verbesserung der Kühlwirkung eintritt [WBH06]. *Von Brevern* erreichte bei einem Kühlschmierstoffdruck von 15 bar und einem Volumenstrom von 250 l/min eine deutliche Reduzierung der Schleiftemperaturen und damit einhergehend des Schleifscheibenverschleißes. Er stellte außerdem fest, dass bei der Verwendung von gröberer Schleifkörnung der Spanraum effektiver mit Kühlschmierstoff gefüllt und so die Kontaktzonentemperatur reduziert werden konnte [Bre08b]. Untersuchungen zur Messung des Kontaktzonen-Volumenstromes belegen, dass beim Tiefschleifen nur etwa 3 bis 55 % des

Kühlschmierstoffes durch den Schleifspalt transportiert werden. Abhängig ist diese Größe von der Porosität der Schleifscheibe, dem Unterschied zwischen Schnittgeschwindigkeit und KSS-Austrittsgeschwindigkeit sowie der Zustellung [WMW06, BHW00, WG08]. *Klocke und Beck* entwickelten zu diesem Zweck ein Modell, in dem sie durch Abtasten der Schleifscheibenoberfläche eine Traganteilkurve errechneten. Durch Verrechnung dieser Kurve mit der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe berechneten sie den maximal möglichen, durch die Kontaktzone fließenden KSS-Volumenstrom [KB97a, KB97b]. Somit ist die dem Prozess zugeführte Menge an Kühlschmierstoff oft wesentlich größer als diejenige, die effektiv durch die Kontaktzone transportiert werden kann. Mit steigender Menge an Kühlschmierstoff und damit steigender Schmierwirkung vergrößert sich der Anteil an elasto-plastischen Verformungsprozessen unter der Kornschneide. Dadurch werden Werkstückrauheiten verbessert, jedoch erhöht ein Übermaß an Schmierung durch eine Verschlechterung der Trennprozesse die Wärmeentwicklung, da mehr Energie für Scher- und Verformungsvorgänge aufgewendet werden muss [WBH06].

Es existiert eine Vielzahl an Forschungsarbeiten, die sich mit der Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung bei Schleifprozessen beschäftigen. Die meisten Arbeiten behandeln dabei das Flachsleifen. Bei diesen Untersuchungen wird unter anderem eine Vielzahl komplexer Düsenformen untersucht. Der Diskussion, wie eine optimale Kühlschmierstoffversorgung auszusehen hat, sei vorangestellt, dass hierauf aufgrund der Vielzahl an Schleifaufgaben beim Werkzeugschleifen keine eindeutige Antwort gegeben werden kann. Des Weiteren sei angemerkt, dass die entwickelten Düsenformen vielfach nicht praxisgerecht angewendet werden können, da es ihnen an Flexibilität und Reproduzierbarkeit im praktischen Einsatz fehlt. Insbesondere beim Nutenschleifen an Zerspanwerkzeugen muss kritisch angemerkt werden, dass sich die Schleifscheibe in den meisten Fällen nicht mit der vollen Breite im Eingriff befindet, aber Schuhdüsen bedingt, durch ihre Bauweisen immer die volle Breite versorgen und so hier mitunter nicht mehr effektiv arbeiten. Aus diesem Grund werden in der industriellen Praxis heutzutage überwiegend Freistrahldüsen eingesetzt. Die Vorteile bestehen vor allem in einer flexiblen Handhabbarkeit. So können auch unterschiedliche Schleifscheibenprofilformen mit ein und derselben Düsenform eingesetzt werden. Demgegenüber bietet der Einsatz von Schuhdüsen die Möglichkeit, auch bei geringen Volumenströmen [BHW00], hier ist eine Reduktion um bis zu 90 % gegenüber einer Freistrahldüse möglich, oder bei geringeren Drücken eine ausreichende Benetzung der Schleifscheibe mit Kühlschmierstoff zu gewährleisten, da die Schleifscheibe selbst die Beschleunigung des Kühlschmierstoffes übernimmt [KB97a, KB97b,]. *Walter et al.* entwickelten zur Beeinflussung der Strömung innerhalb von Schuhdüsen Varianten mit Leitelementen. Diese Leitelemente sollten für eine homogenere Strömung innerhalb der Düse und somit zu einer besseren Befüllung des Porenraumes der Schleifscheibe mit Kühlschmierstoff sorgen [WMW06]. Allerdings fanden *Brinksmeier et al.* in ihren Untersuchungen heraus, dass diese Leitelemente innerhalb der Schuhdüsen keinen signifikanten Effekt ausüben und mitunter auch negative Auswirkungen auf die Kühlschmierstoffversorgung der Kontaktzone haben können [BHW00].

Es ergeben sich laut *Klocke und Beck* drei Forderungen an neuartige Kühlschmierstoffzufuhrsysteme: der Kühlschmierstoff sollte der Wirkstelle möglichst direkt zugeführt werden, das mit der Schleifscheibe rotierende Luftpolster muss abgelenkt werden und der Kühlschmierstoff muss auf die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beschleunigt werden [KB97a, KB97b]. Insbesondere die Beschleunigung des Kühlschmier-

stoffes, so dass dieser das Luftpolster durchbricht, ist wichtig. Laut den Navier-Stokes-Gleichungen ist die Geschwindigkeit der Luft direkt an der Schleifscheibe aufgrund von Reibung zwischen Luftschicht und Schleifscheibenoberfläche identisch mit der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit [KB97a]. Die an der Schleifscheibe auftretenden Luftströmungen und Druckverteilungen verdeutlicht **Abbildung 2-5**.

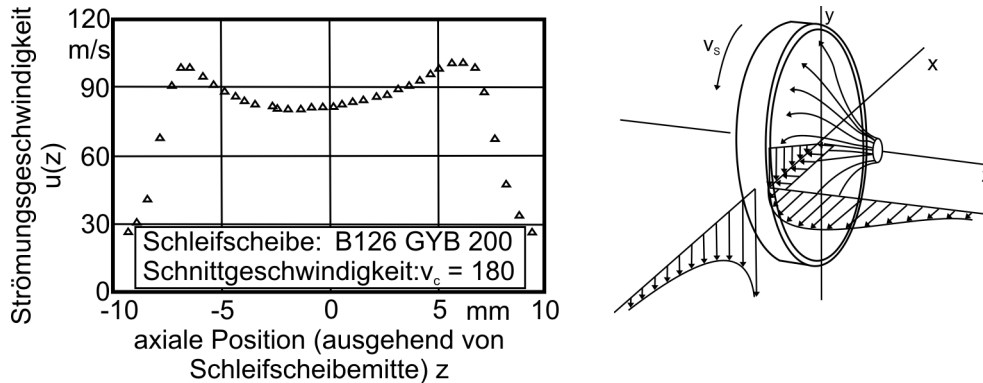


Abbildung 2-5: Druckverteilung und Luftpolster um die Schleifscheibe [KB97a]

Die von *Klocke* und *Beck* vorgeschlagene Lösung, die Luftpolster durch Barrieren zu verringern beziehungsweise abzulenken, hat laut *Webster et al.* und *Brinksmeier et al.* einen hohen Einrichteaufwand nach jedem Konditioniervorgang zur Folge [WG08, BHW00]. Bei der Verwendung von Freistrahldüsen kommt bei tangentialer Anströmung der Schleifscheibe mit Kühlschmierstoff ein Optimum zur Wirkstelle. Die Kühlschmierstoffstrahlgeschwindigkeit muss dabei mindestens 60 % der Scheibenumfangsgeschwindigkeit betragen, damit eine sichtbare Strahlhaftung an der Scheibe beginnt. Wird die Strahlgeschwindigkeit höher als die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe, endet die Strahlhaftung sofort. Laut *Ott* und *Vits* ist aber nicht das Luftpolster allein, sondern vielmehr die Eindringtiefe des Kühlschmierstoffes in den Porenraum der Schleifscheibe ausschlaggebend für eine optimale KSS-Versorgung [Ott02, Vit85].

Aufgrund der zuvor bereits angesprochenen Problematik, dass insbesondere beim Tiefschleifen eine erhöhte Temperaturentwicklung zu verzeichnen ist [Boo95], haben sich Schleiföle im Praxiseinsatz des Werkzeugschleifens als Kühlschmiermedium durchgesetzt. Der wesentliche Vorteil ist in einer Reduktion der Reibung innerhalb der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück begründet [Ded72, Sto97]. So konnte *Storr* nachweisen, dass bei der Verwendung von Öl als Kühlschmierstoff im Vergleich zu den Alternativen nur noch knapp die Hälfte an Leistungsbedarf benötigt wurde [Sto97]. Durch diese Reduktion an Reibung kann thermischen Werkstückschädigungen entgegengewirkt werden. Ebenso hat sich herausgestellt, dass sich Schleiföle positiv auf die Schleifscheibenstandzeiten auswirken können und durch eine Reduktion an Zusetzungen bessere Oberflächengüten begünstigen [WG08, Taw90]. Wesentliche Nachteile von Emulsionen gegenüber Schleifölen sind der fehlende Korrosionsschutz, der Mehraufwand in der Pflege dieser Kühlschmierstoffe sowie die fehlende Fähigkeit, die Kobaltanteile des Hartmetalls zu binden und somit die Erzeugung erhöhter Entsorgungskosten [Boc89].

2.2.5 Schleifscheibenkonzepte zur Hartmetallbearbeitung

Neben den Prozesseinstellgrößen sowie dem zu bearbeitenden Werkstoff und der verwendeten Maschine spielt die Schleifscheibe, die sich aus den Abrasivkörnern, dem Bindungsmaterial und Porenvolumen zusammensetzt, eine wesentliche Rolle sowohl für die

entstehenden Schleifkräfte, die Oberflächengüte als auch für die Temperaturentwicklung während des Schleifprozesses. Von besonderer Bedeutung ist hier neben der Korngröße, welche beim Werkzeugschleifen üblicherweise zwischen D46 und D181 liegt, und Kornkonzentration das verwendete Bindungssystem. Insbesondere vor dem Hintergrund einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Schleifprozessen muss der Schleifscheibe, und hier einer auf die Aufgabe angepassten Bindungszusammensetzung, Aufmerksamkeit gewidmet werden. Üblicherweise kommen im Bereich des Werkzeugschleifens drei Bindungssysteme zur Anwendung. Neben Keramik- und Metallbindungssystemen machen kunstharz-gebundene Varianten die Mehrheit der verwendeten Schleifscheiben zur Erzeugung von Vollhartmetallwerkzeugen aus [Fri02, Hüb11]. Aus diesem Grund sollen diese drei Bindungssysteme in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

Generell hat die Bindung einer Schleifscheibe die Aufgabe, die Abrasivkörner bis zu einem gewissen Verschleißzustand zusammenzuhalten und sie danach freizugeben. So kommen immer neue und scharfe Schneidkörner in den Eingriff [CYY⁺08]. Dabei können vier unterschiedliche Verschleißmechanismen ausgemacht werden. Kornanflachung, Kornabsplitterung, der Ausbruch ganzer Körner aus der Bindung sowie Spanraumzusetzungen sind von *Friemuth* beobachtet worden [Fri02]. Neben dem Verschleiß ist die Belastung der einzelnen Schleifkörner ein wichtiges Merkmal unterschiedlicher Bindungssysteme. So stellte *Saini* heraus, dass die Schleifkörner in einer harten Bindung generell mehr Material zerspanen und somit höheren Kräften ausgesetzt sind als bei weicheren Bindungszusammensetzungen [Sai90].

Kunstharz-Bindungssysteme

Der Begriff Kunstharz steht für eine Vielzahl an höhermolekularen chemischen Syntheseprodukten unterschiedlicher Zusammensetzung. 1908 stellte *Baekelenad* das Grundprinzip der stufenweisen Bildung von duroplastischen Kunststoffen dar. Kommerziell eingesetzt wird dieses Verfahren seit ungefähr 1923 [Kön97, CYY⁺08]. Heutzutage sind laut *Chen et al.* rund 60 bis 70 % der eingesetzten Schleifscheiben zur Bearbeitung ultraharter Materialien kunstharzgebundene Varianten [CYY⁺08, Mac07]. Neben einer vergleichsweise kostengünstigen Herstellung liegen die Vorteile in einer üblicherweise über den Produktionszyklus gleichbleibenden Qualität der gefertigten Werkstücke und einer leichten Beschaffbarkeit der benötigten Rohstoffe [Bre96, CYY⁺08]. In der Regel werden kunstharzgebundene Schleifscheiben laut *Luo et al.* so ausgelegt, dass die Bindung genauso schnell verschleißt wie die Diamantkörner, um ständig neue scharfe Körner freizulegen. Aufgrund der geringen Festigkeit und Hitzebeständigkeit werden diesen Bindungssystemen eine Vielzahl an Füllstoffen wie beispielsweise Siliziumkarbid, Aluminiumoxid, Kupfer, Eisen, Graphit oder Molybdänsulfid beigemischt, um die Eigenschaften auf den Bearbeitungsprozess abzustimmen [LLC⁺97].

Wesentliche vorteilhafte Eigenschaft von kunstharzgebundenen Schleifscheiben, neben den zuvor bereits aufgezeigten, ist eine vergleichsweise elastische Verankerung der Diamantkörner innerhalb der Bindung. Hierdurch können, insbesondere beim Gleichlaufschleifen, die Folgen der schlagartigen Belastungen beim Schneideneintritt gegenüber anderen Bindungssystemen reduziert werden [CB96a, Fri02].

In neuen Bindungssystemen werden die Diamantkörner vermehrt mit Nickel ummantelt. Diese Vorgehensweise führt zu einem zu höheren Kornhaltekräften, hervorgerufen durch die mikroskopische Rauigkeit der beschichteten Oberfläche, innerhalb der Bindung, zum

anderen wird die Temperaturbeständigkeit der Schleifkörner erhöht. So stellten *Abdullah et al.* in Untersuchungen zum Tiefschleifen von Hartmetall mit einem Arbeitseingriff von $a_e = 0,8$ mm und Emulsion als Kühlschmiermedium fest, dass bei Schleifscheiben, deren Körner mit Nickel ummantelt worden sind, sowohl Schleifscheibenverschleiß als auch Oberflächenrauigkeit mit steigender Schnittgeschwindigkeit abnehmen. Bei einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit hingegen kommt es zu einem Anstieg des Schleifscheibenverschleißes [APF⁺07, Fri02, Gra01]. *Maldaner* stellte in seinen Untersuchungen zum Einsatzverhalten kunstharzgebundener Schleifscheiben zur Bearbeitung von Hartmetallen heraus, dass es mit einer steigenden Korngröße zu einem Anstieg der Rauigkeiten der bearbeiteten Oberflächen kommt. Er stellte in diesem Zusammenhang jedoch keinen Einfluss von Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit fest [Mal08].

Als nachteilig sind bei kunstharzgebundenen Schleifscheiben die mögliche Zersetzung unter Kühlschmierstoff und der im Allgemeinen sehr geringe Porenraum zu nennen. Darüber hinaus ist dieser Bindungstyp anfällig gegenüber zu hoher Temperaturbelastung. *Friemuth* und *Chen et al.* stellten fest, dass es ab einer Temperatur von ungefähr 250 bis 300 °C zu einer Zersetzung der Bindung kommen kann [CYY⁺08, Fri02, Gra01]. Die mitunter sehr langen Abrichtzyklen, die notwendig sind, um diesen Bindungstyp zu konditionieren, sind ein weiterer negativer Aspekt, der hier genannt werden soll. *Hübner* stellte innerhalb seiner Arbeit als Lösungsansatz dieses Problems das Profilieren mit intermittierendem Schärfe vor [Hüb11].

Metallbindungssysteme

Im Zusammenhang mit dem Werkzeugschleifen sollen hier Schleifscheiben mit gesinterten metallischen Bindungssystemen betrachtet werden. Da galvanisch belegte Schleifscheiben im Bereich des Werkzeugschleifens in der Praxis keine Anwendung finden, sollen diese hier nicht näher beschrieben werden. Gesinterte Metallbindungen zeichnen sich durch eine im Allgemeinen gute Verschleißbeständigkeit, eine hohe Profilhaltigkeit und eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit aus [Fri02, CB96a, CYY⁺08]. Als einen weiteren Vorteil von metallischen Bindungen stellte *Pfluger* in seinen Ausführungen einen im Vergleich zu Kunstharz- und keramischen Bindungssystemen verbesserten Selbstschärfeeffekt heraus. Während sich bei kunstharz und keramischen Bindungssystemen die Schleifkörner infolge der Schleifkräfte in die Bindung hineindrücken und somit der Selbstschärfeeffekt der Schleifscheibe verringert wird, geschieht dies laut seinen Ausführungen bei metallischen Bindungen nicht in dem Maße [Pfl02].

Metallisch gebundene Schleifscheiben werden überwiegend dort eingesetzt, wo es darauf ankommt, eine besonders profilgetreue Scheibengeometrie sicherzustellen. Darüber hinaus setzten *Yin et al.* Diamantschleifscheiben mit einer weichen Metallbindung aus Zinn oder Kupfer zum Feinstschleifen von Hartmetallen ein [YPR⁺05]. *Maldaner* hingegen stellte fest, dass es bei dem Einsatz von Bronzebindungen zur Herstellung von Hartmetallwerkzeugen zu im Vergleich mit kunstharzgebundenen Schleifscheiben höheren Rauigkeiten kommt [Mal08]. *Busch* erkannte darüber hinaus, dass Bronzebindungen ein spezifisches Verschleißverhalten aufwiesen. Er erkannte, dass sich mit zäher werdenden Hartmetallsorten deutlich erkennbare Riefen in der Bronzebindung bildeten [Bus68].

Die Nachteile von gesinterten Metallbindungen bestehen in einer im Vergleich schlechten Konditionierbarkeit [CYY⁺08, Fri02]. Darüber hinaus ist die Herstellung als aufwändiger als bei kunstharzgebundenen Schleifscheiben anzusehen.

Keramische Bindungssysteme

Keramische Schleifscheibenbindungen zeichnen sich vor allem durch eine im Vergleich mit den zuvor betrachteten Bindungssystemen deutlich bessere Konditionierbarkeit aus. Eine gute Temperaturbeständigkeit sowie chemische Widerstandsfähigkeit ergänzen die positiven Eigenschaften dieses Bindungssystems [Fri02, Bre96, CYY⁺08]. Ferner waren keramische Bindungssysteme bisher die, in denen die Porosität am besten gezielt eingestellt werden konnte. Diese ist für den Kühlschmiermitteltransport in die Kontaktzone und den vergleichsweise guten Spanabtransport aus der Kontaktzone verantwortlich [Gra01]. So lassen sich laut *Pfluger* beim Abrichten mit Silizium- oder Korundschleifscheiben Kornüberstände von bis zu 30 % der durchschnittlichen Korngröße erzielen [Pfl02]. *Clausen und von Brevern* stellten fest, dass keramisch gebundene Schleifscheiben höhere Kornhaltekräfte als kunstharzgebundene Varianten aufweisen können. Darüber hinaus stellten sie ebenfalls die Bedeutung des Porenraumes dieses Bindungstypes heraus [CB96a].

Vergleichende Untersuchungen zeigten, dass keramisch gebundene Diamantschleifscheiben beim Tiefschleifen von Hartmetall geringere Normal- sowie Tangentialkräfte als die Varianten mit Kunstharzbindung aufwiesen [BW09]. Dies liegt darin begründet, dass durch einen im Vergleich hohen Verschleiß keramischer Schleifscheiben ständig neue und somit scharfe Schneidkörner in den Eingriff kommen und die Kräfte auf einem niedrigen Niveau halten. Negativer Aspekt ist hier jedoch die dadurch bedingte im Vergleich zu kunstharzgebundenen Varianten schlechtere Oberflächenqualität [CB96a].

Nachteilig bei keramischen Bindungssystemen ist im Allgemeinen das Problem, dass sich der vorhandene Porenraum der Schleifscheiben mitunter sehr schnell zusetzt [CB96a]. Dies führt in der Folge zu einer Verschlechterung des Kühlschmiermitteltransportes in die Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe und somit zu erhöhten Kontaktzonentemperaturen und aus einer höheren Reibung zwischen zerspantem Material und Bindung resultierendem vermehrten Schleifscheibenverschleiß. In diesem Zusammenhang zusätzlich als nachteilig anzusehen ist die insgesamt schlechtere Wärmeleitfähigkeit keramischer Bindungen und damit auch eine geringe Fähigkeit, die entstehende Prozesswärme über die Schleifscheibe abzuführen [Ded72, Fri02, Bre96].

Hybride Bindungssysteme

Neben den zuvor beschriebenen konventionellen Bindungssystemen haben in jüngster Vergangenheit die sogenannten Hybridbindungen Einzug in die praktische Anwendung beim Werkzeugschleifen erhalten. Hiermit wird versucht, die vorteilhaften Eigenschaften unterschiedlicher Bindungssysteme miteinander zu kombinieren, um so eine Schleifscheibe mit verbesserter Abstimmung auf die spezifische Schleifaufgabe zu erhalten. Generell existiert keine einheitliche Definition dieses Bindungstyps und somit auch keine klare Abgrenzung zu den zuvor genannten Bindungsvarianten. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird von hybriden Bindungssystemen gesprochen, wenn versucht wird, verschiedene der zuvor genannten Standard-Bindungstypen miteinander zu kombinieren.

So zeigte beispielsweise *Graf* in seinen Untersuchungen auf, dass die enormen Leistungssteigerungen beim Schleifen nicht allein auf Weiterentwicklungen von Maschinen und Komponenten zurückgeführt werden können. Die Entwicklung neuer Kornarten und Bindungssysteme hat einen ebenso großen Anteil an diesen Effizienzsteigerungen [Gra01].

Generell lässt sich das bezogene Zeitspanvolumen durch eine Anpassung der Schleifscheibe hinsichtlich einer besseren Wärmeleitfähigkeit, eines verbesserten Kühlschmiermitteltransports in die Kontaktzone, einer größeren Schnittfähigkeit und einer verbesserten Formstabilität erreichen [Sei02]. In der Vergangenheit wurde versucht, diese Anforderungen durch die Beschichtung der Abrasivkörner zu erfüllen. Metallumhüllungen mit Nickel oder Kupfer wurden benutzt, um die Geschwindigkeit des Kornzusammenbruchs zu kontrollieren und vorzeitigen Kornverlust zu minimieren. Zusätzlich kann durch die Beschichtung der Abrasivkörner der Wärmehaushalt der Schleifscheibe gesteuert werden. Die Beschichtung stellt dabei eine Wärmesenke dar, die eine Zersetzung der Kunstharzbindungen aufgrund eines Wärmetransports durch die Diamantkörner verringert [NN77]. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde versucht, die Leistungsfähigkeit von Schleifscheiben durch den Einsatz sogenannter Hybridbindungen weiter zu steigern. Wichtig in diesem Zusammenhang sind die auftretenden Schleiftemperaturen und deren Kontrolle beziehungsweise Minimierung im Prozess. So stellten *Weinert et al.* in vergleichenden Untersuchungen heraus, dass eine kupfer-siliziumhaltige Kunstharzbindung durch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit deutlich stärker in der Lage ist, die anfallende Wärme aus der Kontaktzone abzuführen als ein keramisches Bindungssystem [WJS01]. Auch *Clausen* und *von Brevern* stellten bei vergleichenden Untersuchungen fest, dass metallische Bindungssysteme, in diesem Fall eine metallische Sprödbronzebindung, wesentlich besser in der Lage sind, die entstehende Schleifwärme aufzunehmen, darüber hinaus eine geringere Schleifkraft verursachen und so eine thermische Schädigung der Bauteile verhindern. Sowohl die analysierten keramisch- als auch kunstharzgebundenen Schleifscheiben führten zu thermischen Werkstückschädigungen [Bre08a, CB96b]. *Seiler* berichtet in seinen Ausführungen von einer auf das Nutenschleifen in der Form angepassten Schleifscheibe, dass Binder und Füllstoffe mit einer höheren thermischen Widerstandsfähigkeit ausgelegt wurden, um so ein Einsatz bis zu 450 °C entgegen den üblichen 300 °C bei kunstharzgebundenen Schleifscheiben und somit höhere Abtragsleistungen zu gewährleisten [Sei02]. Das Diamantkorn hingegen neigt erst ab einer Temperatur von 900 °C zur Umwandlung in Graphit [Hör03].

In jüngster Vergangenheit gibt es seitens der Schleifscheibenhersteller jedoch Bestrebungen, durch gezielte Kombination unterschiedlicher Bindungssysteme die Leistungsfähigkeit noch weiter zu steigern. Sowohl *Graf* als auch *von Mackensen* und *Rappold Winterthur* zeigen in ihren Ausführungen die Vorteile sogenannter Metallhybridbindungssysteme auf [Mac07, Rap07]. So sind die positiven Eigenschaften dieses Bindungssystems laut *Graf* die Vereinigung hoher Abtragsleistungen mit hoher Formstabilität und einem im Vergleich zu Kunstharzbindungen vorhandenen Porenraum [Gra01]. *Von Mackensen* stellt die Eigenschaften metallhybridgebundener Diamantschleifscheiben durch eine Kombination aus hoher Abtragsleistung verbunden mit der Fähigkeit des Profilierens mit Diamantformrollen dar [Mac07]. Auch *Rappold Winterthur* stellt Metallhybridbindungen mit größerem Porenraum, vergleichbar einer keramischen Bindung, geprägt durch verlängerte Schleifscheibenstandzeiten und niedrigere Schleifenergien vor [Rap07]. Eine Reduktion der während des Schleifvorgangs auftretenden Kraftkomponenten im Vergleich mit keramischen und Kunstharz-Bindungssystemen konnte überdies in der Arbeit von *Würz* nachgewiesen werden [Wür11]. Neben den hier bereits aufgeführten Vorteilen ergeben sich zusätzlich eine im Vergleich zu kunstharzgebundenen Schleifscheiben höhere Temperaturbeständigkeit, eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit und

damit die Fähigkeit, die Schleifwärme aus der Kontaktzone abzutransportieren sowie ein verbesserter Kühlschmiermitteltransport, hervorgerufen durch die Vergrößerung des Porenraumes. Im momentanen Praxisgebrauch stellen metallhybridgebundene neben den konventionellen kunstharzgebundenen Diamantschleifscheiben die am meisten verwendeten Schleifscheiben zur Erzeugung der Spannuten in Schaftwerkzeugen dar. Ein alternatives Konzept stellen *Kuriyagawa und Syoji* vor. Sie entwickelten eine Schleifscheibe, in der ein Verbund aus crushierbaren Diamantkörnern in einem Cluster-Korn, bestehend aus einer Metallbindung, gehalten wird. Die Cluster-Körner ihrerseits sind in eine Kunstharzbindung eingebettet. Mit dieser Art der Schleifscheibe versuchen sie bei der Bearbeitung von Cermet die gute Kornhaltekraft der Metallbindung mit der guten Oberflächenqualität der Kunstharzbindung zu kombinieren [KS90].

2.3 Werkzeugpräparation

2.3.1 Verfahren zur Nachbehandlung der Spannuten

Neben den originären Schleifaufgaben und hier anfallenden Anforderungen wird der Nachbehandlung von Zerspanwerkzeugen eine immer größere Rolle beigemessen. In diesem Zusammenhang hat sich die Kantenpräparation und Beschichtung von Zerspanwerkzeugen als sinnvoll herausgestellt, die Leistungspotenziale noch weiter steigern zu können. In jüngster Vergangenheit werden im praktischen Einsatz darüber hinaus vielfach Werkzeuge eingesetzt, deren Flächen, wie beispielsweise die Spannuten, durch einen dem Schleifen nachgeschalteten Feinbearbeitungsprozess nachbearbeitet werden, um so die Reibungsanteile während des Werkzeugeinsatzes zu reduzieren. Aufgrund der oftmals sehr komplexen Konturen sind die Verfahren, die für diese Feinbearbeitungsschritte in Frage kommen, in ihrer Anzahl begrenzt. Die wichtigsten werden im Rahmen dieses Kapitels mit ihren inhärenten Vor- und Nachteilen näher beschrieben. Oftmals wird in diesem Zusammenhang in der vorhandenen Literatur von einer Politur berichtet. Das Verfahren Polieren ist jedoch innerhalb der DIN 8589-0 Fertigungsverfahren Spanen Teil 0 nicht als eigenständiges Fertigungsverfahren aufgeführt, sondern wird nur in Verbindung mit anderen Fertigungsverfahren benutzt [DIN03]. Aus diesem Grund soll in der folgenden Arbeit der Terminus Polierschleifen für Verfahren mit gebundenem Schleifkorn verwendet werden.

Grundlegend wird in der vorhandenen Literatur bei Polierprozessen zwischen vier wesentlichen Materialabtragsmechanismen unterschieden (**Abbildung 2-6**). Neben den abrasiven können auch chemische und plastische Vorgänge während des Polierens beobachtet werden. So wird zwischen der Abtragshypothese, der Fließhypothese, der Reibverschleiß-Hypothese und der chemischen Hypothese unterschieden. Ein überwiegend abrasiver Materialabtrag und gewissermaßen ein Feinschleifprozess ist dabei Grundlage der Abtragshypothese, wohingegen ein Verfließen, hervorgerufen durch eine lokale Plastifizierung aufgrund von Druck- und Temperaturmaxima von Oberflächenbereichen, laut der Fließhypothese zu einer Einebnung der Oberfläche führt. Eine chemische Auflösung der Randzone liegt der chemischen Hypothese zugrunde [Dam05, Zun11, EPD⁺03]. Eine Überlagerung der einzelnen Abtragsmechanismen ist in der Realität wohl wahrscheinlich.

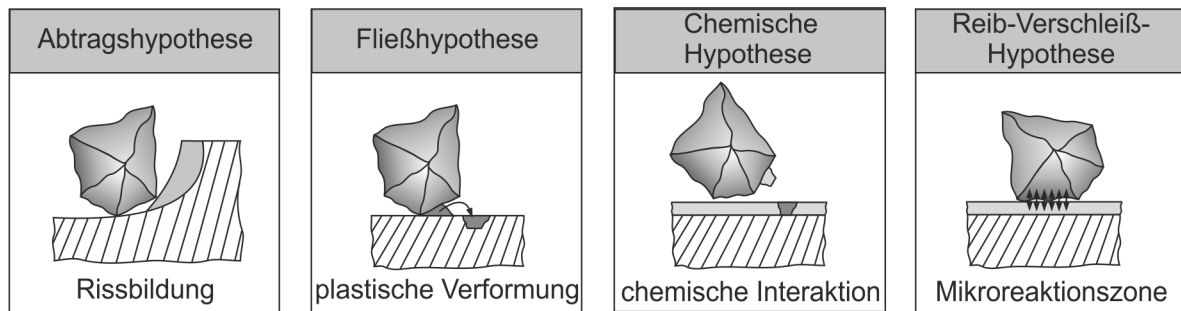


Abbildung 2-6: Abtragshypothesen bei Polierprozessen nach [Zun11, KK05, EPD+03]

Manuelle Nachbehandlung

Insbesondere in Kleinserien oder dort, wo auf Erfahrungswerte von Bedienpersonal zurückgegriffen werden muss, kommt die manuelle Nachbehandlung zum Einsatz. Die sensorischen Fähigkeiten der Mitarbeiter erlauben ein flexibles Reagieren auf unerwartete Probleme während der Bearbeitung. Jedoch stellen sich die hohen aufzuwendenden Kräfte und Schwingungen für das Bedienpersonal als zum Teil stark belastend dar. Umwelteinflüsse wie Staub und die mitunter stark schwankenden Bearbeitungsergebnisse sowie eine im Allgemeinen geringe Wirtschaftlichkeit sind hier als Nachteile der manuellen Nachbehandlung anzuführen [YXX⁺08].

Gleitschleifen und Schleppsleifen

Sowohl das Gleitschleifen als auch das Schleppsleifen sind weit verbreitete Verfahren zum Entgraten und Kantenverrunden sowie zum Polieren und Glätten von Oberflächen [Prü00, TBP⁺05]. Unterschied der beiden Fertigungsverfahren ist die Führung von einzelnen oder mehreren gespannten Werkstücken in ruhender Schleifkörpermasse beim Schleppsleifen, wohingegen bei dem Gleitschleifen durch Vibration eine undefinierte Wirkbewegung zwischen Werkstücken und Schleifkörpermasse erzeugt wird [Prü00, Löh95, Bye08]. Als Schleifkörpermasse kann eine Vielzahl an Bearbeitungsmedien Verwendung finden. Die gängigsten sind Maiskolbenschrot, Holzwüfel, Walnusschalenbruch sowie Steine aus Keramik oder Kunststoffen mit eingelagerten Schleifmineralien, oftmals unter Beisatz von Polierpasten oder Tensid-Lösungen [Hin86, Prü00].

So lassen sich mit diesem Bearbeitungsverfahren wirtschaftlich Werkstücke unterschiedlicher Materialien polieren und entgraten sowie komplexe Strukturen behandeln. Nachteilig sind die mitunter sehr hohen Bearbeitungszeiten und die notwendigen Waschvorgänge, um Lösungsrückstände zu entfernen [Löh95, Bye08].

Strahlstäben und Strahlspanen

Das Strahlspanen oder Strahlstäben ist ein Nachbehandlungsverfahren, bei welchem dem Trägermedium, in der Regel Wasser oder Luft, Abrasivkörner, in den meisten Anwendungsfällen Korund, beigemischt wird, bevor das entstehende Gemisch unter hohem Druck aus einer definierten Düsenöffnung austritt und auf die zu bearbeitende Oberfläche auftrifft. So ergeben sich laut *Terwey* und *Friemuth* die wichtigsten prozessbestimmenden Größen durch die kinetische Energie der Abrasivkörner, die Konzentration der Abrasivkörner sowie den Einfallswinkel des Abrasivwasserstrahls. *Friemuth* und *Terwey* stellte fest, dass es je nach Einfallswinkel und kinetischer Energie der Abrasivkörner entweder zu einem Ausreißen von Werkstückpartikeln aus der Oberfläche oder zu einer Verfestigung dieser kommt [Ter11, Fri02]. *Tönshoff et al.* stellten überdies fest, dass ein Strahlvorgang Druckeigenspannungen

in den Werkzeugrandzonen erhöhen kann und es darüber hinaus zu einem Abtrag der durch das Schleifen hervorgerufenen Randzone kommt, so dass die Karbide der Hartmetalle freigelegt werden [TFH00]. Zusätzlich kann ein dem Schleifen nachgeschalteter Strahlprozess für eine deutlich verbesserte Schichthftung der zumeist aufgetrachten Verschleißschutzschichten (TiAlN) sorgen [BMS⁺12].

Nachteilig ist die im Allgemeinen nach einem Strahlprozess vorherrschende größere Oberflächenrauheit. So stellte *Byelyayev* in Untersuchungen mit HSS-Wendelbohrwerkzeugen fest, dass es durch Strahlspanen und der hiermit verbundenen Verschlechterung der Werkzeugoberflächen zu einer negativen Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen kommen kann [Bye08, Köt06]. Des Weiteren müssen die Werkzeuge nach einem Strahlprozess in der Regel aufwändig gereinigt werden.

Bürsten

Beim Bürsten werden überwiegend Nylon-Filamente, besetzt mit Abrasivkörnern, benutzt um sowohl Kantenverrundungen als auch eine Verbesserung von Werkzeugoberflächen herbeizuführen. Üblicherweise findet dieses Verfahren Anwendung zum Entgraten und Polieren von unterschiedlichen Oberflächen [PS88, Bye08]. Als Abrasivmedium kommt dabei Aluminiumoxid oder Siliziumkarbid zum Einsatz. Die Schleifborsten werden mit dem Abrasivmedium durchtränkt, so dass nicht nur die Enden, sondern auch die Seiten der Schleifborsten einen Materialabtrag realisieren können. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind somit der Werkzeugaufbau, die Schnittgeschwindigkeit, die Eingriffstiefe sowie der Eingriffswinkel und die Prozessdauer [TBP⁺05, Fri02]. *Byelyayev* stellte in seinen Untersuchungen heraus, dass das Bürsten in jüngster Vergangenheit immer mehr beim Polieren der Spanräume von Schaftwerkzeugen Verwendung findet [Bye08].

Nachteilig und aufwändig ist beim Bürsten in der Regel die Notwendigkeit zur definierten Prozesssteuerung, der Verschleiß der Bürsten, der mitunter das Bearbeitungsergebnis beeinflussen kann, sowie eine zum Teil lange Prozesszeit und eine der Größe der Bürsten geschuldete Bearbeitung von Oberflächen und Kanten, die ursprünglich nicht bearbeitet werden sollten.

Magnetabrasive Bearbeitung

Bei der magnetabrasiven Bearbeitung wird das Werkstück zwischen zwei rotierende Dauermagnete geführt, in deren Zwischenraum magnetisches Abrasivmedium eingefüllt wird [TBP⁺05, BWH13a, BWH13b]. So lassen sich unterschiedliche Materialien wie beispielsweise Glas, Keramiken, Metalle, Kunststoffe und Hartmetalle hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheiten und Kanten bearbeiten [YPR⁺05]. Der erzielte Effekt hängt dabei sowohl vom Poliermedium, der Größe der Abrasivpartikel, der Rotationsgeschwindigkeit der Magnetpole, der Prozessdauer, dem Ausgangszustand der Werkstücke, der Bearbeitungs kinematik und dem Werkstückmaterial ab [CZG⁺08, JQY⁺08, Bye08]. Als Bearbeitungsmedium werden dabei in der Regel ferromagnetische Partikel eingesetzt, die mit kleinen Abrasivpartikeln versetzt sind, bestehend aus Al₂O₃, SiC, CBN oder Diamant [Jai09]. Als Vorteile dieses Verfahrens lassen sich ein simpler Aufbau, geringe Maschinenkosten und die Bindung von eventuell entstehenden Stäuben anführen. Dazu kommt ein von der Bearbeitungsaufgabe unabhängiges Maschinenkonzept [CZG⁺08, KG98]. Es lassen sich sowohl Kantenverrundungen als auch die Politur von Spannuten mit einem Aufbau innerhalb der Schleifmaschine realisieren. *Yanhong et al.* stellten in Untersuchungen zur Bearbeitung

von Stahl fest, dass in Bezug auf die Oberflächenrauigkeit eine effektive Bearbeitungszeit existiert, nach der keine signifikanten Verbesserungen mehr erzielt werden [YXX⁺08]. Darüber hinaus stellten *Shafir et al.* heraus, dass es durch eine dem Schleifprozess nachgeschaltete magnetabrasive Bearbeitung zum Abtrag der durch das Schleifen hervorgerufenen Randzonenschicht kommt [SLJ07]. Dies kann sich vorteilhaft auf einen späteren Beschichtungsprozess auswirken.

Als Nachteile dieses Verfahrens sind die mitunter langen Prozesszeiten ebenso zu nennen wie die Tatsache, dass alle sich im Abrasivmedium befindlichen Flächen und Kanten mit bearbeitet werden. Dies kann unter Umständen z. B. zu einem unerwünschten Verrunden der Nebenschneiden an Schaftwerkzeugen führen.

Druckfließläppen und Strömungsschleifen

Bei dem Druckfließläppen oder Strömungsschleifen handelt es sich um ein Bearbeitungsverfahren, welches in den Jahren 1966 bis 1986 in den USA zur Serienreife gebracht wurde [Prz88]. Insbesondere entwickelt, um schwer zugängliche Stellen sowie innenliegende Konturen an Bauteilen zu entgraten und zu polieren [US04, MU08] wird als Bearbeitungsmedium ein mit Abrasivpartikeln vermisches Polymer hoher Viskosität verwendet [Prz87, GJL06]. Als Abrasivpartikel finden überwiegend Aluminiumoxid, Siliziumkarbid, Borkarbid sowie CBN und Diamant Verwendung. Das Bearbeitungsmedium wird dabei unter Druck und einer wechselnden Bearbeitungsrichtung auf die zu bearbeitenden Flächen aufgebracht und trennt so Material ab [FSC07, TBP+05,]. Das Verfahren wird in der Hauptsache durch die Prozesszeit, die Prozesskinematik und die magnetischen Eigenschaften des Abrasivmediums gesteuert [JJ06]. *Gorana et al.* fanden in ihren Untersuchungen heraus, dass ein Anstieg von Druck und Viskosität zu einem Anstieg des Materialabtrages, aber damit einhergehend auch zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualitäten führt. So ist die Abrasionswirkung dort am höchsten, wo auch die Geschwindigkeit des Abrasivmediums am größten ist [GJL06].

Das Verfahren wird heute üblicherweise zur Kantenverrundung und zum Polieren von Spannuten an Vollhartmetallwerkzeugen eingesetzt. Nachteilig sind hier die zum Teil hohen Prozesshauptzeiten und die Tatsache, dass prinzipiell alle Flächen und Kanten der zu präparierenden Werkzeuge innerhalb des Abrasivmediums einer Bearbeitung unterzogen werden. Auch hier muss, wie in den zuvor vorgestellten Verfahrensvarianten auch, auf separate Maschinenkonzepte zurückgegriffen werden, die Energie, Platz und Investitionskosten benötigen.

2.3.2 Polierschleifen von Spannuten

Die Vorteile einer Nachbehandlung von Hochleistungs-Vollhartmetallschaftwerkzeugen werden in der Literatur vor allem durch Beiträge zur Kantenpräparation bestimmt. Hier sind in der Vergangenheit große Erfolge erzielt worden, die Leistungspotenziale von Schaftwerkzeugen noch weiter steigern und auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe anpassen zu können. Jedoch muss den Spannuten und deren Oberflächenqualität, die die Gestalt der Werkzeuge und ihr Einsatzverhalten maßgeblich bestimmen, eine ebenso große Bedeutung beigemessen werden. In diesem Zusammenhang haben *Bonny et al.* festgestellt, dass die plastische Deformationsfähigkeit von Hartmetallen stark limitiert ist und es demzufolge mit schlechter werdenden Oberflächen zu einem Anstieg der Reibungskoeffizienten kommt [BBQ⁺10]. *Bonny et al.* wiesen, in Reibversuchen mit Hartmetall als Reibpartner, ebenfalls

nach, dass polierte Hartmetalloberflächen im Vergleich zu geschliffenen und erodierten die geringsten Reibungskoeffizienten und die höchsten Verschleißbeständigkeiten aufwiesen. Sie fanden überdies heraus, dass das nachträgliche Polieren die durch das Schleifen induzierten Druckeigenstressspannungen verringern kann, was sich negativ auf das spätere Einsatzverhalten von Bauteilen auswirken kann [BBQ⁺10].

Müller stellte die besondere Wichtigkeit von optimal bearbeiteten Spannuten heraus. In Versuchen zum Tiefbohren kam es aufgrund einer nicht optimalen Beschichtung im Hinblick auf Reibungsminimierung zu einem verschlechterten Spanabtransport aus der Nut. Er stellte klar, dass insbesondere für diese anspruchsvolle Aufgabe auch bei beschichteten Werkzeugen möglichst glatte, reibungsminimierende Spannoberflächen benötigt werden [Mül01]. Schon zuvor hatte *Schneider* herausgestellt, dass sich mit höheren Schleifschnittgeschwindigkeiten bessere Oberflächengüten herstellen lassen und dies einen positiven Effekt auf die mechanische Belastung im Einsatz von Vollhartmetallbohrwerkzeugen hat [Schn99].

2.3.3 Grundlagen zum Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben

In der vorliegenden Literatur existieren nur wenige Quellen, die sich mit dem Einsatzverhalten elastisch gebundener Schleifscheiben befassen. An dieser Stelle soll zwischen elastisch gebundenen Schleifscheiben mit konventionellen Schleifmitteln wie etwa Korund oder Siliziumkarbid und solchen mit hochharten Abrasivmitteln wie CBN oder Diamant unterschieden werden. Erstere finden seit Jahren Anwendung zur Glättung von Oberflächen bei der Bearbeitung von Stählen und insbesondere in der Glasindustrie, wohingegen elastisch gebundene Schleifscheiben mit hochharten Abrasivkörnern erst kürzlich entwickelt wurden. Im Folgenden soll zunächst eine Definition von elastischen Bindungssystemen in Abgrenzung zu den zuvor bereits beschriebenen gängigen Schleifscheibenbindungssystemen eingeführt werden. Die Begrifflichkeiten „elastisch“ beziehungsweise „flexibel“ gehen zurück auf die Beschreibung der elastischen Verformung in der Mechanik und Werkstoffkunde. So wird elastisches/flexibles Materialverhalten mit der Fähigkeit zu einer reversiblen Verformung unter Last umschrieben [Wei07]. Somit können auch elastische Bindungssysteme als die Kombination von Abrasivkörnern, eingebettet in einer reversiv verformbaren Matrix aus Gummi oder Polyurethan, definiert werden.

Kacalak und Pluta waren die ersten, die sich in ihren Arbeiten mit Schleifscheiben in poröser Polyurethan- bzw. Gummibindung beschäftigten. Sie fanden heraus, dass diese Schleifscheiben eine effektive Möglichkeit bieten, Flach und Formteile zu glätten. Sie gliederten den Prozess zwischen dem Schleifen und dem herkömmlichen Polieren mit ungebundenen Abrasivkörnern ein. Sie fanden heraus, dass das Schleifkorn unter Einwirkung der Prozesskräfte seine Lage innerhalb der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück verändert. Somit werden laut ihrer Aussage die resultierenden Prozesskräfte und die Lage der Abriebflächen von der Verschiebung der Schleifspitzen mit beeinflusst (**Abbildung 2-7**) [KP83].

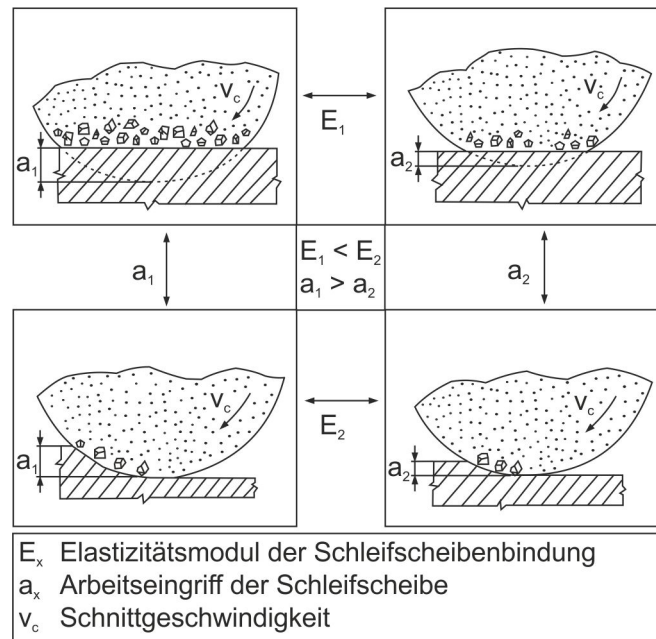


Abbildung 2-7: Abhängigkeit der Verteilung der aktiven Schleifkörner innerhalb der elastisch gebundenen Schleifscheibe von Arbeitseingriff und Bindungshärte [KP83]

Brinksmeier et al. stellten in diesem Zusammenhang heraus, dass frei rollende Abrasivkörner, wie beim konventionellen Polieren mit ungebundenen Abrasivkörnern vorhanden, den Materialabtrag durch Mikrorisse und Partikelabbrüche hervorrufen. Bei gebundenen Abrasivkörnern wird dieser hingegen durch Mikropflügen und Mikrospanen hervorgerufen [BOS07, BMK⁺10]. Eine weitere Besonderheit, die bei dem Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben beachtet werden muss, ist die Tatsache, dass es im Prozess aufgrund der Elastizität der Bindung zu einem linienförmigen und winkligem Versatz, also einer Änderung der Lage der Abrasivkörner innerhalb der Bindung, unter Belastung kommt. Laut *Makuch et al.* hängt die Größe dieses Versatzes von dem Bindungssystem, den Bearbeitungsbedingungen, der Interaktion zwischen den Abrasivkörnern sowie geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstückoberfläche ab [MKC04]. Zusätzlich kommt es zu einer durch die Zentrifugalkraft hervorgerufenen Verformung der Polierscheibenbindung im Einsatz, was das Finden des optimalen Kontaktpunktes zwischen Polierscheibe und Werkstück schwierig macht. *Brinksmeier et al.* zeigten so, dass Prozesse mit elastischen Bindungen mehr über die Kräfte anstatt über die Prozessparameter wie beispielsweise die Zustellung gesteuert werden sollten [BHB09].

Anwendungsbeispiele für elastisch gebundene Schleifscheiben mit Korund als Abrasivmedium finden sich unter anderem im Außenrundsleifen. Bei der Bearbeitung von St52 konnten so resultierende Oberflächenrauheiten von $R_z = 0,3 \mu\text{m}$ und bei der Nachbearbeitung von Zahnrädern aus 20MnCr5 resultierende Oberflächenrauheiten von $R_z = 0,3 \mu\text{m}$ gemessen werden. Bei dem Planschleifen von 100Cr6 und 42CrMo4 konnte eine Oberflächenqualität von $R_z < 1 \mu\text{m}$ erreicht werden. Die Werkzeuge wurden dabei mit einer zusätzlichen Oszillationsbewegung eingesetzt. Schleifscheibenhärte, Körnung sowie die Zustellung haben laut *Koch* den größten Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis [Koc09, Koc13]. Die Vermeidung von Vibrationen innerhalb der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück und somit eine verbesserte Kontrolle der Nano-Topografie der Oberfläche waren Untersuchungsschwerpunkte von *Yoshihara et al.* [YYK07]. Für die wirtschaftliche

Bearbeitung hochharter Materialien wie Hartmetall oder auch Keramiken kommen nur Schleifscheiben mit Diamant als Abrasivmedium in Frage. Generell ist bei allen Schleifscheiben mit elastischen Bindungssystemen ein im Prozess konstanter Druck zwischen Schleifscheibe und Werkstück notwendig, um eine gleichmäßige Oberflächenstruktur zu erzeugen. Hier bieten sich die elastischen Bindungssysteme aufgrund ihrer Deformierbarkeit und Anpassungsfähigkeit an komplexe Oberflächenstrukturen an [BOS07, CYY⁺08]. Jüngste Arbeiten von *Denkena et al.* beschäftigen sich mit der Nachbearbeitung von keramischen Hüftgelenken durch Schleifstifte mit Diamantkorn in einer Silikonbindung und den Abtrag der durch das Schleifen verursachten Rauheitsspitzen ohne eine Beeinträchtigung der Bauteil-Makrogeometrie. Variierende Eingriffsbedingungen führten dort zu unterschiedlich ausgeprägten Rauheiten und zu einer variablen Werkzeugbelastung. Dennoch konnten Werte von $R_a = 8 \text{ nm}$ erreicht werden [DKB⁺11, DKT10]. Ein weiteres, in jüngster Vergangenheit publiziertes Einsatzfeld elastisch gebundener Diamantschleifscheiben stellt die Kantenpräparation von Vollhartmetallwerkzeugen dar. Sowohl *Effgen et al.* als auch *Biermann et al.* stellten die Möglichkeiten zur Erzeugung definierter Schneidkantenmikrogestalten, auch in Form einer gezielten Verkippung der Schneidkantenverrundung, ausführlich dar. Die wesentlichen Einflussgrößen beim Einsatz der elastisch gebundenen Schleifscheiben innerhalb dieses Prozesses waren die Bindungshärte sowie der Arbeitseingriff a_e , die einen deutlich ausgeprägteren Einfluss auf das Prozessergebnis ausüben als Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit [EK13, EKA13, BAW⁺13].

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Vollhartmetallschaftwerkzeuge stellen heutzutage, aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und guten Verfügbarkeit, insbesondere in Hochleistungszerspanprozessen die dominierende Werkzeuggruppe dar. Ihre Leistungsfähigkeit, Effizienz und Prozesssicherheit tragen zur weiteren Verbreitung gegenüber den Alternativen aus Schnellarbeitsstahl bei. Der schleiftechnischen Herstellung dieser Zerspanwerkzeuge kommt dabei die wichtige Aufgabe zu, diesen hohen Anforderungen wie einer steigenden Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Prozesssicherheit durch optimale Prozessparameter gerecht zu werden. Gerade vor dem Hintergrund der äußerst komplexen Strukturen, die zur Herstellung dieser Werkzeuge mit hohen Ansprüchen an Maß- und Formfehler aber auch Oberflächengüten erzeugt werden müssen, eröffnet sich ein weites Feld für Optimierungsansätze. Einer der grundlegenden und die Leistungsfähigkeit wesentlich beeinflussenden Schleifprozesse stellt die Herstellung der in der Regel wendelförmigen Spannuten dar. Der aktuelle Stand der Technik weist gerade hier erhebliche Lücken auf. So wird zwar das Tiefschleifen von Hartmetall betrachtet, jedoch nur mit geringen und auf das Werkzeugschleifen oftmals nicht übertragbaren Zustelltiefen. Ebenfalls finden neueste Entwicklungen im Bereich der Schleifscheibentechnologie keine Berücksichtigung.

Das erste Teilziel dieser Arbeit besteht darin, unter Berücksichtigung neuer hybrider Schleifscheibenbindungssysteme ein Prozessmodell für das Tiefschleifen von Hartmetall am Beispiel von wendelförmigen Spannuten zu entwickeln. So soll ein grundlegendes Prozessverständnis gerade im Hinblick auf die komplexen Eingriffsbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück vor dem Hintergrund einer Steigerung der Leistungsfähigkeit des Schleifprozesses bei gleichbleibender Oberflächengüte, möglichst geringem Schleifscheibenverschleiß und einer hohen Prozesssicherheit aufgebaut werden. Zu diesem Zweck sollen umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen der Schleifscheibenbindungszusammensetzung, der Hartmetallzusammensetzung, der Kühlschmierstoffzuführungsmethodik sowie der Prozessführung auf die resultierenden Schleifkräfte, den Schleifscheibenverschleiß, die Oberflächengüte sowie die Gefügestruktur des Hartmetalls durchgeführt werden.

Neben der rein schleiftechnischen Herstellung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen rücken zunehmend nach der schleifenden Herstellung anschließende Verfahren in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Die Kantenpräparation stellt dabei das zur Zeit am weitesten untersuchte Forschungsgebiet dar. Neben der Kantenpräparation durch die bereits etablierten Verfahren wie dem Strahlspanen, Magnetfinishen, Schleppscheifen oder Bürsten erlaubt die Anpassung der Oberflächentopografie weiterer Werkzeuggestaltelemente wie der Span- und Freifläche sowie der Führungfasen eine zusätzliche Möglichkeit, Vollhartmetallschaftwerkzeuge zu optimieren und hinsichtlich Prozessstabilität und Leistungsfähigkeit weiter zu steigern. Für die Oberflächenfeinstbearbeitung der Funktionsflächen bietet sich nur eine geringe Zahl an Verfahren an. Eine Möglichkeit, diesen Bearbeitungsschritt durchzuführen, bietet das Polierschleifen mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben.

Der aktuelle Stand der Technik zeigt hier nur vereinzelte Forschungsaktivitäten, die insbesondere in der Erfassung der Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und dem Einfluss der Prozessparameter auf das Bearbeitungsergebnis Lücken aufweisen. So ist der Einsatz elastischer Bindungssysteme erst in den Grundzügen und hier lediglich an Stahlwerkstoffen analysiert worden. Darüber hinaus sind bezüglich der dem Schleifprozess nachgegliederten Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächenqualitäten an Vollhartmetallschaftwerkzeugen nur wenige Arbeiten existent.

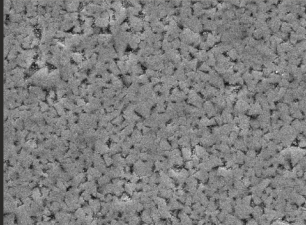
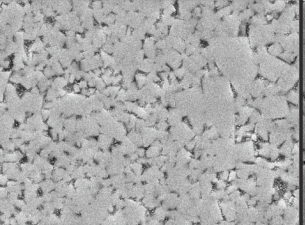
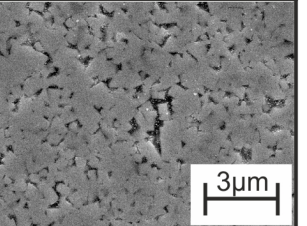
Das zweite Teilziel der Arbeit besteht darin, das Polierschleifen mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben in seinen Grundzügen zu analysieren und auf den Anwendungsfall der Spannutpolitur zu übertragen. Zu diesem Zweck werden Versuche zu den Auswirkungen einer Veränderung der Prozessstrategie, Schleifscheibenbindungshärte und Werkstückgestalt auf die resultierenden Bearbeitungskräfte sowie die entstehenden Oberflächentopografien und Schneidkantenqualitäten durchgeführt. Abschließend werden nachbehandelte Bohrwerkzeuge in Zerspanversuchen eingesetzt, um die aufgebauten Erkenntnisse zu validieren und den positiven Effekt einer optimalen Schleifbearbeitung der Spannuten im Werkzeugeinsatz herauszustellen. So soll durch die vorliegende Arbeit ein wesentlicher Beitrag zum Verständnis der zur Herstellung von Vollhartmetall-Zerspanwerkzeugen notwendigen Schleifoperationen, insbesondere dem Schleifen und Polierschleifen der Spannuten, und der hier möglichen Potenziale zur Verbesserung erarbeitet werden.

4. Experimentelle Randbedingungen

4.1 Versuchswerkstoffe

Bei den eingesetzten Versuchswerkstoffen handelt es sich um Wolframkarbid-Kobalt-Hartmetalle der Anwendungsgruppe K. Laut DIN ISO 513:2005-11, nach welcher die unterschiedlichen Hartmetalle klassifiziert werden, bedeutet dies eine vergleichsweise hohe Härte. Die Hartmetalle dieser Anwendungsgruppe werden überwiegend zur Herstellung von Zerspanwerkzeugen für die Bearbeitung von harten Stählen, Gusseisen, Gesteinen und Keramiken verwendet [DIN05]. **Tabelle 3.1** stellt die untersuchten Versuchswerkstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften dar.

Tabelle 3.1: Darstellung der Versuchswerkstoffe und ihrer physikalischen Eigenschaften (Herstellerangaben)¹

Hartmetallsorte	AF K44 EF	TSM33	TSM20
Zusammensetzung WC % Co %	88 12	90 10	92,5 7,5
Anwendungsgruppe	K40 - K50	K20 - K30	K10 - K30
Gefügedarstellung			
Korngröße in µm	0,5	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8
Dichte ρ in g/cm ³	14,1	14,5	14,75
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	---	85	90
Wärmeausdehnung in 10 ⁻⁶ /K	---	5,2	5,0
Elastizitätsmodul E in GPa	---	574	605

Allen drei Versuchswerkstoffen ist laut Hersteller eine Wolframkarbid-Korngröße von 0,5 bis 0,8 µm (Feinstkornhartmetalle) gemein. Jedoch ist in den Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen deutlich das erheblich homogenere und feinere Gefüge bei dem Versuchswerkstoff AF K44 EF zu erkennen.

¹ Herzlichen Dank an den Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der TU Dortmund und insbesondere an Frau Dipl.-Ing. Lydia Reisch für die Unterstützung bei der Anfertigung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen.

Wesentliches, die physikalischen Eigenschaften und den Gefügebau bestimmendes Merkmal der untersuchten Hartmetalle ist deren Zusammensetzung hinsichtlich der prozentualen Gewichtsanteile von Hartstoffphase und Binder.

Hier weist der untersuchte Werkstoff AF K44 EF mit 12 % den höchsten Anteil an Kobaltbinder auf. Die weiteren untersuchten Werkstoffe TSM33 und TSM20 besitzen mit 10 % bzw. 7,5 % weniger Kobaltbinder im Werkstoffverbund. So kann mittels der unterschiedlichen Zusammensetzungen ein breites Spektrum an Hartmetallen, insbesondere innerhalb der Anwendungsgruppe K, abgedeckt werden.

4.2 Werkzeuge

4.2.1 Schleifscheiben

Als Werkzeuge kommen zylindrische Diamantschleifscheiben der Form 1A1 mit variierenden Korngrößen, Kornkonzentrationen und Bindungszusammensetzungen zum Einsatz. Allen Schleifscheiben ist gemein, dass es sich um sogenannte hybridgebundene Versionen handelt. Diese Art der Bindung stellt eine Kombination aus Metall- und Kunstharzbindung dar, wobei bei den untersuchten Varianten laut Hersteller der Metallanteil gegenüber dem Kunstharzanteil deutlich überwiegt. **Tabelle 3.2** fasst die wichtigsten Kenngrößen der eingesetzten Schleifscheiben zusammen. Um vor jedem Versuch gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen, wurden die Schleifscheiben stets nach demselben Prinzip abgerichtet und nachfolgend geschärft. Zum Abrichten kam eine Siliziumkarbidschleifscheibe in keramischer Bindung der Spezifikation 200X10X32 1G10C12099KOVs zum Einsatz. Zum anschließenden Schärfen der Schleifscheiben wurde ein Korundblock verwendet. Während des innerhalb der Schleifmaschine per NC-Programm durchgeführten Schärfvorgangs wurde mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15$ m/s und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 50$ mm/min sowie einem Arbeitseingriff in den Korundblock von $a_e = 1$ mm gearbeitet.

Tabelle 3.2: Spezifikationen der eingesetzten Schleifscheiben

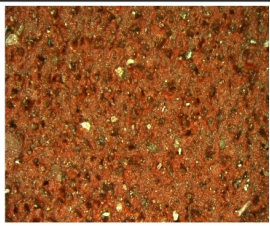
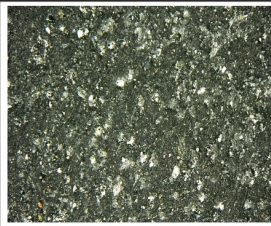
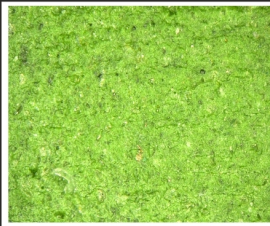
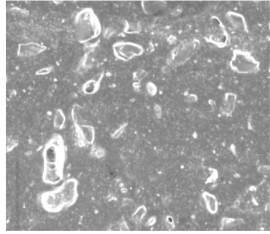
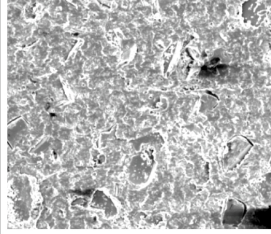
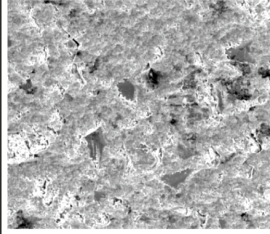
Form	1A1		
Kornart/größe	D46	D54	D64
Kornkonzentration	C75	C75	C100
Durchmesser neu [mm]	100	100	100
Breite [mm]	12	12	12
Bindungsart	Hybrid 1	Hybrid 1	Hybrid 2
Herstellerbezeichnung	Q-Flute ²	Q-Flute ²	Q-Flute +Dress

Schleifscheibenform 1A1

4.2.2 Polierschleifscheiben

Zusätzlich zu den zuvor bereits vorgestellten hybridgebundenen Diamantschleifscheiben für den Nutenschleifprozess wurden innerhalb der vorgestellten Arbeit Polierschleifscheiben mit Diamant als Abrasivmedium, eingebettet in einer flexiblen Bindung, zur nachträglichen Politur der zuvor geschliffenen Spannuten eingesetzt. Die Spezifikationen dieser Schleifscheiben sind in **Tabelle 3.3** dargestellt.

Tabelle 3.3: Spezifikationen der untersuchten Polierschleifscheiben

Bindungsgefüge 100 μm			
Herstellerspezifikation	1A1-100-10-5-EGD1A-E-S	1A1-100-10-5-EGDA2-E-S	1A1-100-10-5-EGD1D-E-S
Form	1A1		
Durchmesser neu [mm]	100	100	100
Breite [mm]	12	12	12
Schleifmittel	Diamant	Diamant	Diamant
Korngröße	> 10 μm	> 10 μm	> 10 μm
Bindungshärte	gering	mittel	hoch
Abgerichtete Schleifscheibenoberfläche im Detail 50 μm			

Es handelt sich hier ausnahmslos um Schleifscheiben mit der Grundform 1A1 und einem Ausgangsdurchmesser von $d_s = 100$ mm. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal besteht in der Härte des flexiblen Bindungssystems. Hier kommen drei unterschiedliche Härten, abgegrenzt durch die Kennzeichnung gering, mittel und hoch, zum Einsatz. Zur Konditionierung werden die Schleifscheiben mit den zuvor auch bei den hybridgebundenen Schleifscheiben verwendeten Abrichtparametern abgerichtet. Die Besonderheit besteht darin, dass nach dem Abrichten kein separater Schärffprozess mehr durchgeführt wird, um die Abrasivkörner aus der Bindung freizulegen.

4.3 Versuchsmaschinen

4.3.1 Schütte 305micro

Für die Durchführung der Schleifversuche am Institut für Spanende Fertigung stand eine CNC gesteuerte Schleifmaschine zur Verfügung, die im Folgenden näher beschrieben wird. Die Versuche zum Bohrernutenschleifen sowie zum anschließenden Polierschleifen fanden auf einer Universal-Werkzeugschleifmaschine der Firma Alfred H. Schütte vom Typ 305micro statt. **Abbildung 4-1** zeigt die Maschine im Zusammenhang mit den wichtigsten prozessrelevanten Kenndaten.

CNC-Werkzeugschleifmaschine

Typ: 305micro
 Hersteller: Fa. Schütte Schleiftechnik

Rotatorische Achse

Werkstückspindel: $n_W = 4000 \text{ min}^{-1}$

Hauptspindel

max. Leistung: $P_{\max} = 10 \text{ kW}$
 max. Drehzahl: $n_{\max} = 12.000 \text{ min}^{-1}$

Translatorische Achsen

Verfahrweg: $400 \times 250 \times 250 \text{ mm}^3$
 Vorschubgeschw.: $v_f = 24.000 \text{ mm/min}$



Abbildung 4-1: Kenndaten der eingesetzten Versuchsmaschine Schütte 305micro

Ausgestattet mit 5 Achsen und einer Schleifspindel, die direkt angetrieben eine Leistung von $P = 10 \text{ kW}$ und eine maximale Drehzahl von $n_{\max} = 12.000 \text{ min}^{-1}$ bereitstellt, eignet sich dieses Maschinenkonzept sowohl zum Nachschleifen als auch zum Neuschleifen von Zerspanwerkzeugen. Alle 5 CNC-Achsen sind dabei als Direktantriebe gestaltet. Die linearen Achsen sind mit Linearmotoren ausgestattet und das Werkstück wird horizontal mittels Präzisionsspannzangen gespannt. Eine weitere Besonderheit stellt das vom Hersteller patentierte Werkstückführungssystem dar. Dieses erlaubt durch hochgenaues Einschleifen mehrerer Auflageflächen innerhalb der Maschine eine sehr gute Abstützung des Werkstückes während des Schleifprozesses. Zur ausreichenden Versorgung des Prozesses mit Schleiföl wird eine KSS-Tauchpumpe mit $P = 2,6 \text{ kW}$ Leistung, einer Förderhöhe von 52 m und einem Fördervolumen von 160 l/min verwendet. Aufgrund der kompakten Gestaltung des Maschinenraums wurde zur Messung der im Prozess auftretenden Kraftkomponenten auf das Prinzip der Wirkleistungsmessung zurückgegriffen. Zu diesem Zweck kam ein Wirkleistungsmodul der Firma Nordmann vom Typ WLM-3 zum Einsatz. Auf die Messung der Wirkleistung wird in **Kapitel 4.4.1** näher eingegangen.

4.3.2 Chiron FZ 12 S Magnum

Neben der mehrheitlich genutzten und zuvor vorgestellten Werkzeugschleifmaschine wurden zum Abschluss der dargestellten Forschungsarbeit Validierungsversuche durchgeführt, in denen die zuvor geschliffenen Bohrwerkzeuge hinsichtlich ihres Einsatzverhaltens analysiert worden sind. Diese Versuche wurden auf einem CNC-Bearbeitungszentrum vom Typ FZ 12 S Magnum des Herstellers Chiron durchgeführt (**Abbildung 4-2**). Die Maschine ist in C-Gestell-Bauweise ausgeführt und besitzt eine vertikale Spindelanordnung, was eine gute Integration von Messequipment innerhalb der Maschine erlaubt. Es besteht die Möglichkeit, die Bearbeitungsoperationen sowohl mit innerer als auch mit äußerer Kühlschmierstoffversorgung auszuführen. Während der durchgeführten Einsatzversuche wurden Bohrwerkzeuge ohne innere Kühlschmierstoffkanäle eingesetzt, sodass mit der Möglichkeit der äußeren Kühlschmierstoffzufuhr gearbeitet wurde. Hierfür kam eine fünfprozentige amin- und

borsäurefreie Emulsion vom Typ AVANTIN 225 des Herstellers Carl Bechem zum Einsatz.

Bearbeitungszentrum

Typ: FZ 12 S Magnum
Hersteller: Chiron

Arbeitsspindel

max Leistung: $P_{\max} = 16 \text{ kW}$ (bei 25 % ED)
max Drehzahl: $n_{\max} = 15.000 \text{ min}^{-1}$

Translatorische Achsen

Verfahrweg: $550 \times 300 \times 425 \text{ mm}^3$
Eilganggeschw.: $v_w = 40.000 \text{ mm/min}$

Kühlmitteleinrichtung

ND-Pumpe: 150 l/min bei 0,8 bar
HD-Pumpe: 20 l/min bei 20 bar



Abbildung 4-2: Kenndaten der eingesetzten Versuchsmaschine Chiron FZ 12 S Magnum

4.4 Mess- und Analysetechniken

Zur Analyse der im Schleif- und Polierschleifprozess ablaufenden Mechanismen sowie der anschließenden Betrachtung der Werkstückqualität wird aufgrund der während des Schleifvorgangs unzureichenden Zugänglichkeit der Wirkstelle auf eine Reihe an In-Prozess- sowie Post-Prozess-Mess- und Analysetechniken zurückgegriffen. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

4.4.1 Wirkleistungsmessung

Um Aussagen über die während der Schleifprozesse ablaufenden Mechanismen treffen zu können, wurde im Rahmen der Versuche die resultierende Wirkleistung mittels des in Kapitel 4.3.1 bereits erwähnten Wirkleistungsmoduls der Firma Nordmann vom Typ WLM-3 aufgenommen und weiter verarbeitet. Die Stromsensoren, die die Wirkleistung aufnehmen und an das Messgerät weiterleiten, arbeiten nach dem Hall-Prinzip, das das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter beschreibt, der sich in einem Magnetfeld befindet. Nach Gleichung (1) kann das so aufgezeichnete Spannungssignal in die Wirkleistung umgerechnet werden. Dabei steht die Variable n für die Anzahl der Stromleiterwindungen durch die Öffnung des Sensors (in diesem Fall eine Windung), S_{Sensor} gibt die Empfindlichkeit des Stromsensors wieder und $U_{\text{Mess-lin}}$ steht für die Spannung am linearen Messwertausgang.

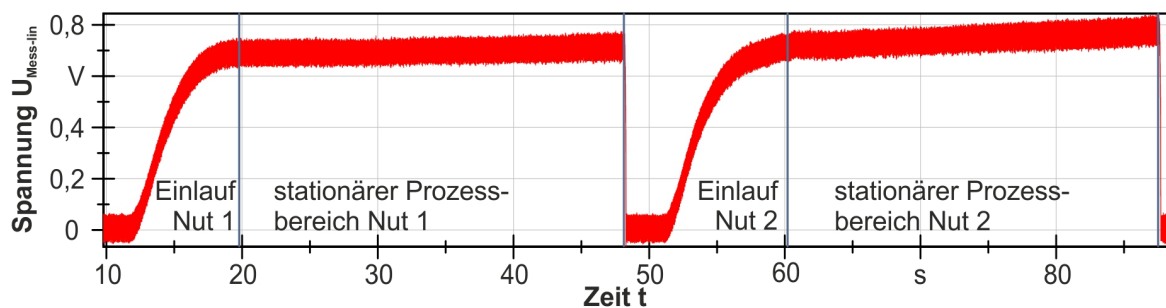
$$P = 3 \cdot \frac{21,3}{n \cdot S} \cdot U_{\text{Mess-lin}} \quad (1)$$

Da die Versuchsmaschine über eine direkt angetriebene Schleifspindel verfügt, kann davon ausgegangen werden, dass die Verlustleistung vernachlässigbar gering ausfällt und somit die aufgenommene Wirkleistung P der Schleifleistung P_c entspricht. Nach *Lowin* und *Klocke und König* ist die Schleifleistung P_c direkt proportional zu der Tangentialkraft F_t und kann mit (2) berechnet werden [Low80, KK05].

$$P_c = F_t \cdot v_c \quad (2)$$

Die auf diese Weise ermittelten Kräfte dienen innerhalb der folgenden Analysen zur Beurteilung der betrachteten Schleifprozesse. **Abbildung 4-3** gibt exemplarisch ein ausgegebenes Spannungssignal wieder. Zu erkennen ist der Verlauf für zwei Bohrernten,

die nacheinander in den Rundrohling geschliffen wurden. In der ersten Prozessphase tritt die Schleifscheibe im sogenannten Einlauf in das zu bearbeitende Werkstück ein und mit ansteigender Kontaktlänge zwischen Schleifscheibe und Werkstück nimmt die resultierende Spannung zu. Im weiteren Verlauf bildet sich ein stationärer Verlauf im aufgenommenen Spannungssignal aus, der bis zum Rückzug der Schleifscheibe aus dem Werkstück andauert. Der Verlauf der aufgenommenen Spannungen für die zweite Nut ist mit dem der ersten Nut nahezu identisch. Hier ergeben sich lediglich leichte Abweichungen, die durch einen Verschleiß beziehungsweise das Freischleifen der Schleifscheibe hervorgerufen werden. Für die Auswertung der Schleifleistung und daraus resultierender Tangentialkräfte wurde ein je nach Schleifzeit unterschiedlich langes Zeitintervall im Bereich des stationären Prozessverlaufs ausgewählt und innerhalb dieses Zeitintervalls ein Mittelwert gebildet. Um eine ausreichende statistische Absicherung der aufgenommenen Messdaten zu gewährleisten, wurden je Parameterkombination jeweils vier Bohrernuten geschliffen, von denen innerhalb dieser Arbeit die Mittelwerte dargestellt sind.



Prozess:	Schleifen	KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse
Prozessstrategie:	Gleichlauf		nichtwassermischbarer KSS
Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²		Mineralöl ($v = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10% Kobalt)	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$

Abbildung 4-3: Exemplarischer Verlauf der ausgewerteten Spannungssignale

4.4.2 Beurteilung der Oberflächengüte der Bohrernuten

Zur Beurteilung der Werkstückqualität wird die Oberfläche der erzeugten Spannuten einer näheren Analyse unterzogen. Innerhalb der dargestellten Arbeit werden zwei unterschiedliche Messmethodiken angewandt, um dieses Ziel zu erreichen. Unterschieden wird hier zwischen den Untersuchungen zum Bohrernutenschleifen und denen zur anschließenden Nachbearbeitung mittels Polierschleifen. Generell kann vorangestellt werden, dass die Quantifizierung der Oberflächenqualität innerhalb der erzeugten wendelförmigen Spannuten aufgrund der komplexen Werkstückgeometrie nicht nach [DIN13] und nicht mittels taktiler Messmethoden durchgeführt werden kann. Der zur Vermessung der geschliffenen Bohrernuten angewandte Ablauf ist in **Abbildung 4-4** skizziert. Um die Oberflächenkenngrößen in den komplex geformten wendelförmigen Spannuten zu messen, wurden zunächst mit Hilfe einer hochgenauen und nichtschrumpfenden Abdruckmasse, bestehend aus einem schnell aushärtendem Zwei-Komponenten-Silikon, Abdrücke der Nutoberflächen angefertigt. Diese wurden im zweiten Arbeitsschritt unter einem konfokalen Weißlichtmikroskop des Herstellers NanoFokus vom Typ μsurf vermessen.

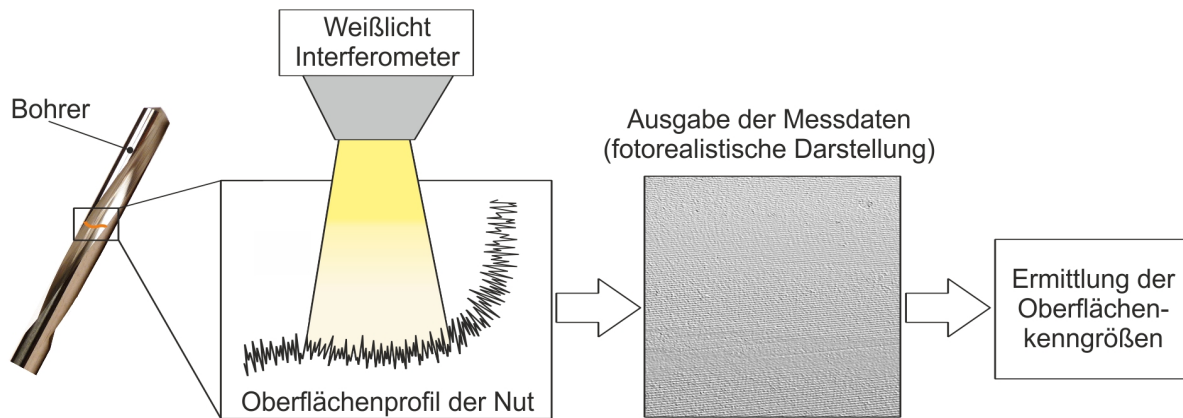


Abbildung 4-4: Prinzip zur Erfassung der Nutoberflächen-Kenngrößen beim Schleifen

Das so erstellte Höhenprofil kann mittels einer im Messrechner des Mikroskops vorhandenen Analysesoftware hinsichtlich der Oberflächenkenngrößen R_z , R_a und R_{max} ausgewertet werden. In Abbildung 4-4 ist die fotorealistische Visualisierung einer beispielhaften Oberfläche dargestellt. Mittels der Analysesoftware werden im nächsten Arbeitsschritt Schnitte orthogonal zur Richtung der Schleifriefen eingefügt. Diese an mehreren über das Höhenprofil verteilten Schnitte werden nun zur Vermessung der Oberflächenkenngrößen herangezogen. So ergibt sich jeder innerhalb dieser Arbeit dargestellte Messwert aus der Mittelung von mehreren Einzelmessungen. Dies bietet eine einfache und reproduzierbare Möglichkeit, die Oberflächenkennwerte an beliebigen Stellen innerhalb der erzeugten Spannuten zu messen.

Während der innerhalb der Arbeit vorzustellenden Untersuchungen zum Polierschleifen wurden jedoch Oberflächen erzeugt, die deutlich bessere Oberflächengüten als der tiefgeschliffene Ausgangszustand aufwiesen. Aus diesem Grunde wurde in Kapitel 6 nicht mehr mit der Abdruckmasse gearbeitet, sondern die Oberflächen wurden direkt mittels Weißlichtmikroskop vermessen und anschließend die ermittelten Daten ausgewertet, indem, wie zuvor bereits beschrieben, Schnitte orthogonal zu den Schleifriefen analysiert wurden.

4.4.3 Beurteilung des radialen Schleifscheibenverschleißes

Durch die thermomechanischen Belastungen während des Schleifprozesses unterliegt die Schleifscheibe einem permanenten Verschleiß. Unterschieden wird hier allgemein zwischen dem Verschleiß der Abrasivkörner und dem Verschleiß der Schleifscheibenbindung. Laut *König und Klocke* ist der Kornverschleiß meist die indirekte Ursache für Bindungsverschleiß. Differenziert wird dabei zwischen Kornbruch, Anhaftung von Material am Abrasivkorn, Kornabsplitterung, Rissindizierung, Mikro-Kornbruch und dem Anhaften von Spänen als Verschleißerscheinungsformen der Abrasivkörner [KK05]. Somit lässt die Messung des radialen Schleifscheibenverschleißes einen sehr detaillierten Einblick in das Einsatzverhalten der analysierten Schleifscheiben zu und ermöglicht einen genauen Vergleich der unterschiedlichen Schleifscheibenspezifikationen. Um den Schleifscheibenverschleiß zu messen, wurde zu ausgewählten Zeitpunkten während der Durchführung der experimentellen Untersuchungen mit der Schleifscheibe durch einen Abbildkörper geschliffen. **Abbildung 4-5** zeigt ausgehend von dem geschliffenen Abbildkörper das weitere Vorgehen zur Verschleißmessung auf.

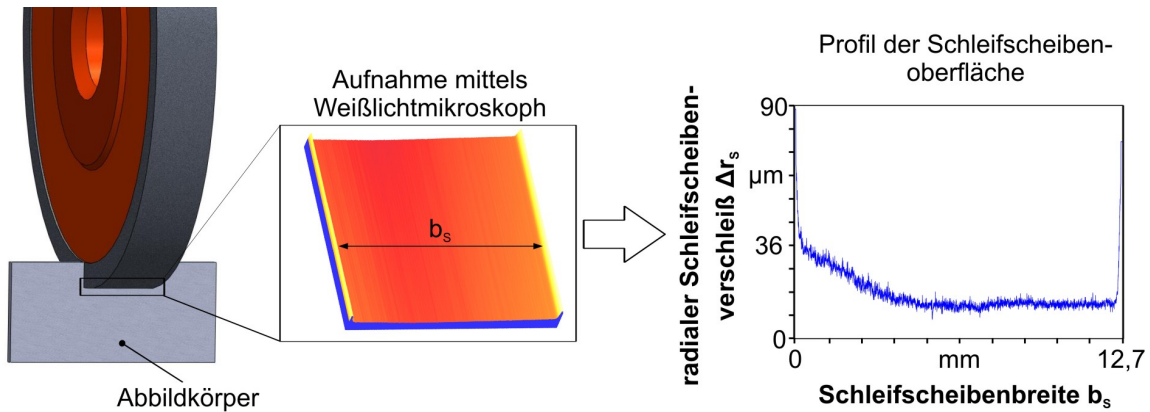


Abbildung 4-5: Prinzip zur Messung des radialen Schleifscheibenverschleißes Δr_s

Nach dem Schleifen des Abbildkörpers wird dieser mit einem konfokalen Weißlichtmikroskop dreidimensional vermessen. Auf Grundlage dieser Messung können nun Rauheiten ausgewertet werden und, wie in Abbildung 4-5 rechts zu sehen ist, durch die Anfertigung von Profilschnitten über die Schleifscheibenbreite der radiale Schleifscheibenverschleiß Δr_s gemessen werden. Zur Absicherung der Ergebnisse werden pro Abbildkörper jeweils mindestens sieben Einzelmessungen durchgeführt, anschließend der Mittelwert gebildet und in den Untersuchungsergebnissen dargestellt.

4.4.4 Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie bietet die Möglichkeit, durch Aufnahmen hoher Vergrößerung Detailanalysen durchzuführen. Innerhalb dieser Arbeit kommt die Rasterelektronenmikroskopie deshalb zum Einsatz, um das Verschleißverhalten von Schleifscheiben und insbesondere die Oberflächentopografie der geschliffenen und poliergeschliffenen Spannuten qualitativ beurteilen zu können. Am Institut für Spanende Fertigung steht zu diesem Zweck ein Mikroskop der Firma Phillips vom Typ XL40 ESEM mit einem integrierten Detektor für energiedispersive Strahlung (EDX) der Firma Oxford vom Typ INCA 200 bereit. Für die dargestellten Gefügebildungen der Hartmetalle wurde auf das Rasterelektronenmikroskop der Firma JEOL vom Typ JSM 7001F des Lehrstuhles für Werkstofftechnologie an der TU Dortmund zurückgegriffen.

4.4.5 Streifenlichtmikroskopie

Um die Werkstücke hinsichtlich der erzeugten Schneidkantenmikrogestalt untersuchen zu können, wurde ein optisches 3D-Oberflächenmessgerät der Firma GF Messtechnik vom Typ MikroCAD verwendet. Das Messprinzip ist dabei die Streifenprojektion, welche eine Kombination aus Triangulationsverfahren und interferometrischen Verfahren darstellt [FWH12]. So wurde innerhalb der Untersuchungen die Schneidkantengestalt der Hauptschneide, der Spanntrückenkante und der Nebenschneide dreidimensional digitalisiert und in Form des Materialabtrags an Span (s_v)- und Freifläche (s_a) sowie der Schneidkantenschartigkeit R_s vermessen.

5. Bohrernutenschleifen

Stetig steigende Leistungsanforderungen an Zerspanungswerkzeuge stellen auch an deren schleiftechnische Herstellung wachsende Herausforderungen. Diese zeigen sich vor allem durch Neuentwicklungen im Bereich der Hartmetallsorten sowie durch immer komplexer ausgeformte Werkzeugmakro- und -mikrogeometrien. Das Schleifen der Spannuten stellt bei der Herstellung von Schaftwerkzeugen aus Hartmetall einen zentralen Prozessschritt dar. Nicht nur werden hier die größten mechanischen und thermischen Lasten auf das zu fertigende Zerspanungswerkzeug aufgebracht, sondern durch die Notwendigkeit, große Volumina zu zerspanen, ergeben sich auch mitunter lange Prozesshauptzeiten. Hier bieten hybridgebundene Schleifscheiben einen Ansatzpunkt für Verbesserungen (siehe Kapitel 4.2.1). Als Ausgangsmaterial der Untersuchungen werden Rundrohlinge mit einem Durchmesser von $d_W = 8 \text{ mm}$ der Feinstkornhartmetallsorte (Korngröße $0,5 \mu\text{m}$ bis $0,8 \mu\text{m}$) TSM 33 mit einem Kobaltanteil von 10 % verwendet. **Abbildung 5-1** zeigt detailliert die Gestalt der gefertigten Spannuten und die Lage der Nuten im fertigen Zerspanungswerkzeug auf. Die Versuchswerkstücke stellen dabei die zuvor erwähnten Rundrohlinge dar, die seitens des Herstellers mit einem Spitzenanschliff von $\kappa = 120^\circ$ versehen wurden und eine Gesamtlänge von $l_R = 160 \text{ mm}$ besitzen.

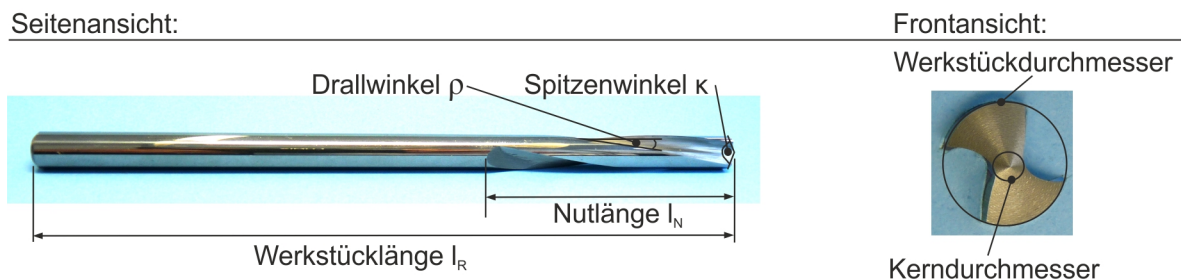


Abbildung 5-1: Abmessungen des Werkstückrohlings sowie der geschliffenen Spannuten

In die Rundrohlinge werden mittels Schleifscheiben der Form 1A1 wendelförmige Nuten mit einem Drallwinkel von $\rho = 11^\circ$ und einer Länge von $l_N = 60 \text{ mm}$ eingebracht. Der Arbeitseingriff der Schleifscheibe beträgt $a_e = 3,2 \text{ mm}$ und der Vorhaltewinkel wurde mit $\chi = 2^\circ$ eingestellt. In **Abbildung 5-2** ist der zu schleifende Rohling und dessen Positionierung innerhalb der Versuchsmaschine zu erkennen. Neben der Möglichkeit, die Schleifscheibe mittels eines fest eingespannten Schärfblocks reproduzierbar zu schärfen, bietet sich durch die integrierte Abrichtspindel zusätzlich die Gelegenheit, die Schleifscheibe innerhalb der Versuchsmaschine abzurichten. Zum Abrichten wurde sowohl dieser Prozess als auch eine separate Abrichtmaschine der Firma Geiger vom Typ AP 800 Fusion mit jeweils identischen Prozessparametern benutzt. Der zu schleifende Rohling wird von einer Präzisionsspannzange gehalten und während des Schleifvorgangs über eine innerhalb der Maschine hochgenau eingeschliffene konkave Auflage gestützt.



Abbildung 5-2: Versuchsaufbau während der Untersuchungen zum Nutenschleifen

Als Kühlschmierstoffversorgung kommen Freistrahldüsen zum Einsatz. Die Hauptinflussgrößen des Nutenschleifprozesses lassen sich durch die Schnittparameter Schnittgeschwindigkeit, Arbeitseingriff und Vorschubgeschwindigkeit, die zur Anwendung kommende Schleifscheibenspezifikation und Gestalt, das Kühlschmierstoffkonzept sowie die Hartmetallzusammensetzung und die Werkstückgestalt charakterisieren. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen haben die Analyse dieser Einflussgrößen auf den Nutenschleifprozess zum Inhalt. So soll der Einfluss auf die resultierenden Schleifkräfte ebenso untersucht werden wie die Qualität der erzeugten Spannuten und der Schleifscheibenverschleiß. In den folgenden Untersuchungen wird neben einer Variation der Prozessparameter sowohl die Kühlschmierstoffzuführung in Form von unterschiedlich ausgestalteten Düsenformen als auch der Einfluss der Hartmetallsorte auf den Nutenschleifprozess an Vollhartmetallbohrwerkzeugen betrachtet.

5.1 Einfluss der wesentlichen Prozessparameter auf den Nutenschleifprozess

5.1.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit hat wesentliche Auswirkungen auf den Schleifprozess. Im Allgemeinen vergrößert sich durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit unmittelbar die Zahl der aktiven Schneiden bei einer gleichzeitig steigenden Einzelkornspannungsdicke. Somit erhöhen sich zwangsläufig mit steigender Vorschubgeschwindigkeit die Schleifkräfte und die maximal realisierbare Vorschubgeschwindigkeit hängt folglich unmittelbar von dem Kornüberstand der Diamantabrasivkörner ab [CB96a, Mac07]. Durch diesen Zusammenhang sind dem Prozess Grenzen hinsichtlich einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit gesetzt. In einem ersten Schritt sollen nachfolgend die resultierenden Schleiftangentialkräfte F_t betrachtet werden. Neben der Schleifnormalkraft ist die Schleiftangentialkraft eine wesentliche und reproduzierbare Größe, um Aussagen über die während des Schleifprozesses ablaufenden Mechanismen treffen zu können. Die Schleiftangentialkraft steht in einem direkten Verhältnis zur Schleifleistung, also dem zum Schleifen aufzubringenden Energieanteil. Somit lassen sich mit dieser Größe nicht nur Unterschiede zwischen einzelnen Schleifprozessen ausmachen, sondern gerade wegen einer thermischen Beeinflussung der Hartmetalle während der Bearbeitung ist die Tangentialkraft die entscheidende Bestimmungsgröße. Vor der Diskussion der Ergebnisse soll erwähnt werden, dass diese aufgrund der in der industriellen Praxis vorherrschenden Vielfalt an Zerspanwerkzeuggeometrien nicht unmittelbar auf andere Anwendungsfälle und Werkstoffvarianten übertragen werden, sie können als grundlegende Erkenntnisse aber sehr wohl eine allgemeingültige Aussage zulassen. **Abbildung 5-3** zeigt die erzielten Ergebnisse bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf. So wurde zunächst mit einer im Bereich

des Hartmetallschleifens üblichen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15$ m/s gearbeitet und die Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min in $\Delta v_f = 50$ mm/min Schritten gesteigert. Dabei wurde der Arbeitseingriff und somit der Nutquerschnitt nicht verändert, so dass eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit unmittelbar eine Steigerung des Zeitspanvolumens zur Folge hat. Die Prozessgrenze wurde durch eine starke und plötzliche, während des Schleifprozesses einsetzende Rauchentwicklung, verbunden mit deutlichen optischen Zusetzungen der Schleifscheibe, festgesetzt. So konnte die Vorschubgeschwindigkeit in diesen Untersuchungen prozesssicher bis auf einen Wert von $v_f = 200$ mm/min gesteigert werden.

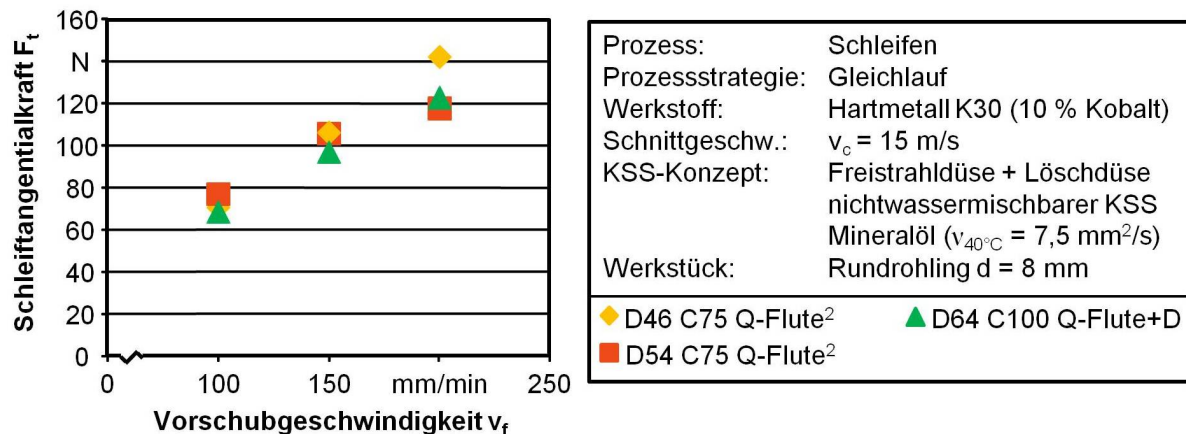


Abbildung 5-3: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Schleiftangentialkräfte

Zunächst ist erwartungsgemäß eine mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und damit steigendem Zeitspanvolumen steigende Schleiftangentialkraft zu beobachten. Im Vergleich der Schleifscheiben D54 C75 Q-Flute² und D46 C75 Q-Flute² wird deutlich, dass sich mit steigender Vorschubgeschwindigkeit eine kleinere Korngröße negativ auf die Schleiftangentialkräfte auswirkt. Ursächlich für diesen Effekt sind eine geringere Kornüberstandshöhe und somit vermehrte Reibungsvorgänge zwischen Schleifscheibenbindung, den entstehenden Spänen und Werkstückoberfläche bei geringerer Diamantkorngröße. Zusätzlich durchgeführte Untersuchungen zum Verschleißverhalten der Schleifscheiben bestätigen, dass sich diese vermehrt durch eine Bindungszusatzung und Bindungsverschleiß, verbunden mit einem Abstumpfen, Absplittern und daraus resultierendem Ausbrechen von Diamantkörnern, aus der Bindung abnutzen. Beim Vergleich der Schleifscheiben D54 C75 Q-Flute² und D64 C100 Q-Flute+D fällt auf, dass trotz der größeren Korngröße und höheren Kornkonzentration bei steigender Vorschubgeschwindigkeit die Schleifscheibe mit diesen Spezifikationen die geringeren Schleiftangentialkräfte hervorruft. Somit kommt hier der Schleifscheibenbindung und deren Kornhaltekräften und Verschleißverhalten eine wichtige Rolle zu. Nachfolgend soll deshalb eine Untersuchung des Schleifscheibenverschleißes den Einfluss der Schleifscheibenbindungszusammensetzung und deren Verhalten im Einsatz bestätigen. Während des Schleifvorgangs werden die Schleifscheiben entlang ihrer Eingriffsbreite a_p unterschiedlich stark beansprucht. Dies resultiert, wie in **Abbildung 5-4** veranschaulicht wird, aus dem durch den runden Werkstückdurchmesser begründeten, über die Eingriffsbreite der Schleifscheibe unterschiedlichen Arbeitseingriff a_e der Schleifscheibe. Prinzipiell wird, hervorgerufen durch die Relativbewegung zwischen Bohrerrohling und Schleifscheibe, der Materialabtrag am Werkstück durch die Umfangsfläche der Schleifscheibe und dem in Kontakt befindlichen Bereich der Schleifscheibenkante hervorgerufen. **Abbildung 5-4** gibt diese Eingriffssituation

statisch wieder. So ist zu erkennen, dass das zu zerspanende Volumen mit sich ändernder seitlicher Zustellung a_p über die Schleifscheibenbreite zunimmt. Dieses Phänomen ist auch in Abbildung 4-5 zu erkennen, in der das Prinzip zur Messung des radialen Schleifscheibenverschleißes Δr_s vorgestellt wurde. Mit sich änderndem Zerspanungsvolumen über die Schleifscheibenbreite nehmen in gleichem Maße der Verschleiß sowie die mechanischen Belastungen zur Schleifscheibenkante hin zu.

Üblicherweise wird bei Schleifscheiben zwischen Kornverschleiß und Bindungsverschleiß unterschieden. Kornanflachungen führen dazu, dass das Korn abstumpft und somit Reibungskräfte ansteigen und so der Kornüberstand reduziert wird. Durch ein Absplintern einzelner Kornfragmente werden hingegen neue scharfe Schneiden erzeugt. Einhergehend mit dem auftretenden Kornverschleiß findet immer auch ein Verschleiß an dem Bindungsmaterial der Schleifscheibe statt. Hierfür ursächlich ist in der Hauptsache die abrasive Wirkung der entstehenden Schleifspäne, die zwischen Schleifscheibe und Werkstückmaterial aus der Kontaktzone transportiert werden [Heu91].

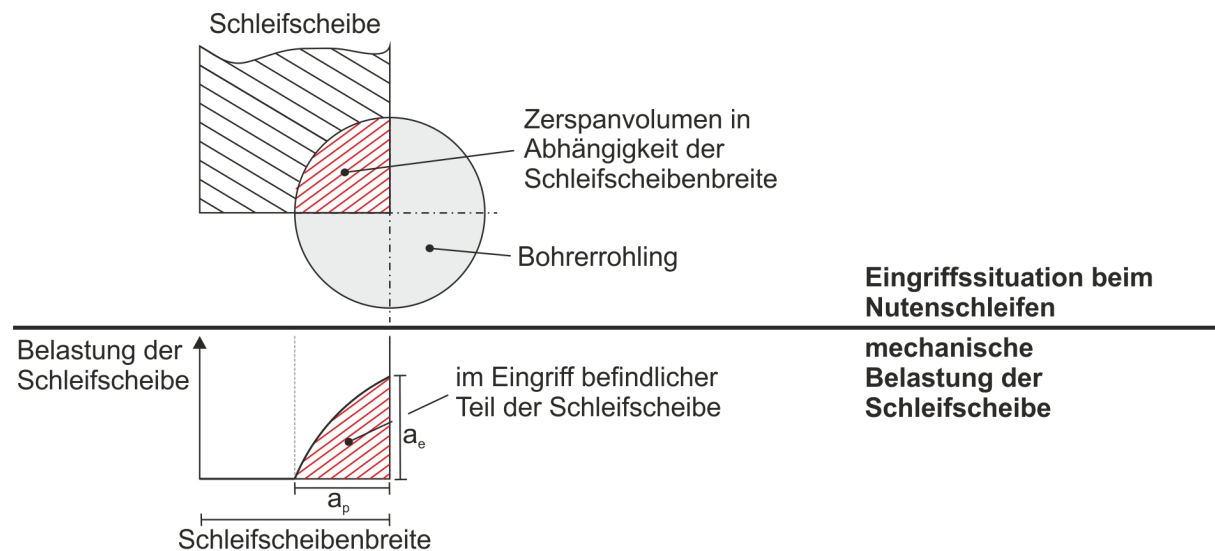


Abbildung 5-4: Belastungsverteilung an der Schleifscheibe beim Bohrernutenschleifen

Um das Verschleißverhalten der hybridgebundenen Schleifscheiben im Detail erfassen und bewerten zu können, wurden Standzeituntersuchungen durchgeführt, in denen eine große Anzahl an Bohrernuten geschliffen wurde, ohne die Schleifscheiben zwischenzeitlich abzurichten oder zu schärfen. So konnte die Verschleißentwicklung über eine Anzahl von 14 Bohrwerkzeugen, an denen insgesamt 28 Bohrernuten geschliffen wurden, dokumentiert und analysiert werden. Während der hier dargestellten Versuche kam die Schleifscheibe des Typs D46 C75 Q-Flute² bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15$ m/s und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min zum Einsatz. Vor Versuchsbeginn wurde die Schleifscheibe mit den in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Parametern abgerichtet und anschließend geschärft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in **Abbildung 5-5** gezeigt. Anhand der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen kann das Verschleißverhalten der Schleifscheibe qualitativ analysiert werden. Links in Abbildung 5-5 ist der Ausgangszustand dargestellt, wohingegen die rechte Seite den Zustand nach dem Einsatz der Schleifscheibe zeigt. Hinsichtlich der Bindungsoberfläche sind signifikante Unterschiede zu beobachten. Die noch nicht eingesetzte Schleifscheibenoberfläche zeichnet sich durch eine unregelmäßige und im Vergleich raue Oberflächenstruktur mit einem großen

Traganteil aus. Die eingesetzte Schleifscheibenoberfläche hingegen ist im Vergleich glatt, eingeebnet und weist eine Struktur mit weniger Zwischenräumen und einem geringeren Traganteil auf, die Späne aufnehmen und im Schleifprozess abtransportieren kann. Bezüglich der Diamantkörner unterscheiden sich die Kornüberstandhöhen der beiden gezeigten Schleifscheibenoberflächen nicht signifikant voneinander, aber ein Vergleich der Anzahl der hervorstehenden Schleifkörnern zeigt, dass es zu vermehrten Kornausbrüchen aus dem Bindungsmaterial gekommen ist. Zusätzlich weisen die Abrasivkörner der eingesetzten Schleifscheibe deutliche Kornanflachungen auf. Gestützt werden die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Abdrücken der Schleifscheibenoberflächen, die mit Hilfe der bereits in Kapitel 4.4.2 beschriebenen, nichtschrumpfenden Abdruckmasse angefertigt, und anschließend durch ein konfokales Weißlichtmikroskop ausgewertet wurden. Hier ist ebenfalls der deutliche Unterschied zwischen konditionierter und eingesetzter Schleifscheibenoberfläche hinsichtlich der Bindungsoberflächenstruktur und des Kornüberstandes sowie der Kornanzahl detektierbar. So kann an dieser Stelle die Bedeutung bezüglich des Einsatzzustandes der Schleifscheibenbindung und Diamantkorngröße auf die Schleiftangentialkraftentwicklung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bestätigt werden.

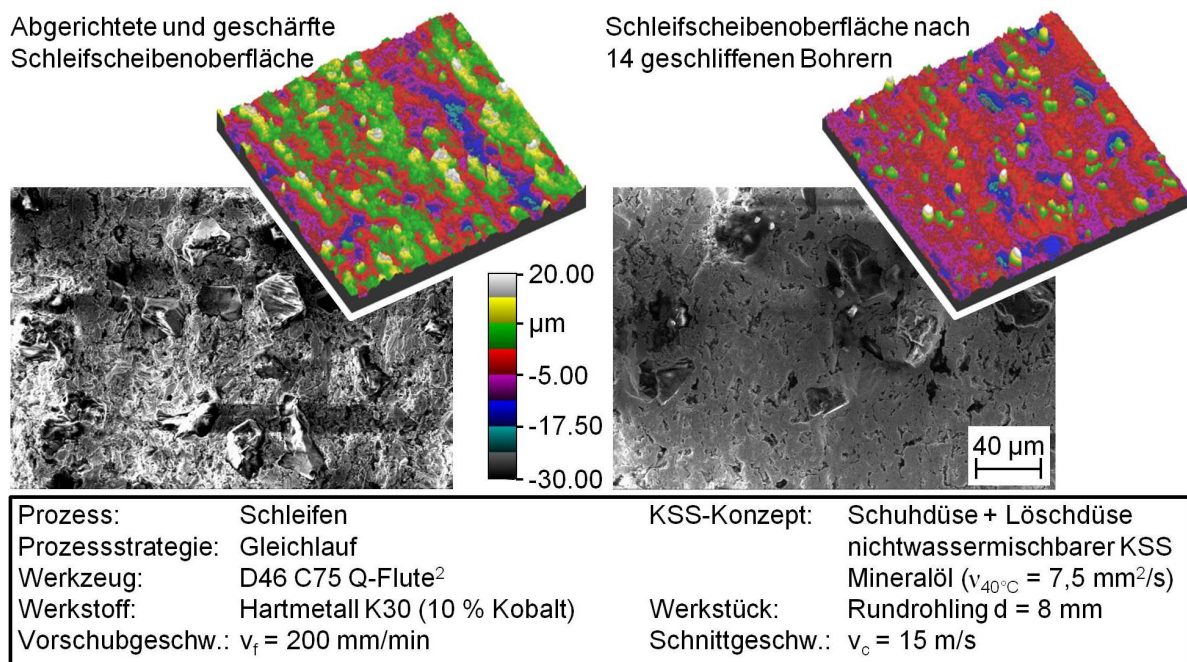


Abbildung 5-5: Exemplarische Darstellung der Verschleißentwicklung

Nachdem zuletzt das Verschleißverhalten der hybriden Bindungssysteme im Detail analysiert wurde, sollen im Anschluss die Auswirkungen einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit auf den radialen Schleifscheibenverschleiß Δr_s betrachtet werden. **Abbildung 5-6** zeigt den radialen Schleifscheibenverschleiß für die drei untersuchten Schleifscheiben in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit auf. Zunächst ist deutlich zu sehen, dass der radiale Schleifscheibenverschleiß Δr_s mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und steigendem Q_w bei zwei der drei untersuchten Schleifscheiben signifikant ansteigt. Lediglich die Schleifscheibe des Typs D64 C100 Q-Flute+D zeigt einen mit steigender Vorschubgeschwindigkeit nahezu konstanten Schleifscheibenverschleiß. Der mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ansteigende Schleifscheibenverschleiß des zuvor erwähnten Schleifscheibentyps liegt in der Zunahme der Einzelkornspannungsdicke und somit auch der

Einzelkornbelastung begründet. So kommt es, verbunden mit dem zuvor bereits detektierten Bindungsverschleiß, zu einem vermehrten Ausbrechen von Diamantkörnern aus dem Bindungsmaterial und somit einem zunehmendem radialen Schleifscheibenverschleiß. Im Vergleich der Schleifscheiben D46 C75 Q-Flute² sowie D54 C75 Q-Flute² zeigt sich, dass eine kleinere Diamantkorngröße zu einem erhöhten Schleifscheibenverschleiß führt. Dies liegt darin begründet, dass mit sinkender Diamantkorngröße die Kornüberstandshöhe abnimmt und somit auch der Zwischenraum zwischen Schleifscheibenbindung und Werkstück, der sich für den Spanabtransport aus der Kontaktzone verantwortlich zeichnet, reduziert wird. So kommt es mit sinkender Korngröße zu vermehrten Reibvorgängen zwischen Spänen und Schleifscheibenbindung im Prozess und einem daraus resultierenden größeren Verschleiß. Dieser Trend zeigt sich im untersuchten Parameterraum vor allem bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten. Beim Vergleich der Schleifscheibentypen D54 C75 Q-Flute² und D64 C100 Q-Flute+D zeigt sich, dass trotz einer höheren Korngröße und Kornkonzentration und damit einhergehend einem größeren Zwischenraum zwischen Schleifscheibenbindung und Werkstück zum Spanabtransport und einer mit steigender Kornkonzentration sinkenden Einzelkornbelastung im Schleifprozess sich diese positiven Effekte erst bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150$ mm/min auf den Schleifscheibenverschleiß auswirken. Somit kommt auch hier, wie bereits zuvor bei der Betrachtung der entstehenden Schleifprozesskräfte, der Schleifscheibenbindung eine enorme Bedeutung zu.

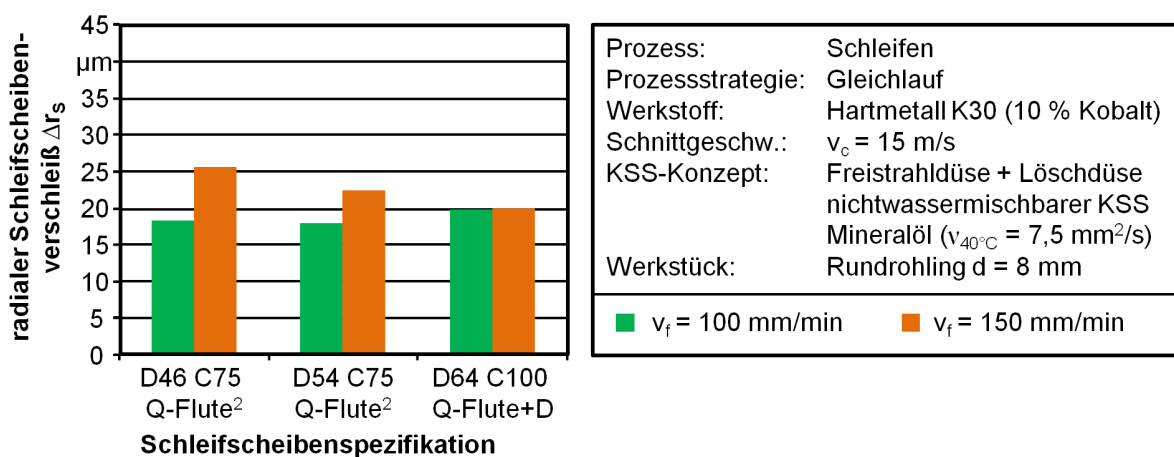


Abbildung 5-6: Schleifscheibenverschleiß in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Neben den Prozesskräften und den daraus resultierenden thermomechanischen Belastungen des Werkstückes ist die erreichbare Oberflächenqualität ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von Schleifprozessen. Gemessen wurde in den nachfolgend dargestellten Ergebnissen die gemittelte Rautiefe R_z (**Abbildung 5-7**). Die Oberflächenqualität der geschliffenen wendelförmigen Spannuten ist insbesondere im Hinblick auf den späteren Einsatz der Zerspanwerkzeuge von besonderer Bedeutung. Hier kommt der Fähigkeit, durch eine sehr gute Oberflächenqualität einen möglichst reibungsfreien Spanabtransport durch die Nut zu gewährleisten und eine gute Basis für eine eventuell folgende Beschichtung des Zerspanwerkzeuges sicherzustellen, eine wichtige Bedeutung zu. Die Ergebnisse zur Analyse der gemittelten Rautiefe R_z in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit zeigen, dass eine größere Diamantkorngröße generell auch die größeren Rautiefen erzeugt. So generiert die Schleifscheibe des Typs D64 C100 Q-Flute+D im gesamten untersuchten Parameterraum die größten gemittelten Rautiefen, wohingegen die beiden Schleifscheiben

mit kleinerer Korngröße die geringeren Rautiefen erzeugten. Ein Vergleich zwischen den Schleifscheibentypen D46 C75 Q-Flute² und D54 C75 Q-Flute² zeigt einen wesentlich geringeren Effekt auf als der Vergleich mit der Schleifscheibe, die neben einer Korngröße von D64 auch eine erhöhte Kornkonzentration sowie ein abgeändertes Bindungssystem aufweist. Die Diamantkorngröße der Schleifscheiben hat einen direkten Einfluss auf die resultierende Einzelkornspannungsdicke die mit ansteigender Korngröße ebenfalls zunimmt. Neben der Korngröße übt auch die Vorschubgeschwindigkeit einen Einfluss auf die erreichbare Oberflächenqualität aus. In Abbildung 5-7 ist ersichtlich, dass es mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu einer Verschlechterung der gemittelten Rautiefe Rz kommt. Dies ist ebenfalls in einer mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zunehmenden Einzelkornspannungsdicke, begründet und spiegelt die in der Literatur zu Grunde liegenden Ergebnisse wider. So kann nach Betrachtung der zuvor gezeigten Ergebnisse gefolgert werden, dass mit diesen hybriden Schleifscheibenbindungssystemen über eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit eine gegenüber dem aktuellen Stand der Technik und dem Einsatz von Kunstharzbindungssystemen deutliche Steigerung des bezogenen Zeitspanvolumens prozesssicher bis auf einen Wert von $Q'_w = 10,7 \text{ mm}^3/\text{mms}$ realisiert werden kann. Der Vergleich mit konkreten Werten gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen und zum Teil komplexen Eingriffsverhältnisse als schwierig. Es kann jedoch gefolgert werden, dass im aktuellen Stand der Technik mit kunstharzgebundenen Schleifscheiben Werte von $Q'_w = 5 \text{ bis } 6 \text{ mm}^3/\text{mms}$ realistisch sind.

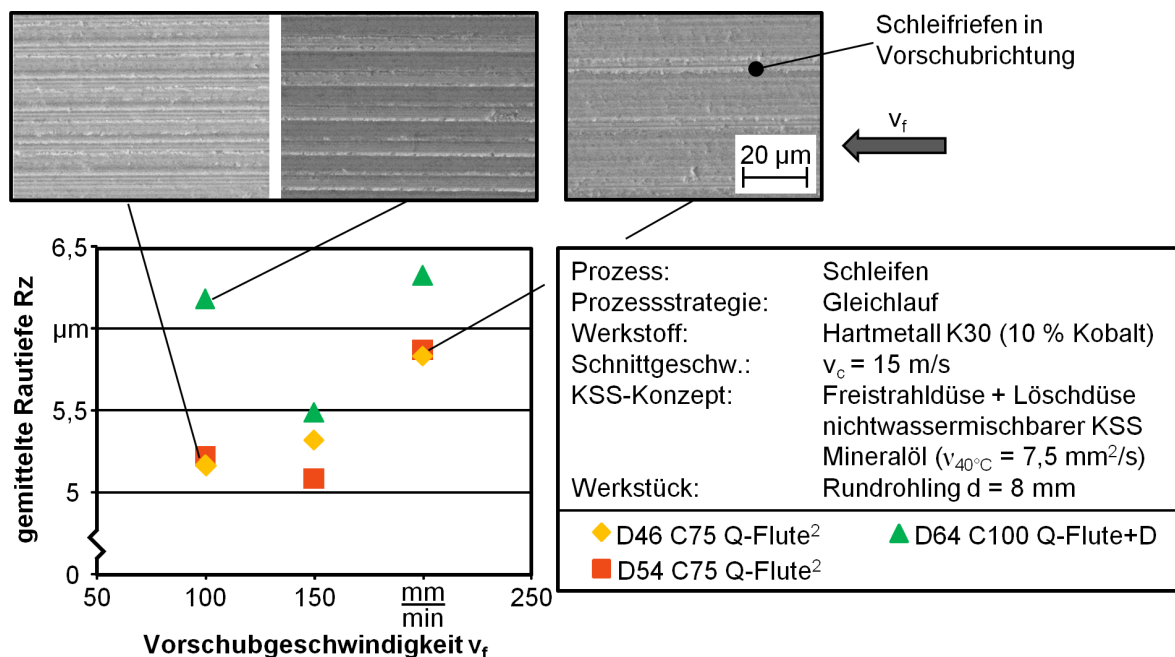


Abbildung 5-7: Gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

5.1.2 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Neben der Vorschubgeschwindigkeit ist die Schnittgeschwindigkeit die wohl wichtigste prozessbestimmende Größe beim Schleifen von Spannuten. Im nachfolgenden Kapitel soll deshalb in Analogie zur Vorschubgeschwindigkeit der Einfluss einer Variation der Schnittgeschwindigkeit auf den Prozess des Bohrernutenschleifens analysiert werden. Bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und dabei unverändertem Zeitspanvolumen geraten pro Zeitintervall mehr Einzelkörner in Kontakt zum Werkstück und die Spandicke pro Schneidkorn sinkt ebenso wie die Einzelkornbelastung. Im gleichen Rahmen nimmt die im

Prozess entstehende Reibung zwischen Diamantkorn, Spänen und Werkstück deutlich zu. Dies resultiert sowohl in einer Zunahme der Schleifkräfte als auch der thermischen Werkstückbelastung [Tön97, Hüb11]. **Abbildung 5-8** zeigt die Schleiftangentialkraft F_t unter Variation der Schnittgeschwindigkeit v_c und der Vorschubgeschwindigkeit v_f auf. Die Schnittgeschwindigkeit wurde dabei in einem für das Hartmetallschleifen üblichen Bereich von $v_c = 15 \text{ m/s}$ bis $v_c = 25 \text{ m/s}$ variiert. Vorangegangene Versuche mit erheblich erhöhter Schnittgeschwindigkeit haben aufgezeigt, dass eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit über den hier betrachteten Wertebereich eine signifikant negative Auswirkung durch eine Erhöhung der Prozesskräfte und erheblichen Schleifscheibenverschleiß auf den Schleifprozess ausübt. Im betrachteten Prozess steigt die Schleiftangentialkraft mit steigender Schnittgeschwindigkeit ebenfalls an. Dies trifft sowohl für alle untersuchten Schleifscheiben als auch für unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten zu. Hinsichtlich der untersuchten Schleifscheibentypen kann festgestellt werden, dass bei dem Typ D54 C75 Q-Flute² bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 100 \text{ mm/min}$ der Anstieg der Schleiftangentialkraft bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15 \text{ m/s}$ auf $v_c = 25 \text{ m/s}$ mit am höchsten ausfällt. Bei der betrachteten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150 \text{ mm/min}$ erzeugen sowohl der Typ D54 C75 Q-Flute² als auch der Typ D64 C100 Q-Flute+D mit $\Delta F_t \approx 20 \text{ N}$ die höchsten Differenzen.

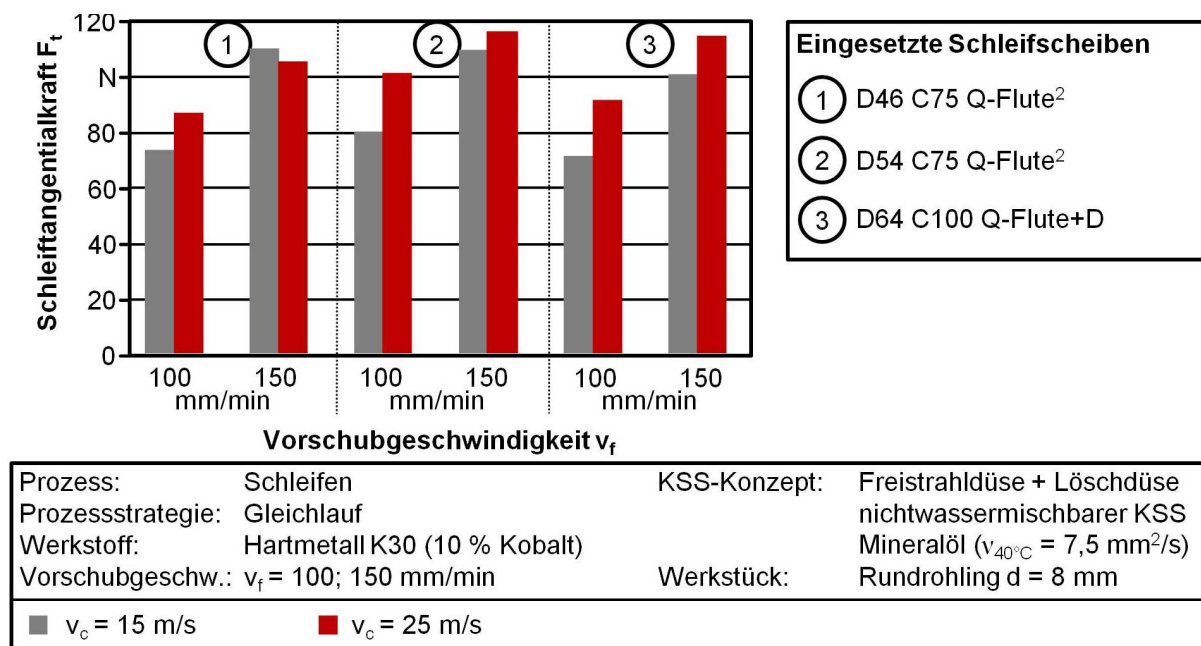


Abbildung 5-8: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Schleiftangentialkräfte

Somit ruft die Schleifscheibe D46 C75 Q-Flute² bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit die geringsten Anstiege innerhalb der gemessenen Schleiftangentialkräfte hervor. Ursächlich hierfür zeichnet sich in der Hauptsache die im Vergleich geringere Korngröße, die dafür sorgt, dass sich bei gleichbleibender Kornkonzentration mehr Schleifkörner in der Bindung befinden. Eine verringerte Korneindringtiefe und eine damit verbunden verminderte Spannungsdicke führt im betrachteten Parameterbereich zu einer geringeren Differenz der Schleiftangentialkräfte bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit.

Auch der Schleifscheibenverschleiß unterliegt einer Beeinflussung durch die Schnittgeschwindigkeit. In der Darstellung der ausgewerteten Verschleiß-Abbildkörper zeigt sich, dass sich bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit für unterschiedliche Vorschub-

geschwindigkeitsbereiche gegensätzliche Tendenzen ergeben. So kommt es bei der betrachteten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min und einer Steigerung der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15$ m/s auf $v_c = 25$ m/s zu keiner nennenswerten Veränderung des radialen Schleifscheibenverschleißes. Wohingegen sich bei der betrachteten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150$ mm/min eine steigende Tendenz abzeichnet (**Abbildung 5-9**). Generell führt eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit, wie zuvor bereits erwähnt wurde, zu einem Anstieg der pro Zeitintervall im Eingriff befindlichen Abrasivkörner und somit zu einer Verringerung der Einzelkornbelastung (Kornverschleiß). Im gleichen Zuge nehmen die im Prozess ablaufenden Reibungsvorgänge mit steigender Schnittgeschwindigkeit im Allgemeinen zu (Bindungsverschleiß). Bei der betrachteten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min kommt es, hervorgerufen durch die im Vergleich mit herkömmlichen Schleifscheiben deutlich verschleißbeständigeren hybriden Bindungssysteme, zu keinem nennenswerten Anstieg des Bindungsverschleißes und so auch mit steigender Schnittgeschwindigkeit zu nahezu konstanten Werten für den radialen Schleifscheibenverschleiß. Bei Betrachtung der bei höherer Vorschubgeschwindigkeit, einhergehend mit einem gestiegenem Zeitspanvolumen, erzielten Ergebnisse zeigt sich, dass es aufgrund der gesteigerten Vorschubgeschwindigkeit zu einem gleichbleibenden Zerspanvolumen pro Einzelkorn kommt. Die Steigerung des Zeitspanvolumens führt jedoch zu einer Vergrößerung der entstehenden thermischen Schleifscheibenbelastung. Dies resultiert mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit in einem Anstieg des radialen Schleifscheibenverschleißes.

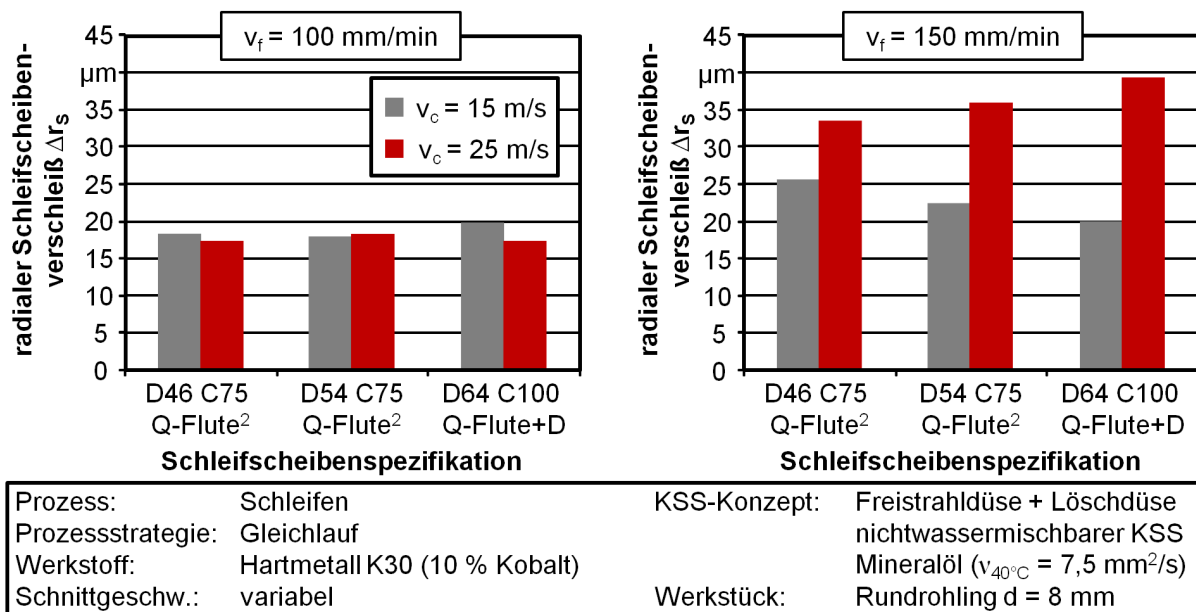


Abbildung 5-9: Schleifscheibenverschleiß in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Abschließend soll der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die resultierenden Oberflächenrauigkeiten analysiert werden. Hier zeigt **Abbildung 5-10**, dass es mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit zu einer Abnahme der gemittelten Rautiefe R_z kommt.

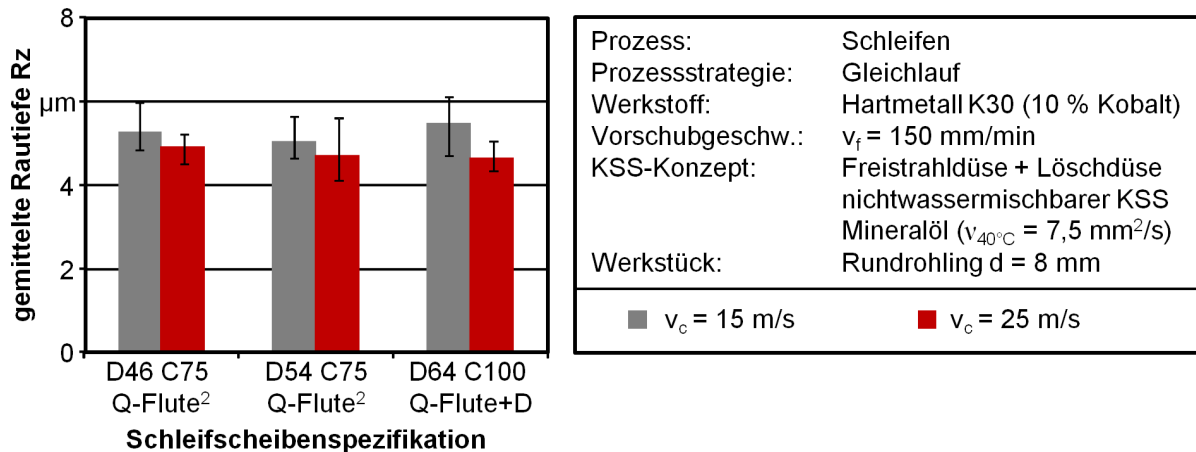


Abbildung 5-10: Gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Diese Ergebnisse decken sich mit denen von *Brinksmeier und Minke*, die aufzeigten, dass sich bei konstantem Zeitspannvolumen mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit die Einzelkornsnitttiefe und infolge dessen die Einzelkornspandicke verringert und dies in einer besseren Oberflächengüte mündet [BM93]. Bei Betrachtung der eingesetzten Schleifscheiben fällt auf, dass diese unabhängig von der Schleifscheibenspezifikation gemittelte Rautiefen in einem Bereich von $Rz = 5 \mu\text{m}$ bis $Rz = 5,5 \mu\text{m}$ erzeugen und somit hinsichtlich der erzielbaren Rauheiten dicht beieinander liegen. Ein Anstieg der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15 \text{ m/s}$ auf $v_c = 25 \text{ m/s}$ führt bei allen Schleifscheiben unabhängig von Korngröße, Kornkonzentration sowie Bindungszusammensetzung zu einer Verbesserung der gemittelten Rautiefe. So kann festgestellt werden, dass sich im untersuchten Parameterraum eine steigende Schnittgeschwindigkeit positiv auf die Oberflächenrauigkeit in Form der analysierten gemittelten Rautiefe Rz auswirkt.

5.1.3 Einfluss der Kühlschmierstoffzuführstrategie

Neben den unmittelbaren Prozesseinstellgrößen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit ist auch die Prozessperipherie und hier vor allem die Kühlschmierstoffversorgung bei der Bearbeitung der Hartmetallrohlinge besonders wichtig. Gerade vor dem Hintergrund einer thermischen Schädigung der Hartmetalle und einer energieeffizienten Fertigung bietet die Anpassung der Kühlschmierstoffversorgung erhebliches Optimierungspotenzial. Das Werkzeugschleifen ist geprägt von einer Vielzahl an einzelnen Bearbeitungsoperationen, zu deren Realisierung eine große Vielfalt an Schleifscheibengestalten eingesetzt wird. Bei dem Nutenschleifen werden neben den zylindrischen 1A1-Schleifscheibenformen vor allem Formscheiben eingesetzt, um mit dem Nutenschleifprozess auch gleichzeitig die Form der Hauptschneiden beeinflussen zu können. Dies führt, insbesondere in der Einzelteilfertigung und bei Kleinserien, zu einer notwendigen Flexibilität der Kühlschmierstoffversorgung an der Wirkstelle. Erschwerend kommt hinzu, dass in der industriellen Anwendung oftmals sogenannte Schleifscheibenpakete zur Verwendung kommen. Hierbei befinden sich mehrere Schleifscheiben auch unterschiedlicher Gestalt auf einem Aufnahmedorn. Auch hier muss die Bereitstellung einer optimalen Menge an Kühlschmierstoff sichergestellt werden. Aus dem Grund der besonderen Flexibilität und einfachen Handhabung findet die Freistrahldüse die größte Verbreitung innerhalb der industriellen Anwendungen. Der Stand der Technik zeigt, dass umfangreiche Arbeiten zum Thema der Kühlschmierstoffe und deren Zuführung zur Wirkstelle beim Schleifen vorliegen, diese sich jedoch fast ausschließlich mit dem Flachsleifen beschäftigen und somit die

Besonderheiten des Nutenschleifens nicht berücksichtigen. Aus diesem Grund soll nachfolgend die Zuführung mittels unterschiedlicher Kühlschmierstoffdüsen beim Schleifen von wendelförmigen Spannuten näher betrachtet werden. So soll eine Analyse hinsichtlich der resultierenden Kräfte sowie der entstehenden Oberflächenrauigkeiten in Abhängigkeit des gewählten Düsenkonzeptes durchgeführt werden.

Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen zeigen vier unterschiedliche Kühlschmierstoffdüsen und deren Einflussmöglichkeiten auf den Nutenschleifprozess. Neben der Freistrahldüse, die in Analogie zu der Anwendung in der Industrie aus mehreren zur Wirkstelle gebogenen Kupferrohren gleichen Querschnitts sowie einer Löschdüse besteht und als Referenz dient, wurden eine Nadeldüse, eine Schuhdüse sowie eine Kammerdüse eingesetzt. **Abbildung 5-11** zeigt sowohl die jeweiligen Installationen innerhalb der Versuchsmaschine als auch die Zuführung des Kühlschmierstoffes durch die jeweiligen Düsen im Querschnitt.

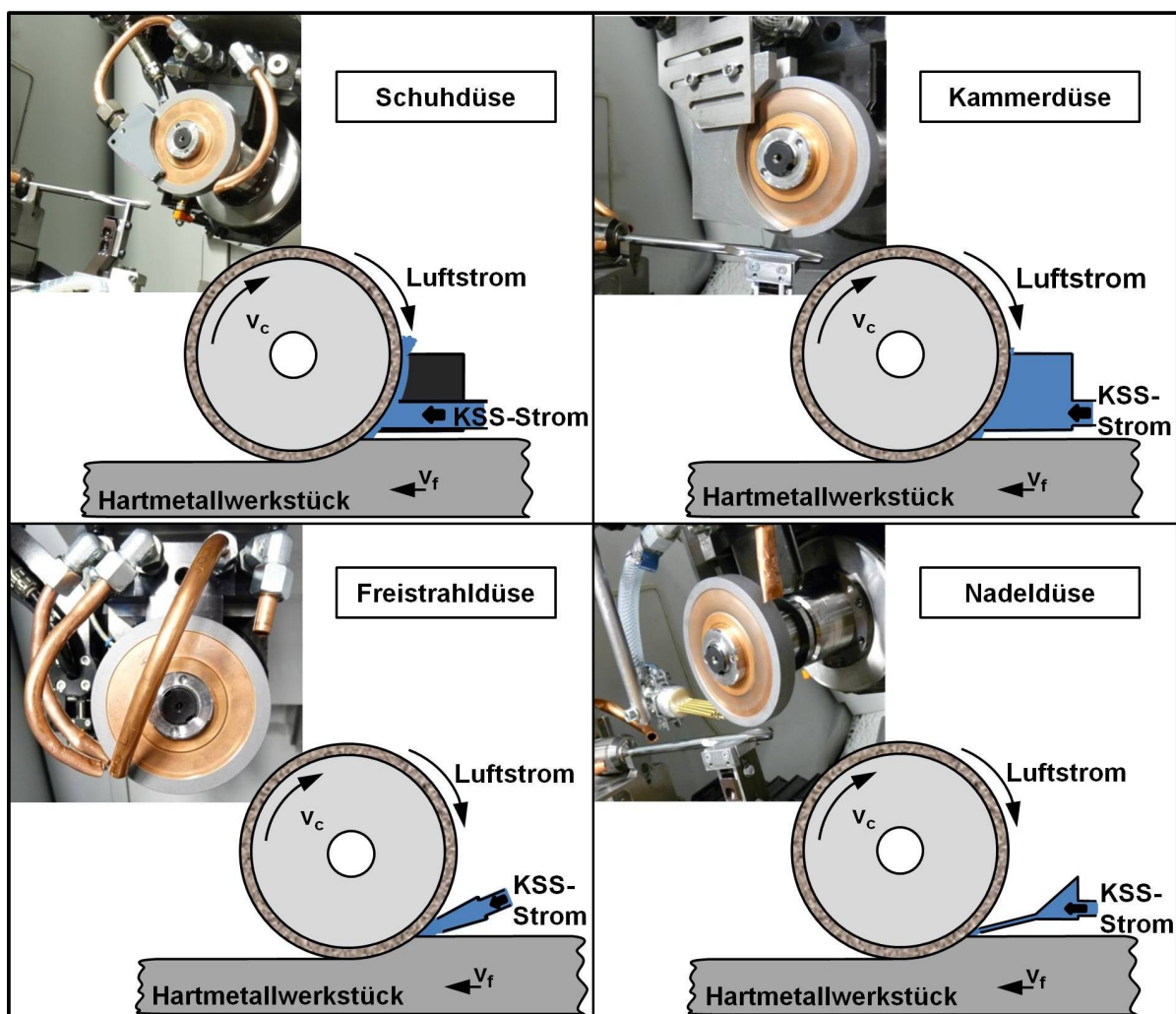


Abbildung 5-11: Vergleich der eingesetzten KSS-Düsen-Konzepte

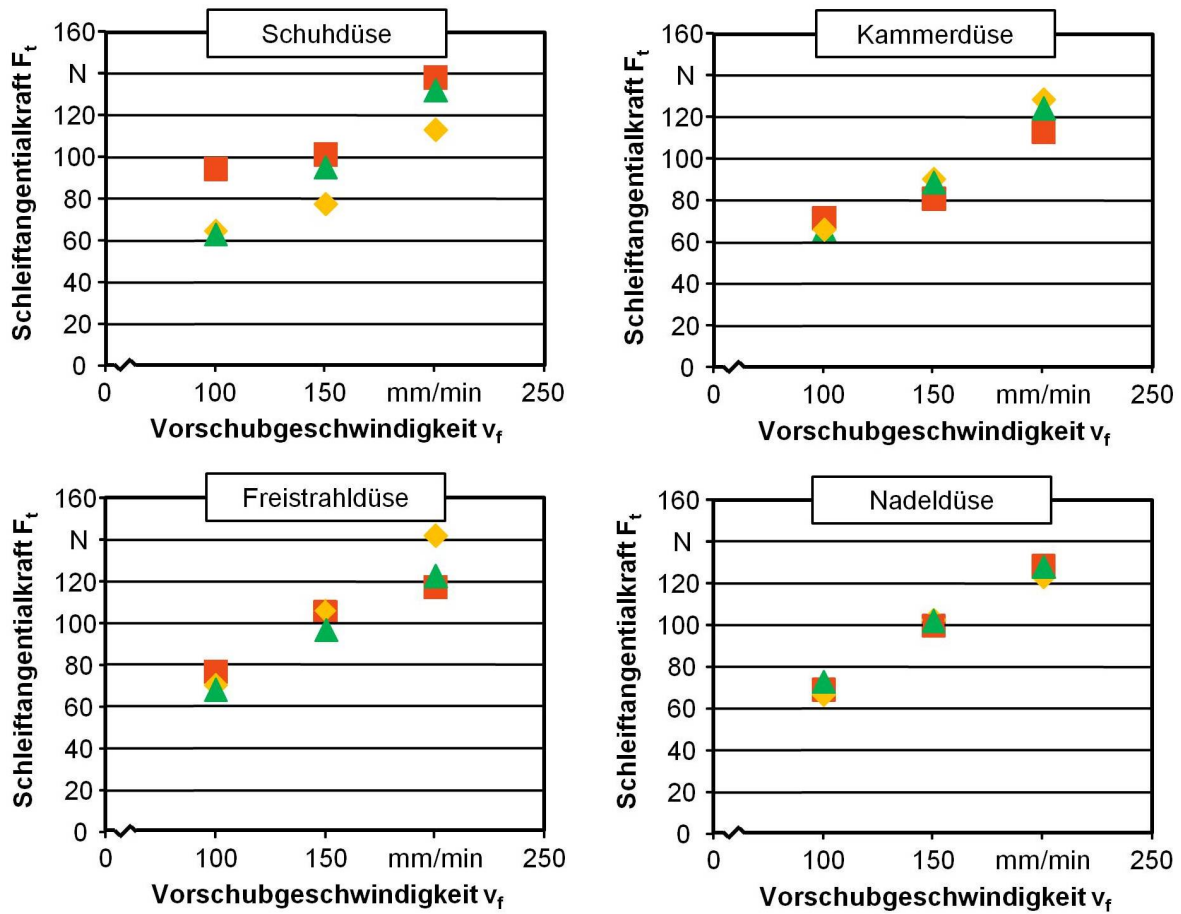
So wurde bei der Installation darauf geachtet, mittels einer speziell konstruierten Vorrichtung eine reproduzierbare Positionierung der Düsen sicherzustellen und eine optimale Zuführung zum Schleifspalt zu gewährleisten. Kammer- und Schuhdüse unterscheiden sich dabei hinsichtlich des Düsenquerschnitts und des innerhalb der Düse befindlichen Kühlschmierstoffvolumens. Bei Anfertigung dieser Düsentypen wurde desweiteren darauf geachtet, dass die

Schleifscheiben auch an den Stirnflächen von den Düsen umschlossen sind, so kann nahezu der vollständige zur Verfügung stehende Volumenstrom an Kühlschmierstoff zur Wirkstelle geleitet werden. Die Nadeldüse besteht aus neun Messingrohren mit einem jeweiligen Querschnitt von 1 mm, die in zwei Reihen über die Schleifscheibenbreite verteilt in einem Aluminiumgehäuse angebracht werden. Während der Durchführung der Versuche kam die an dem Kühlschmierstofftank der Maschine installierte Tauchpumpe der Herstellerfirma Brinkmann Pumps vom Typ TC 160/740+001 mit einer Leistung von $P = 2,6$ kW, einem maximalen Volumenstrom von $\dot{V} = 160$ l/min und einer Förderhöhe von 52 m zum Einsatz. Der Kühlschmierstoff wurde mittels Kühlaggregat auf $T = 18,6$ °C temperiert, so dass bei den Versuchen konstante Ausgangsbedingungen sichergestellt werden konnten.

In Analogie zu den vorangegangenen Untersuchungen soll bei der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kühlschmierstoffdüsen die Schleiftangentialkraft als wesentliche Kraftkomponente ausgewertet werden, da diese Aufschluss über die in den Schleifprozess eingebrachte Leistung gibt und somit ein Indiz für die Temperaturbelastung des Werkstückes darstellt. So können Aussagen über die Leistungsfähigkeit einer Kühlschmierstoffstrategie getroffen werden und Optimierungspotenziale hinsichtlich einer möglichen Reduzierung von Kühlschmierstoffdruck oder -volumenstrom aus Gründen einer energieeffizienten Fertigung abgeleitet werden. Vor der Betrachtung der erzielten Ergebnisse soll vorangestellt werden, dass der maximale Volumenstrom an Kühlschmierstoff, der durch den Schleifspalt fließt und somit effektiv die Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstückrohling kühlt, limitiert ist. Die maximale Menge wird dabei von den geometrischen Bedingungen innerhalb der Kontaktzone und damit in erheblichem Maße von der Oberflächentopografie der Schleifscheibe beeinträchtigt. So beträgt der maximal durch den Schleifspalt transportierte Anteil des eingesetzten Kühlschmierstoffes beim Tiefschleifen laut [WMW06] und [BHW00] nur 4 bis 14 %. [WG08] gibt hier einen Wert von 26 bis 55 % an und [WBH06] nennt etwa 30 % realistisch. Der nicht genutzte Teil wird über die Schleifscheibe abgeschleudert und führt zu einer mitunter starken Aerosolbildung innerhalb der Bearbeitungsmaschine. **Abbildung 5-12** stellt die bei Variation der Kühlschmierstoffdüse gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Schleiftangentialkraft dar.

Nach Installation der jeweiligen Kühlschmierstoffdüse in der Versuchsmaschine wurden die Vorschubgeschwindigkeiten je Schleifscheibentyp gesteigert, bis es im Prozess zu einer starken und plötzlich auftretenden Rauchentwicklung in Verbindung mit einer deutlichen optischen Verfärbung der Schleifscheibenoberfläche kam. Dies galt als Abbruchkriterium. Aus Gründen der Vergleichbarkeit ist in **Abbildung 5-12** der Vorschubgeschwindigkeitsbereich von $v_f = 100$ mm/min bis $v_f = 200$ mm/min dargestellt. Insbesondere mit der Schuhdüse ließen sich aber trotz der höchsten resultierenden Schleiftangentialkräfte auch Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu $v_f = 300$ mm/min realisieren. Dies kann damit begründet werden, dass sich innerhalb der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück ein hydrodynamischer Druck aufbaut, der mit steigender Kühlschmierstoffaustrittsgeschwindigkeit ansteigt [KB97b, BHW00, KB97a]. Dieser führt zu steigenden Schleiftangentialkräften, obwohl die Düsen-Schleifscheiben-Prozessparameterkombination die höchste Leistungsfähigkeit für eine Steigerung des Zeitspannvolumens aufweist. Hinsichtlich der ausgewerteten Schleiftangentialkraft lassen sich generelle Unterschiede zwischen den einzelnen Düsenarten ausmachen. Bevor jedoch näher auf die gemessenen Kräfte eingegangen wird, sollen die grundlegenden Unterschiede zwischen den Kühlschmierstoffdüsen erläutert werden. Innerhalb der hier dargestellten Untersuchungen wurde kein

Kühlschmierstoffvolumenstrom und Kühlschmierstoffdruck am Düsenaustritt gemessen. Es lassen sich aber auf Basis der im Stand der Technik dargelegten umfangreichen Arbeiten in diesem Gebiet generelle Unterschiede zwischen den Düsen ausmachen.



Prozess:	Schleifen	KSS-Konzept:	variabel
Prozessstrategie:	Gleichlauf		nichtwassermischbarer KSS
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
◆ D46 C75 Q-Flute ²		▲ D64 C100 Q-Flute+D	
		■ D54 C75 Q-Flute ²	

Abbildung 5-12: Einfluss der KSS-Düsengestalt auf die Schleiftangentialkräfte

So liegt der Unterschied im geförderten Volumenstrom in einem vergleichsweise kleinen Wert bei der Nadeldüse und in im Vergleich höheren Werten bei Kammer- und Schuhdüse. Hinsichtlich des Kühlschmierstoffdrucks am Düsenaustritt ergibt sich ein gegensätzliches Bild. Hier liefert die Nadeldüse, gefolgt von der Freistrahldüse, die höchsten Werte, wohingegen bei Kammer- und Schuhdüse der Kühlschmierstoffdruck vergleichsweise gering ausfällt. Auf Basis dieser generellen Annahmen soll die nachfolgend dargestellte Auswertung der Schleiftangentialkraftmessung durchgeführt werden.

Bei der Kammer- sowie der Schuhdüse kann ein progressiver Anstieg der Schleiftangentialkraft mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit detektiert werden, wohingegen es bei der Nadel- und Freistrahldüse zu einem linearen Anstieg der Kräfte kommt. Bei genauerer Betrachtung der mit der Nadeldüse erzielten Ergebnisse kann festgestellt werden, dass alle drei Schleifscheiben nahezu identische Kräfte hervorrufen. Dies ist bei den weiteren Düsenarten nicht der Fall. Bei Verwendung der Schuhdüse

verursacht der Schleifscheibentyp D46 C75 Q-Flute² die geringsten Kräfte, wohingegen bei Verwendung der Kammerdüse der Schleifscheibentyp D54 C75 Q-Flute² hinsichtlich der Kräfte mit steigender Vorschubgeschwindigkeit einen im Vergleich mit den weiteren analysierten Schleifscheiben geringeren Wert annimmt. Diese Tatsache steht in direktem Zusammenhang mit der Schleifscheibenoberfläche und der Fähigkeit der jeweiligen Düsen, diese mit Kühlschmierstoff in der Art zu versorgen, dass dieser durch die Schleifscheibenrotation zur Wirkstelle zwischen Schleifscheibe und Werkstück transportiert wird. Ein Vergleich der gemessenen Kräfte zeigt, dass bei geringeren Vorschubgeschwindigkeiten die Schuhdüse ein Minimum bei $F_t = 62 \text{ N}$ aufweist, wohingegen bei der höchsten dargestellten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200 \text{ mm/min}$ die Kammerdüse mit einem Wert von $F_t = 111 \text{ N}$ die im Vergleich geringsten Schleiftangentialkräfte hervorruft. Offensichtlich führt die Fähigkeit der Kammerdüse, einen großen Volumenstrom zur Verfügung zu stellen und diesen durch die Umschließung der Düse konzentriert der Wirkstelle zuzuführen, zu im Vergleich geringeren Tangentialkräften im Schleifprozess. Begünstigt wird dies zudem durch die konstruktive Gestaltung der Düse, die den Kühlschmierstoff im Düseninnern über eine lange Strecke auf Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beschleunigt, um das Luftpolster durchbrechen zu können. Die gute Versorgung von Schuh- und Kammerdüsen der Wirkstelle mit Kühlschmierstoff und hier insbesondere die Umschließung der Schleifscheibe und damit einhergehend optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Volumenstromes stellten schon *Wittmann, Brinksmeier und Heinzl* in ihren Untersuchungen heraus [WBH06].

Neben einer Auswirkung auf die resultierenden Schleiftangentialkräfte hat die Auswahl der Kühlschmierstoffdüse einen Einfluss auf die Oberflächenrauheit, die durch den Schleifprozess entsteht (**Abbildung 5-13**).

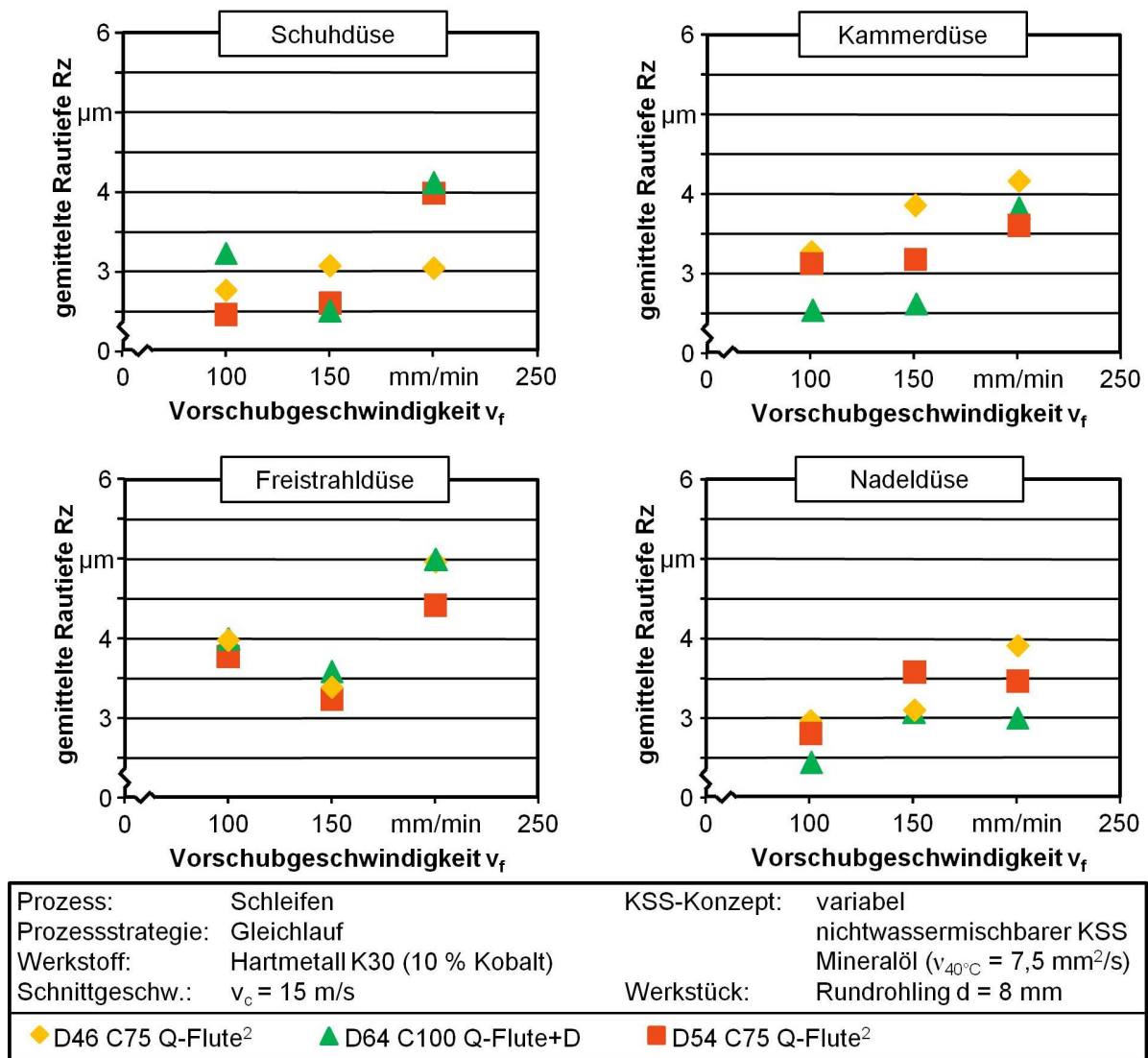


Abbildung 5-13: Einfluss der KSS-Düsengestalt auf die gemittelte Rautiefe Rz

Die Unterschiede hinsichtlich der erzielbaren gemittelten Rautiefen fallen deutlicher aus als die gemessenen Unterschiede in den Tangentialkräften. Bei einem Vergleich der Düsen untereinander wird deutlich, dass insbesondere die Nadeldüse und die Schuhdüse über den analysierten Vorschubgeschwindigkeitsbereich hinweg geringere gemittelte Rautiefen erzeugen als Kammer- und Freistrahldüse. Sowohl bei der Nadel- als auch bei der Schuhdüse kann von einer im Vergleich hohen Kühlschmierstoffaustrittsgeschwindigkeit aus der Düse ausgegangen werden. Hierdurch kommt es zu einer verbesserten Reinigung der Schleifscheibenoberfläche von Spanmaterial, welches im Anschluss nicht durch die Wirkstelle transportiert wird, und in Folge dessen zu einer verbesserten Oberflächengüte. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei dem analysierten Schleifprozess die Kühlschmierstoffaustrittsgeschwindigkeit aufgrund der zuvor bereits angesprochenen Reinigungswirkung der Schleifscheibe und der besseren Benetzbarkeit der Bindungsoberfläche die größere Rolle spielt als die zur Verfügung gestellte Menge an Kühlschmierstoff.

5.1.4 Einfluss der Hartmetallsorte

Neben der Wahl der Prozessparameter Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit hat auch die Zusammensetzung des zu bearbeitenden Hartmetalls

einen Einfluss auf die resultierenden Kräfte, den Schleifscheibenverschleiß und die entstehende Oberflächenrauigkeit. Dies stellte schon *von Brevern* in seinen Untersuchungen heraus. Er kommt zu dem Schluss, dass es in Abhängigkeit der untersuchten Hartmetallsorte zu einem variierenden Vermögen des Schneidkorns führt, in den Werkstoff einzudringen, womit sich die kritische Spannungsdicke pro Korn verändert [Bre07]. An dieser Stelle soll nachfolgend der Einfluss der Hartmetallzusammensetzung auf die Schleiftangentialkräfte analysiert werden. Zur Durchführung der Versuche wurden neben dem schon zuvor eingesetzten Hartmetall der Anwendungsgruppe K 30 (TSM 33; 10 % Co) die in Tabelle 3.1 dargestellten Hartmetalle der Anwendungsgruppen K 20 (TSM 20; 7,5 % Co) und K 40 (AF K 44 EF; 12 % Co) mit heterogenen Zusammensetzungen bezüglich der prozentualen Anteile von Hartstoffphase und Binder geschliffen. Die Zerspanbarkeit hängt dabei nicht nur von der Zusammensetzung des Verbundmaterials, sondern auch von der verwendeten Größe der Wolframkarbidkörner ab. Um in den durchgeführten Analysen diesen Effekt ausschließen zu können, wiesen alle untersuchten Hartmetalle eine mittlere Korngröße von $d_k = 0,5$ bis $0,8 \mu\text{m}$ auf und sind somit als Feinstkornhartmetalle eingestuft. Nachfolgend kann der Einfluss der Hartmetallzusammensetzung auf die resultierenden Schleiftangentialkräfte bei Bearbeitung mittels hybridgebundener Diamantschleifscheiben betrachtet werden. Ausgangsbasis bilden wie zuvor Rundrohlinge mit einem Durchmesser von $d_w = 8 \text{ mm}$. **Abbildung 5-14** zeigt die Resultate der Schleifversuche auf.

Unabhängig vom zu bearbeitenden Hartmetall, führt eine kleinere Diamantkorngröße zu tendenziell geringeren Schleiftangentialkräften und bestätigt das zuvor bereits detektierte Einsatzverhalten der hybridgebundenen Schleifscheiben. Bei einer Variation der Hartmetallzusammensetzung fällt auf, dass bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ die Hartmetallsorten AF K 44 EF und TSM 33 mit den geringsten Anteilen an Wolframkarbidpartikeln die geringsten Schleiftangentialkräfte produzieren. Offensichtlich können die Diamantkörner der Schleifscheiben bei den im Vergleich geringen zu bewältigenden Einzelkornspannungsvolumina besser in den Materialverbund eindringen und die Zerspanarbeit leisten.

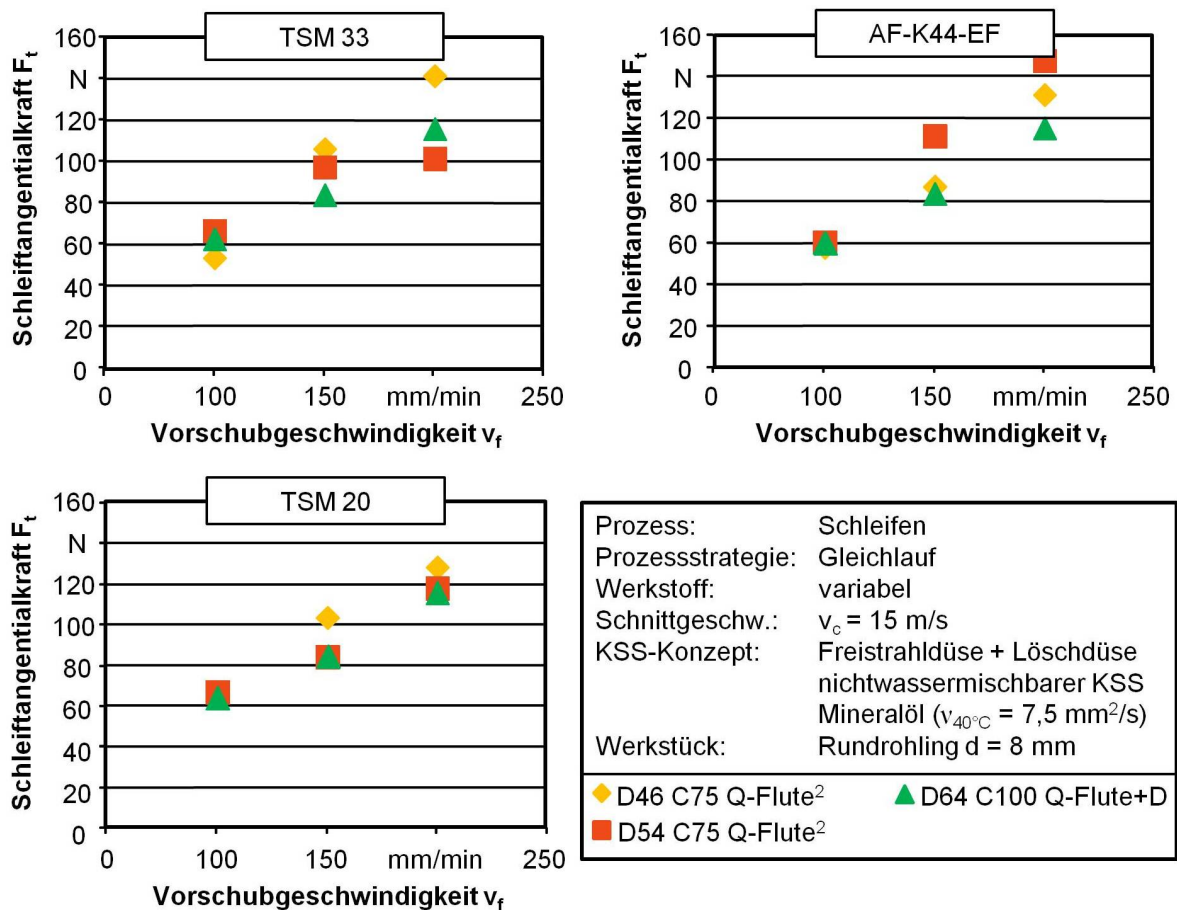


Abbildung 5-14: Einfluss der Hartmetallzusammensetzung auf die Schleiftangentialkräfte

Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ist jedoch ersichtlich, dass der höchste prozentuale Anteil an Wolframkarbid im Hartmetall der Sorte TSM 20 zu geringeren Schleiftangentialkräften führt. Die Kombination aus erhöhten Einzelkornspannungsvolumen und höherer Materialhärte führt zu einem verbesserten Vermögen der Schneidkörner, in das Material einzudringen und ruft somit die im Vergleich zu den weiteren untersuchten Hartmetallzusammensetzungen niedrigeren Kräfte hervor. Es ist allerdings anzumerken, dass die detektierten Unterschiede bezüglich der Schleiftangentialkraft über einen weiten Bereich der untersuchten Prozessparameter nur geringe Varianzen aufweisen. Insgesamt kann von einem stabilen Prozessverhalten der hybridgebundenen Schleifscheiben bei einer Variation der Hartmetallzusammensetzung ausgegangen werden.

5.1.5 Einfluss der Prozessparameter auf die Bauteilrandzone

Zur Beurteilung von Schleifprozessen und hier insbesondere ihrer Leistungsfähigkeit spielt neben den zuvor bereits im Detail untersuchten Aspekten die Werkstückschädigung eine bedeutende Rolle. Besonders mit der Kombination aus der Bearbeitung eines Verbundwerkstoffes und der durch das Schleifen hinlänglich bekannten Problematik der hohen Prozesstemperaturen kann es hier zu den im Stand der Technik bereits angesprochenen Werkstückschädigungen kommen. Üblicherweise ist dies messbar in Form von Eigenspannungen und auftretenden Rissen sowohl an der Werkstückoberfläche als auch innerhalb des Werkstoffverbundes. *Eyrisch* beschreibt dabei vier unterschiedliche Schädigungsformen, den transkristallinen Bruch, den duktilen Bruch durch die Kobaltbereiche, den Grenzflächenbruch entlang der Phasengrenzen zwischen Wolfram-

karbid und Kobalt sowie den Grenzflächenbruch entlang der Korngrenzen zwischen Wolframkarbid und Wolframkarbid [Eyr09]. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurden sowohl die Oberflächen der Spannuten als auch das Hartmetallgefüge optisch auf Rissbildung hin untersucht. Nachfolgend dargestellt sind die mittels Rasterelektronenmikroskop analysierten Gefügeschliffbilder des Hartmetalls bei unterschiedlichen Prozessbedingungen (**Abbildung 5-15**).

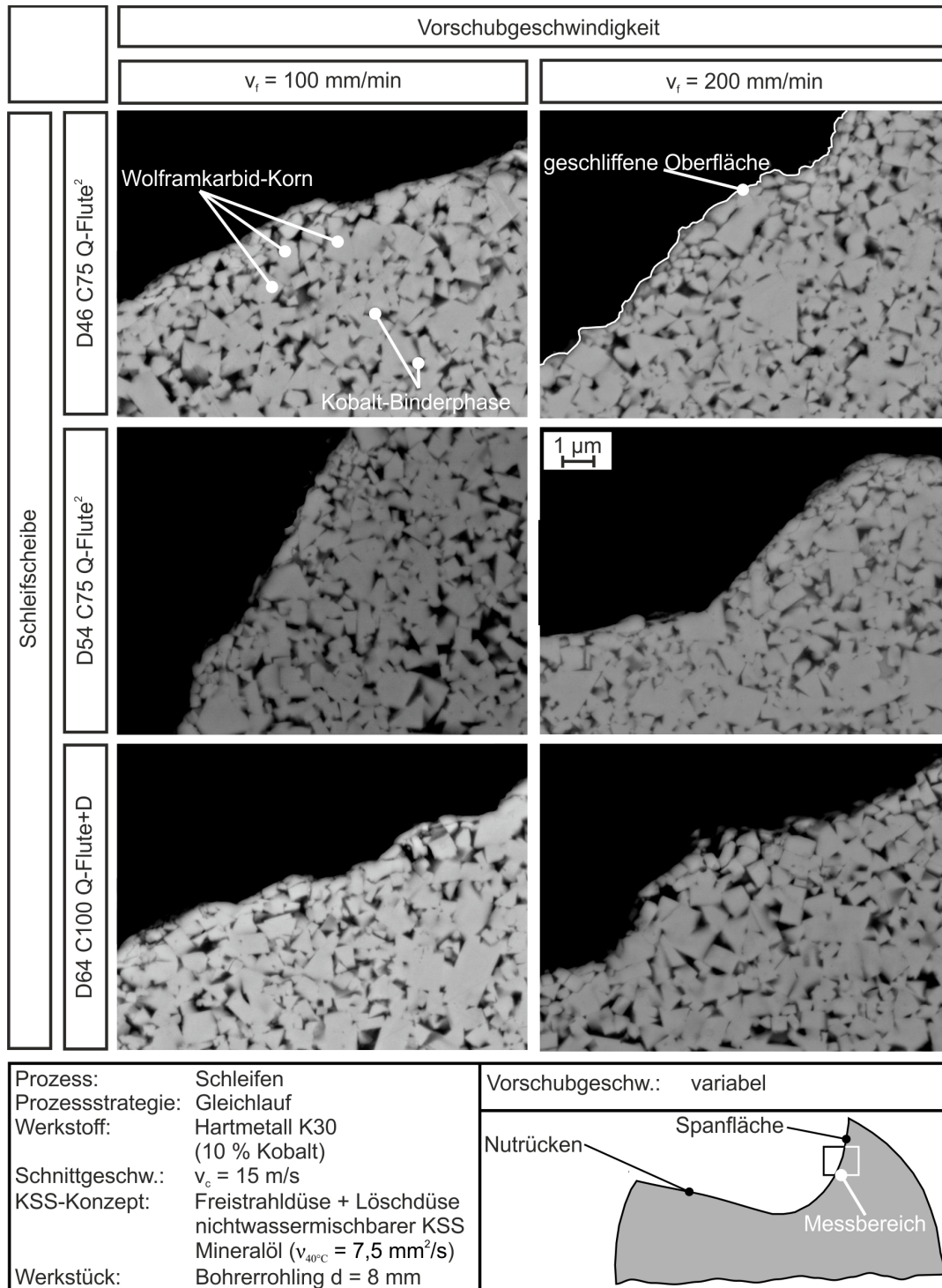


Abbildung 5-15: Analyse des Hartmetallgefüges bei Vorschubvariation

Um neben der Untersuchung der Spanntoberfläche auf augenscheinlich detektierbare Rissbildung auch das Hartmetallgefüge untersuchen zu können, wurden Proben, die entlang

des Werkstückquerschnitts gesägt wurden, der zuvor geschliffenen Bohrwerkzeuge mittels leitfähiger Einbettmasse präpariert, anschließend poliert und so das Hartmetallgefüge sichtbar gemacht. Es wurden dabei sowohl die Spanfläche beziehungsweise das Werkstoffgefüge unterhalb dieser als auch das Gefüge unterhalb des Nutrückens analysiert. Gezeigt wird das Werkstoffgefüge im Bereich der Spanfläche der geschliffenen Nuten. Es kann unabhängig von der gewählten Schleifscheibenspezifikation und der gewählten Vorschubgeschwindigkeit keine Rissbildung detektiert werden. Auch zusätzlich durchgeführte EDX-Analysen der Werkstückrandzone ergeben eine gleichmäßige Verteilung zwischen Kobaltbinder und Wolframkarbid, so dass eine signifikante Kobaltauslösung aus der geschliffenen Hartmetallrandzone ebenfalls ausgeschlossen werden kann. Neben der Vorschubgeschwindigkeit hat gerade die Schnittgeschwindigkeit durch die mit steigender Schnittgeschwindigkeit vermehrt ablaufenden Reibungsvorgänge einen signifikanten Einfluss auf die entstehenden Prozesstemperaturen. So soll abschließend an dieser Stelle auch eine mögliche Hartmetallschädigung durch eine variierte Schnittgeschwindigkeit betrachtet werden (**Abbildung 5-16**).

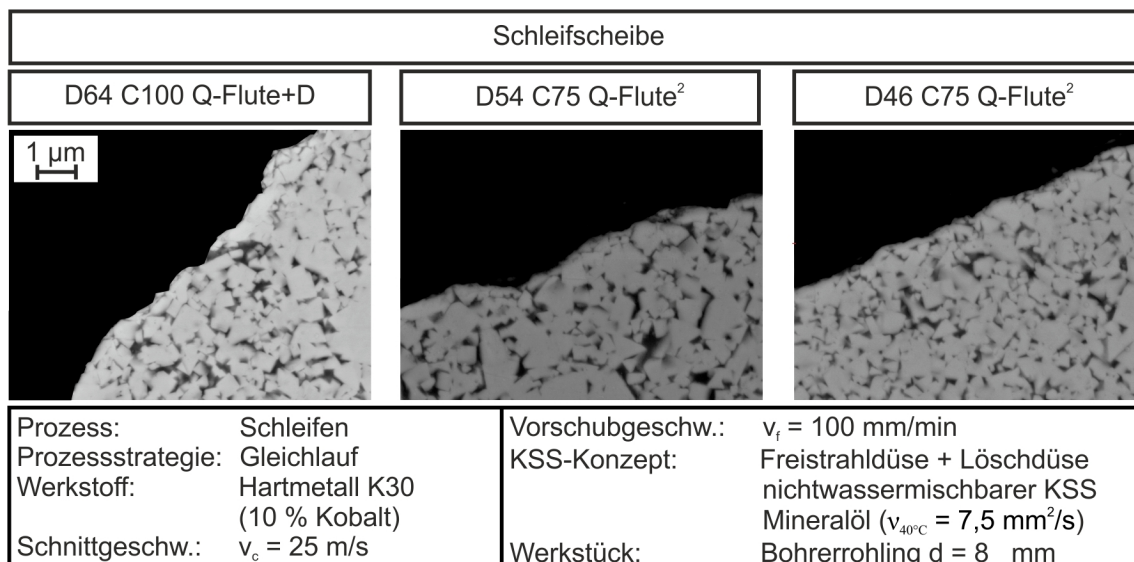


Abbildung 5-16: Analyse des Hartmetallgefüges bei Schnittgeschwindigkeitsvariation

Bei einer detaillierten Betrachtung der Hartmetallgefüge, die im Vergleich zu Abbildung 5-15 mit einer auf $v_c = 25$ m/s erhöhten Schnittgeschwindigkeit bearbeitet worden sind, fällt auch hier auf, dass keine Rissbildung im Hartmetall erkennbar ist. Diese Tendenz setzte sich auch bei Analyse der Nutoberfläche fort. Abschließend ist davon auszugehen, dass mit den hybridgebundenen Schleifscheiben im untersuchten Parameterraum von Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Schleifscheibenzusammensetzung keine Werkstückschädigung in Form von Rissen sowohl innerhalb der Hartmetallgefüge als auch auf der erzeugten Spanntoberfläche auftritt.

5.1.6 Zusammenfassende Darstellung des Nutenschleifprozesses

Das Schleifen wendelförmiger Spannuten an Vollhartmetallwerkzeugen war ein bislang noch nicht gänzlich durch Forschungsarbeiten erfasstes Themenfeld. Mittels eines ganzheitlichen Ansatzes wurden in den vorangestellten Untersuchungen nun alle kardinalen Einflussparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Kühlschmierstoffzuführstrategie, Hartmetallzusammensetzung, Schleifscheibenspezifikation) auf den Schleifprozess der Spannuten hin analysiert und dokumentiert. Das bisher errungene und im Stand

der Technik dargestellte Prozesswissen zum Tiefschleifen von Hartmetall und die grundlegenden Effekte lassen sich weitgehend auch auf das Nutenschleifen übertragen. Insbesondere die komplexen Eingriffsbedingungen der Schleifscheibe beim Schleifen der wendelförmigen Spannuten führen jedoch zu einer Veränderung im Einsatzverhalten.

Im untersuchten Parameterraum konnte mit steigender Vorschubgeschwindigkeit eine Zunahme der Schleiftangentialkraft und des Schleifscheibenverschleißes ebenso beobachtet werden wie ein Anstieg der Oberflächenrauheiten. Dabei stellte sich hinsichtlich des Verschleißes und der Kraftentwicklung eine im Vergleich größere Korngröße als vorteilhaft heraus. Bei der Beurteilung der aufgenommenen Oberflächenrauigkeiten jedoch konnte eine mit kleiner werdender Korngröße bessere Oberflächenqualität detektiert werden.

Wesentlicher Unterschied zu den bislang existierenden Forschungsarbeiten besteht in der Verwendung von hybridgebundenen Schleifscheiben und den komplexen Eingriffsbedingungen beim Nutenschleifen. Bei diesen Bindungstypen konnte ein vermehrter Bindungsverschleiß und damit einhergehend ein Ausbrechen an Diamantkörnern aus der Bindung beobachtet werden, was unter anderem dazu führte, dass mit geringerer Kornkonzentration und gleichzeitig reduzierter Korngröße kleinere Schleiftangentialkräfte detektiert werden konnten. Ein sich über der Schleifscheibenbreite veränderndes Zerspanvolumen, hervorgerufen durch den runden Ausgangsquerschnitt des Werkstückes, führt zu einem sich über die Schleifscheibenbreite ergebenden unterschiedlichen Belastungsprofil der Schleifscheibe. Dies spiegelt sich in einem typischen Verschleißbild der Schleifscheibenbindung wider. Geprägt wird dies von einem dominierenden Kantenverschleiß an der im Eingriff befindlichen Ecke im Schleifscheibenprofil. Über die Eingriffsbreite nimmt die Größe des Verschleißes mit abnehmendem Zerspanvolumen sukzessive ab.

Der Einfluss einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit spiegelt sich in steigenden Prozesskräften und einer verbesserten Oberflächenqualität wider. Hinsichtlich des Schleifscheibenverschleißes konnte bei den untersuchten geringen Vorschubgeschwindigkeiten kein Unterschied bezogen auf eine Veränderung der Schnittgeschwindigkeit erkannt werden. Bei den betrachteten höheren Vorschubgeschwindigkeiten konnte demgegenüber ein signifikanter Anstieg des Schleifscheibenverschleißes mit steigender Schnittgeschwindigkeit ausgemacht werden.

Neben den Prozessparametern sowie der Schleifscheibenspezifikation konnte gerade beim Nutenschleifen, welches im Tiefschliff durchgeführt wurde, mit Hilfe einer angepassten Kühlschmierstoffzuführstrategie Einfluss auf den Schleifprozess genommen werden. In der industriellen Praxis gestaltet sich dieser Aspekt aufgrund stark variierender und mitunter profilierten Schleifscheibenformen als sehr komplex. Die grundlegenden Erfahrungen, die innerhalb dieser Untersuchungen gewonnen werden konnten, führen zu der Erkenntnis, dass hinsichtlich der Oberflächenqualität die Nadeldüse mit vergleichsweise hoher Kühlschmierstoffaustrittsgeschwindigkeit zu den besten Ergebnissen führt. Bei Verwendung der Kammerdüse kommt es jedoch zu den vergleichsweise geringsten Schleiftangentialkräften, so dass hier ein Kompromiss aus der zur Verfügung gestellten Menge an KSS und der Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse gefunden werden muss.

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen somit deutlich das Potenzial, welches sich durch die Entwicklung neuer Schleifscheibenbindungssysteme ergibt. Die Prozessgrenzen hinsichtlich der erzielbaren Zeitspannvolumina im Vergleich zur industriellen Praxis und in der Literatur angegebenen Werten verschieben sich deutlich zu mehr Leistungsfähigkeit und

einer Erhöhung der Prozessstabilität. Die abschließende Betrachtung der Werkstückschädigungen hat aufgezeigt, dass mit den untersuchten Prozessparametern lediglich bezüglich der Schleifscheiben die Prozessgrenzen erreicht worden sind. So ist es denkbar, durch die Anbringung von zusätzlichen Hochdruck-Kühlschmierstoffdüsen die plötzliche Zusetzung und damit das Versagen der Schleifscheiben auch in Bereichen höherer Zeitspanvolumina effektiv zu verhindern und so die Leistungsfähigkeit des Prozesses weiter zu steigern.

6. Prozessentwicklung für die Polierschleifbearbeitung von wendelförmigen Bohrernuten mit elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben

Im Anschluss an das Schleifen der Spannuten wird das Polierschleifen als Nachbearbeitungsverfahren, auch vor einer möglichen Werkzeugbeschichtung, betrachtet. Wie zuvor bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert, soll hier aufgrund fehlender Normung für Verfahren mit gebundenem Abrasivkorn der Begriff des Polierschleifens Verwendung finden. Die durch das Schleifen erzeugte Nutoberfläche soll durch eine gezielte Nachbehandlung hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit verbessert werden. Dies wird im Anschluss an die Prozessentwicklung durch Einsatzversuche von durch Polierschleifen nachbehandelten Wendelbohrwerkzeugen überprüft.

Heutzutage ist die Herstellung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen geprägt durch eine Vielzahl an Einzelprozessen, die aufeinander abgestimmt werden müssen. Angefangen bei der Hartmetallherstellung über das Erstellen des Rundrohlings, das anschließende Schleifen der makrogeometrischen Konturen bis hin zu Verfahren, die vor einer Beschichtung eingesetzt werden, und Schichtnachbehandlungsverfahren (**Abbildung 6-1**).

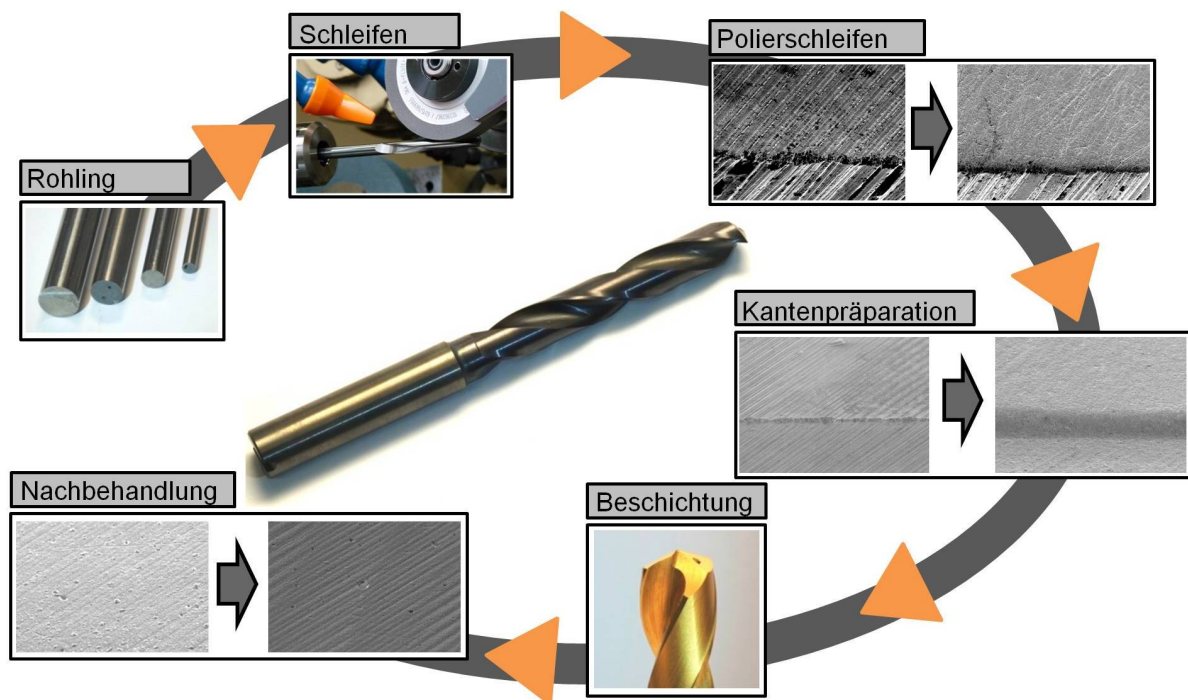


Abbildung 6-1: Prozesskette zur Herstellung von VHM-Hochleistungswerkzeugen

Gerade diese letztgenannten Verfahren haben in jüngster Zeit enorm an Bedeutung gewonnen, kann hierdurch doch eine zum Teil erhebliche Verbesserung des Einsatzverhaltens von Zerspanwerkzeugen erreicht werden. In diesem Zusammenhang wird die Kantenpräparation als heute übliches Verfahren zur Vorbehandlung der Schneidkanten an Zerspanwerkzeugen vor einem Beschichtungsprozess genannt. Inhalt der nachfolgenden Untersuchungen ist das Polierschleifen mittels elastisch gebundenen Schleifscheiben, welches ergänzend zum Einsatz kommen kann. **Abbildung 6-2** zeigt den Vergleich zwischen polierter und nicht nachbehandelter Spannute auf.



Abbildung 6-2: Vergleich einer polierten (unten) und einer nicht polierten (oben) Spannuten an einem wendelgenuteten Tiefbohrwerkzeug

Durch sehr kleine Diamantkörnungen und die Eigenschaften der elastischen Bindung im Schleifprozess kann eine Verbesserung der Oberflächentopografie der Spannuten erzeugt werden. Die Vorteile des Polierschleifens gegenüber alternativen Verfahrensvarianten liegen in der Möglichkeit, gezielt einzelne Konturelemente von Vollhartmetallschaftwerkzeugen zu bearbeiten. Durch die Möglichkeit, den kompletten Herstellungsprozess der Werkzeuge auf einer Maschine abzubilden, werden zudem Umspannfehler vermieden und Prozesszeiten eingespart. Im Rahmen dieser Arbeit sollen grundlegende Erkenntnisse zu diesem Verfahren präsentiert werden. Nachfolgend werden zunächst die kardinalen Einflussfaktoren identifiziert und bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Prozessergebnis hin analysiert. Hierzu wird umfassend die Wirkungsweise der elastischen Bindung untersucht. Den Abschluss bilden Einsatzversuche nachbehandelter Vollhartmetallbohrwerkzeuge, die die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens validieren sollen.

6.1 Beurteilung der relevanten Prozesskenngößen

Im Vorfeld wurden sechs kardinale Einflussgrößen identifiziert. Die Nachgiebigkeiten der Bearbeitungsmaschine sowie deren dynamisches Prozessverhalten spielen insbesondere bei dem zu analysierenden Feinstbearbeitungsprozess mit geringen Arbeitseingriffen und hohen Genauigkeiten eine nicht vernachlässigbare Rolle. Ebenso der Umwelteinfluss in Form von Temperaturschwankungen der Umgebungsmedien und Wärmestrahlungen übt unmittelbar einen Einfluss auf das Verhalten der Bearbeitungsmaschine und somit mittelbar auf den Polierschleifprozess aus. Die jedoch als wesentlich für den Prozess des Polierschleifens ausgemachten Einflussfaktoren sind der Ausgangszustand des Werkstückes nach dem vorgelagerten Schleifprozess, die Polierschleifscheibenspezifikation, die Prozessführung als auch die Kühlschmierstoffstrategie. Hinsichtlich des Werkstückausgangszustandes sind sowohl die durch das Schleifen als vorgelagerten Prozessschritt erzeugten Oberflächentopografien als auch Form und Maßabweichungen des zu bearbeitenden Werkstückes zu nennen. Bei der eingesetzten Schleifscheibenspezifikation spielen die Korngröße und die Kornkonzentration, durch das elastische Bindungssystem allerdings auch verstärkt die Bindungseigenschaften hinsichtlich Nachgiebigkeiten und Härte, eine Rolle. Ähnlich dem konventionellen Schleifen kommt auch beim Polierschleifen der Prozessstrategie in Form der Prozessparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit sowie dem Arbeitseingriff (vgl. **Abbildung 6-3**) eine bedeutende Rolle zu. Von nicht minderer Bedeutung kann die Versorgung des Prozesses mit Kühlschmierstoff angesehen werden und hier insbesondere die Art des Kühlschmierstoffes sowie die Zuführung.

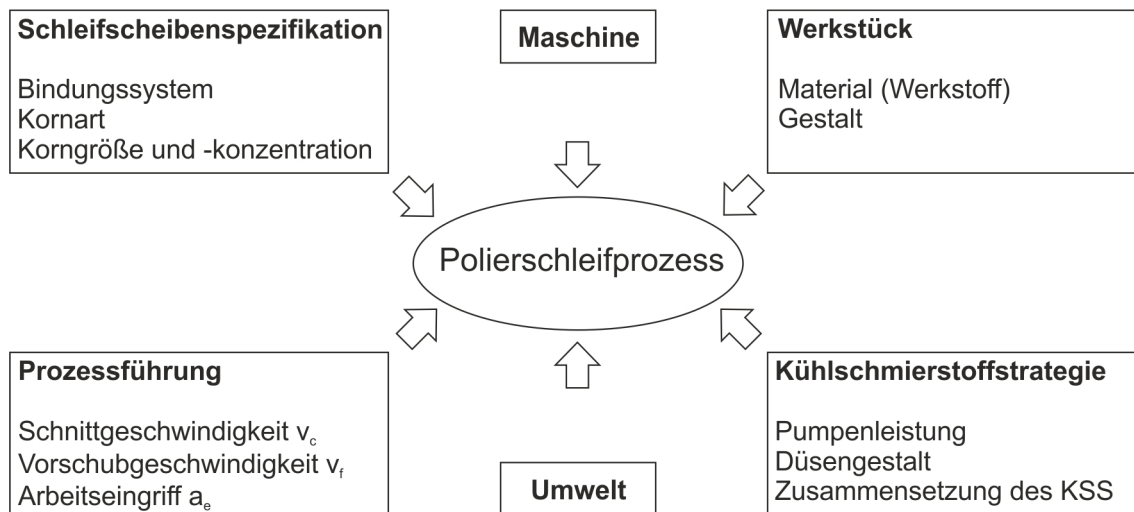


Abbildung 6-3: Darstellung der kardinalen Prozessparameter beim Polierschleifen

Nach grundlegenden Überlegungen und Analysen sollen die Unterschiede zum vorgelagerten Schleifprozess visualisiert und der Prozessablauf und das Verhalten der elastischen Bindungen im Detail analysiert werden. Nachfolgend werden sowohl die Polierschleifscheibenspezifikation in Form von drei verschiedenen Elastomerbindungen mit unterschiedlichen IRHD-Härten (International Rubber Hardness Degree) als auch die Prozessparameter Schnittgeschwindigkeit v_c , Vorschubgeschwindigkeit v_f sowie der Arbeitseingriff a_e bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Polierprozess hin untersucht.

6.2 Mechanische Eigenschaften der eingesetzten elastischen Bindungssysteme

Gerade das statische und dynamische Verhalten sowie die mechanischen Eigenschaften der elastischen Bindungssysteme dienen innerhalb der nachfolgend dargestellten Arbeiten als Erklärungsansatz für die auftretenden Prozessresultate hinsichtlich der erzeugten Oberflächengüten und Kräfte, werfen jedoch im gleichen Moment eine Reihe an Fragestellungen auf. Um die mechanischen Eigenschaften der untersuchten elastischen Bindungstypen näher beschreiben zu können und auf diesem Wege Erklärungshypothesen für das Verhalten der Bindungen im Schleifprozess herleiten zu können, wurden die Bindungstypen im Zugversuch nach DIN 53504 und durch die Härteprüfung nach DIN 53519 analysiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen detailliert dargestellt.

Die Härteprüfung nach DIN 53519 ermittelt den IRHD-Wert (International Rubber Hardness Degree), der ähnlich der Shore-Härtemessung durch die Messung der Eindringtiefe eines unter einer festgelegten Kraft stehenden, kugelförmigen Eindringkörpers in den elastomeren Prüfkörper festgelegt wird [DIN94]. So können im Folgenden Rückschlüsse auf die elastische Verformbarkeit der Bindungstypen getroffen werden. Zu diesem Zweck sind in **Abbildung 6-4** die gemessenen IRHD-Werte und exemplarisch die daraus resultierenden Federkonstanten skizziert. Der Bindungstyp EGD1A weist mit 90 IRHD die geringste Härte und damit nachgiebigste Zusammensetzung auf. So ist der sich ergebende Kontaktdruck oder die notwendige Kraft um die Bindung zu verformen bei gleicher Zustellung im Polierschleifprozess im Vergleich kleiner. Der Bindungstyp EGDA2 liegt mit 99 IRHD an der innerhalb der DIN messbaren Obergrenze von IRHD 100. Bei gleicher Tiefenzustellung ist hier der Kontaktdruck zwischen Schleifscheibenbindung und Werkstück im Vergleich größer. Der Bindungstyp EGD1D konnte innerhalb der DIN nicht mehr hinsichtlich der Härte

vermessen werden. Hier kann vermutet werden, dass dieser Bindungstyp aufgrund der hohen Härte ein zu konventionellen kunstharzgebundenen Schleifscheiben äquivalentes Verhalten aufweist. Die Kraft, die notwendig ist um diesen Bindungstypen zu verformen, ist demzufolge im Vergleich am größten.

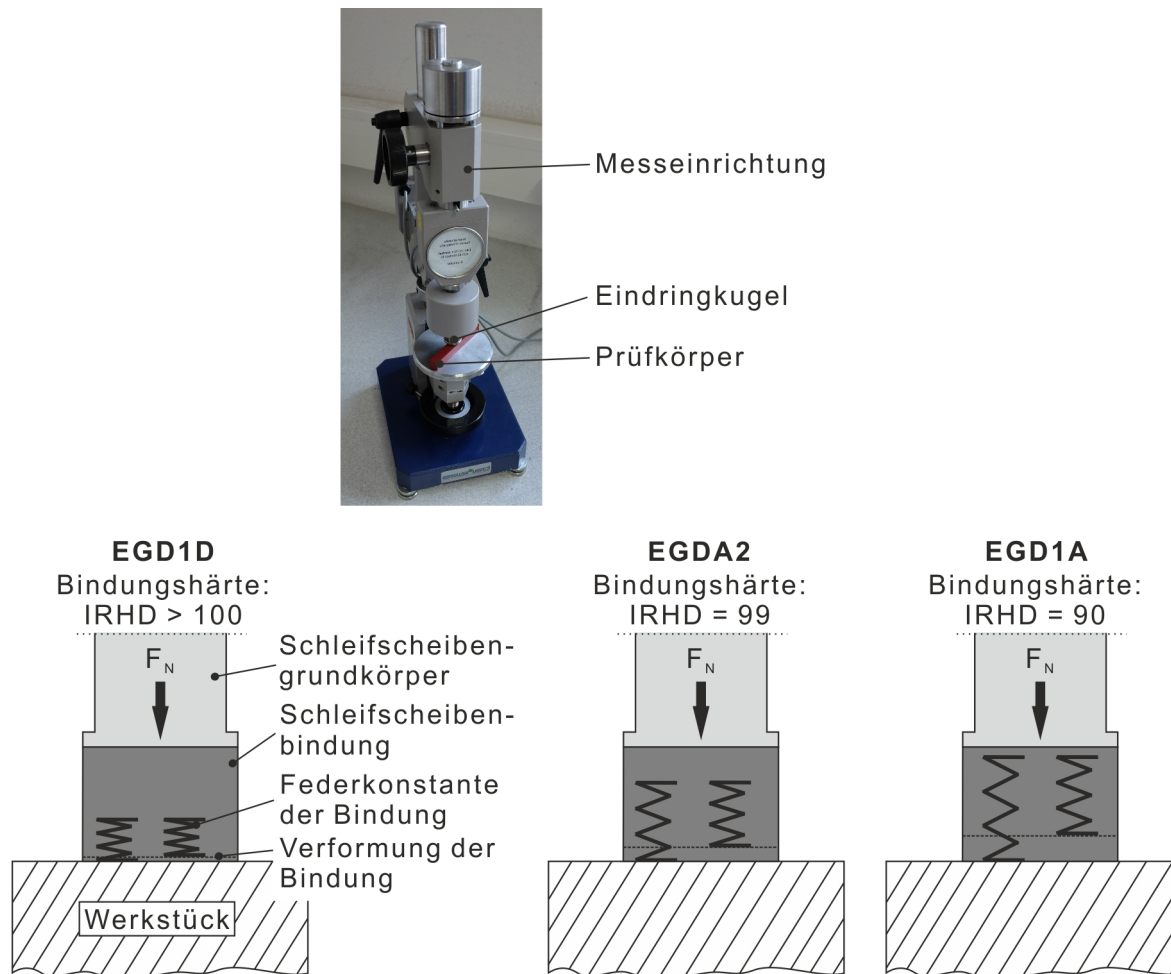


Abbildung 6-4: Versuchsaufbau und exemplarische Darstellung der Federkonstanten sowie des resultierenden Verformungsvermögens der Bindungssysteme

Zusätzlich wurden am Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik der TU Dortmund Zugversuche des Schleifscheibenbindungsmaterials durchgeführt. Herstellerseitig war im Rahmen der Arbeit nicht zu klären, wie sich die Schleifscheibenbindung genau zusammensetzt. Generell wird im Bereich der Kunststoffe jedoch zwischen kettenförmig, eindimensional aufgebauten Makromolekülen, den Thermoplasten und den vernetzten, dreidimensional aufgebauten Makromolekülen, den Duroplasten und Elastomeren unterschieden. Das zur Anwendung kommende Schleifscheibenbindungsmaterial wird den Elastomeren zugeordnet. Zugversuche sind Kurzzeitversuche und erlauben somit keine Aussage über das Verhalten von Werkstoffen bei länger anhaltender mechanischer Belastung [SFH⁺05]. So sollen die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Zugversuche als vergleichender Erklärungsansatz für das unterschiedliche Verhalten der elastisch gebundenen Schleifscheiben in Abhängigkeit der Bindungshärte dienen. Der verwendete Versuchsaufbau, die Abmessungen der eingesetzten Probenkörper sowie die exemplarische Darstellung eines zerstörten Prüfkörpers sind in **Abbildung 6-5** gezeigt.

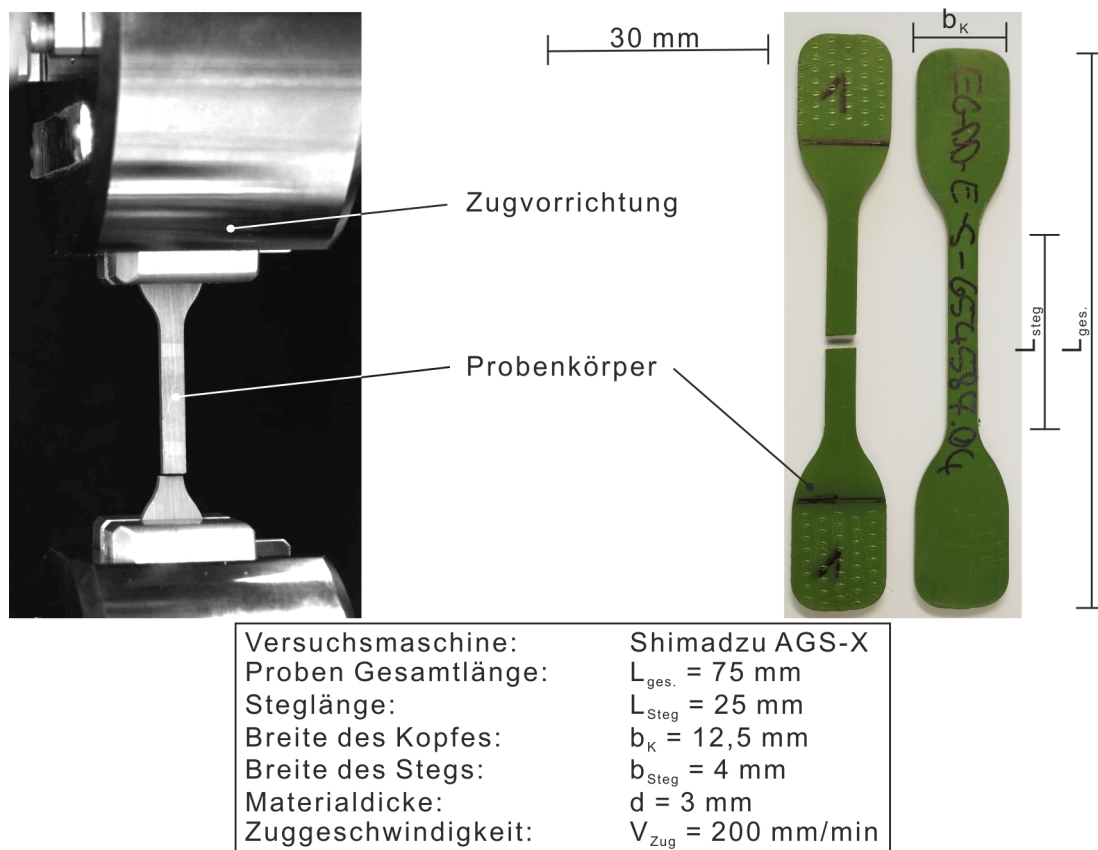


Abbildung 6-5: Darstellung der Zugvorrichtung sowie eingesetzten Probenkörper während der Zugversuche des Schleifscheibenbindungsmaterials²

Die Zugversuche wurden auf einer statischen Universalprüfmaschine des Herstellers Shimadzu vom Typ AGS-X durchgeführt. Die Probenkörper und die Durchführung der Versuche wurden dabei nach DIN 53504, die die Prüfung von Kautschuk und Elastomeren in Zugversuchen bestimmt, ausgeführt. Die Abmessungen der Probenkörper entsprechen dem Schulterstab Typ 2 aus den Spezifikationen der DIN. Ebenso wurden je Material drei Einzelmessungen angefertigt. Da sich diese nicht signifikant unterscheiden und es sich im Rahmen dieser Arbeit nur um einen qualitativen Vergleich handeln soll, wurden drei repräsentative Kraft-Weg-Verläufe ausgewählt und in **Abbildung 6-6** dargestellt.

Die Probenkörper bestanden aus dem Schleifscheibenbindungsmaterial, versetzt mit Diamantabrusivkörnern. So konnten die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Bindungssysteme im Detail analysiert werden. Aus Geheimhaltungsgründen seitens des Schleifscheibenherstellers, sind in den Diagrammen jeweils nur die maximalen Zugkräfte angegeben. So wird zwar ein Vergleich hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ermöglicht, jedoch ohne die genauen Werte hinsichtlich des Kraft-Weg-Diagramms preiszugeben.

Generell hängen die mechanischen Kennwerte von Elastomeren, die während des Zugversuches gewonnen werden können, stark von der Umgebungstemperatur und der Zuggeschwindigkeit ab [SFH+05, BS12]. Gerade bei Elastomeren können zudem je nach Zusammensetzung stark variierende Verläufe im Kraft-Weg-Diagramm ausgemacht werden.

² Herzlichen Dank an den Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik der TU Dortmund und insbesondere an Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Bastian Penning für die Unterstützung bei der Durchführung der Zugversuche

So findet sich in der Regel an keiner Stelle ein linearer Zusammenhang zwischen der aufbrachten Kraft und der Dehnung. Gummi zeichnet sich durch ein hohes reversibles elastisches Verformungsvermögen aus. Die Bruchdehnung kann zum Teil bis zu mehreren hundert Prozent betragen. Bei der Analyse des Spannungs-Dehnungs-Diagramms fehlt der Hook'sche Bereich zumeist weitgehend [SFH+05, Bon14, DEE⁺12].

Die Auswertung der Zugversuche des Schleifscheibenbindungsmaterials, dargestellt in Abbildung 6-6, zeigt deutliche Unterschiede, die sich in Abhängigkeit der Bindungshärte ergeben. Während das harte und das weiche Bindungssystem die zuvor bei Gummi üblichen Verläufe des Kraft-Weg-Diagramms ohne plastischen Verformungsbereich aufweisen, kann bei dem mittelharten Bindungstyp ein mit Metallen vergleichbarer Verlauf, mit einem zunächst elastischen Bereich und danach anschließend einer Phase plastischer Verformung, detektiert werden. Neben den Verläufen unterscheiden sich die untersuchten Bindungstypen zusätzlich in den maximal erreichten Zugkräften voneinander. So muss mit steigender Bindungshärte auch mehr Kraft aufgewendet werden, um die Probe im Zugversuch zu brechen.

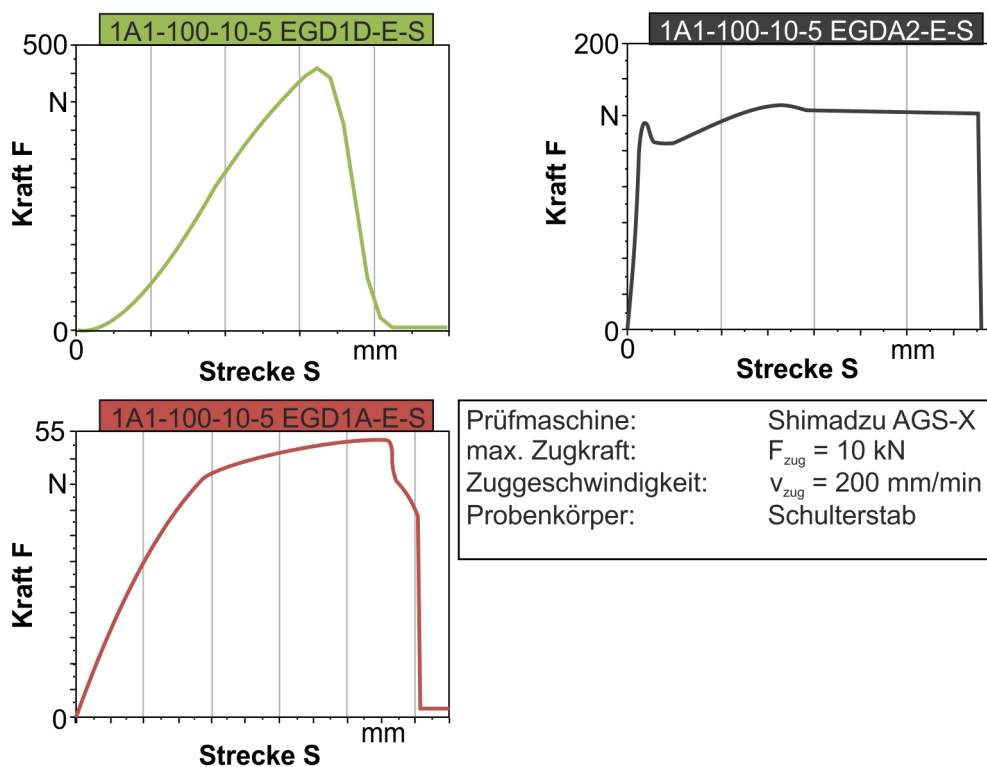


Abbildung 6-6: Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche des Schleifscheibenbindungsmaterials

Aus den zuvor vorgestellten Versuchen können wichtige Erkenntnisse über das mechanische Verhalten der elastisch gebundenen Schleifscheiben gewonnen werden. Diese Erkenntnisse dienen zur Entwicklung einer Theorie über das Einsatzverhalten dieser Bindungstypen.

6.3 Grundlegende Betrachtung des Polierschleifens mit elastischen Schleifscheibenbindungssystemen

Wie zuvor bereits erwähnt, sind sowohl bei dem Schleifen als auch dem nachgelagerten Polierschleifen die Schleifscheibenumfangsfläche und auch ein Teil der

Schleifscheibenkante im Eingriff. Die Umfangsfläche der Schleifscheibe bearbeitet dabei den Nutrücken, die Schleifscheibenkante durch die Relativbewegung zwischen Schleifscheibe und Bohrerrohling hingegen die Spanfläche, insbesondere aufgrund der Drehung des Bohrerrohlings und des Anstellwinkels der Schleifscheibe. **Abbildung 6-7** veranschaulicht die Flächen innerhalb der Spannutt und verdeutlicht den Unterschied zwischen Nutrücken und Spanfläche. Zusätzlich werden für die nachfolgend präsentierten Untersuchungen hinsichtlich der erzeugten Kantenmikrogestalt sowie der qualitativen und quantitativen Auswertung der Oberflächentopografie die Messbereiche an Schneidkante und Nutrückenkante festgelegt. Hier wird jeweils ein Bereich in der Mitte der beiden Kantensegmente analysiert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

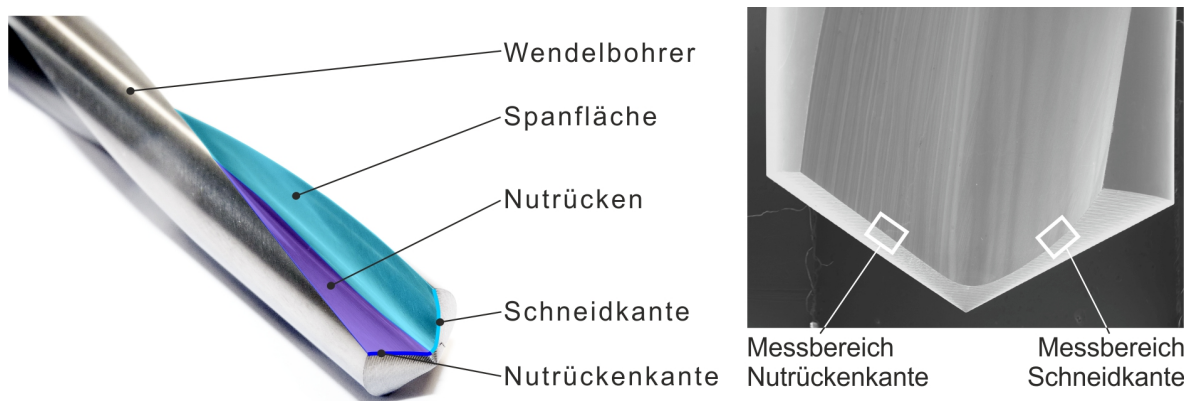
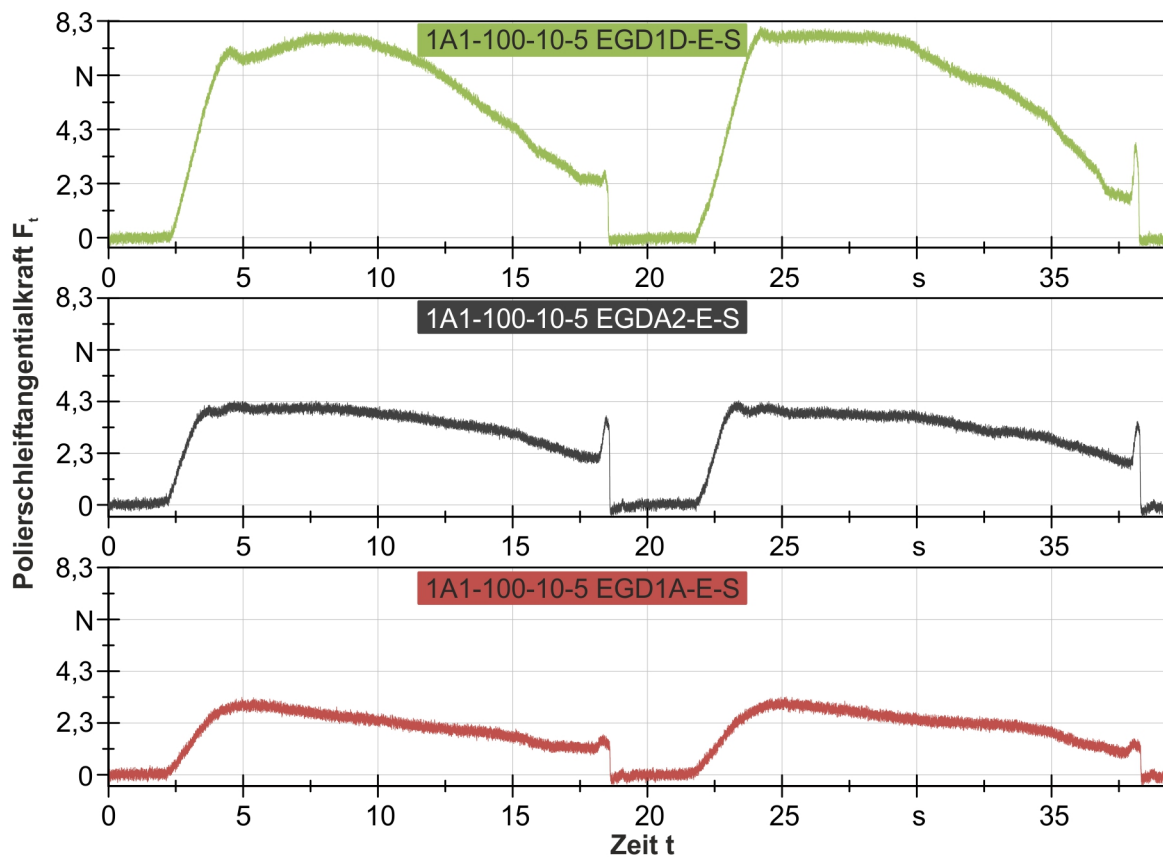


Abbildung 6-7: Begriffsdefinition und Messbereiche in der Spannutt

Während des Polierschleifens aufgezeichnete Tangentialkraftverläufe sollen einen Aufschluss über das Verhalten der unterschiedlichen eingesetzten Polierschleifscheiben im Prozess sowie Unterschiede untereinander und insbesondere im Vergleich zum vorher betrachteten Schleifprozess liefern. Dargestellt ist in **Abbildung 6-8** für die drei eingesetzten Polierschleifscheiben jeweils ein Kraftverlauf der Tangentialkraft F_t , der das aufeinanderfolgende Polierschleifen der ersten und zweiten Spannutt wiedergibt. Dabei nimmt die IRDH-Härte der Bindungssysteme, ausgehend von der farblich grünen 1A1-100-10-5 EGD1D-E-S über die schwarze Polierschleifscheibe bis zur rot eingefärbten Schleifscheibe des Typs 1A1-100-10-5 EGD1A-E-S, sukzessive ab. Der Versuchsaufbau gleicht dem der vorangegangenen Schleifversuchen mit hybriden Bindungssystemen. So wurde auch hier der Bohrerrohling durch eine konkave Auflage gestützt und zur Versorgung des Prozesses mit Kühlschmierstoff wurden die gleichen peripheren Anlagen verwendet.



Vorbearbeitung		
Prozess:	Schleifen	KSS-Konzept: Freistrahldüse + Löschdüse
Prozessstrategie:	Gleichlauf	nichtwassermischbarer KSS
Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²	Mineralöl ($v = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10% Kobalt)	Werkstück: Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$	Schnittgeschw.: $v_c = 15 \text{ m/s}$
Nachbearbeitung		
Prozess:	Polierschleifen	KSS-Konzept: Freistrahldüse
Prozessstrategie:	Gleichlauf	nichtwassermischbarer KSS
Arbeitseingriff:	$a_e = 40 \text{ }\mu\text{m}$	Mineralöl ($v = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Vorschubgeschw.:	$v_f = 200 \text{ mm/min}$	Schnittgeschw.: $v_c = 15 \text{ m/s}$

Abbildung 6-8: Verlauf der Poliertangentialkraft im Vergleich der eingesetzten Schleifscheiben

Um die grundlegende Wirkungsweise der Polierschleifscheiben erfassen zu können, wurde folgende Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung eingehalten. Nach dem Schleifen, welches ohne nachfolgende Schlichtoperation ausgeführt wurde, wurden die Bohrwerkzeuge zunächst aus der Maschine ausgespannt und umfassend bezüglich der erzielten Oberflächenqualitäten und der resultierenden Schneidkantenmikrogestalt vermessen. Anschließend wurden die Werkzeuge erneut mittels Spannzange in der Werkzeugschleifmaschine aufgenommen und die Lage der Nuten durch den in der Bearbeitungsmaschine integrierten Messtaster erfasst. Darauf folgend wurde der Polierschleifprozess durchgeführt und abschließend ausgewertet.

Allen aufgezeichneten Kraftverläufen gemein ist im Vergleich zum Schleifprozess das Nichtvorhandensein einer stationären Prozessphase. Hingegen bildet sich nach dem Einlauf ein stark abfallendes Tangentialkraftniveau mit zunehmender Prozessdauer. Dieser Effekt ist zum einen den besonderen Eingriffsbedingungen bei Verwendung der elastischen Bindung

geschuldet. Zum anderen ergibt sich dieser Verlauf aus der beim Schleifen resultierenden Normalkraftkomponente und infolge dessen einer Abdrängung des Hartmetallrohlings beim vorgelagerten Schleifprozess. Diese fällt mechanisch bedingt an der Rohlingsspitze am größten aus und nimmt zum Nutauslauf hin sukzessive ab. Kraftmessungen bei Schlichtoperationen haben ebenfalls einen fallenden Tangentialkraftverlauf aufgezeigt, so dass ein während des Polierschleifens über die Nutlänge abfallender Arbeitseingriff a_e als Folge ausgemacht werden kann. Dieser Effekt nimmt mit geringer werdender Bindungshärte nach IRHD ab, da das elastische Bindungssystem mit geringerer Härte vermehrt die Möglichkeit besitzt, sich zu deformieren und somit nachgiebig auf die unterschiedlichen Arbeitseingriffe zu reagieren. Der Vergleich der Tangentialkraftverläufe unter den eingesetzten Polierschleifscheiben zeigt, dass es hinsichtlich der auftretenden Kraftmaxima zu deutlichen Unterschieden kommt. So verursacht das Bindungssystem mit der größten Bindungshärte auch die höchsten Tangentialkräfte. Mit abnehmender Bindungshärte nehmen die maximalen Tangentialkräfte ab. Dieser Effekt wird an späterer Stelle noch ausführlich erläutert. Zuletzt soll auf den Auslaufbereich und den hier detektierbaren Kraftanstieg am Ende der polierten Nuten eingegangen werden. Als Ursache kann die Auslaufstrategie während des Polierschleifens und infolgedessen ein erhöhter Kontakt zwischen Polierscheibe und Werkstück im Auslaufbereich angesehen werden.

Aufbauend auf der grundlegenden Analyse der Polierscheiben durch aufgenommene Kräfte, sollen nachfolgend die Kontaktbedingungen und hier insbesondere der resultierende Kontaktdruck und die Kontaktfläche zwischen Polierscheibe und Werkstück grundlegend analysiert werden. Diese sind aufgrund der unterschiedlichen Nachgiebigkeiten der elastischen Bindungssysteme von besonderer Bedeutung. Die statischen Kontaktbedingungen werden, wie in **Abbildung 6-9** zu erkennen ist, mittels einer Druckmessfolie, welche auf der Polierscheibe angebracht wurde, erfasst. So kann ein Verständnis aufgebaut werden, in wieweit eine variierende Bindungshärte oder ein sich ändernder Arbeitseingriff a_e auf die Kontaktbedingungen Einfluss ausübt. Bei den zur Anwendung kommenden Druckmessfolien befinden sich mit Farbstoff gefüllte Mikrokapseln und ein Entwickler im Innern. Die Mikrokapseln platzen unter definierter Druckbelastung und verfärben die Folie, so dass im Anschluss die Druckbelastung anhand einer Farbtabelle ausgewertet werden kann.

Verfahrensbedingt lässt sich mit dieser Methodik nur der statische Kontakt zwischen Schleifscheibenumfangsfläche und Nutrücken visualisieren. Die Spanfläche wird im Polierprozess hingegen von der sich im Eingriff befindlichen Schleifscheibenkante bearbeitet und kann somit nicht analysiert werden. Die schematische Darstellung des Bohrers in **Abbildung 6-9** gibt die sich so ergebende prinzipielle Kontaktfläche zwischen Schleifscheibenumfangsfläche und Bohrerhut wieder. Somit kann der resultierende Druck in Abhängigkeit des Arbeitseingriffes a_e und der Bindungshärte visualisiert werden.

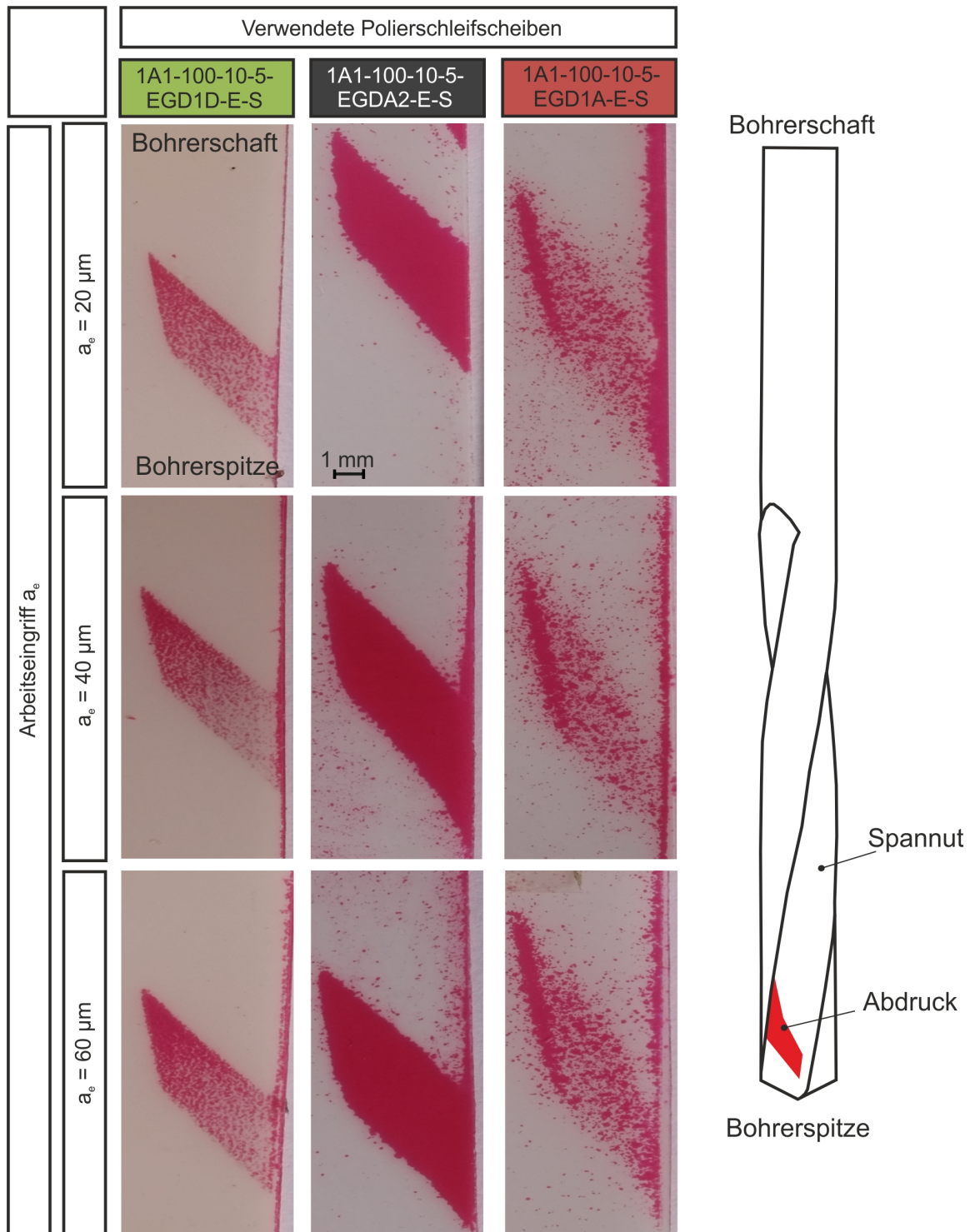


Abbildung 6-9: Statische Analyse der Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück mittels Druckmessfolie

Bei der Verfärbung der Druckmessfolie und damit dem resultierenden Druck innerhalb der Kontaktzone, kann kein signifikanter Unterschied zwischen den analysierten Schleifscheibenspezifikationen ausgemacht werden. Erhebliche Abweichungen ergeben sich jedoch bezüglich der Form und insbesondere der Größe der Kontaktfläche zwischen Polierscheibe und der Nutoberfläche. Generell führt sowohl ein steigender Arbeitseingriff als auch eine weichere Schleifscheibenbindung zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück. Neben der gesamten Kontaktfläche sind zwischen

den analysierten Bindungshärten deutliche Unterschiede in der Verteilung des Kontaktdruckes zu beobachten. Bei Betrachtung des Polierscheibentyps 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRDH > 100) fällt auf, dass es zu einer ungleichmäßigen Druckverteilung mit einem Minimum im Bereich des Übergangs zwischen Nutrücken und Spanfläche und einem Maximum im Bereich des Nutrückens kommt. Bei dem Polierscheibentyp 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S (IRDH = 99) ist hingegen eine über die gesamte Kontaktfläche homogene Druckverteilung zu detektieren. Im Vergleich bildet der Polierscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRDH = 90) mit dem nachgiebigsten Bindungssystem einen zum Teil nur linienförmigen Kontakt zwischen den Wirkpartnern aus. Diese Unterschiede ergeben sich aufgrund der variierenden Nachgiebigkeiten der Polierscheibenbindungssysteme. Die hier grundlegend dargelegten Verhaltensweisen der elastischen Polierscheibenbindungen werden in den nachfolgenden Ausführungen als Wissensgrundlage zur Erläuterung herangezogen.

6.4 Einfluss des Vorbearbeitungszustandes durch das Schleifen

Da der Polierschleifprozess auf den vorgelagerten Schleifprozess der Spannuten aufbaut und somit die Vorbearbeitung auch einen deutlichen Einfluss auf das resultierende Prozessergebnis beim Polierschleifen ausübt, soll im Nachfolgenden zunächst die Qualität dieser Vorbearbeitung analysiert werden, um Referenzwerte zu erhalten. Die Schleifbearbeitung wurde zuvor bereits ausführlich dargestellt, jedoch lag der Fokus innerhalb der Untersuchungen zum Polierschleifen auf einer möglichst guten Ausgangsrauigkeit nach dem Schleifen. Aufbauend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen, wurde zudem nun auch die Ausgangsrauigkeit auf der Spanfläche und dem Nutrücken getrennt voneinander betrachtet. **Abbildung 6-10** zeigt die ermittelten Rauheitskennwerte auf. Betrachtet werden der arithmetische Mittenrauwert R_a , die gemittelte Rautiefe R_z und die maximale Rautiefe R_{max} , jeweils als Mittelwert aus 20 Einzelmessungen. Es sind deutliche Unterschiede zwischen Spanfläche und Nutrücken in den aufgenommenen Rauheitskennwerten detektierbar. So kommt es schon während der Schleifbearbeitung durch ungleiche Eingriffsbedingungen der Schleifscheibe zu geringeren Oberflächengüten auf der Spanfläche, welche die spätere wichtigere Funktionsfläche im Einsatz des Zerspanwerkzeuges darstellt.

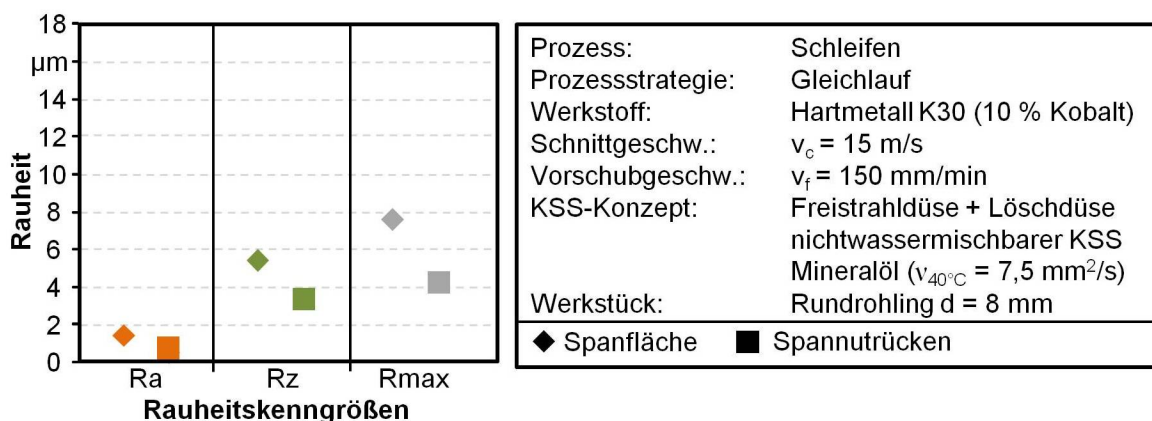


Abbildung 6-10: Ausgangsrauigkeiten nach der Schleifbearbeitung der Bohrernuten

Zusätzlich zu den höheren Werten bei R_a und R_z lässt sich auch bezüglich des Oberflächenprofils anhand der R_{max} -Werte ausmachen, dass es sich um unterschiedlich ausgeprägte Topografien handelt. So weist die geschliffene Spanfläche deutlich höhere Spitzen im Rauheitsprofil auf als der Nutrücken. Dies lässt sich auf die bereits zuvor

geschilderte Tatsache zurückführen, dass der Nutrücken mit der Umfangsfläche und die Spanfläche mit der sich im Eingriff befindlichen Kante der Schleifscheibe bearbeitet werden. Dies führt dazu, dass sich die Eingriffskinematiken unterscheiden und dass bei der Bearbeitung des Rückens deutlich mehr Abrasivkörner den Materialabtrag bewirken als an der Spanfläche. Ein weiterer Aspekt, der über das Schleifscheibenprofil betrachtete und an der Schleifscheibenkante am wesentlichsten ausgeprägte Schleifscheibenverschleiß, hervorgerufen durch das dort zu bewältigende Zerspanvolumen, führt ebenfalls zu dem aufgezeigten ungleichmäßigen Bearbeitungszustand nach der Tiefschleifoperation der Spannuten. Die hier dargestellten Werte zeigen nicht nur den Ausgangszustand für die nachfolgenden detaillierten Untersuchungen zum Verhalten der flexibel gebundenen Diamantschleifscheiben auf, sie stellen darüber hinaus auch die Referenzwerte für die sich ergebenden Veränderungen hinsichtlich der Oberflächentopografie nach den Polierschleifprozessen dar. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die erzeugten Oberflächengüten in einem Bereich von $R_a \approx 1,5 \mu\text{m}$ und $R_z \approx 4,5 \mu\text{m}$ einen im Vergleich zu anderen untersuchten Zerspanwerkzeugen guten Wert in Anbetracht der Oberflächenqualität darstellen und sich somit für eine Nachbearbeitung mittels Polierschleifen eignen.

6.5 Aufbau eines grundlegenden Prozessmodells

Wie zuvor geschildert, ist der Prozessschritt des Polierschleifens als Nachbehandlungsverfahren für Vollhartmetallzerspanwerkzeuge aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen sehr komplex. Um jedoch ein grundlegendes Prozessverständnis zu entwickeln, wurden in einem ersten Schritt die Größen Bindungshärte, Arbeitseingriff und Vorschubgeschwindigkeit auf ihre Auswirkungen auf die Werkstückqualität hin untersucht. So wurde in den nachfolgend gezeigten Ergebnissen die Vorschubgeschwindigkeit in einem für das Schleifen üblichen Bereich von $v_f = 50 \text{ mm/min}$ bis $v_f = 200 \text{ mm/min}$ variiert. Der Arbeitseingriff wurde dabei von $a_e = 20 \mu\text{m}$ über $a_e = 40 \mu\text{m}$ bis auf $a_e = 60 \mu\text{m}$ gesteigert. Zusätzlich wurden die bereits zuvor analysierten drei unterschiedlichen Bindungshärten eingesetzt. **Abbildung 6-11** zeigt die im Prozess ermittelten maximalen Tangentialkräfte auf.

Eine starke Abhängigkeit der Höhe der resultierenden Tangentialkraft von der eingesetzten Bindungshärte ist die erste wesentliche Erkenntnis, die gewonnen werden kann. So kommt es mit steigender Bindungshärte zu ebenfalls ansteigenden Tangentialkräften. Die Schleifscheibe mit der nachgiebigsten Bindung verursacht Schleiftangentialkräfte im Bereich von $F_t \approx 2$ bis 4 N . Bei der Schleifscheibe mit dem härtesten Bindungssystem liegen die Kräfte um den Faktor zwei bis drei höher, auf einem Niveau von $F_t \approx 8$ bis 12 N . Bei gleichzeitiger Betrachtung des Einflusses des Arbeitseingriffs fällt auf, dass dieser in dem betrachteten Wertebereich keinen signifikanten Effekt auf die resultierenden Tangentialkräfte ausübt. Ein Zusammenführen der beiden zuvor genannten Ergebnisse führt zu dem Schluss, dass die Prozesskräfte im Wesentlichen über die Bindungshärte gesteuert werden können.

Das härteste Bindungssystem setzt dem Materialabtrag den größten Widerstand entgegen, wohingegen mit geringer werdender Bindungshärte die Federrate demensprechend sinkt und es so eher zu einer Verformung der Bindung als zu einem Anstieg der resultierenden Schleiftangentialkräfte kommt. Zusätzlich führt ein elastischeres Bindungssystem nach [KP83] bei konstantem Arbeitseingriff im Vergleich zu einer Zunahme aktiver Schneidkörner und somit einer sinkenden Einzelkornbelastung. Dieser Effekt der Verformbarkeit beziehungsweise Anpassung der Schleifscheibenbindung an die Werkstückoberfläche wird im Folgenden noch eingehender Betrachtung finden.

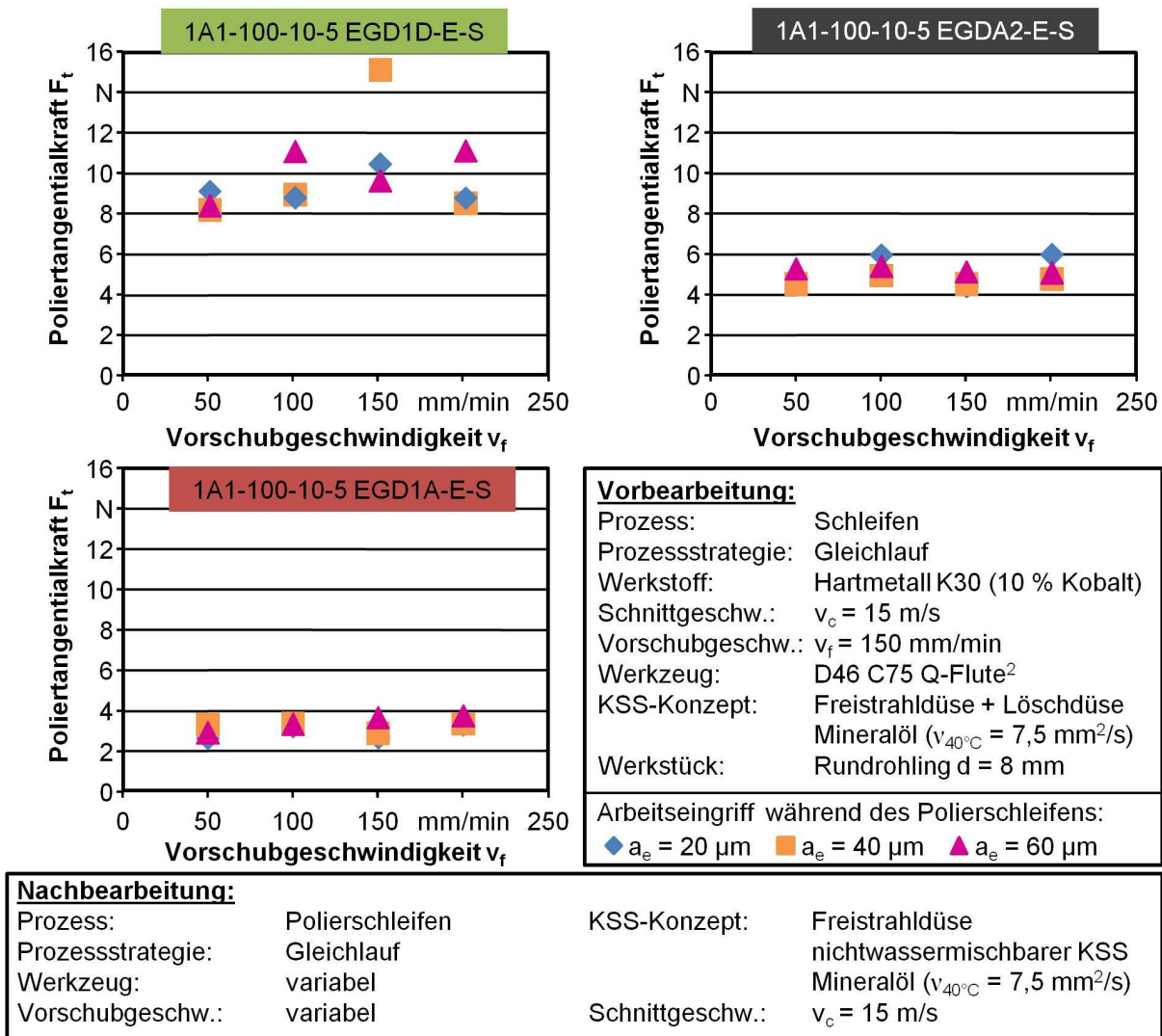
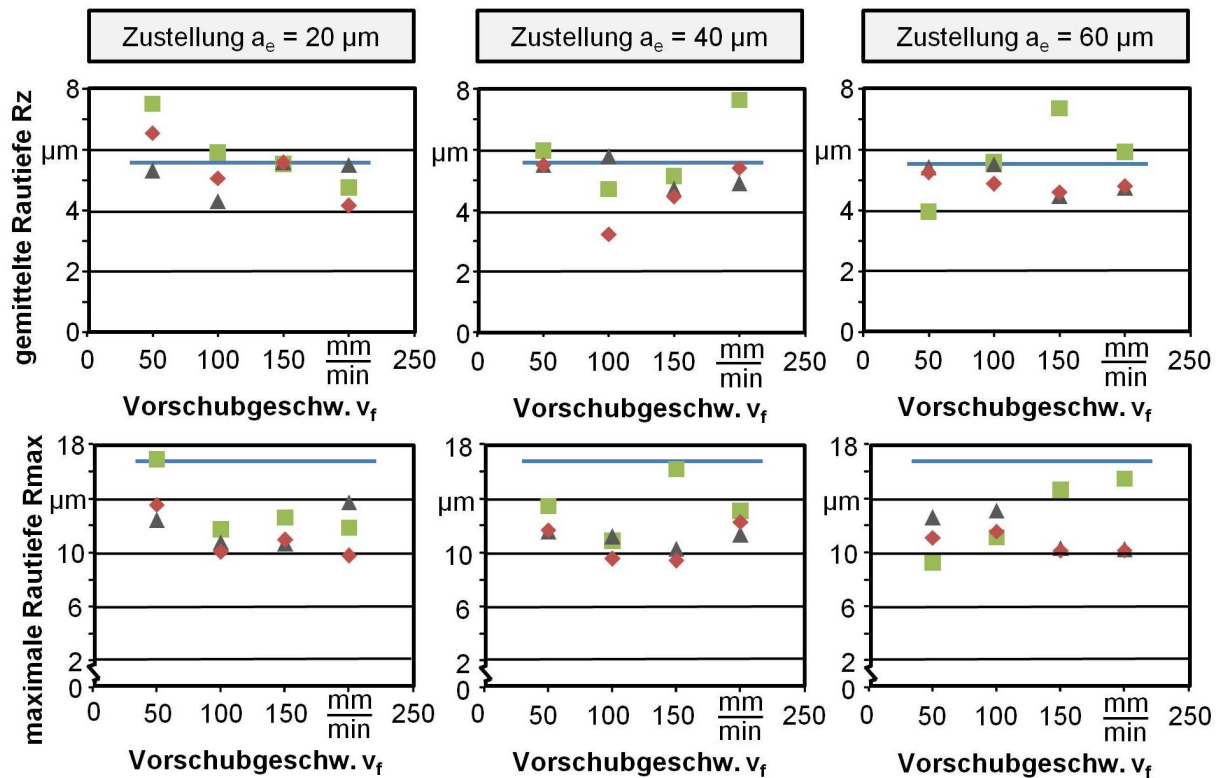


Abbildung 6-11: Einfluss des Arbeitseingriffs, der Vorschubgeschwindigkeit und der Polierscheibenbindung auf die resultierende Poliertangentialkraft

Neben der Bindungshärte und dem Arbeitseingriff wurde auch der Einfluss einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit auf das Bearbeitungsergebnis betrachtet. Bei Schleifprozessen mit konventionellen Bindungssystemen führt eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer steigenden Anzahl an aktiven Schneiden bei einer gleichzeitig steigenden Einzelkornspannungsdicke. Im Allgemeinen erhöhen sich mit steigender Vorschubgeschwindigkeit somit auch die Schleifkräfte [CB96a, Mac07]. Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass sich diese Theorie nicht auf elastisch gebundene Schleifscheiben übertragen lässt. So bleiben die Kräfte mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nahezu konstant. Es kann also davon ausgegangen werden, dass es bei den elastischen Bindungssystemen nicht zu einer steigenden Einzelkornspannungsdicke kommt, sondern sich die Schleifscheibe infolge der Belastung verformt und über das Werkstück gedrückt wird.

Neben den Prozesskräften stellen die resultierenden Oberflächenqualitäten nach dem Polierschleifprozess das wohl wichtigste Qualitätskriterium im Hinblick auf den späteren Einsatz der fertigen Bohrwerkzeuge dar. Das primäre Ziel dieses Nachbearbeitungsverfahrens ist schließlich in einer Verbesserung der ausgangsseitig geschliffenen Spanntoberflächen zu sehen. Demzufolge wird dem Gesichtspunkt der Oberflächenqualität besondere Bedeutung bei der Analyse beigemessen.

Bei Auswertung der Rauheitskenngrößen R_z und R_{max} im Bereich der Spanfläche konnte generell festgestellt werden, dass es in Abhängigkeit der Schleifscheibenbindungshärte zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen kommt. Während die Polierschleifscheiben des Typs 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S und 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 99 und IRHD = 90) mit wenigen Ausnahmen die gleichen Tendenzen aufwiesen, ergab die Auswertung der Oberflächen, die mit dem Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) bearbeitet wurden, mitunter stark von den zuvor genannten Schleifscheibentypen abweichende Resultate (**Abbildung 6-12**).



Vorbearbeitung:		KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse nichtwassermischbarer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Schleifen	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf	Schleifscheibe:	D46 C75 Q-Flute ²
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)		
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$		
Nachbearbeitung (Spanfläche):		KSS-Konzept:	Freistrahldüse nichtwassermischbarer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf		
Werkzeug:	variabel		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 50 \dots 200 \text{ mm/min}$		
Verwendete Polierschleifscheiben:		— geschliffener Ausgangszustand	
■	1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲	1A1-100-10-5 EGDA2-E-S
		◆	1A1-100-10-5 EGD1A-E-S

Abbildung 6-12: Oberflächenqualität der nachbearbeiteten Spanflächen unter Variation von Arbeitseingriff, Bindungshärte und Vorschubgeschwindigkeit

Innerhalb der Abbildung sind die Ausgangswerte der geschliffenen Oberflächenqualitäten blau gekennzeichnet. Zur Ermittlung dieser wurden jeweils alle innerhalb der Versuchsserie geschliffenen Oberflächen vermessen und der Mittelwert dieser Einzelmessungen innerhalb der Abbildung dargestellt, wohingegen die Rauigkeitsgrößen der polierten Oberflächen den

Mittelwert aus 4 Einzelmessungen zeigen. Generell ergibt sich bei Analyse der gemittelten Rautiefe Rz nur bei bestimmten Prozessparameterkombinationen eine Verbesserung, wohingegen bei der maximalen Rautiefe die Werte der nachbearbeiteten Oberflächen alle unterhalb der geschliffenen Rauigkeitswerte liegen. Hier kann zunächst gefolgert werden, dass es unabhängig von der Schleifscheibenbindungshärte zu einem Abtrag der Rauigkeitsspitzen der Ausgangsoberflächentopografie gekommen ist und die weicheren Bindungen darüber hinaus zu einer Einebnung und Glättung der Oberfläche geführt haben. Wie bereits zuvor erläutert, wird die Spanfläche sowohl im vorgelagerten Schleifprozess als auch bei der Nachbearbeitung der Spannuten mittels elastisch gebundener Schleifscheiben nur von der im Eingriff befindlichen Kante der Schleifscheibe bearbeitet. Es handelt sich hier deshalb per se um einen linienförmigen Kontaktbogen zwischen Schleifscheibe und Werkstück. In Abhängigkeit der Bindungshärte und in Analogie zu den bereits in Abbildung 6-9 dargestellten Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass sich mit geringerer Bindungshärte eine größere und nicht mehr nur linienförmige Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück ausbildet und es deshalb zu einer Zunahme der aktiven Schneiden und in Folge dessen zu einer verbesserten Oberflächenqualität kommt (**Abbildung 6-13**). Ähnlich der Betrachtung der Schleiftangentialkräfte kann auch bei der Analyse der Oberflächenqualitäten im Bereich der Spanfläche keine Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Arbeitseingriff erkannt werden.

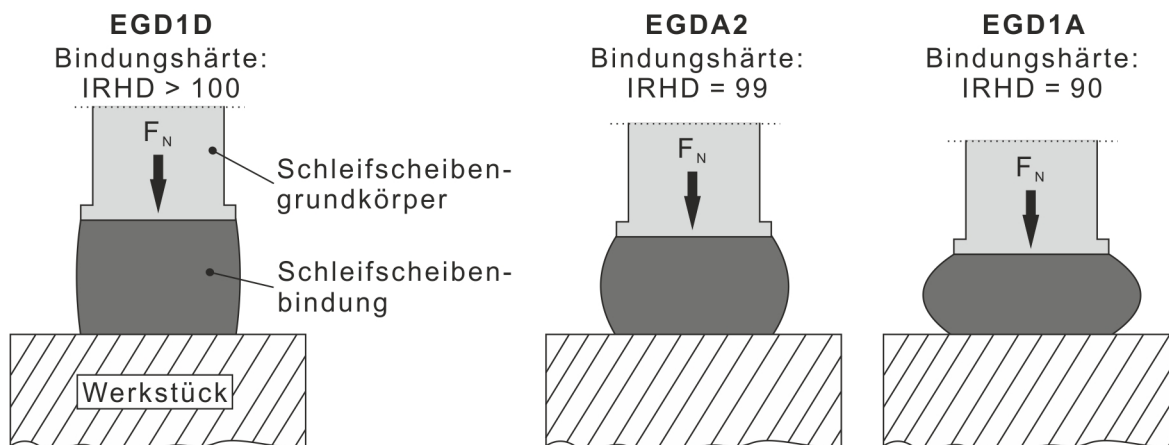


Abbildung 6-13: Verformungsvermögen des elastischen Bindungssystems unter Krafterwirkung in Abhängigkeit von der Bindungshärte

Während der Auswertung innerhalb dieser ersten Versuchsreihe zur Analyse des Einflusses der kardinalen Prozessparameter auf den Polierschleifprozess fiel eine hohe Streuung der Werte hinsichtlich der erzielten Oberflächenqualitäten auf. Bei Betrachtung der Spanfläche wurden die obenstehenden Oberflächenrauigkeiten erzielt. Bei detaillierterer Analyse der gesamten Spannutoberfläche zeigte sich jedoch, dass der Nutrücken, also diejenige Fläche der Nut, die zum einen nicht die wesentliche Funktionsfläche darstellt und zum anderen mit der Umfangsfläche der Schleifscheibe bearbeitet worden war, eine im Vergleich zur Spanfläche deutlich bessere Oberflächenqualität aufwies.

Auch bei einer Analyse der Oberflächengüten im Bereich des Nutrückens kann kein Einfluss von Vorschubgeschwindigkeit und Arbeitseingriff ausgemacht werden. Ähnlich den Ergebnissen bezüglich der Spanfläche weisen auch hier die Schleifscheibentypen 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S und 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 99 und IRHD = 90) ähnliche Verläufe der Oberflächenqualitätskenngrößen Rz und Rmax in Abhängigkeit von Vorschub-

geschwindigkeit und Arbeitseingriff auf, wohingegen der Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) zum Teil abweichende Verläufe erzeugt. Auch im Bereich des Nutrückens kann aus diesem Grunde der Schleifscheibenbindungshärte die wesentlichste Bedeutung in Bezug auf die resultierenden Oberflächengüten zugewiesen werden (**Abbildung 6-14**).

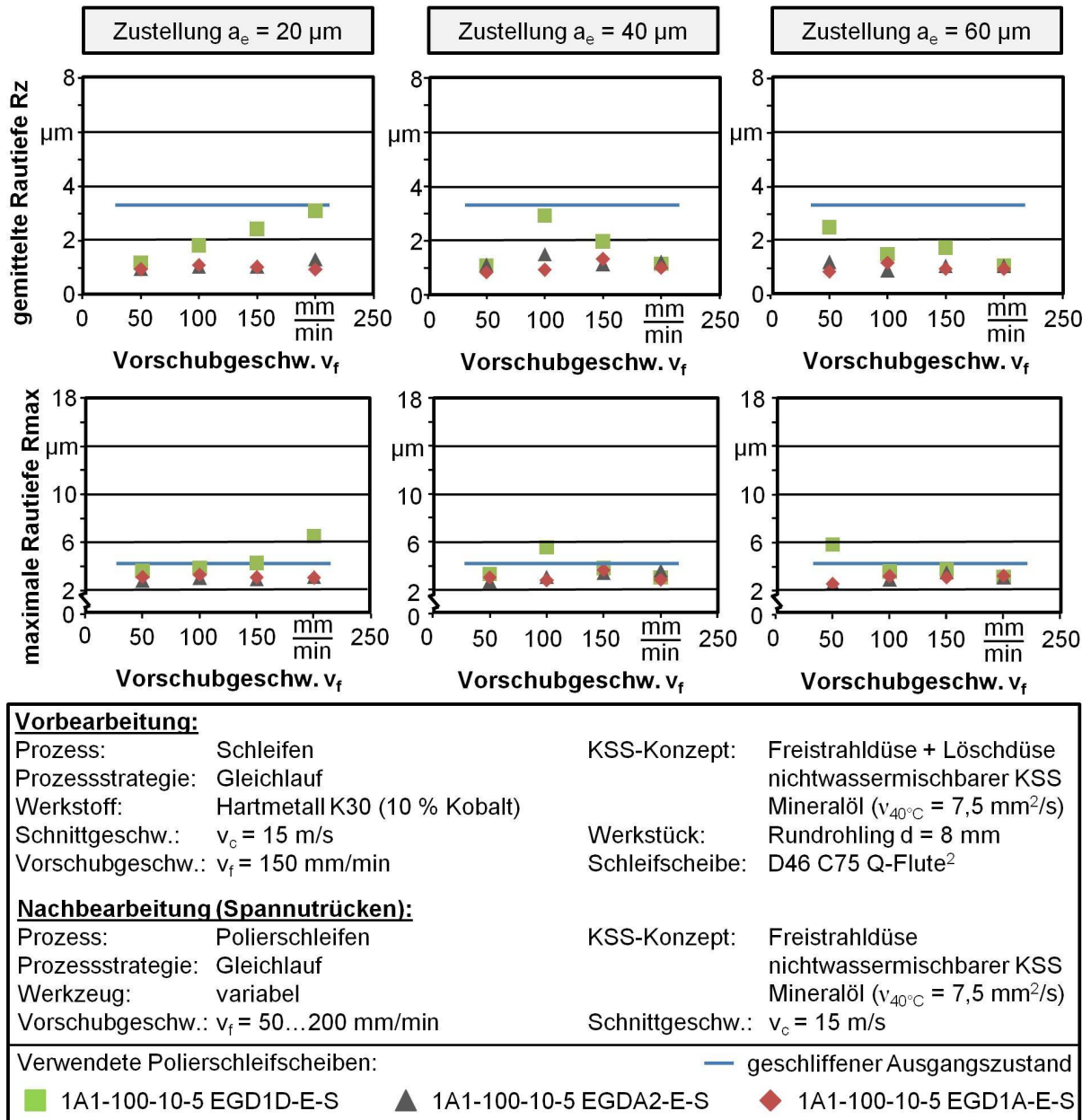


Abbildung 6-14: Oberflächenqualität der nachbearbeiteten Spannutrückenflächen unter Variation von Arbeitseingriff, Bindungshärte und Vorschubgeschwindigkeit

Dieses Phänomen kann auf die stark von der Bindungshärte abhängigen Kontaktflächenrößen zwischen Schleifscheibe und Werkstück und der Druckverteilung innerhalb dieser zurückgeführt werden. Wie schon in Abbildung 6-9 dargestellt, weist der Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S (IRHD = 99) eine sehr homogene Druckverteilung innerhalb der Kontaktzone auf. Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 90) hingegen zeichnet sich durch die größte Kontaktfläche und nur einen linienförmigen Bereich maximalen Kontaktdruckes aus. Das härteste Bindungssystem hingegen zeichnet sich durch eine im Vergleich wesentlich geringere Kontaktfläche und eine

inhomogene Verteilung des Kontaktdruckes in dieser aus. So kann hier gefolgert werden, dass es abhängig von der sich ausbildenden Größe der Kontaktfläche zwischen elastischem Schleifscheibenbindungssystem und Werkstück zu einer sich ändernden Oberflächengüte kommt.

Zur Verdeutlichung der resultierenden Oberflächengüten in Abhängigkeit der eingesetzten Schleifscheibenbindungshärten zeigt **Abbildung 6-15** einen qualitativen Vergleich mittels Weißlichtmikroskop analysierter Oberflächen im Bereich des Spannutrückens auf. Gezeigt werden zum einen die nach dem Polierschleifprozess resultierenden Oberflächentopografien sowie jeweils ein exemplarischer Rauheitsmessschrieb, der mittels der vorhandenen Auswertesoftware angefertigt worden ist.

Vorbearbeitung:			
Prozess:	Schleifen	Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Werkstück:	Bohrerrohling d = 8 mm
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$
Nachbearbeitung (Spannutrücken):			
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse
Werkstoff:	Hartmetall K30	Werkstück:	Bohrerrohling d = 8 mm
Arbeitseingriff:	$a_e = 20 \text{ }\mu\text{m}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 200 \text{ mm/min}$

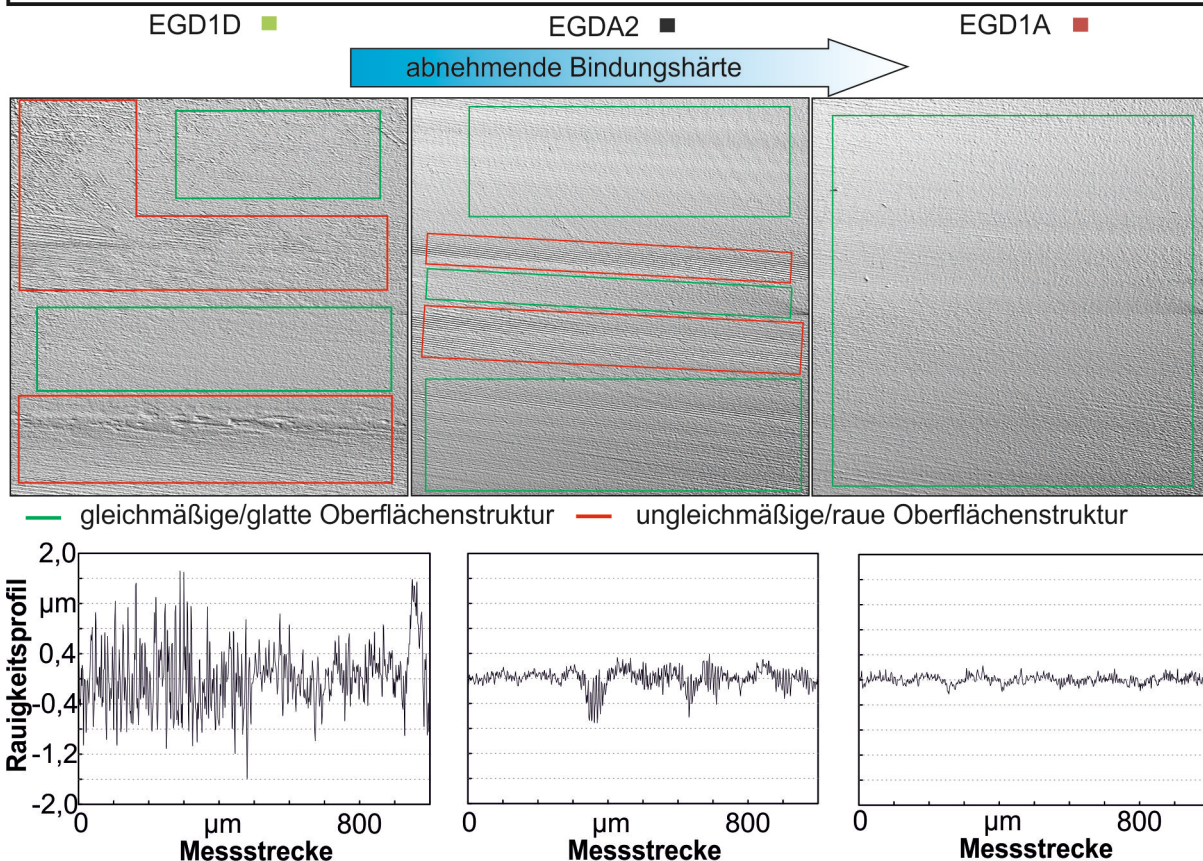


Abbildung 6-15: Qualitativer Vergleich der Oberflächengüten im Bereich des Spannutrückens in Abhängigkeit von der Schleifscheibenbindungshärte

Dabei wurden die Schleifscheiben mit identischen Prozessparametern und unter identischen Prozessbedingungen eingesetzt. Eine in Abhängigkeit der Schleifscheibenbindungshärte stark unterschiedliche Ausprägung der Oberflächentopografie kann detektiert werden. Vor

allem die Homogenität der Oberfläche hängt in starkem Maße von der gewählten Bindungshärte ab. Während das härteste Bindungssystem im Vergleich eine deutlich ungleichmäßige und an einigen Stellen noch mit starken Strukturen aus dem vorgelagerten Schleifprozess versehene Oberfläche erzeugt, bildet sich mit weicher und nachgiebiger werdender Schleifscheibenbindung qualitativ gesehen eine homogenere Oberfläche aus. Die Schleifscheibe mit der nachgiebigsten Bindung erzeugte so eine über die gesamte Nutrückenoberfläche gleichmäßige Oberflächenstruktur. Die Fähigkeit der Schleifscheibenbindung, sich mit zunehmender Nachgiebigkeit elastisch an die zu bearbeitenden Oberflächen anzupassen, ist hier als Ursache zu sehen. Auch die dargestellten Rauigkeitsmessschriebe bestätigen die zuvor getroffene Aussage. So nimmt mit weicher werdender Schleifscheibenbindung die Güte der poliergeschliffenen Oberflächen zu. Der hier gezeigte Effekt unregelmäßiger Oberflächentopografie hat natürlich auch unmittelbaren Einfluss auf die innerhalb der Arbeit dargestellten Messwerte hinsichtlich der Oberflächenqualität. Aus diesem Grunde wurden die Messungen an immer den gleichen Stellen auf der Werkstückoberfläche angefertigt und zusätzlich mehrere Einzelmessungen zu einem Mittelwert kombiniert, um reproduzierbare Werte zu erhalten.

Die Qualität der Schneidkante und Schneidenecke stellen einen wesentlichen, die Effizienz von Zerspanwerkzeugen determinierenden Faktor dar. Sie bestimmen maßgeblich die Standzeit und die Prozessstabilität. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Schneidkante sowie der Spannutrückenkante geben einen Aufschluss über das qualitative Ergebnis der Polierschleifbearbeitung, insbesondere an den für die Spanbildung wesentlichen Elementen der Zerspanwerkzeuge (**Abbildung 6-16** bis **Abbildung 6-18**).

Der bereits in den quantitativen Ergebnissen herausgestellte Unterschied zwischen der Güte der Nachbehandlung im Bereich der Spanfläche und der Nutrückfläche wird hier offensichtlich (vgl. **Abbildung 6-12** und **Abbildung 6-14**). Vor der eigentlichen Analyse soll an dieser Stelle nochmals Erwähnung finden, dass bei allen Versuchswerkstücken lediglich die Spannuten geschliffen wurden. Die Rundrohlinge waren bereits herstellerseitig mit einem Spitzenanschliff versehen, so dass die abgebildeten Freiflächen nicht Gegenstand der Untersuchungen waren und nicht im Rahmen der Arbeit erzeugt wurden. Die in den Abbildungen zu sehende raue Freiflächenoberfläche und damit einhergehend auch eine relativ große Kantenschartigkeit sind demnach nur bedingt auf die Schleifbearbeitung der Spannuten zurückzuführen. In den Abbildungen sind jeweils für einen Schleifscheibentyp die Schneidkanten- und Spannutrückenkantenbeschaffenheiten für unterschiedliche Arbeitseingriffe von $a_e = 20 \mu\text{m}$ bis $a_e = 60 \mu\text{m}$ dargestellt. Eine im Rahmen der Untersuchungen durchgeführte Auswertung ergab, dass die Vorschubgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die qualitative Ausgestaltung der Spanfläche sowie Schneidkante ausübt, weshalb hier der Arbeitseingriff als relevante Größe festgesetzt und visualisiert wurde.

Generell decken sich die nachfolgend dargestellten qualitativen Eindrücke direkt an der Schneidkante nicht in jedem Fall mit allen Werten der optischen Rauigkeitsmessungen. Als Ursache kann wiederum die sich über die gesamte Nutoberfläche nicht gleichmäßig ausbildende Oberflächenverbesserung durch die Polierschleifbearbeitung sowie die Tatsache, dass gerade der Einlauf der Schleifscheibe in einem instationären und stetigen Anstieg der Schleifkraftkomponenten resultiert, angeführt werden. Insbesondere im Einlaufbereich der Schleifscheibe kommt es zu einem langsamen Aufbau des Bearbeitungsdruckes zwischen Schleifscheibe und zu bearbeitendem Werkstück. Dieser Umstand führt in der Folge zu teilweise nicht optimal nachbehandelten Schneidkanten.

Die qualitativen Oberflächengüten, die mittels der Schleifscheibe mit dem am wenigsten nachgiebigen und härtesten Bindungssystem 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) erzeugt wurden, sind in Abbildung 6-16 dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Polierschleifbearbeitung mit elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben im Bereich des Spannutrückens schon bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 20 \mu\text{m}$ zu einer deutlichen Glättung der Oberfläche führt und eine weitere Steigerung des Arbeitseingriffs keinen signifikanten Effekt auf die Oberflächengüte des Spannutrückens mehr zeigt.

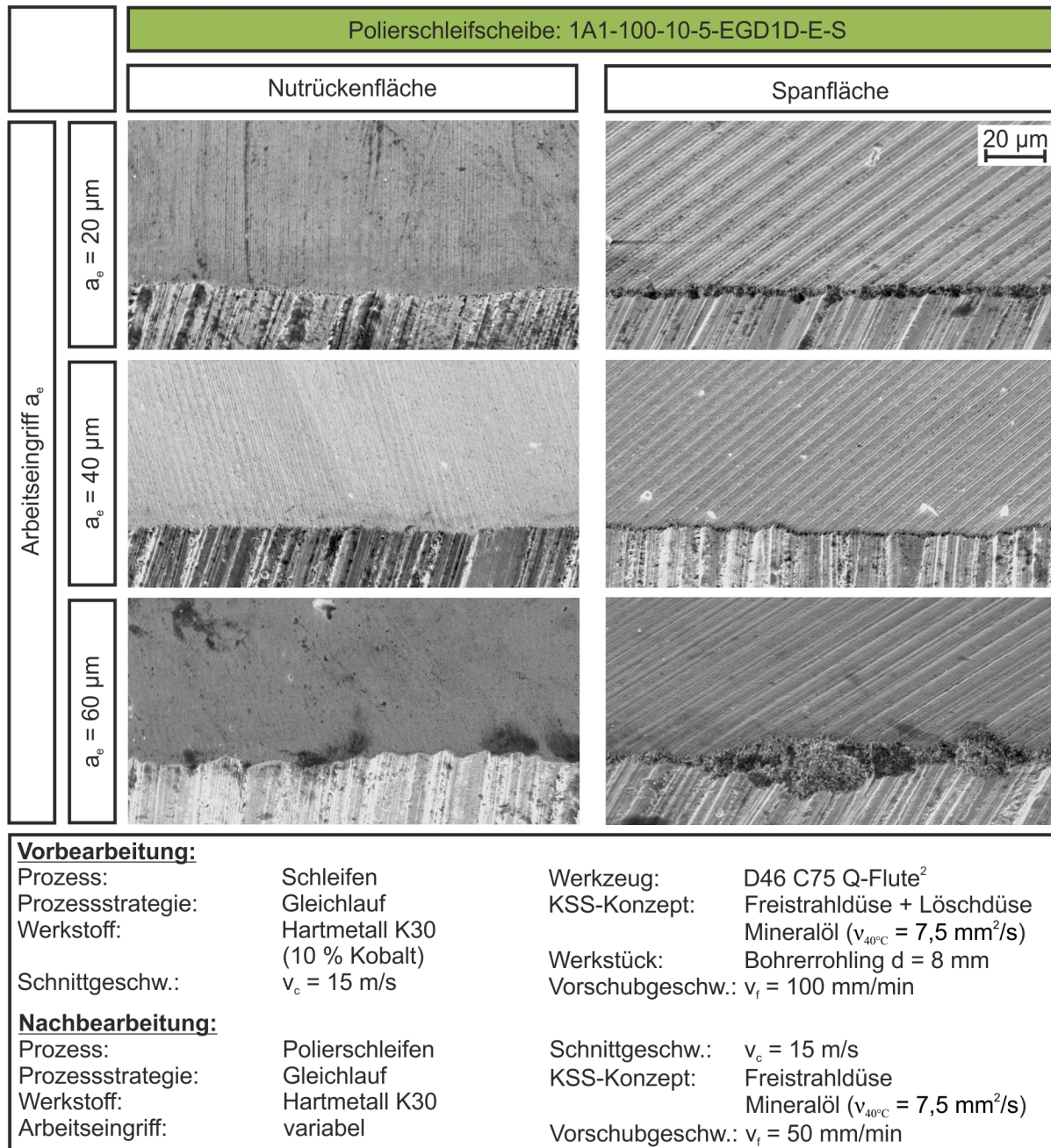


Abbildung 6-16: Qualitative Ergebnisbeurteilung nach einer Variation des Arbeitseingriffs I

Die Spanflächen als eigentliche Funktionselemente der Spannut, die mittels des harten Bindungstyps bearbeitet worden sind, zeigen erst bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 60 \mu\text{m}$ eine minimal geglättete Oberfläche auf, wobei die Profilriefen aus dem vorgelagerten Schleifprozess jedoch noch deutlich erkennbar sind.

Der bereits angesprochene Aspekt, dass sich die Schleifscheibentypen 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S und 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 99 und IRHD = 90) im Prozess ähnlich verhalten und dies in vergleichbaren Oberflächengüten resultiert, kann auch in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wieder beobachtet werden. Im Vergleich zum harten Bindungssystem zeigen auch die mit dem mittelharten Bindungssystem bearbeiteten Oberflächengüten im Bereich des Spannutrückens bereits ab einem Arbeitseingriff von $a_e = 20 \mu\text{m}$ eine deutliche Verbesserung auf. Im Bereich der Spanfläche kommt es dagegen mit steigendem Arbeitseingriff zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengüte.

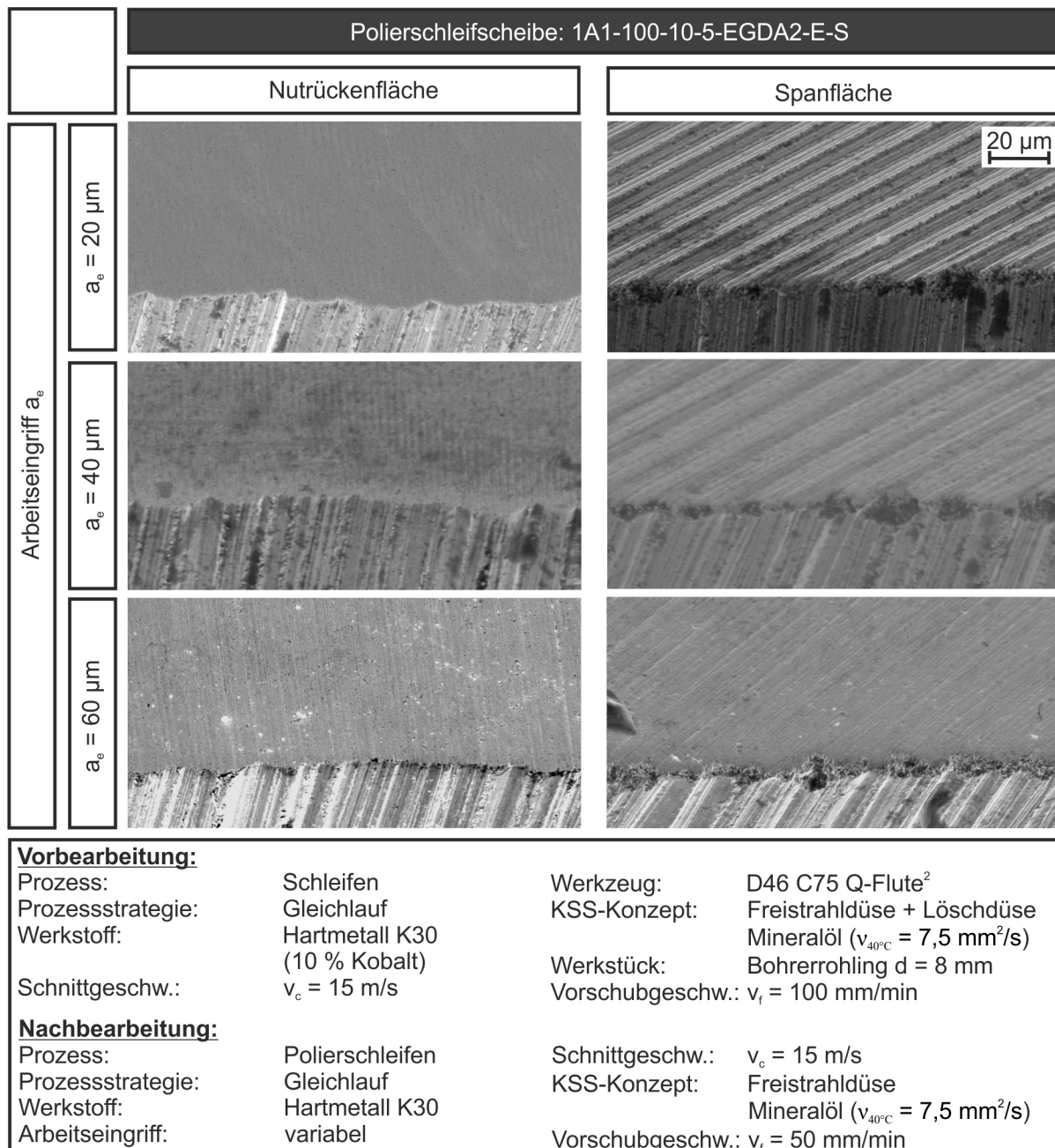


Abbildung 6-17: Qualitative Ergebnisbeurteilung einer Variation des Arbeitseingriffs II

Während im Bereich der Spanfläche bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 20 \mu\text{m}$ kaum Einfluss der Nachbearbeitung zu erkennen ist, werden bei einer Zustellung von $a_e = 40 \mu\text{m}$ bereits die Profilspitzen des Schleifprofils aus der Vorbearbeitung geglättet. Bei einem Arbeitseingriff von $a_e = 60 \mu\text{m}$ sind Spannutrücken und Spanfläche qualitativ gesehen identisch und

gleichmäßig nachbearbeitet worden. Das Oberflächenprofil aus dem vorgelagerten Schleifprozess wurde vollständig eingeebnet.

Auch das Bindungssystem mit der geringsten Härte 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S führt generell zu ähnlichen Ergebnissen wie die zuvor dargestellte mittelharte Schleifscheibenbindung. So führt ein steigender Arbeitseingriff auch im Bereich der Spanfläche zu einer sukzessive höheren Oberflächengüte.

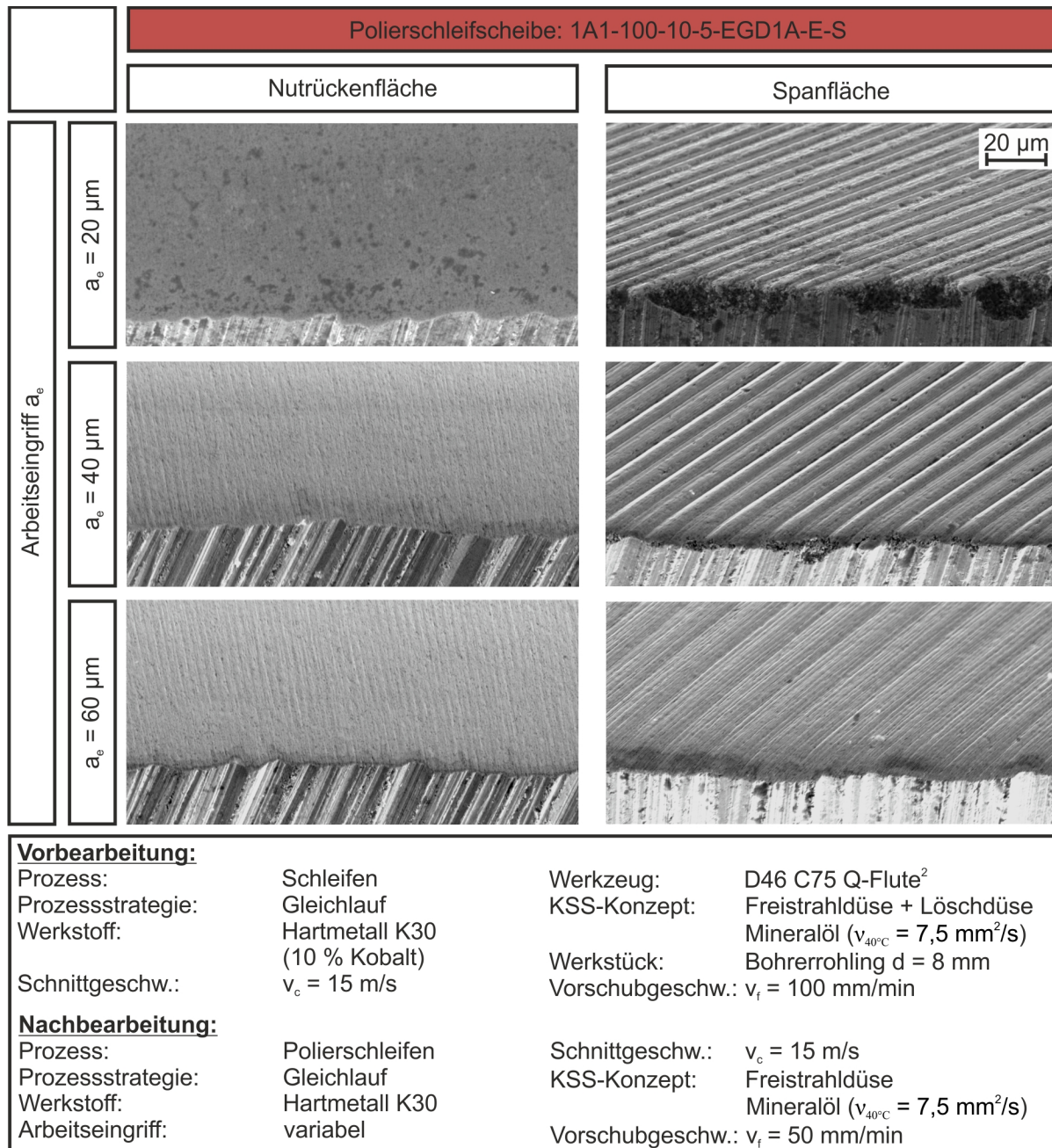
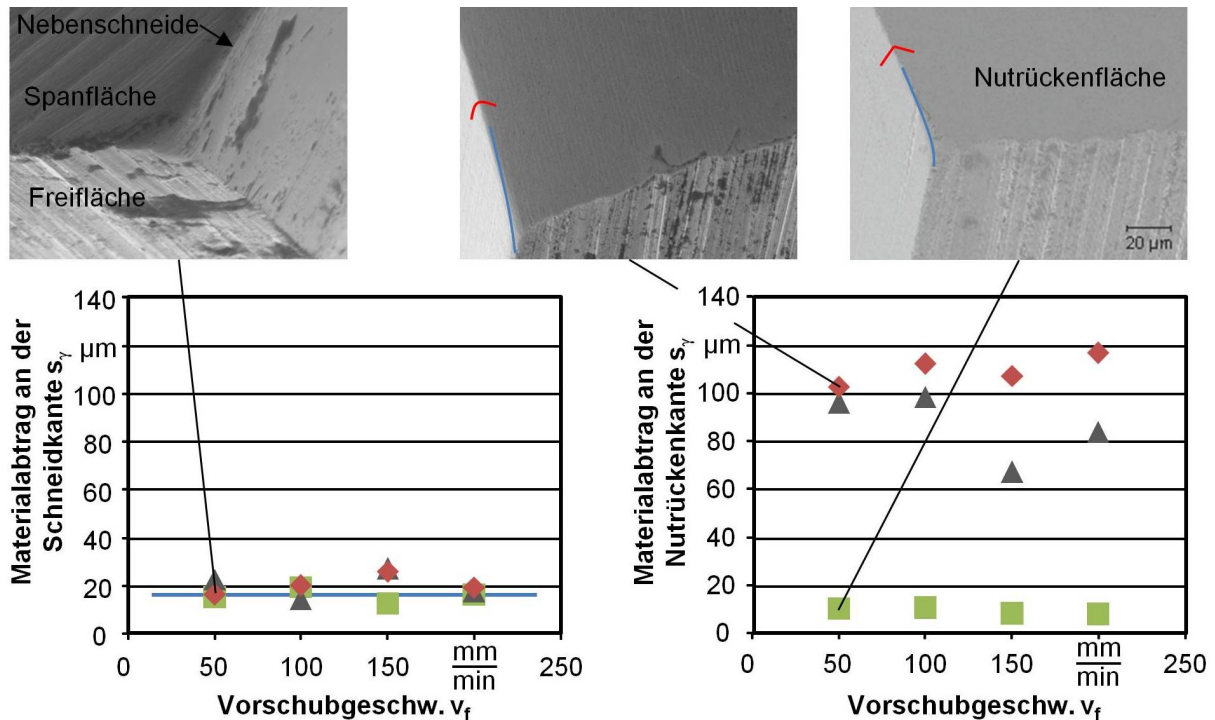


Abbildung 6-18: Qualitative Ergebnisbeurteilung einer Variation des Arbeitseingriffs III

Im Unterschied zu den zuvor betrachteten Schleifscheibenbindungshärten kommt es bei der Nachbearbeitung der Spannuten mit dem nachgiebigsten Bindungssystem zusätzlich zu einer Schneidkantenverrundung und deutlichen Verbesserung der Schneidkantenqualität. Im Vergleich zu den beiden härteren Bindungssystemen sind die Ausbrüche entlang der Schneidkante bereits ab einem Arbeitseingriff von $a_e = 40 \mu\text{m}$ reduziert und ab einem Arbeitseingriff von $a_e = 60 \mu\text{m}$ in Gänze geglättet.

Bei einem Vergleich der drei in der Härte beziehungsweise Nachgiebigkeit variierenden Bindungssysteme in Bezug auf die im untersuchten Parameterraum produzierten qualitativen Oberflächengüten kann eine Abstufung unter den eingesetzten Bindungssystemen vorgenommen werden. Auch hier zeigt sich, dass vor allem die Bindungshärte einen Einfluss auf das Prozessergebnis in Form der Oberflächengüte ausübt. Das Bindungssystem mit der höchsten Härte ist zu unflexibel und kann sich nicht an die zu bearbeitende Oberfläche der Spannut anpassen, so kommt es vor allem im Einlaufbereich zu einer Oberfläche, die noch deutlich von den aus dem Tiefschleifprozess erzeugten Strukturen geprägt ist. Eine geringere Bindungshärte erlaubt hingegen eine größere Verformung und so den Ausgleich von Höhenunterschieden im zu bearbeitenden Profil und erzeugt mit steigendem Arbeitseingriff besser werdende Oberflächengüten. Aufgrund der weichen Bindung kann mit diesem Bindungssystem aber nur wenig Materialabtrag realisiert werden. Die in diesem Fall optimale Kombination aus Flexibilität des Bindungssystems und Härte, um den benötigten Materialabtrag des Rauigkeitsprofils aus dem Tiefschleifprozess abzutragen, stellt das Bindungssystem mit einer Härte von IRHD = 99 bereit.

Gerade die Möglichkeit, die Schneidkante von Zerspanwerkzeugen zu bearbeiten, bietet großes Optimierungspotenzial in der Fertigung. So kann im Idealfall die Qualität von Zerspanwerkzeugen innerhalb eines einzigen Nachbearbeitungsprozessschrittes hinsichtlich der Spanflächenqualität und Schneidkantenqualität verbessert werden. Aus diesem Grunde sollen die Möglichkeiten der drei Schleifscheibenbindungssysteme diesbezüglich näher analysiert werden. **Abbildung 6-19** zeigt quantitativ die mit den unterschiedlichen Bindungshärten realisierbaren Materialabträge sowohl an der Spanfläche als auch an der Spannutrückenfläche auf. Darüber hinaus wird eine qualitative Betrachtung der Form des Materialabtrages mit Hilfe rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen durchgeführt. Aufgrund der bereits geschilderten Tatsache, dass innerhalb der vorliegenden Arbeit nur die Spanflächen beziehungsweise die Spannuten geschliffen wurden, wird sich bei der Analyse hier lediglich auf den Materialabtrag an den Spanflächen beziehungsweise an der Nutrückenkante s_γ konzentriert. Der Unterschied zwischen den Werten für s_γ an der Spanfläche und der Nutrückenfläche fällt gravierend aus. Während an der Spanfläche ein Wert von $s_\gamma \approx 20 \mu\text{m}$, unabhängig vom eingesetzten Bindungssystem sowie der gewählten Vorschubgeschwindigkeit, gemessen wurde, ergibt sich im Bereich des Spannutrückens ein differenziertes Bild. Hier zeigt sich wiederum ein Unterschied zwischen den Resultaten im Hinblick auf die Härte des eingesetzten Bindungssystems. Während das Bindungssystem 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) unabhängig von der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit einen Materialabtrag von $s_\gamma \approx 10 \mu\text{m}$ verursacht, verhalten sich die weicheren Bindungssysteme abweichend. Mit den Bindungssystemen 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S und 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 99 und IRHD = 90) kann ein Materialabtrag im Bereich von $s_\gamma \approx 90 \mu\text{m}$ bis $s_\gamma \approx 120 \mu\text{m}$ realisiert werden, der deutlich über den gemessenen Werten des harten Bindungssystems liegt. Zu erwähnen bleibt jedoch, dass die Nutrückenkante im Werkzeugeinsatz der Bohrer eine zu vernachlässigende Bedeutung hat.



<u>Vorbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse nichtwassermischbarer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Schleifen	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf	Schleifscheibe:	D46 C75 Q-Flute ²
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)		
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$		
<u>Nachbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse nichtwassermischbarer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf		
Arbeitseingriff:	$a_e = 20 \text{ µm}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 50 \dots 200 \text{ mm/min}$		
Verwendete Polierschleifscheiben:		— geschliffener Ausgangszustand	
■ 1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲ 1A1-100-10-5 EGDA2-E-S	◆ 1A1-100-10-5 EGD1A-E-S	

Abbildung 6-19: Realisierbarer Materialabtrag s_γ an der Span- und Nutrückenkante

Der gravierende Unterschied zwischen dem Materialabtrag an der Spanfläche und an der Nutrückfläche kann auf die sich ausbildenden Druckverhältnisse innerhalb der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück zurückgeführt werden. Ebenso spielt die Größe der Kontaktfläche eine wichtige Rolle. Hinsichtlich des Bindungssystems kann an der Nutrückfläche nicht nur mit weicher werdender Bindung ein größerer, sondern auch ein in der Gestalt abweichender Materialabtrag ausgemacht werden. Mit abnehmender Bindungshärte wird eher eine Verrundung erzeugt. **Abbildung 6-20** zeigt schematisch den realisierbaren Materialabtrag an der Nutrückenkante zur Freifläche unter Variation der Schleifscheibenbindungshärte auf.

In Abhängigkeit von der Nachgiebigkeit der Schleifscheibenbindung kommt es insbesondere im Einlaufbereich zu voneinander abweichenden Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück. Die härteste Bindung ähnelt in ihrem Verhalten dem einer konventionellen kunstharzgebundenen Schleifscheibe und führt zu einer Nutrückenkante mit nahezu keiner Verrundung. Auch im Einlaufstadium der Schleifscheibe wird gleichmäßig

Material auf der Nutrückfläche entfernt. Mit weicher werdender Schleifscheibenbindung gibt das System, bestehend aus Bindung und Abrasivkörnern, im Einlaufbereich der Schleifscheibe elastisch nach und es kommt gerade im Bereich der Nutrückenkante und auch der Schneidkante, in dem die Bearbeitungskräfte noch gering sind, zu einer ebenso geringen Rückfederung der Schleifscheibenbindung. In Folge dessen ist der realisierte Materialabtrag an der Kante am größten und nimmt dann mit Zunahme der Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück und dem dem entsprechenden Kontaktdruck ab. Erst nach dem vollständigen Eintritt der Schleifscheibe in den Eingriff und die Ausbildung der vollständigen Kontaktzone wird ein quasi-stationärer Bereich mit gleichmäßigem Materialabtrag erreicht.

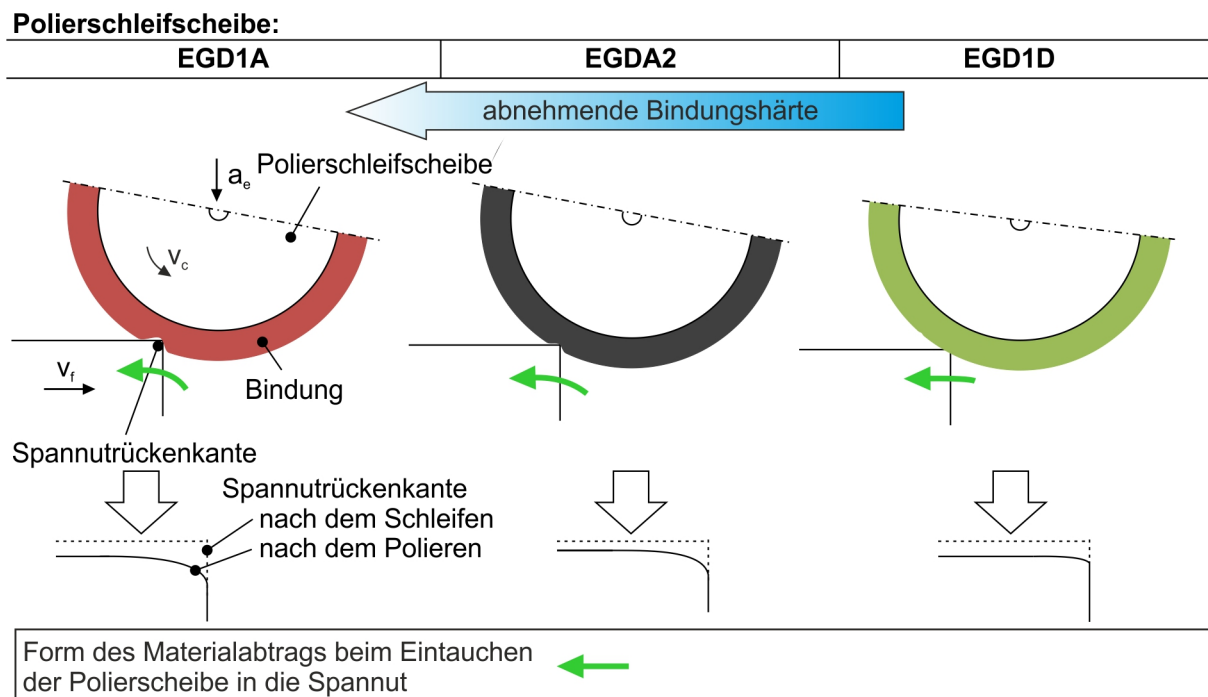


Abbildung 6-20: Schematische Darstellung des Materialabtrages an der Spannutrückenkante

Mit steigender Elastizität der Bindung wird eine größere Verrundung im Bereich der Spannutrückenkante erreicht, die, wie zuvor schon aufgezeigt, auch die Ausbrüche entlang der Kante egalisiert und somit die Qualität der Kante deutlich steigert. Die zuletzt aufgezeigten Ergebnisse beziehen sich vor allem auf den Spannutrücken und dessen Kante zur Freifläche. Da aber die Spanfläche und daran angrenzende Schneidkante die eigentlichen Funktionselemente von Vollhartmetallzerspannwerkzeugen darstellen, wird im Folgenden versucht, durch eine Erweiterung des Prozessmodells um die seitliche Zustellung a_p die Spanfläche effektiver zu bearbeiten.

6.6 Einfluss der seitlichen Zustellung a_p auf das Prozessergebnis

Im Kapitels 6.5 konnten grundlegende Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern beim Polierschleifen und den resultierenden Bearbeitungskräften sowie Oberflächengüten erarbeitet werden. Innerhalb des untersuchten Parameterraums war jedoch nur ein enges Prozessfenster ersichtlich, in dem sowohl der Spannutrücken als auch die Spanfläche, das eigentliche Funktionselement der Spannut, eine ausreichende Oberflächengüte aufwiesen. Aus diesem Grund wird im Folgenden angestrebt, durch die seitliche Zustellung a_p , den

Kontaktdruck zwischen Werkstückoberfläche und Schleifscheibenkante in der Art zu steigern, dass eine gleichmäßig polierte Nutoberfläche sowohl im Bereich der Spanfläche als auch des Nutrückens entsteht.

Die Erkenntnisse, die sich aus der Entwicklung des Prozessmodells zur Polierschleifbearbeitung von Spannuten mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben gewinnen lassen, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im untersuchten Parameterraum werden die resultierenden Bearbeitungskräfte von der Schleifscheibenbindungshärte dominiert.
- Die Oberflächenqualität hingegen hängt sowohl von der Bindungshärte als auch dem Arbeitseingriff a_e ab.
- Zum Teil werden bei der Messung der Oberflächenqualität der gesamten Spannut stark inhomogene Oberflächengüten erzeugt.
- Die durch Nachbearbeitung mittels Polierschleifen erreichten Prozessergebnisse sind im Bereich des Spannutrückens in der Regel deutlich besser als auf der Spanfläche.
- Es bildet sich lediglich ein kleines Prozessfenster aus, in dem die Nuten auch im Bereich der Spanfläche gleichmäßig und homogen nachbearbeitet wurden (Bindungshärte IRHD = 99 und eine Zustellung von $a_e = 60 \mu\text{m}$).

Aus dem Anspruch heraus, nicht nur im aufgezeigten Prozessfenster, sondern auch darüber hinaus gleichmäßig gute Oberflächenqualitäten zu erzeugen, ergibt sich die Notwendigkeit, das Prozessmodell um die seitliche Zustellung a_p zu ergänzen. So soll untersucht werden, ob durch diesen zusätzlichen Prozessparameter der Bearbeitungsdruck zwischen Schleifscheibe und Werkstück im Bereich der Spanfläche erhöht und so gerade in diesem Bereich der Spannut bessere Oberflächenqualitäten realisiert werden können. **Abbildung 6-21** gibt die vorherrschenden Kontaktbedingungen zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück im Bereich der Spanfläche innerhalb der Spannuten wieder.

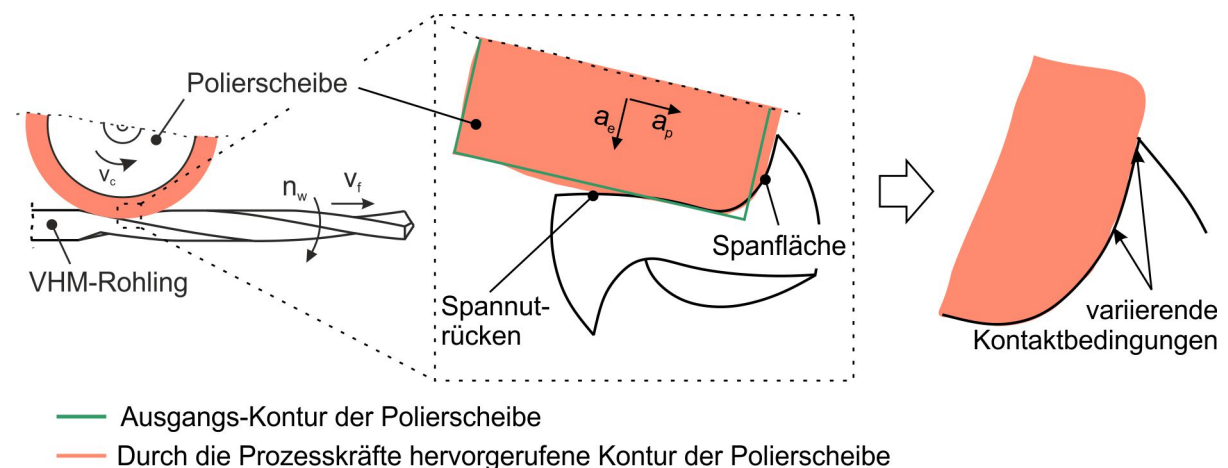


Abbildung 6-21: Einfluss der seitlichen Zustellung a_p auf die Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück

Die Fähigkeit der Schleifscheibe, sich durch ihr elastisches Bindungssystem an die konkave Oberflächenstruktur der Spanfläche anpassen zu können, ist hier von entscheidender Bedeutung. Neben der Schnittgeschwindigkeit v_c , der Vorschubgeschwindigkeit v_f und dem Arbeitseingriff a_e bietet sich mit dem Prozessparameter der seitlichen Zustellung a_p die Möglichkeit, den Kontaktdruck zwischen Schleifscheibe und der Spanfläche zu erhöhen. So

sollen gleichmäßige Kontaktbedingungen mit permanentem Kontakt zwischen Schleifscheibe und Werkstück hergestellt und auch ein homogener Bearbeitungsdruck erzeugt werden, der in einem gleichmäßigen, homogenen Materialabtrag resultiert.

Der Einfluss einer Variation der seitlichen Zustellung a_p auf die sich ergebenden Poliertangentialkräfte soll im Vergleich zu den zuvor aufgenommenen Prozesskräften Aufschluss über eine Veränderung der Eingriffsbedingungen geben (**Abbildung 6-22**). Die seitliche Zustellung wurde in einem Bereich von $a_p = 0 \mu\text{m}$ in Schritten von $a_p = 20 \mu\text{m}$ auf einen Wert von $a_p = 80 \mu\text{m}$ gesteigert. Innerhalb dieses Parameterraums kam es jedoch beim Einsatz der Schleifscheibe des Typs 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S (IRHD = 99), aufgrund der zuvor dargestellten mechanischen Eigenschaften und hier insbesondere im Vergleich zu den anderen Schleifscheibentypen großen plastischen Verformungsvermögens, schon bei einer Zustellung von $a_p = 20 \mu\text{m}$ zu einer Zerstörung des Bindungsmaterials, so dass mit diesem Schleifscheibentyp keine weiteren Prozessparametervariationen durchgeführt werden konnten. Dargestellt sind für diesen Schleifscheibentyp nur die Werte für $a_p = 0 \mu\text{m}$.

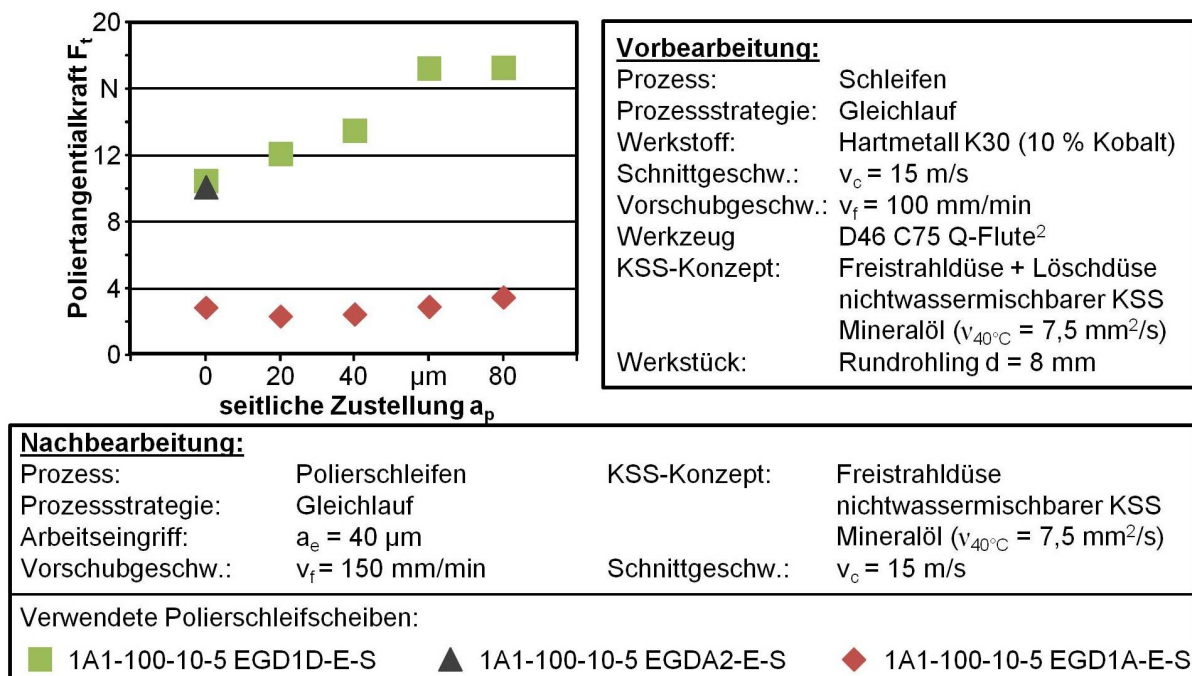
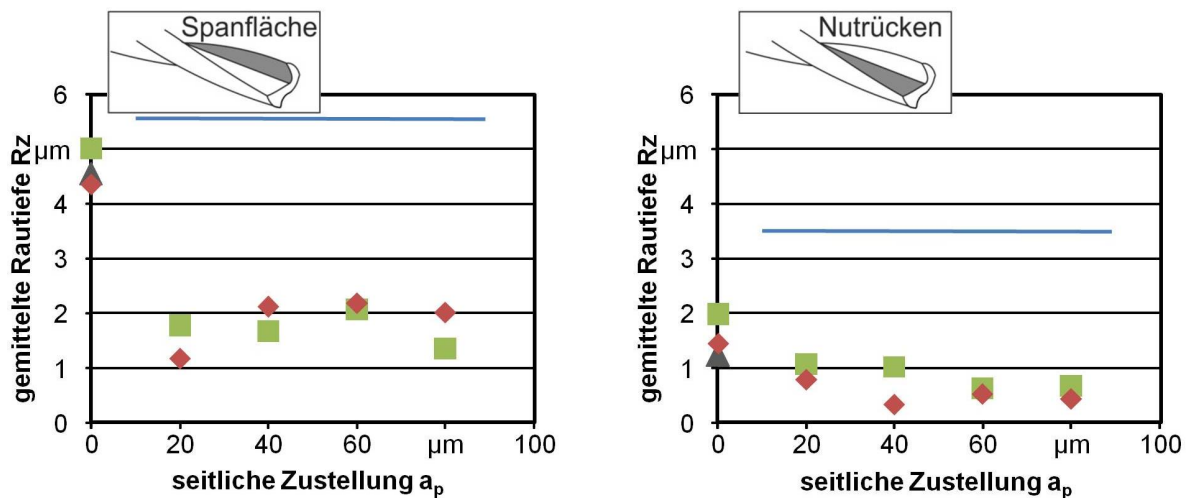


Abbildung 6-22: Einfluss einer Variation der seitlichen Zustellung auf die Poliertangentialkraft

Als Schnittgeschwindigkeit wurde wie in den Versuchen zuvor ein Wert von $v_c = 15 \text{ m/s}$ gewählt und als Vorschubgeschwindigkeit wurde ein Wert von $v_f = 150 \text{ mm/min}$, der sich in den vorangegangenen Untersuchungen als Optimum aus Oberflächengüte und Wirtschaftlichkeit herausgestellt hat, eingestellt. Die bei der Variation der seitlichen Zustellung aufgenommenen Poliertangentialkräfte zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den untersuchten Bindungstypen auf. So zeigt der Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S (IRHD = 90) Tangentialkräfte im Bereich von $F_t \approx 2$ bis 4 N , die auch mit zunehmender seitlicher Zustellung nicht ansteigen. Der Schleifscheibentyp 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) hingegen erzeugt Tangentialkräfte, die mit steigender seitlicher Zustellung ansteigen und einen Maximalwert von $F_t \approx 30 \text{ N}$ bei einer Zustellung von $a_p = 80 \mu\text{m}$ erreichen. Die härtere Schleifscheibenbindung setzt dem Werkstück mit zunehmender seitlicher Zustellung mehr Widerstand entgegen, wohingegen bei der weicheren

Bindungsspezifikation die in den Prozess eingebrachten Kräfte eher in einer Verformung der Bindung resultieren.

Mit der Zielsetzung, gleichmäßige Oberflächenstrukturen sowohl auf der Spanfläche als auch der Nutrückfläche zu erzeugen, wurden die sich ergebenden Oberflächengüten zunächst quantitativ ausgewertet (**Abbildung 6-23**). Innerhalb der Abbildung sind wie zuvor die Werte der ausgangsseitig geschliffenen Oberflächen blau gekennzeichnet. Es ist eine offensichtliche Verbesserung der Oberflächengüten zu beobachten. Während im Bereich der Nutrückfläche wie bereits bei den innerhalb von Kapitel 6.5 gezeigten Ergebnissen eine Reduzierung der Rauigkeiten von ausgangseitigen $Rz \approx 3,5 \mu\text{m}$ auf einen Wert von $Rz \approx 1 \mu\text{m}$ möglich ist, sind nun auch die Rauigkeiten im Bereich der Spanfläche im Vergleich zu den geschliffenen Oberflächen stark reduziert.



Vorbearbeitung:		KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse nichtwassermischer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Schleifen	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf	Schleifscheibe:	D46 C75 Q-Flute ²
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)		
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$		
Nachbearbeitung:		KSS-Konzept:	Freistrahldüse nichtwassermischer KSS Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf		
Arbeitseingriff:	$a_e = 40 \mu\text{m}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$		
Verwendete Polierschleifscheiben:		— geschliffener Ausgangszustand	
■	1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲	1A1-100-10-5 EGDA2-E-S
◆	1A1-100-10-5 EGD1A-E-S		

Abbildung 6-23: Oberflächenqualität der nachbearbeiteten Spannutrücken- und Spanflächen unter Variation der seitlichen Zustellung a_p

Unabhängig von der seitlichen Zustellung werden bereits ab einem Wert von $a_p = 20 \mu\text{m}$ Rauigkeiten von $Rz \approx 1,5 \mu\text{m}$ erreicht. Dies entspricht eine Verbesserung der Oberflächengüte um einen Wert von $Rz \approx 4 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6-12). Die aus den Kraft-Weg-Diagrammen in Kapitel 6.2 abgeleiteten deutlichen Unterschiede hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften führen zu dem im Schleifscheibeneinsatz zuvor detektiertem Verhalten in Abhängigkeit der Bindungshärte der Polierschleifscheiben. So kann zunächst bestätigt werden, dass eine geringere Härte, verbunden mit einer geringeren Zugkraft, dazu führt, dass sich die Polierschleifscheibe besser an die komplexe Nutoberflächen anpassen

kann. Die frühzeitige Zerstörung der Polierschleifscheibe mit dem mittelharten Bindungssystem kann auf die ausgeprägte Phase plastischer Verformung zurückgeführt werden. Diese führt auch dazu, dass dieses Bindungssystem, aufgrund der optimalen Kombination aus Verformungsvermögen und Härte, die besten Oberflächengüten erzeugen kann.

Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-26 geben die qualitativ mittels Rasterelektronenmikroskop ausgewerteten Oberflächengüten im Bereich der Schneidkante und Spannutrückenkante wieder. Beginnend mit dem härtesten Bindungssystem 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S, ist wiederum ein großer Unterschied zwischen den Oberflächengüten auf den Spanflächen und den Nutrückflächen ersichtlich. Somit decken sich die dargestellten Ergebnisse nicht unmittelbar mit denen der quantitativen Rauigkeitsmessungen. Dies ist auf die zuvor bereits angesprochenen Bedingungen im Einlaufbereich der Schleifscheibe zurückzuführen. Die optischen Messungen mithilfe der Weißlichtmikroskopie zur Erlangung der quantitativen Messwerte konnten nicht direkt an der Schneidkante durchgeführt werden. Hier wurde, um ein komplettes und gleichzeitig möglichst großes Messfeld zu erzeugen, in einem Bereich hinter der Schneidkante und Spannutrückenkante auf der Spanfläche und Nutrückfläche gemessen. Auch eine seitliche Zustellung der Schleifscheibe führt bei direkter Betrachtung der Schneidkante nicht zu dem gewünschten Effekt einer Verbesserung der Oberflächengüten und Schneidkantenqualität. Auch mit der maximal eingestellten seitlichen Zustellung von $a_p = 80 \mu\text{m}$ konnte hier keine Verbesserung erreicht werden. Im weiteren Verlauf der Spannut kommt es aber, wie die Messwerte der optischen Rauigkeitsmessungen bestätigen, zu den gewünschten Oberflächengüten. So kann hier eine ungleichmäßige Politur in Achsrichtung des Werkstückrohrlings entlang der Spannut detektiert werden.

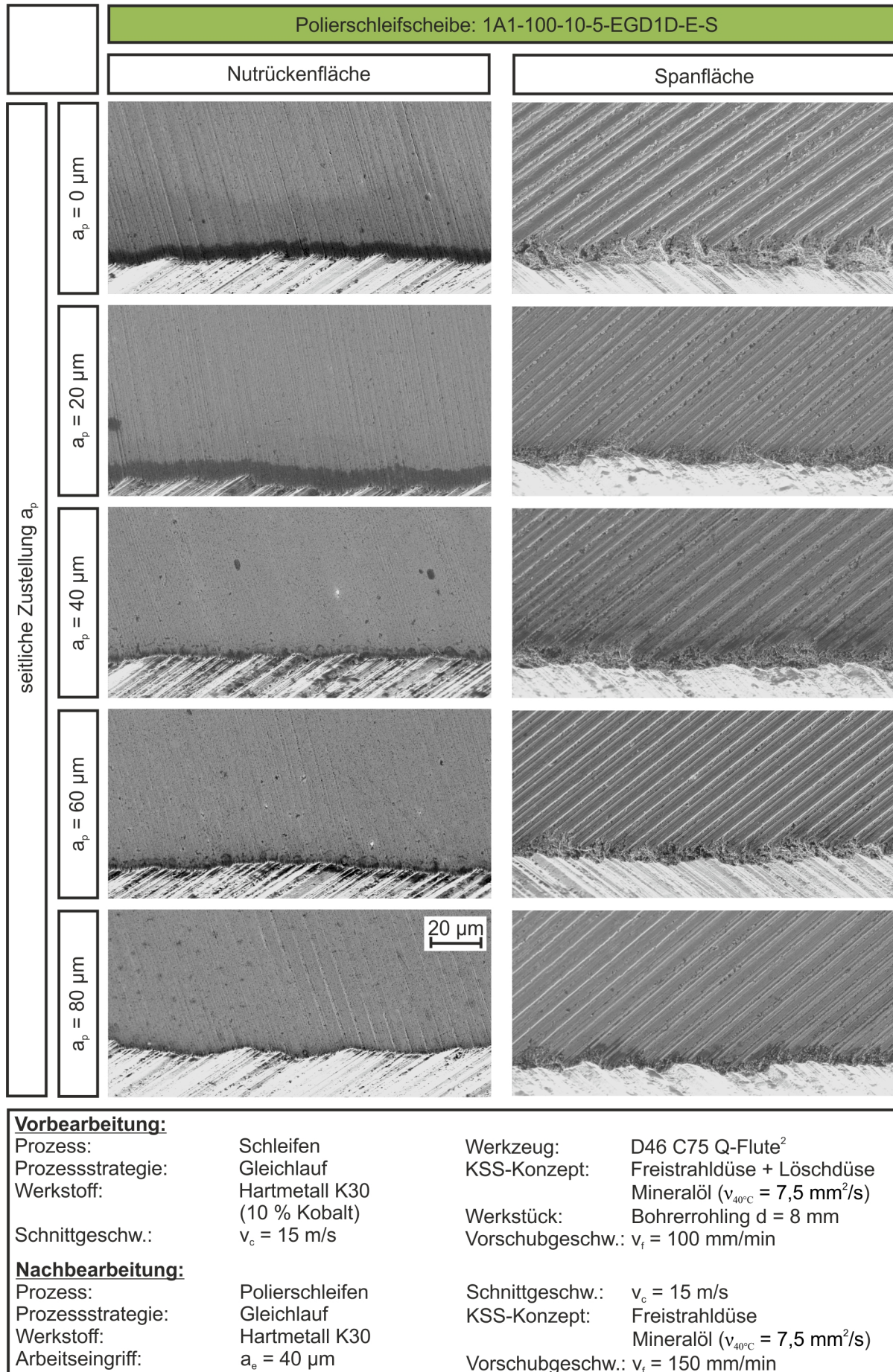


Abbildung 6-24: Ergebnisbeurteilung einer Variation der seitlichen Zustellung (EGD1D)

Bei Betrachtung der qualitativen Oberflächenanalysen, die mithilfe des mittelharten Bindungssystems 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S bearbeitet wurden, kann ein vollkommen gegensätzliches Ergebnis beobachtet werden. Bereits bei dem untersuchten Anfangswert von $a_p = 0 \mu\text{m}$ kommt es sowohl im Bereich des Spannutrückens und der Spannutrückenkante als auch im Bereich der Spanfläche und Schneidkante zu einem homogenen und hinsichtlich der erzeugten Oberflächengüten sehr gutem Resultat. Bei einer seitlichen Zustellung von $a_p = 20 \mu\text{m}$ wurde die Schleifscheibe bereits durch die während der Bearbeitung und hier insbesondere im Anfangsbereich auftretenden zu großen Belastungen beschädigt. Das mittelharte Bindungssystem stellt dennoch auch hier die optimale Kombination aus Bindungshärte und Elastizität dar. Insbesondere die Bindungshärte ist als wesentlich zu nennen. Die mittlere Härte von 99 IRHD erlaubt es der Schleifscheibe, sich elastisch genug an die komplexe Nutoberfläche anzupassen und gleichzeitig noch einen ausreichend hohen Materialabtrag zu realisieren und die Oberfläche zu glätten. Mit diesem Bindungstyp können auch bei Variation der seitlichen Zustellung die im Vergleich mit den übrigen untersuchten Bindungssystemen besten Oberflächengüten realisiert werden. Diese Verhaltensweise der Bindung lässt sich mit den zuvor dargestellten Härtemessungen und Zugversuchen erklären. Insbesondere der gering ausgeprägte elastische Bereich in dem Kraft-Weg-Verlauf während der Zugversuche führt dazu, dass gerade im Einlaufbereich der Spannut eventuelle Konturfehler der zu bearbeitenden Oberfläche durch die fehlende Elastizität nicht ausgeglichen werden können.

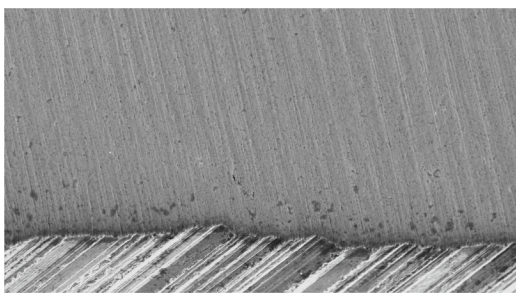
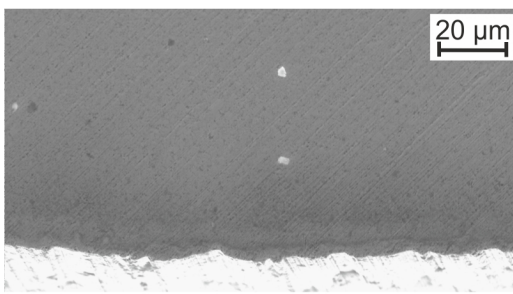
		Polierschleifscheibe: 1A1-100-10-5-EGDA2-E-S	
		Nutrückenfläche	Spanfläche
seitliche Zustellung a_p	$a_p = 0 \mu\text{m}$		
Vorbearbeitung:			
Prozess:	Schleifen	Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Werkstück:	Bohrerrohling d = 8 mm
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$
Nachbearbeitung:			
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse
Werkstoff:	Hartmetall K30	Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)	
Arbeitseingriff:	$a_s = 40 \mu\text{m}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$

Abbildung 6-25: Ergebnisbeurteilung einer Variation der seitlichen Zustellung (EGDA2)

Im Gegensatz zu den beiden zuvor gezeigten Bindungstypen erzeugt das weichste Bindungssystem 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S mit zunehmender seitlicher Zustellung a_p eine besser werdende Oberflächengüte, insbesondere im Bereich der Spanfläche und Schneidkante. Das homogenste und qualitativ beste Ergebnis wird bei einer seitlichen

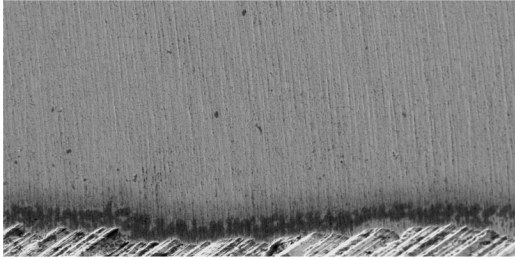
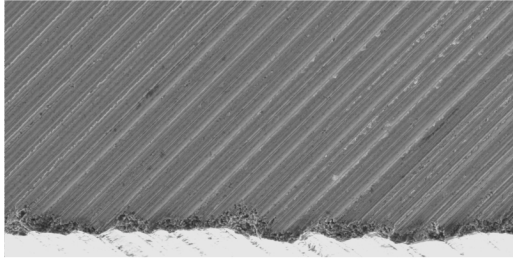
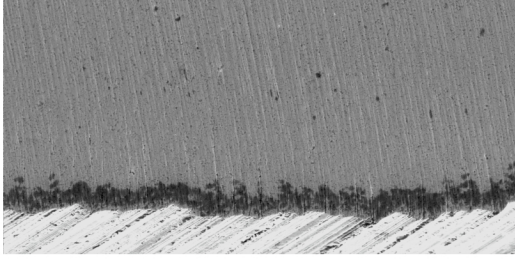
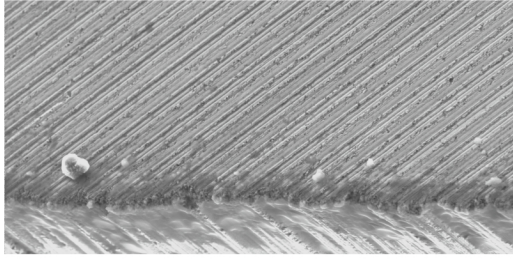
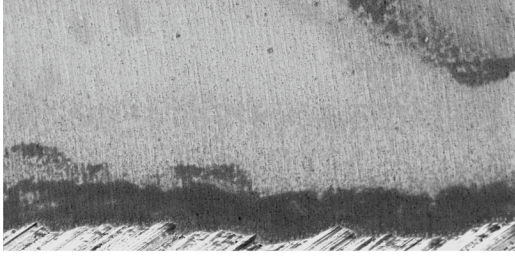
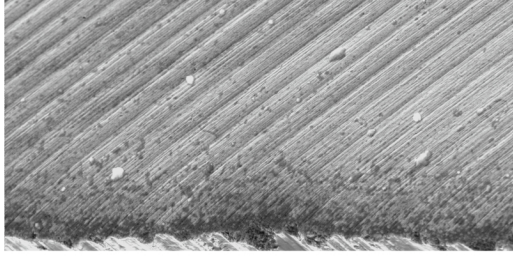
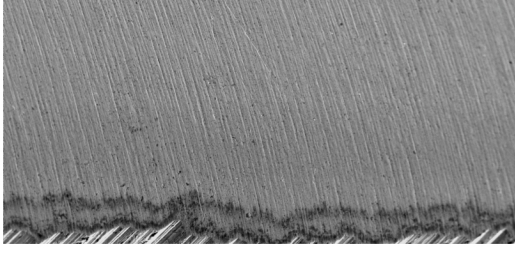

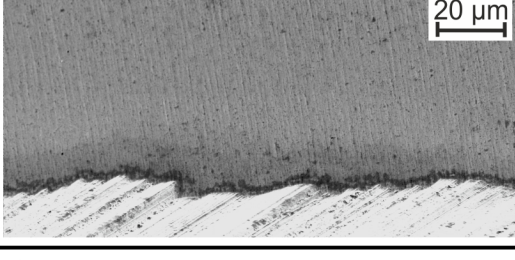
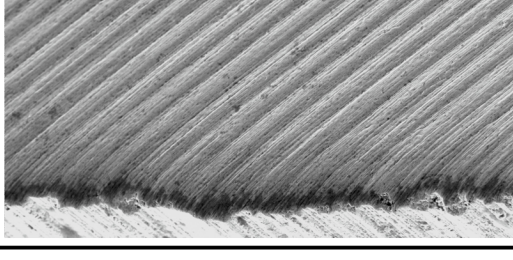
		Polierschleifscheibe: 1A1-100-10-5-EGD1A-E-S																																	
		Nutrackenfläche	Spanfläche																																
seitliche Zustellung a_p	$a_p = 0 \mu\text{m}$																																		
	$a_p = 20 \mu\text{m}$																																		
	$a_p = 40 \mu\text{m}$																																		
	$a_p = 60 \mu\text{m}$																																		
	$a_p = 80 \mu\text{m}$																																		
<p>Vorbearbeitung:</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 25%;">Prozess:</td> <td style="width: 25%;">Schleifen</td> <td style="width: 25%;">Werkzeug:</td> <td style="width: 25%;">D46 C75 Q-Flute²</td> </tr> <tr> <td>Prozessstrategie:</td> <td>Gleichlauf</td> <td>KSS-Konzept:</td> <td>Freistrahldüse + Löschdüse</td> </tr> <tr> <td>Werkstoff:</td> <td>Hartmetall K30 (10 % Kobalt)</td> <td>Werkstück:</td> <td>Bohrerrohling d = 8 mm</td> </tr> <tr> <td>Schnittgeschw.:</td> <td>$v_c = 15 \text{ m/s}$</td> <td>Vorschubgeschw.:</td> <td>$v_f = 100 \text{ mm/min}$</td> </tr> </table> <p>Nachbearbeitung:</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 25%;">Prozess:</td> <td style="width: 25%;">Polierschleifen</td> <td style="width: 25%;">Schnittgeschw.:</td> <td style="width: 25%;">$v_c = 15 \text{ m/s}$</td> </tr> <tr> <td>Prozessstrategie:</td> <td>Gleichlauf</td> <td>KSS-Konzept:</td> <td>Freistrahldüse</td> </tr> <tr> <td>Werkstoff:</td> <td>Hartmetall K30</td> <td></td> <td>Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)</td> </tr> <tr> <td>Arbeitseingriff:</td> <td>$a_s = 40 \mu\text{m}$</td> <td>Vorschubgeschw.:</td> <td>$v_f = 150 \text{ mm/min}$</td> </tr> </table>				Prozess:	Schleifen	Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²	Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse	Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Werkstück:	Bohrerrohling d = 8 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$	Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse	Werkstoff:	Hartmetall K30		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)	Arbeitseingriff:	$a_s = 40 \mu\text{m}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$
Prozess:	Schleifen	Werkzeug:	D46 C75 Q-Flute ²																																
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse																																
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Werkstück:	Bohrerrohling d = 8 mm																																
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$																																
Prozess:	Polierschleifen	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$																																
Prozessstrategie:	Gleichlauf	KSS-Konzept:	Freistrahldüse																																
Werkstoff:	Hartmetall K30		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)																																
Arbeitseingriff:	$a_s = 40 \mu\text{m}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$																																

Abbildung 6-26: Ergebnisbeurteilung einer Variation der seitlichen Zustellung (EGD1A)

Zustellung von $a_p = 60 \mu\text{m}$ erreicht. Mit einer darüber hinausgehenden Zunahme der seitlichen Zustellung kommt es zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität.

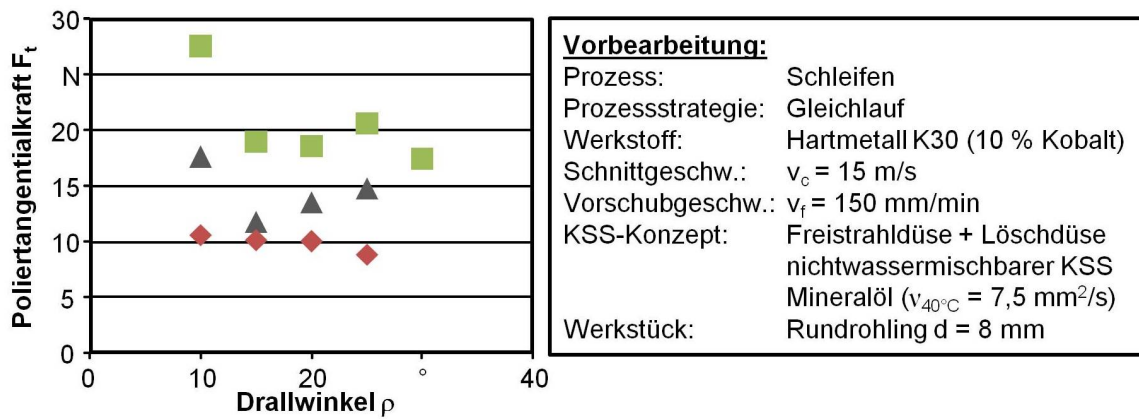
6.7 Übertragung des Prozessmodells durch Variation des Drallwinkels

Allen Vollhartmetallzerspanwerkzeugen gemein ist die Tatsache, dass es für die unterschiedlichen Anwendungsfälle in der Regel angepasste und somit in ihrer Gestalt stark unterschiedliche Varianten gibt. Auch hier nimmt die Spannute eine wesentliche Stellung ein. Es existieren von geradgenuteten Varianten bis hin zu Versionen mit großen Drallwinkeln von über 30° auch jegliche denkbaren Zwischenschritte. Der Drallwinkel hat dabei unmittelbaren Einfluss auf das Querschnittsprofil des Zerspanwerkzeuges, das Spanabtransportvermögen sowie die Winkel des Schneidteils. Um das zuvor entwickelte Prozessmodell für das Polierschleifen mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben zu verallgemeinern, wurde nachfolgend der Einfluss einer Variation des Drallwinkels auf den Polierprozess untersucht. **Abbildung 6-27** zeigt auf, dass für die Untersuchungen der Drallwinkel von ausgangsseitig $\rho = 10^\circ$ in Schritten von $\rho = 5^\circ$ bis auf einen Wert von $\rho = 30^\circ$ gesteigert wurde. Zu erkennen ist zum einen die sich mit zunehmendem Drallwinkel stark verändernde Gestalt der Spannute sowie zum anderen eine deutliche Veränderung in dem Querschnittsprofil des Bohrerrohrlings. Bei gleichbleibenden Werten für den Spanwinkel und die Tiefenzustellung während der schleiftechnischen Herstellung der Spannuten ergeben sich diese Veränderungen alleine durch eine veränderte Position der Schleifscheibe in Relation zum Werkstück während der Bearbeitung. Somit verändert sich auch die Eingriffssituation zwischen Schleifscheibe und Werkstück nicht nur bei der schleiftechnischen Herstellung der Spannuten, sondern auch bei der Nachbearbeitung durch das Polierschleifen durch eine Variation des Drallwinkels.



Abbildung 6-27: Einfluss des Drallwinkels ρ auf die Werkstückgestalt

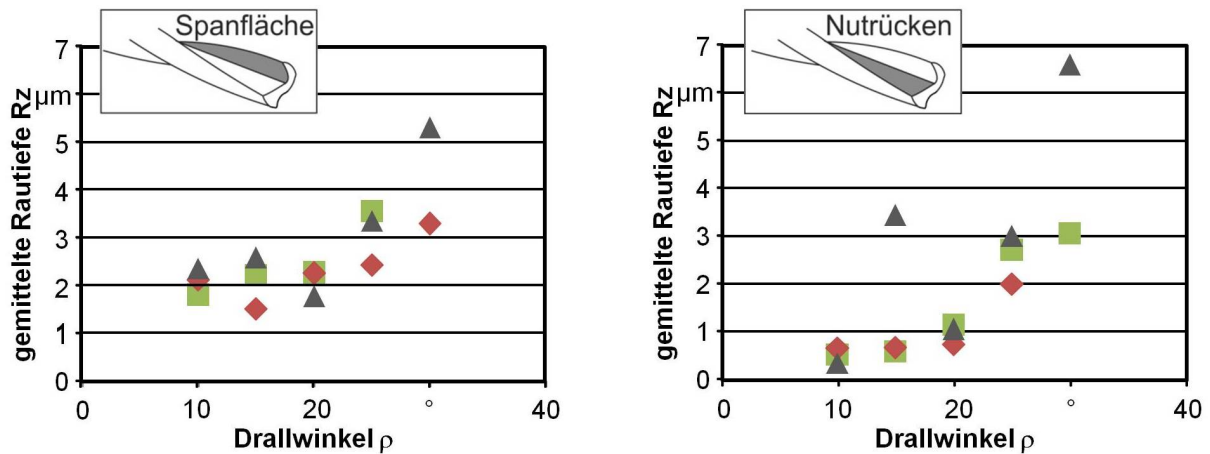
Durch die sich verändernde Eingriffssituation und die variierenden Kontaktbedingungen bei der Polierschleifbearbeitung von unterschiedlich gestalteten Spannuten ergeben sich auch Abhängigkeiten bezüglich der entstehenden Prozesskräfte (**Abbildung 6-28**). Mit größer werdendem Drallwinkel können tendenziell sinkende Poliertangentialkräfte beobachtet werden. Die Größe und Gestalt der Kontaktfläche zwischen Polierschleifscheibe und Werkstück zeichnet sich hauptverantwortlich für diesen Effekt. Die Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstückoberfläche verändert sich mit steigendem Drallwinkel in der Art, dass mehr Schleifscheibenoberfläche in den Eingriff kommt. Die Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und zu bearbeitender Oberfläche wird demnach breiter. Somit sinkt mit steigendem Drallwinkel die benötigte Schleifenergie und der Kontaktdruck zwischen Polierschleifscheibe und Nutoberfläche, welcher an dieser Stelle über die Reibung detektiert wird, nimmt ab, da er sich über eine größere Fläche verteilt. Auch bei einer Variation des Drallwinkels bleiben die zuvor detektierten Abhängigkeiten der Bindungshärte auf die Prozesskräfte erhalten. Das nachgiebigste Bindungssystem erzeugt auch hier die geringsten und das härteste Bindungssystem die größten Kräfte. Von ausgangsseitig $F_t = 27 \text{ N}$ findet bei dem Bindungssystem 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) eine Reduktion auf $F_t = 17 \text{ N}$ statt. Bei den weiteren untersuchten Bindungssystemen fällt der Rückgang der Poliertangentialkräfte im Vergleich geringer aus. Das flexibelste Bindungssystem, welches die größte Fähigkeit besitzt, sich an die Oberflächengestalt anpassen zu können, zeigt die geringsten Abhängigkeiten der Prozesskräfte vom Drallwinkel.



Nachbearbeitung:			
Prozess:	Polierschleifen	KSS-Konzept:	Freistrahldüse
Prozessstrategie:	Gleichlauf		nichtwassermischbarer KSS
Tiefenzustellung:	$a_e = 40 \mu\text{m}$; $a_p = 40 \mu\text{m}$		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm}/\text{min}$	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m}/\text{s}$
Verwendete Polierschleifscheiben:			
■	1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲	1A1-100-10-5 EGDA2-E-S
		◆	1A1-100-10-5 EGD1A-E-S

Abbildung 6-28: Einfluss des Drallwinkels auf die Poliertangentialkräfte

Wie schon bei den Untersuchungen zur Prozessentwicklung sowie zur Variation der seitlichen Zustelltiefe a_p existiert auch bei einer Variation des Drallwinkels eine starke Korrelation zwischen den Prozesstangentialkräften und den resultierenden Oberflächenqualitäten. Es verbessert sich mit zunehmender Poliertangentialkraft tendenziell die Oberflächenqualität (**Abbildung 6-29**). Aus den aufgenommenen Werten für die gemittelte Rautiefe R_z kann zunächst kein signifikanter Unterschied zwischen den eingesetzten Bindungshärten ausgemacht werden.

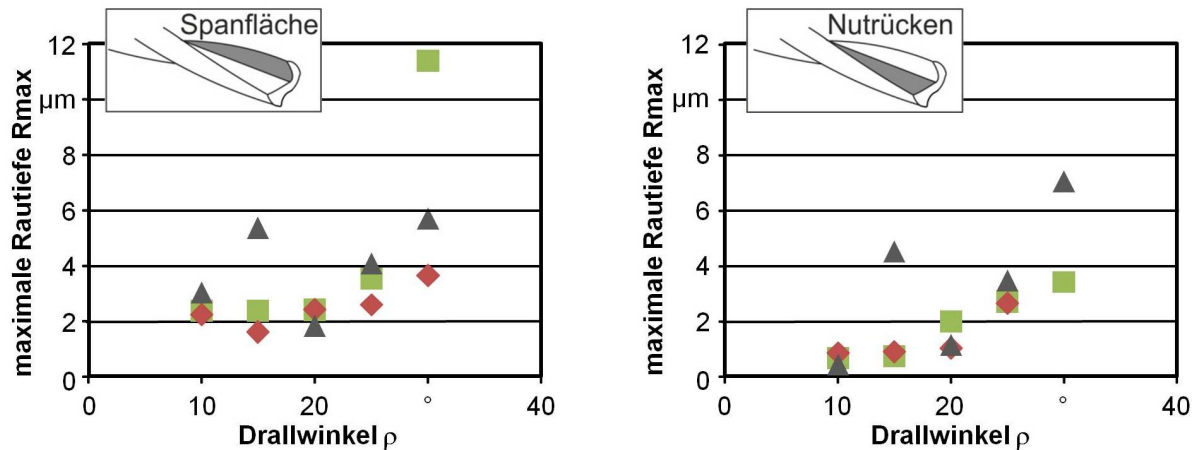


<u>Vorbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse
Prozess:	Schleifen		nichtwassermischbarer KSS
Prozessstrategie:	Gleichlauf		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$	Schleifscheibe:	D46 C75 Q-Flute ²
Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$		
<u>Nachbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse
Prozess:	Polierschleifen		nichtwassermischbarer KSS
Prozessstrategie:	Gleichlauf		Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Arbeitseingriff:	$a_e = 40 \mu\text{m}; a_p = 40 \mu\text{m}$	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$		
Verwendete Polierschleifscheiben:			
■	1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲	1A1-100-10-5 EGDA2-E-S
		◆	1A1-100-10-5 EGD1A-E-S

Abbildung 6-29: Oberflächenqualität (Rz) der nachbearbeiteten Spannutrücken- und Spanflächen unter Variation des Drallwinkels

Es ergibt sich jedoch eine mit zunehmendem Drallwinkel schlechter werdende Oberflächenqualität. Sind mit dem Bindungstyp 1A1-100-10-5-EGD1D-E-S (IRHD > 100) bei einem Drallwinkel von $\rho = 10^\circ$ Werte von $R_z = 1,8 \mu\text{m}$ auf der Spanfläche und $R_z = 0,5 \mu\text{m}$ auf der Nutrückenfläche realisierbar, so werden bei einem Drallwinkel von $\rho = 30^\circ$ gemittelte Rautiefen von $R_z = 4,6 \mu\text{m}$ auf der Spanfläche und $R_z = 3,0 \mu\text{m}$ auf der Nutrückenfläche gemessen. Im gleichen Parameterraum sinken die gemessenen Poliertangentialkräfte von $F_t = 27 \text{ N}$ auf $F_t = 17 \text{ N}$. Es kann gefolgert werden, dass der wichtigste Parameter, der die Oberflächenqualität bei einer Variation des Drallwinkels beeinflusst, die Prozesskräfte und hier insbesondere die Poliertangentialkraft ist. Mit zunehmenden Prozesskräften steigt der Kontaktdruck zwischen Schleifscheibe und Werkstück an, so dass bei gleichbleibenden Prozessparametern mehr Material vom Werkstück abgetragen wird und somit eine bessere Oberflächenqualität entsteht. Schon *Kacalak und Pluta* erkannten diesen Zusammenhang [KP83]. Die sich mit variierendem Drallwinkel ändernden Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück tragen ebenfalls zu den sich ändernden Kräften und Oberflächengüten bei. Wie zuvor bereits erwähnt, kommt es bei einer Erhöhung des Drallwinkels zu einer Zunahme der im Eingriff befindlichen Breite der Schleifscheibe und somit zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstückoberfläche. Dies führt zu einer Verringerung des Kontaktdrucks zwischen Schleifscheibe und Werkstückoberfläche. Infolgedessen werden die Oberflächenqualitäten schlechter.

Neben der gemittelten Rautiefe Rz wurden auch die Werte der maximalen Rautiefe Rmax aufgezeichnet und in **Abbildung 6-30** dargestellt. Generell lassen sich hier die gleichen Tendenzen erkennen wie schon zuvor bei der Auswertung der gemittelten Rautiefe Rz. Der Einfluss des Drallwinkels auf die resultierende Oberflächenqualität ist im untersuchten Parameterraum größer als der Einfluss der Schleifscheibenbindungshärte.



<u>Vorbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse + Löschdüse nichtwassermischbarer KSS
Prozess:	Schleifen	Werkstoff:	Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozessstrategie:	Gleichlauf	Werkstück:	Rundrohling $d = 8 \text{ mm}$
Werkstoff:	Hartmetall K30 (10 % Kobalt)	Schleifscheibe:	D46 C75 Q-Flute ²
Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$		
<u>Nachbearbeitung:</u>		KSS-Konzept:	Freistrahldüse nichtwassermischbarer KSS
Prozess:	Polierschleifen	Werkstoff:	Mineralöl ($v_{40^\circ\text{C}} = 7,5 \text{ mm}^2/\text{s}$)
Prozessstrategie:	Gleichlauf	Schnittgeschw.:	$v_c = 15 \text{ m/s}$
Arbeitseingriff:	$a_e = 40 \mu\text{m}; a_p = 40 \mu\text{m}$		
Vorschubgeschw.:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$		
Verwendete Polierschleifscheiben:			
■	1A1-100-10-5 EGD1D-E-S	▲	1A1-100-10-5 EGDA2-E-S
◆	1A1-100-10-5 EGD1A-E-S		

Abbildung 6-30: Oberflächenqualität (Rmax) der nachbearbeiteten Spannutrücken- und Spanflächen unter Variation des Drallwinkels

Somit ist der Einfluss eines variierenden Drallwinkels auf den Prozess des Polierschleifens mittels elastisch gebundenen Diamantschleifscheiben auffallend groß. Sowohl die resultierenden Bearbeitungskräfte als auch das Bearbeitungsergebnis in Form der Oberflächenkenngrößen Rz und Rmax werden gravierend vom Drallwinkel beeinflusst. In der Praxis ist somit eine individuelle Anpassung des Polierschleifprozesses an die sich ändernden Hartmetall-Werkzeuggestalten für eine optimale und effiziente Bearbeitung unabdingbar

7. Einsatzverhalten polierter Bohrwerkzeuge

Das Polierschleifen mithilfe elastisch gebundener Diamantschleifscheiben als Nachbearbeitungsprozess kann zwischen der schleiftechnischen Herstellung der Makrogeometrie und der Kantenpräparation von Vollhartmetallschaftwerkzeugen eingeordnet werden. Das Resultat dieser Nachbearbeitung soll das Einsatzverhalten von VHM-Schaftwerkzeugen positiv beeinflussen. Insbesondere eine Erhöhung der Prozesssicherheit im Einsatz bei gleichzeitig verbesserter Spanbildung und einer Optimierung des Abtransportes von Spänen und Kühlschmierstoff stehen im Fokus. Um diese Effekte und damit die Sinnhaftigkeit einer Oberflächenfeinstbearbeitung der Spannuten an Vollhartmetallschaftwerkzeugen zu belegen, wurden wendelgenutete Bohrwerkzeuge gefertigt und in Einsatzversuchen hinsichtlich des auftretenden Werkzeugverschleißes, der resultierenden Bearbeitungskräfte sowie erzeugten Spanformen analysiert.

Ausgangsbasis bildet dabei die in Kapitel 5 dargestellte und schleiftechnisch untersuchte Spannute. Um das Gestaltelement der Spannute wurden im Folgenden die weiteren Bearbeitungsschritte zur Herstellung eines Vollhartmetallwendelbohrers angelegt. **Abbildung 7-1** zeigt die einzelnen durchgeführten Bearbeitungsoperationen und die dabei gewählten Prozessparameter sowie die verwendeten Schleifscheiben.

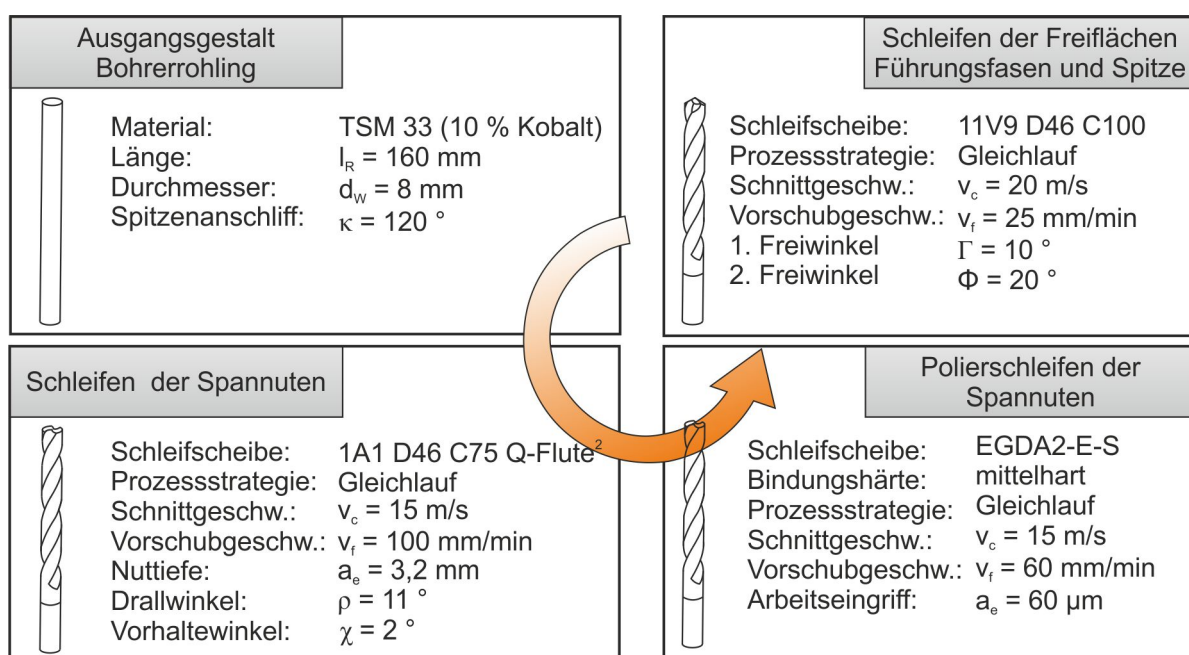


Abbildung 7-1: Schleiftechnische Herstellung von VHM-Bohrwerkzeugen

Ausgehend von der schleiftechnischen Herstellung der Spannute, die mithilfe einer Schleifscheibe der Form 1A1, einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 15$ m/s und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min mit einer hybridgebundenen Diamantschleifscheibe des Typs Q-Flute² in den Rundrohling aus Hartmetall mit einem Kobaltgehalt von 10 % eingebracht wurde, schließt sich die Oberflächenfeinstbearbeitung der Spannuten an. Basierend auf dem bisher erlangten Prozesswissen, wurde für diesen Bearbeitungsschritt das mittelharte Bindungssystem mit einem Arbeitseingriff von $a_e = 60$ μ m und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 60$ mm/min eingesetzt. Aufbauend auf diesen Prozessschritten, wurde die Umfangsbearbeitung sowie die Spitzengeometrie

schleiftechnisch erzeugt und anschließend die Schneidkante von Hand verrundet, um ein reproduzierbares Einsatzverhalten der Werkzeuge zu garantieren.

Die Einsatzversuche wurden auf dem in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Bearbeitungszentrum der Firma Chiron vom Typ FZ 12 S Magnum durchgeführt (**Abbildung 7-2**). Dabei wurden vergleichend Werkzeuge analysiert, deren Spannuten mithilfe des Polierschleifprozesses hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität optimiert wurden, und solche, die lediglich geschliffen wurden und keine Nachbehandlung erfahren haben.

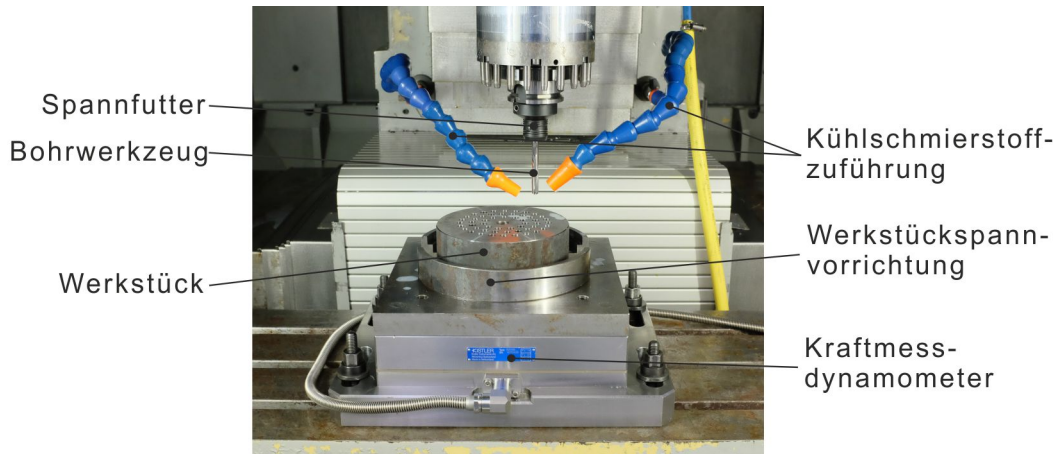


Abbildung 7-2: Aufbau innerhalb des Bearbeitungszentrums für die Bohreinsatzversuche

Es wurden Rundproben mit einem Durchmesser von $d_w = 150$ mm aus 42CrMo4+QT zerspannt. Die Einsatzversuche wurden mit äußerer Kühlschmierstoffzufuhr durchgeführt. Um lediglich den Effekt einer Politur der Spannuten untersuchen zu können, wurden die Bohrer zudem ohne zusätzliche Werkzeugbeschichtung eingesetzt. Während der Bearbeitung wurde die Vorschubkraft F_f sowie das Bohrmoment M_b mithilfe eines Drei-Komponenten-Dynamometers des Herstellers Kistler vom Typ 9255 aufgenommen und über einen Verstärker des gleichen Herstellers vom Typ 5070 an den Messrechner zur Datenerfassung und Auswertung weitergeleitet. Zusätzlich wurden die erzeugten Späne aufgefangen, um diese anschließend vergleichend analysieren zu können und hierdurch Rückschlüsse auf durch den Polierschleifprozess der Spannuten veränderte Spanbildungsmechanismen ziehen zu können.

Abbildung 7-3 zeigt im Detail zunächst die Gestalt der erzeugten Bohrwerkzeuge in fotografischen Aufnahmen. Zusätzlich wurden an nachbehandelten und unbehandelten Bohrwerkzeugen Detailbetrachtungen hinsichtlich der erzeugten Oberflächen und Kantenqualitäten mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops durchgeführt. Bei vergleichender Betrachtung der fotografischen Aufnahmen ist am nachbehandelten Werkzeug eine gleichmäßig nachbehandelte Spannute detektierbar, wohingegen die unbehandelten Werkzeuge die für Schleifverfahren typische, mit Rauigkeitsriefen in Schleifvorschubrichtung durchsetzten Spannutoberflächen aufweisen. Die Detailanalyse ergibt eine, qualitativ betrachtet, deutliche Verbesserung der Oberflächengüte im Bereich der Spannute und hier sowohl auf der Nutrückfläche als auch auf der Spanfläche. Die Freifläche wurde nicht bearbeitet und die Schneidkante ist demzufolge noch mit einer Schartigkeit behaftet. Des Weiteren ist im Bereich der Schneidenecke ersichtlich, dass die Nebenschneiden durch das Polierschleifen mit der elastisch gebundenen Schleifscheibe auch bearbeitet worden sind. So ist erkennbar, dass auch die Schartigkeit entlang der

Nebenschneide durch den Polierschleifprozess verringert werden konnte. Die Abbildungen zeigen den Zustand der Werkzeuge vor der händisch durchgeführten Kantenpräparation, bei der die Ausbrüche und Schartigkeit entlang der Hauptschneide beseitigt worden sind, um ein reproduzierbares Einsatzverhalten der Werkzeuge zu gewährleisten. Bei einem Vergleich des nachbehandelten Bohrwerkzeuges mit dem nicht nachbehandelten Werkzeug, an dem die Spannuten lediglich mittels eines Tiefschleifprozesses erzeugt wurden, lassen sich die Verbesserungen durch den Polierschleifprozess deutlich hervorheben. Die geschliffene Oberfläche weist eine, qualitativ bewertet, deutlich schlechtere Oberflächengüte, versehen mit den typischen Schleifriefenstrukturen auf. Ebenfalls ist die Schartigkeit der lediglich geschliffenen und nicht polierten Werkzeuge im Bereich der Hauptschneide sowie die Qualität der Nebenschneide im Vergleich schlechter.

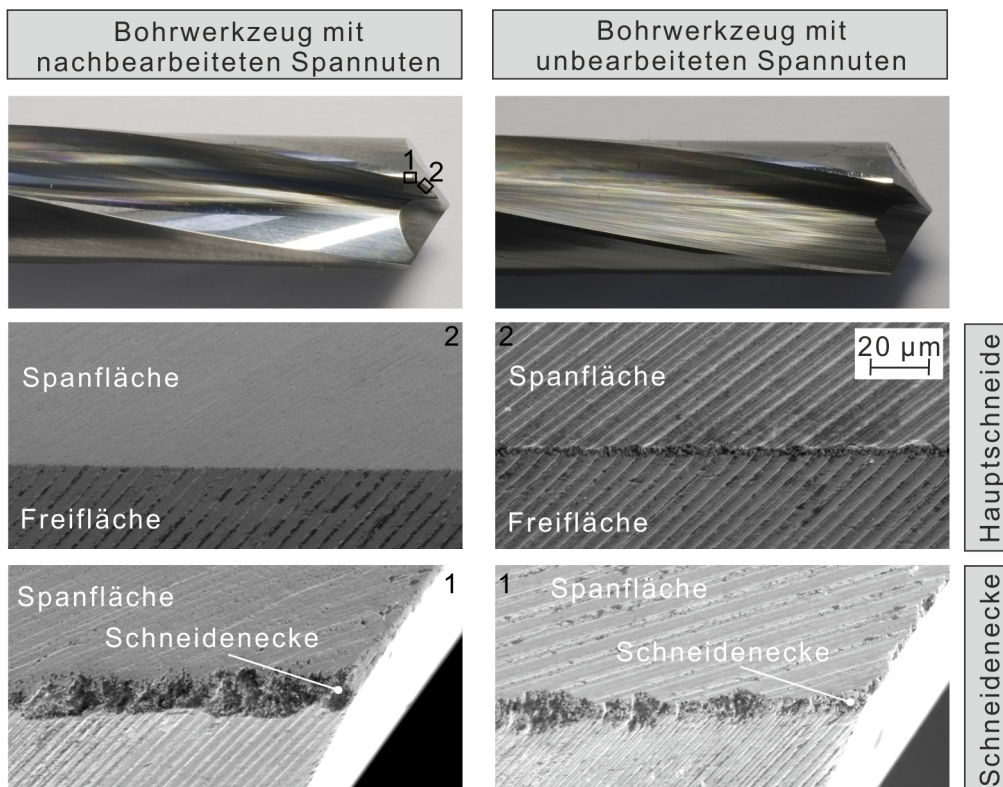


Abbildung 7-3: Vergleichende Darstellung eines mittels Polierschleifen nachbehandelten und eines unbehandelten Bohrwerkzeuges

Die zuvor gewonnenen Erkenntnisse konnten erfolgreich in die Produktionskette zur Herstellung von Vollhartmetallbohrwerkzeugen integriert werden. Das Ergebnis stellt ein, nicht nur hinsichtlich der Oberflächenqualität im Bereich der Spannuten, sondern auch entlang der Hauptschneiden und Nebenschneiden optimiertes Zerspanwerkzeug dar, welches im weiteren Verlauf der Arbeit zur Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT eingesetzt wird.

Die resultierenden Kräfte und Momente während des Werkzeugeinsatzes geben zunächst einen Aufschluss über die Belastungen, die auf das Zerspanwerkzeug einwirken. Diese Belastung spielt eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der Prozesssicherheit und Stabilität eines Zerspanprozesses. Fallen die Kräfte und Momente auch über den gesamten zu realisierenden Bohrweg niedrig aus und zeigen die Kraftmessungen zudem gleichmäßige, ohne plötzliche Kraftspitzen versehene Verläufe, kann der Bohrprozess als stabil eingestuft werden. **Abbildung 7-4** zeigt die während der Bearbeitung aufgenommenen Vorschubkräfte

und Bohrmomente im Vergleich zwischen nicht nachbehandeltem und poliergeschliffenem Werkzeug. Die Vorschubkräfte des nachbehandelten Bohrers unterscheiden sich über den Bohrweg deutlich von denen des unbehandelten Bohrwerkzeuges. Liegen die Vorschubkräfte bei einem Bohrweg von $L_f = 0,1$ m bei $F_f = 740$ N für das poliergeschliffene Werkzeug und bei $F_f = 1150$ N für das unbehandelte Werkzeug, so steigt die Vorschubkraft des poliergeschliffenen Werkzeuges degressiv bis auf einen Wert von $F_f = 1600$ N ($L_f = 1,5$ m) an, wohingegen die Kräfte des unbehandelten Werkzeuges mit zunehmendem Bohrweg nahezu konstant verlaufen.

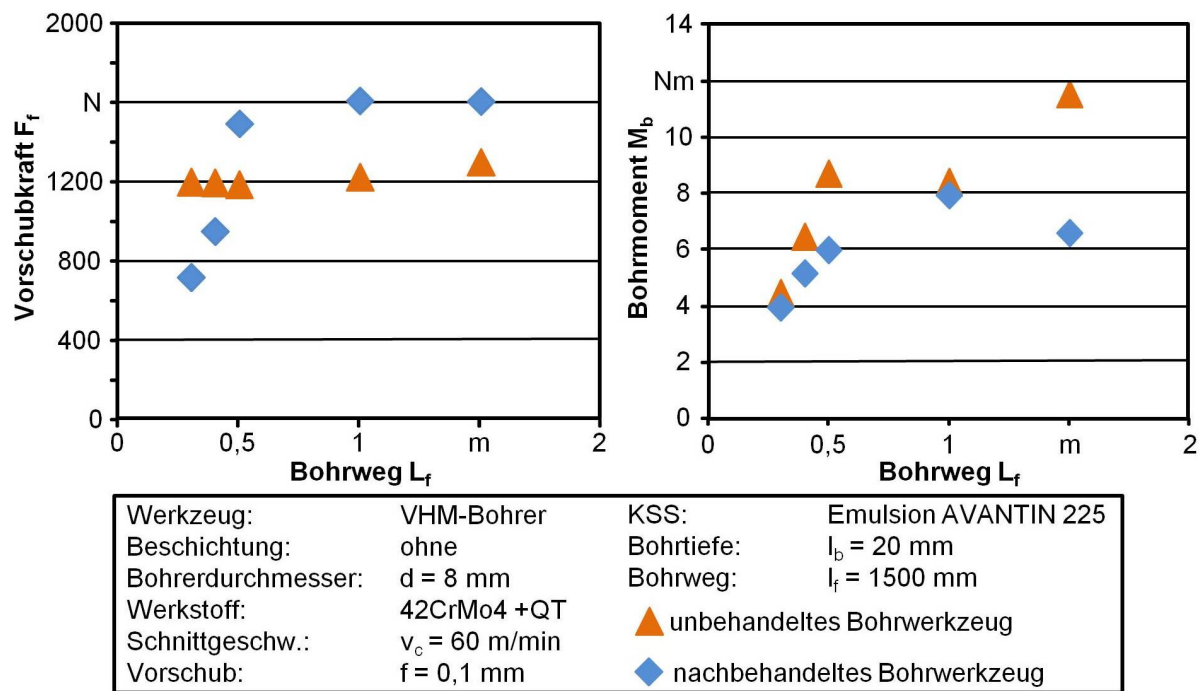


Abbildung 7-4: Vorschubkraft und Bohrmoment in Abhängigkeit der Nachbehandlung

Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch die Nachbehandlung mittels Polierschleifen, wie die vorangegangenen Analysen gezeigt haben, auch immer ein Materialabtrag im Bereich der Spanfläche stattfindet. Dieser sorgt für eine Verrundung der Schneidkante und somit für größere Kräfte in Bohrvorschubrichtung. Gerade im Bereich des Initialverschleißes lässt sich jedoch erkennen, dass es bei dem nachbehandelten Bohrwerkzeug zu einem starken Anstieg der Vorschubkraft kommt. Dies lässt sich damit begründen, dass die auch im Bereich der Querschneide vorherrschende Verrundung im Werkzeugeinsatz schnell größer wird und somit auch die Kräfte in Bohrvorschubrichtung.

Die aufgenommenen Bohrmomente zeigen hingegen, dass eine Oberflächenfeinstbearbeitung der Spannuten zu geringeren Bohrmomenten führt. Das nicht nachbehandelte Werkzeug zeigt mit zunehmendem Bohrweg ein nahezu stetig steigendes Bohrmoment, wohingegen das nachbehandelte Werkzeug hier einen degressiven Anstieg verursacht. Dieser Effekt kann auf die verbesserten tribologischen Eigenschaften der Nutoberfläche zurückgeführt werden. Insbesondere die Reibung zwischen den entstehenden Spänen und der Nutoberfläche führt bei dem nachbehandelten Werkzeug zu besonders bei steigendem Bohrweg detektierbaren, geringeren Bohrmomenten. So wurde im Einsatz des unbehandelten Bohrwerkzeuges bei einem Bohrweg von $L_f = 1,5$ m ein Bohrmoment von $M_b = 11,5$ Nm gemessen, wohingegen das nachbehandelte Werkzeug bei gleichem zurückgelegtem Bohrweg ein Bohrmoment von lediglich $M_b = 6,7$ Nm verursacht. Dass es

infolge der Politur der Spannuten neben einer Beeinflussung der mechanischen Komponenten auch zu einer sich verändernden Spanbildung kommt, zeigt **Abbildung 7-5**. Die Abbildung zeigt die Spanbildung im Vergleich zwischen den zuvor dargestellten Bohrwerkzeugen mit und ohne poliertes Spannuten auf. Es sind deutliche Unterschiede zu beobachten. Generell produzieren beide Bohrwerkzeuge zylindrische Wendelspäne. Das unbearbeitete Werkzeug jedoch erzeugt die vergleichsweise kürzeren Späne. Zusätzlich ist bei dem nachbehandelten Werkzeug eine auffällige Spanform, wie oben rechts innerhalb der Abbildung dargestellt, zu beobachten. Die unterschiedlichen Spanformen und -längen lassen sich auf die Spanbildung im Bereich der Schneidkante und Spanfläche, aber auch auf die Kontaktbedingungen zwischen Span und Werkzeug im weiteren Verlauf der Spannuten zurückführen. So kommt es aufgrund der Nachbehandlung zu längeren Spänen, die später brechen, weil die Reibung zwischen Span und Nutenoberfläche durch den Polierschleifprozess verringert wird.



Abbildung 7-5: Spanbildung im Vergleich zwischen nachbehandelten und unbehandeltem Bohrwerkzeug

Die Nachbehandlung führt zudem dazu, dass überwiegend eine verhältnismäßig lange zylindrische Wendelspanform mit geringer Wendelung erzeugt wird. Dies kann auf sich verändernde Spanbildungsmechanismen im Bereich der Schneidkante zurückgeführt werden. So zeigt die Nachbehandlung mittels Polierschleifen im Einsatz der Bohrwerkzeuge neben Vorteilen auch Nachteile in Form von größeren Kraftkomponenten in Vorschubrichtung und eine, in den durchgeführten Untersuchungen ungünstige Spanform auf.

7.1 Verfahrenserweiterung

Zuvor wurde die Entwicklung einer geeigneten Prozessstrategie für das Polierschleifen mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben für den Anwendungsfall der gewendelten Spannuten von Vollhartmetallbohrwerkzeugen beschrieben. Ein wesentlicher Vorteil dieser Bearbeitungsmethode besteht neben der Möglichkeit zur Nachbehandlung der Spannuten durch die flexible Auslegung von Prozessparametern und Schleifscheibengestalt sowie der Prozessstrategie darin, auch weitere Funktionsflächen von Zerspanwerkzeugen nachzubearbeiten. Auch an Führungsflächen, Freiflächen und Nebenschneiden können Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächengüten vorgenommen werden. Im Nachfolgenden soll, aufbauend auf einem Bohrwerkzeug, an welchem die Spannuten

nachbehandelt worden sind, die sinnvolle Erweiterung und Anwendung des erlangten Prozesswissens auf die Politur der Freiflächen betrachtet werden. Die Nachbearbeitung der Freiflächen steht dabei exemplarisch für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und die sich damit gleichzeitig ergebenden Möglichkeiten. Die Freifläche bestimmt zusammen mit der Spanfläche maßgeblich nicht nur die Form und Schartigkeit der Schneidkante sowie die Gestalt des Schneidteils, sondern trägt auch mit der sich aus dem Schleifprozess ergebenden Oberflächenrauigkeit maßgeblich zu deren Qualität und der Standzeit des Zerspanwerkzeuges bei. Die Nachbearbeitung der Freifläche mittels des Polierschleifprozesses stellt somit eine mögliche Ergänzung zur Nachbehandlung der Spannuten dar (**Abbildung 7-6**).

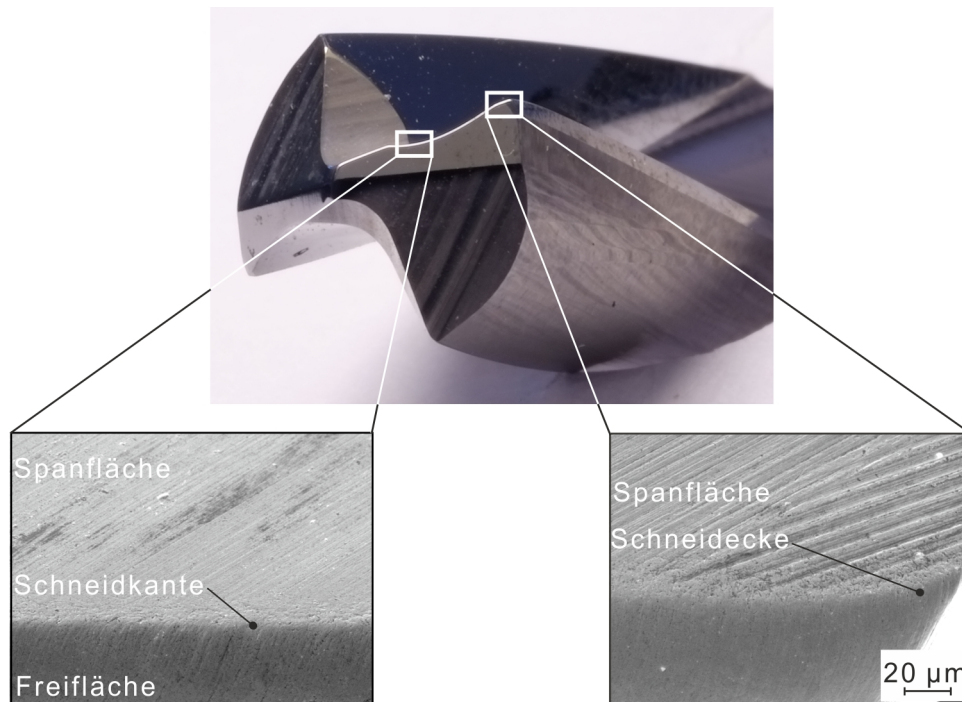


Abbildung 7-6: Prozesserweiterung durch die Nachbearbeitung der Freiflächen

In den mittels Rasterelektronenmikroskop angefertigten Detailaufnahmen ist deutlich erkennbar, dass sowohl Span- als auch Freifläche im Vergleich zum ausgangsseitig geschliffenen Zustand eine, qualitativ bewertet, deutlich bessere Oberflächengüte aufweisen. Der sich darüber hinaus ausbildende und wesentliche positive Effekt einer Nachbehandlung sowohl der Spanfläche als auch der Freifläche besteht jedoch darin, dass sich an der Schneidkante und der Schneidenecke, welche im Einsatz der Zerspanwerkzeuge die am höchsten belasteten Elemente darstellen, eine gleichmäßige Verrundung einstellt (**Abbildung 7-7**). Im Vergleich zu den innerhalb dieser Arbeit zuvor dargestellten geschliffenen Werkzeugen ohne Nachbehandlung durch das Polierschleifen stellt dies eine wesentliche Verbesserung dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Schneidkantenverrundung positiv auf das Einsatzverhalten der Zerspanwerkzeuge auswirkt [Ter11, Köt06].

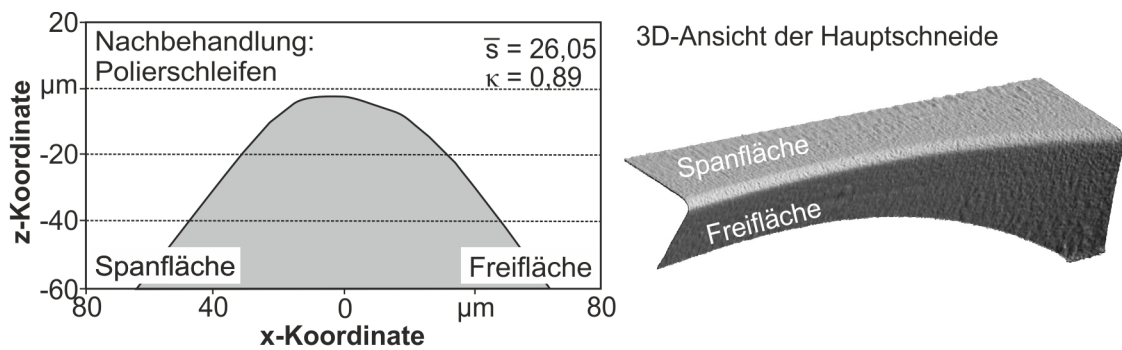


Abbildung 7-7: Detaildarstellung der mittels Prozessenerweiterung erzeugten Schneidkantenmikrogestalt

Ein mögliches Szenario zur Optimierung von Zerspanwerkzeugen könnte in Zukunft für einfache Anwendungsfälle, in denen gleichmäßige Verrundungsgrößen entlang der Schneidkante ohne eine komplexe Verkippung der Verrundung in Richtung Spanfläche oder Freifläche gewünscht sind, auch ohne separate Kantenpräparationsverfahren wie dem Strahlspanen, Bürsten oder Schleppschleifen auskommen. Die erforderliche Verrundung der Schneidkante kann mithilfe der angepassten Nachbehandlung durch elastisch gebundene Schleifscheiben wirtschaftlich und effizient in die Prozesskette zur Herstellung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen integriert werden, ohne dass ein wesentlicher zeitlicher Mehraufwand zur Präparation entsteht.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Moderne Schaftwerkzeuge nehmen zunehmend komplexe Gestalten an. Dies ist den stark steigenden Anforderungen an Prozesssicherheit und Effizienz im Einsatz dieser Zerspanwerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide geschuldet. Die schleiftechnische Herstellung dieser Werkzeuge sieht sich indes der Problemstellung ausgesetzt, immer höhere Oberflächengüten sowie Form- und Maßgenauigkeiten zu produzieren und dies bei einer gleichzeitigen Effizienzsteigerung. Die Herstellung von Vollhartmetallschaftwerkzeugen ist durch eine Abfolge einer Vielzahl von Schleif- und Nachbehandlungsvorgängen geprägt. Im Wesentlichen werden die Umfangsbearbeitung, die Erzeugung der Spitzengestalt sowie die Herstellung der Spannuten voneinander unterschieden. Das Schleifen der Spannuten nimmt aufgrund der großen abzutragenden Werkstoffvolumina, der komplexen Eingriffsbedingungen und der besonderen Anforderungen, die an die Genauigkeit gestellt werden, eine Sonderstellung ein. In jüngster Vergangenheit hat sich, ausgehend von der rein schleiftechnischen Herstellung dieser Zerspanwerkzeuge, zusätzlich eine Reihe an Vor- und Nachbehandlungsverfahren etabliert, um die Werkzeuge noch spezifischer an den Anwendungsfall anzupassen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand in der Entwicklung eines Prozessmodells für das Spannutschleifen sowie das darauf aufbauende Polierschleifen der Spannuten. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Prozessanalysen durchgeführt.

Die Prozessanalyse der schleiftechnischen Herstellung der Spannuten durch das Tiefschleifen mit hybriden Schleifscheibenbindungssystemen ergab, dass sich die bislang gewonnenen Erkenntnisse aus dem Stand der Technik in weiten Teilen auch auf größere Tiefenzustellungen und die komplexen Werkstück-Schleifscheibe-Eingriffsbedingungen beim Spannutschleifen übertragen lassen. Im Vergleich zu den herkömmlichen Schleifscheibenbindungssystemen konnte bei den hybridgebundenen Varianten insbesondere ein verändertes Verschleißverhalten und eine gesteigerte Leistungsfähigkeit beobachtet werden. Eine Erhöhung des Zeitspanvolumens, herbeigeführt durch eine steigende Vorschubgeschwindigkeit, führt zu linear ansteigenden Schleiftangentialkräften. Die Vorschubgeschwindigkeit konnte innerhalb der Untersuchungen bei einer Tiefenzustellung von $a_e = 3,2 \text{ mm}$ prozesssicher auf einen Wert von $v_f = 200 \text{ mm/min}$ angehoben werden. Die Korngröße hat indes erhebliche Auswirkungen auf das Prozessverhalten der Schleifscheibe. Eine Verringerung der Korngröße führt zu ansteigenden Schleiftangentialkräften, einem erhöhten radialen Schleifscheibenverschleiß, aber in gleichem Zuge verbesserten resultierenden Oberflächengüten der Spannuten. Ein Anstieg der Schnittgeschwindigkeit hat durch zunehmende Reibungsvorgänge innerhalb der Kontaktzone steigende Schleiftangentialkräfte und einen höheren Verschleiß, aber sinkende Oberflächenrauigkeiten zur Folge. Ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt der Arbeit war die Analyse von unterschiedlichen Kühlschmierstoffdüsen auf den Nutenschleifprozess. Konkret wurden neben der Freistrahldüse eine Schuhdüse, eine Nadeldüse sowie eine Kammerdüse analysiert. Bei Verwendung einer Schuhdüse anstatt der üblicherweise auch industrieseitig zur Anwendung kommenden Freistrahldüsen konnte die Vorschubgeschwindigkeit bei ansonsten unveränderter Prozessführung um 50 % bis auf einen Wert von $v_f = 300 \text{ mm/min}$ gesteigert werden. Hinsichtlich der Oberflächengüte hat sich die Nadeldüse als Optimum der untersuchten Düsentypen herausgestellt. Gerade durch diese Maßnahme erschließt sich

also ein großes Potenzial, die Effizienz des Schleifprozesses weiter zu verbessern. Zusätzlich wurden die während der Tiefschleifversuche gewonnenen Erkenntnisse auf eine Auswahl an Hartmetallen der Anwendungsgruppe K angewendet. Neben der Sorte TSM 33 mit einem Kobaltanteil von 10 % kamen die Sorten TSM 20 mit 7,5 % und AF K44 EF mit 12 % Kobalt zum Einsatz. Mehr Kobaltgehalt führte im analysierten Parameterraum aufgrund einer Reduzierung an zu schleifenden Hartstoffpartikeln zu verringerten Schleifkräften. Innerhalb des ersten Teiles der Arbeit, der sich mit dem Tiefschleifen der Spannuten befasst, wurde abschließend der Thematik der Werkstoffschädigung Aufmerksamkeit gewidmet, indem Gefügeschleife von mit unterschiedlichen Prozessparametern geschliffenen Proben angefertigt und bezüglich der auftretenden Rissbildungen und Kobaltauswaschungen aus der Werkstückrandzone analysiert wurden. Hier konnten im untersuchten Parameterraum keine Beeinträchtigungen des Werkstoffgefüges von der Auslegung des Schleifprozesses detektiert werden.

Auf dem Tiefschleifprozess mithilfe hybridgebundener Diamantschleifscheiben aufbauend, wurde ein grundlegendes Prozessmodell für das Polierschleifen durch elastisch gebundene Diamantschleifscheiben entwickelt (**Abbildung 8-1**). Das Polierschleifen hat primär die Zielsetzung, Vollhartmetallschaftwerkzeuge durch eine Optimierung der Oberflächengüten, im Speziellen der Spannuten, in ihrem Einsatzverhalten zu verbessern und so die Leistungsfähigkeit und Prozessstabilität der Zerspanprozesse zu steigern.

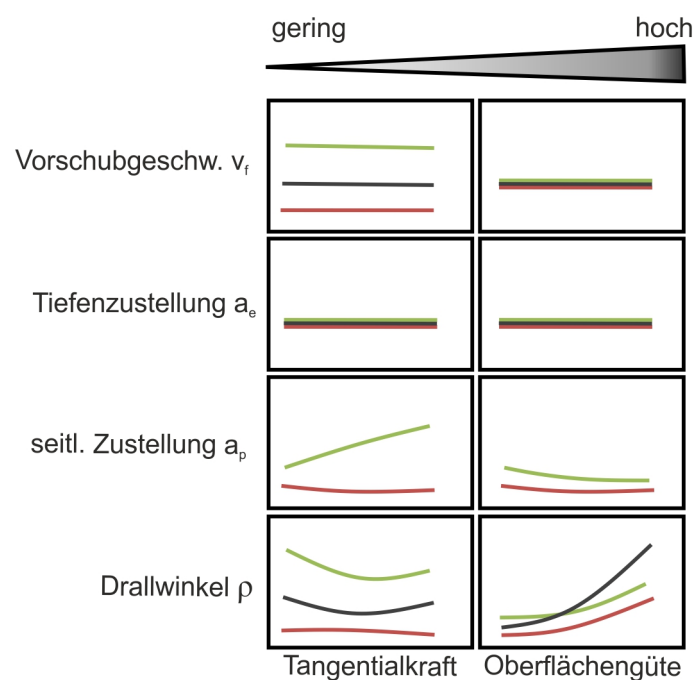


Abbildung 8-1: Prozessmodell für das Polierschleifen

Da der Stand der Technik für das Polierschleifen und den Einsatz von elastisch gebundenen Schleifwerkzeugen nur vereinzelte Quellen aufweist, sollten hier die Grundlagen für ein umfassendes Prozessverständnis gelegt werden. Hierfür wurden neben den Analysen der auftretenden Bearbeitungskräfte, Oberflächengüten und Schneidkantenqualitäten auch grundlegende Untersuchungen zu dem Verhalten und den Kontaktbedingungen zwischen Schleifscheibe und Werkstück durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der Kontaktdruck mithilfe von Druckmessfolie aufgenommen und die mechanischen Eigenschaften der

Schleifscheibenbindung in Zugversuchen analysiert. Als kardinale Prozessgrößen wurden vor Beginn der Arbeit die Schleifscheibenbindungshärte, die Tiefenzustellung a_e , die Vorschubgeschwindigkeit v_f sowie die Werkstückgestalt in Form des Drallwinkels der Spannut identifiziert. Zunächst wurden als Ausgangsbasis die schleiftechnisch erzeugten Spannuten im Detail analysiert und festgestellt, dass es innerhalb des Schleifprozesses zu ungleichmäßigen Rauigkeiten innerhalb der Spannut kommt. Für die weitere Analyse wurde die Nutoberfläche aus diesem Grund in die Spanfläche und die Nutrückenfläche unterteilt, um hier für den nachfolgenden Polierschleifprozess die Einflussfaktoren herausstellen zu können. Generell ließ sich eine starke Abhängigkeit des Polierschleifprozesses von der Schleifscheibenbindungshärte beobachten, so dass mit härter werdender Bindung die Bearbeitungskräfte ansteigen, aber die Oberflächengüten im Vergleich zum vorangegangenen Tiefschleifprozess nicht signifikant verbessert werden konnten. Zielführend war die Verwendung des mittelharten Bindungssystems. Hier konnte eine Ausgewogenheit von notwendiger Flexibilität der Bindung detektiert werden, um sich an die komplexe Nutoberfläche anpassen zu können, um einen gleichmäßigen Materialabtrag zu realisieren und gleichzeitig einer genügenden Härte um ausreichend Material zu entfernen. So konnten die Spitzen des Rauigkeitsprofils geglättet werden. Nachdem die oben aufgeführten kardinalen Prozessparameter untersucht worden waren konnte festgestellt werden, dass nur bestimmte Prozessparameter sowie Schleifscheibenkombinationen die gewünschte Oberflächenqualität erzeugt hatten und die Spanfläche tendenziell schlechter nachbehandelt wurde als die Nutrückenfläche. Die seitliche Zustellung a_p wurde darauf aufbauend als weiterer wesentlicher Parameter erkannt und untersucht, besonders um den Kontaktdruck zwischen Polierschleifscheibe und Spanfläche zu erhöhen. Hier zeigte sich, dass bei gezielter Einstellung der Prozessparameter und der Wahl der geeigneten Härte des flexiblen Bindungssystems die Rauigkeiten prozesssicher von ausgangsseitig $R_z = 5 \mu\text{m}$ auf $R_z = 1 \mu\text{m}$ nach dem Polierschleifen reduziert werden konnten.

Das Polierschleifen unter Verwendung von flexiblen Bindungssystemen bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber den bereits etablierten Verfahren. So ist zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten kein Umspannen des Werkstücks notwendig. Auch kostenintensive Maschinenanschaffungen lassen sich reduzieren. Wesentlich ist aber wohl die Möglichkeit, den Materialabtrag auf den zu bearbeitenden Fläche gezielt steuern und den jeweiligen Anforderungen anpassen zu können. Dies ist mit nur einer geringen Beeinflussung der Gestalt aus der Vorbearbeitung hinsichtlich Form- und Maßtoleranzen möglich.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit konnte ein grundlegendes Verständnis für den Einsatz von flexibel gebundenen Diamantschleifscheiben zur Hartmetallbearbeitung aufgebaut werden. Jedoch stellen sich nach wie vor Fragen und ergeben sich zahlreiche Ansätze für weiterführende Forschungsaktivitäten. Die Verschleißmechanismen und ihre Auswirkungen auf die Standzeiten der Schleifscheiben sowie eine darauf angepasste Abrichtstrategie sollte ebenso analysiert werden wie das dynamische Verhalten der flexiblen Bindungssysteme. Eine Bearbeitung der weiteren an Zerspanwerkzeugen vorhandenen Funktionsflächen wie beispielsweise der Freifläche und der Führungsfasen bietet darüber hinaus Potenziale, die Einsatzmöglichkeiten und damit die Effektivität der Polierschleifbearbeitung weiter zu erhöhen.

9. Literaturverzeichnis

- [AF10] Abele, E.; Fajara, M.: Simulation-based twist drill design and geometry optimization. CIRP Annals – Manufacturing Technology 59 (2010), S. 145-150
- [APF⁺07] Abdullah, A.; Pak, A.; Farahi, M.; Barzegrai, M.: Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide. Journal of Materials Processing Technology 183 (2007), S. 165-168
- [AWB08] Anderson, B.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Effect of Face Cooling on Workpiece Temperatures Using 2D and 3D Finite Element Analysis of Creep-Feed Grinding. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, CSME, Montreal; Vol. 32 (2008) No. 3-4, S. 439-451
- [BAW⁺13] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Wolf, M. Kipp, M.: Der letzte Schliff formt die Mikrogestalt – Neue Potenziale in der Schneidkantenpräparation mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik, 26 (2013) Heft 2 , S. 76-83
- [BBQ⁺10] Bonny, K.; De Beats, P.; Vleugels, J.; Jiang, D.; Van der Biest, O.; Lauwers, B.; Liu, W.: Surface finishing on tribological characteristics of WC-Co hardmetals. Tribology international, 43 (2010) 1-2, S. 40-54
- [BHB09] Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Bleil, N.: Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system. Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 19, S. 6117-6123
- [BHW00] Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Wittmann, M.: Effektive Zuführung des Kühlschmierstoffs beim Schleifen. Industrie Diamanten Rundschau 34 (2000) Heft 2, S. 163-175
- [BM93] Brinksmeier, E.; Minke, E.: High-Performance Surface Grinding - The Influence of Coolant on the Abrasive Process. Annals of the CIRP Vol. 42 (1993) 1, S. 367-370
- [BMK⁺10] Brinksmeier, E.; Mutlugünes, Y.; Klocke, F.; Aurich, J. C.; Shore, P.; Ohmori, H.: Ultra-precision grinding. Annals of the CIRP Vol. 59 (2010) 2, S. 652-671
- [Boc89] Bock, R.: Umweltfreundliche Kühlschmierstoffe beim Schleifen von Hartmetall. Industrie Anzeiger, 111 (1989) 79, S. 46-47
- [Boo95] Boor, U.: Kühlschmierstoffe für das Tiefschleifen. VDI-Zeitschrift, Band 137 (1995) Heft 6, S. 40-47
- [BOS07] Brinksmeier, E.; Oltmann, R.; Schulte, H.: Kinematiken zum Polieren von Mikrostrukturen. wt Werkstatttechnik online, 97 (2007) Heft 6, S. 431-436
- [Bre07] Brevern, P. v.: Tiefschleifen von unterschiedlichen Hartmetallsorten mit Öl als Kühlschmierstoff. Industrie Diamanten Rundschau, Band 41 (2007) Heft 4, S. 68-71

- [Bre08a] Brevern, P. v.: Untersuchungen zum Seiten-Planschleifen von Hartmetall. Industrie Diamanten Rundschau, Band 42 (2008) Heft 1, S. 60-63
- [Bre08b] Brevern, P. v.: Untersuchungen zur Kühlschmierstoffversorgung beim Tiefschleifen von Hartmetall. Industrie Diamanten Rundschau, Band 42 (2008) Heft 3, S. 34-38
- [Bre96] Brevern, P. v.: Untersuchungen zum Tiefschleifen von Hartmetall unter besonderer Berücksichtigung von Schleiföl als Kühlschmierstoff. Dissertation, Hamburg, 1996
- [BH12a] Biermann, D.; Heymann, T.: Tiefschleifen von Hartmetall (Teil 1) – Erhöhung der Leistungsfähigkeit Tiefschleifprozessen zur Hartmetallbearbeitung am Beispiel von Bohrernten. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 4 (2012) Heft 3, S. 20-25
- [BH12b] Biermann, D.; Heymann, T.: Tiefschleifen von Hartmetall (Teil 2) – Untersuchungen zum Nutenschleifen an wendelgenuteten Vollhartmetallwerkzeugen mit hybridgebundenen Schleifscheiben. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 4 (2012) Heft 4, S. 8-15
- [BMS⁺12] Bouzakis, K. D.; Michailidis, N.; Skordaris, G.; Bouzakis, E.; Biermann, D.; M'Saoubi, R.: Cutting with coated tools – Coating technologies, characterization methods and performance optimization. Annals of the CIRP, Vol. 61 (2012) 2, S. 703-72
- [Bon14] Bonnet, M.: Kunststofftechnik – Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. 2. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2014
- [BS12] Bargel, H. J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 11. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg Dordrecht London New York, 2012
- [Bus68] Busch, D. M.: Ritz- und Verschleißuntersuchungen an spröden Werkstoffen mit einzelkornbestückten Hartstoffwerkzeugen, Dissertation, Hannover, 1968
- [BW09] Biermann, D.; Würz, E.: A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels. Production Engineering. Research and Development (Online) Band 3 (2009) Heft 4/5, S. 411-416
- [BW04] Brinksmeier, E.; Wilke, T.: Erfassung und Vermeidung thermischer Randzonenbeeinflussung beim Schleifen. In: Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 5. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2004, Stuttgart, S. 2/1-2/22
- [BWG09] Brinksmeier, E.; Wilkens, A.; Giese, E.: In-Prozess-Temperaturmessung ermöglicht optimale Auslegung des Kühlschmierstoffs. MM – Maschinenmarkt. Das Industrie Magazin (2009) Heft 30, S. 30-33
- [BWH13a] Biermann, D.; Wolf, M.; Heymann, T.: Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen – Verfahrenstechnische Grundlagen. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 5 (2013) Heft 2, S. 24-29
- [BWH13b] Biermann, D.; Wolf, M.; Heymann, T.: Magnetfinishen zur Präparation von VHM-Werkzeugen – Untersuchungen zur Oberflächenfeinbearbeitung der

- Spannuten. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 5 (2013) Heft 3, S. 32-37
- [Bye08] Byelyayev, O.: Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation, Aachen, 2008
- [CB96a] Clausen, R.; Brevern, P. v.: Tiefschleifen von Hartmetall mit Diamantschleifscheiben – Teil 1 – Tiefschleifen mit Emulsion. Industrie Diamanten Rundschau, Band 30 (1996) Heft 3, S. 185-189
- [CB96b] Clausen, R.; Brevern, P. v.: Tiefschleifen von Hartmetall mit Diamantschleifscheiben – Teil 2 – Tiefschleifen mit Schleiföl. Industrie Diamanten Rundschau, Band 30 (1996) Heft 4, S. 247-253
- [CYY⁺08] Chen, M.; Yuan, J.; Yang, Y.; Yu, D.: The Characteristic of Organic Bond Grinding Wheel. Key Engineering Materials, Vol. 359-360 (2008) S. 63-67
- [CZG⁺08] Cheung, F. Y.; Zhou, Z. F.; Geddam, A.; Li, K. Y.: Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. Journal of Materials Processing Technology, 208 (2008) 1; S. 196-204
- [Dam05] Dambon, O.: Das Polieren von Stahl für den Werkzeug- und Formenbau. Dissertation, Aachen, 2005
- [DD09] Deichmüller, M.; Denkena, B.: Calculating the Deflection of a Twist Drill during the Flute Grinding Process using a Beam Model with Changing Moments of Inertia, in: 3rd GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry, Hannover, 2009
- [Ded72] Dederichs, M.: Untersuchung der Wärmebeeinflussung des Werkstückes beim Flachsleifen. Dissertation, Aachen, 1972
- [DIN03] Standard DIN 8589-0 (2003-09). Fertigungsverfahren Spanen Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN05] DIN ISO 513 (2005-11). Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen
- [DIN09] DIN 53504 (2009-10-00). Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugdehnung, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch
- [DIN13] DIN EN ISO 4287/A2. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [DIN84] Standard DIN 8589-11 (1984-01). Fertigungsverfahren Spanen Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN94] DIN 53519-1 (1972-05). Elastomere und thermoplastische Elastomere – Bestimmung der Härte

- [DKB⁺11] Denkena, B.; Köhler, J.; Behrens, L.; Turger, A.; Hahmann, D.; v. d. Meer, M.: Schleifen keramischer Verschleißschutzsysteme. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 3 (2011) Heft 3, S. 28-43
- [DKT10] Denkena, B.; Köhler, J.; Turger, A.: Einsatz hochharter Schneidstoffe beim Schleifen. DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge, 2 (2010) Heft 2, S. 30-36
- [DTD06] Denkena, B.; Tracht, K.; Deichmüller, M.: Wechselwirkungen zwischen Struktur und Prozess beim Werkzeugschleifen. Wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 96 (2006) Heft 11/12, S. 814-819
- [DEE⁺12] Dominighaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen. 8. Auflage Springer Verlag, Heidelberg, 2012
- [EK13] Effgen, C.; Kirsch, B.: A new method for the preparation of cutting edges via grinding. Advanced Materials Research – WGP Kongress, 769 (2013) S 85-92
- [EKA13] Effgen, C.; Kirsch, B.; Aurich, J. C.: Schneidkantenpräparation mithilfe elastisch gebundener Schleifscheiben. VDI-Zeitschrift, Band 155 (2013) Special II, S. 22-24
- [EPD⁺03] Evans, C. J.; Paul, E.; Dornfeld, D.; Lucca, D. A.; Byrne, G.; Tricard, M.; Klocke, F.; Dambon, O.; Mullany, B. A.: Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. Annals of the CIRP Vol.52 (2003) 2, S. 543-566
- [Eyr09] Eyrisch, T.: Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen – Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen. Dissertation, Kaiserslautern, 2009
- [Fel11] Felderhoff, J. F.: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle. Dissertation, Dortmund, 2011
- [Fri02] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Habilitation, Hannover, 2002
- [FWH12] Frankowski, G.; Wolf, M.; Heymann, T.: Optisches 3D-Digitalisieren zur Analyse von Werkzeugen zur Simulation von Zerspanungsprozessen. Zerspanen im modernen Produktionsprozess – 40 Jahre ISF, Tagungsband, 2012
- [FSC07] Fang, L.; Sun, K.; Cen, Q.: Particle movement patterns and their prediction in abrasive flow machining. Tribotest, 13 (2007) 4, S. 195-206
- [Ger10] Gernsheimer, S.: Tribologische und schmierungstechnische Aspekte der Bearbeitung von Hartmetallen. Tribologie und Schmierungstechnik, Band 57 (2010) Heft 1, S. 39-44
- [GJL06] Gorana, V. K.; Jain, V. K.; Lal, G. K.: Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. Wear – An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear 260 (2006), S. 128-129
- [Gra01] Graf, W.: Es geht ohne hohe Geschwindigkeiten. Schweizer Maschinenmarkt, 18 (2001), S. 18-20

- [GRS⁺13] Goeke, S.; Rausch, S.; Schumann, S.; Biermann, D.: Charakterisierung funktionaler Oberflächen durch die konfokale Weißlichtmikroskopie. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik, 26 (2013) Heft 4 , S. 86-93
- [Heu91] Heurer, W.: Potentiale der Kühlschmierung beim Schleifen mit hochharten Schleifstoffen. Kühlschmierstoffe in der spanenden Fertigung, Deutsches IndustrieForum für Technologie, Frankfurt a. M. (1991), S. 1-26
- [Hey12a] Heymann, T.: Gezielte Nut- und Schneidkantenpräparation von Vollhartmetall-Zerspanwerkzeugen durch Polierschleifen. Spanende Fertigung / Prozesse-Innovation – Werkstoffe. 6. Ausgabe (2012), Vulkan-Verlag Essen, S. 104-110
- [Hey12b] Heymann, T.: Simulation der Temperaturverteilung beim Bohrernutenschleifen. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik, 25 (2012) Sonderausgabe zur GrindTec , S. 82-88
- [HHW01] Hegeman, J. B. J. W.; De Hosson, J. T. M.; De With, G.: Grinding of WC-Co hardmetals. Wear – An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear 248 (2001) 1/2, S. 187-196
- [Hin86] Hinz, H. E.: Gleitschleifen – Druckschleifen mit Maiskolbenschrot. Galvanotechnik, Band 77 (1986) Heft 10, S. 2387-2391
- [Hör03] Hörner, D.: Moderne Kühlschmierstoffkonzepte für die Schleifbearbeitung – Leistungsperformance durch Einsatz ungewöhnlicher Basisflüssigkeiten. Schleiftechnisches Kolloquium, 3, European Conference on Grinding, 1, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Band 642 (2003), S. 9.1-9.28
- [Hüb11] Hübent, C.: Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schafffräsern. Dissertation, Berlin, 2011
- [Jai09] Jain, V. K.: Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209 (2009), S. 6022-6038
- [JJ06] Jha, S.; Jain, V. K.: Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. Wear – An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear 261 (2006), S. 856-866
- [JQY⁺08] Jiabin, L.; Qiusheng, Y.; Juan, Y.; Hong, T.; Weiqiang, G.: A Study of Micro Machining with Instantaneous Tiny-Grinding Wheel Based on the Fe₃O₄ Magnetorheological Fluid. Key Engineering Materials, Vols. 359-360 (2008), S. 389-393
- [JS06] Jin, T.; Stephenson, D. J.: Heat flux distributions and convective heat transfer in deep grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 14, S. 1862-1868
- [KB97a] Klocke, F.; Beck, T.: Potentiale der Kühlschmierstoffreduzierung beim Schleifen. Tagung der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Umweltfreundlich zerspanen, 1997, VDI-Verlag, Düsseldorf in: VDI-Berichte Band 1339 (1997), S. 281-297

- [KB97b] Klocke, F.; Beck, T. Zufuhrsysteme für den anforderungsgerechten Kühlschmierstoffeinsatz. Schleiftechnik im Wettbewerb: Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, Schleiftechnisches Kolloquium, Düsseldorf, VDI-Verlag (1997), S. 9.1-9.14
- [KG98] Kordonski, W.; Golini, D.: Progress Update in Magnetorheological Finishing. Proceedings of the 6th International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their Applications, Japan (1998), S. 837-844
- [KK05] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren - Schleifen, Honen, Läppen. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005
- [KK08] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2008
- [Koc09] Koch, J.: Feinstschleifen von Maschinenwellen. Schweizer Maschinenmarkt; technische Fachzeitschrift, Band 110 (2009) Heft 6, S. 32-35
- [Koc13] Koch, J.: Elastisch gebundene Schleifwerkzeuge – ein Überblick. Hanser Schleiftagung – Sichere, reproduzierbare und effiziente Prozesse, Fellbach, 2013
- [Kol92] Kolaska, H.: Pulvermetallurgie der Hartmetalle. Herausgegeben als Vorlesungsreihe vom Fachverband Pulvermetallurgie, Hagen, 1992
- [Kön97] König, M.: Phenolharzbindung für Schleifwerkzeuge. Schleiftechnik im Wettbewerb: Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, Schleiftechnisches Kolloquium (1997) S. 3.1-3.10
- [Köt06] Kötter, D.: Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen, Dissertation, Dortmund, 2006
- [KP83] Kacalak, W.; Pluta, Z.: Schleifen und Polieren mit elastischen Schleifscheiben. Schleifen und Trennen / Tyrolit Schleifmittelwerk Swarovski, Heft 107 (1983), S. 7-11
- [KS90] Kuriyagawa, T.; Syoji, K.: Study of Cermet with Hybrid Bond Diamond Wheel. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Band 24 (1990) Heft 2, S. 118-123
- [Lie98] Lierse, T.: Mechanische und thermische Wirkungen beim Schleifen keramischer Werkstoffe. Dissertation, Hannover, 1998
- [LLC⁺97] Luo, S. Y.; Liao, Y. S.; Chou, C. C.; Chen, J. P.: Analysis of the wear of a resin-bonded diamond wheel in the grinding of tungsten carbide. Journal of materials processing technology, Vol. 69 (1997), S. 289-296
- [Low80] Lowin, R.: Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. Dissertation, Aachen, 1980
- [Löh95] Löhnert, V.: Schleifen – Glätten – Glänzen. MAV Kompetenz in der Spanenden Fertigung. Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, (1995) Heft 10, S. 84

- [Mac07] Mackensen, T. v.: Produktives Nutenschleifen mit profilierbaren Diamant Schleifscheiben. Industrie Diamanten Rundschau, Band 41 (2007) Heft 2, S. 50-59
- [Mak05] Maksoud, T. M. A.: Heat transfer model for creep-feed grinding. Journal of Materials Processing Technology, 168 (2005) 3, S. 448-463
- [Mal08] Maldaner, J.: Verbesserung des Zerspanverhaltens von Werkzeugen mit Hartmetall-Schneidelementen durch Variation der Schleifbearbeitung. Dissertation, Kassel, 2008
- [Met81] Metzger, J. L.: Tiefschliff von Hartmetall mit Diamantscheiben. Technica internationale technische Zeitschrift, Band 30 (1981) Heft 21, S. 1941-1943
- [MG07] Malkin, S.; Guo, C.: Thermal Analysis of Grinding. Annals of the CIRP Vol.56 (2007), S. 760-782
- [MGE92] Malkin, S.; Guo, C.; Engineer, F.: Experimental Measurement of Fluid Flow through the Grinding Zone. Journal of Engineering for Industry, Vol. 114 (1992), S. 61-66
- [MKC04] Makuch, S.; Kacalak, W.; Cincio, R.: Methods of precision polishing using new conceptions of grinding tools. Elektronika, Band 45 (2004) Heft 8/9, S. 178-181
- [Moh78] Mohr, H.: Nutenschleifen im Schleichgangverfahren. Werkstatt und Betrieb, Band 111 (1978) Heft 3, S. 185-186
- [Mou11] Mourek, D.: Automatische Suche der Scheibenposition beim Schleifen wendelförmiger Nuten von Schaftwerkzeugen. Dissertation, Magdeburg, Shaker Verlag Aachen, 2011
- [MU08] Mihotovic, V.; Uhlmann, E.: Strömungsschleifen ermöglicht flexible Endbearbeitung komplexer Strukturen. MM – Maschinenmarkt. Das Industrie Magazin (2008) Heft 36, S. 116-120
- [Mül01] Müller, P.: Improved Process Reliability in Drilling by New Coating Techniques. Third international Conference on Metal Cutting and High Speed Machining, New York, 3 (2001), S. 339-346
- [NN77] Notter, A.T.; Nicolls, M. O.: CDA – die neue Hochleistungs-Diamantkörnung für das Schleifen von Hartmetall. Neuentwicklungen beim Schleifen von Hartmetall mit kunstharzgebundenen Diamantscheiben, Düsseldorf; De Beers Industrie Diamanten-Verlag, 1977, S. 11-18
- [OF86] Ohishi, S.; Furukawa, Y.: Accuracy of work-pieces produced by one-pass creep feed grinding. Precision Engineering 8 (1986) 3, S. 144-150
- [Ott02] Ott, H. W.: Dimensionierung der Kühlschmierstoffzuführung (Menge, Druck, Leistungsbedarf und Düsenausführungen). Feinstbearbeitung technischer Oberflächen, Internationales IWF-Kolloquium, Zürich, 6 (2002), S. 111-135
- [Pet05] Peters, C.: Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen. Dissertation, Dortmund, 2005

- [Pfl02] Pfluger, J. A.: Metallgebundene Diamant-Schleifscheibe für alle harten Schneidstoffe. VDI-Zeitschrift Special Werkzeuge, I (2002) S. 56-58
- [PKD⁺09] Popp, K.; Kröger, M.; Deichmüller, M.; Denkena, B.: On Contact Modeling of Workpiece and Grinding Wheel with Nonlinear Elements, in: Proceedings 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, ESCM 2009, Lisbon, Portugal, 2009
- [Prü00] Prüller, H.: Gleitschleifen - Ein Schleifverfahren mit Unterstützung durch Tenside. 47. Kongress der SEPAWA, Bad Dürkheim, (2000), S. 205-209
- [Prz87] Przyklenk, K.: Ergebnisse beim Feinschleifen von Bohrungen mit kleinem Durchmesser mit dem Verfahren Druckfließläppen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 54. Ausgabe (1987), Vulkan-Verlag Essen, S. 362-371
- [Prz88] Przyklenk, K.: Druckfließläppen – Feinbearbeitungsverfahren mit Schleifpasten. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 55. Ausgabe (1988), Vulkan-Verlag Essen, S. 441-458
- [PS88] Pishek, G. A.; Scheider, A. F.: Emerging Trends in Flexible Abrasive Tools. Konferenzbeitrag: Westec, Los Angeles, California (1988), S. 135.1-135.9
- [Rap07] Rappold Winterthur Schleiftechnik GmbH: Werkzeugschleifen mit Metallhybridbindung verlängert Standzeit. Diamond Business, 1 (2007) S. 48-49
- [Sai90] Saini, D. P.: Wheel Hardness and Local Elastic Deflections in Grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Band 30 (1990) Heft 4, S. 637-649
- [Sche88] Schedler, W.: Hartmetall für den Praktiker – Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe. HRSG.: Plansee TIZIT GmbH, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1988
- [Schn99] Schneider, M.: Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen. Dissertation, Dortmund, 1999
- [Schu05] Schulte, M.: Die Strategie beim Werkzeugschleifen beeinflusst die Leistungsfähigkeit des Werkzeugs. Maschinenmarkt (2005) Heft 17, S. 26-31
- [Schu94] Schulz, H.: Bedarfsgerechte Auswahl von PVD-Schichten zur Leistungssteigerung von HSS- und Hartmetallwerkzeugen. In: Weinert, K. (Hrsg.): Spanende Fertigung, Vulkan-Verlag, Essen, 1994, S. 293-299
- [SE00] Schulz, H.; Emrich, A. K.: Optimization of the Chip Flute of Drilling Tools Using the Principle of Genetic Algorithms. Intelligent computation in manufacturing engineering, (2000) 2, S. 371-376
- [Sei02] Seiler, A.: Höhere Zeitspanvolumina beim Nutentiefschleifen von Hartmetall. Industrie Diamanten Rundschau Band 36 (2002) Heft 2, S. 150-152
- [SFH⁺05] Schwarz, O.; Ebeling, F. W.; Huberth, H.; Schirber, H.; Schlör, N.: Kunststoffkunde. 8. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2005

- [SLJ07] Shafrir, S. N.; Lambropoulos, J. C.; Jacobs, S. D.: A magnetorheological polishing-based approach for studying precision microground surfaces of tungsten carbides, *Precision Engineering* 31 (2007), S. 83-93
- [SN06] Schulte, M.; Noyen, M.: Steigerung der Werkstückqualität beim Schleifen von Spannungswerkzeugen durch optimiertes Simulationsmodell. *Industrie Diamanten Rundschau*, Band 40 (2006) Heft 1, S. 30-34
- [SO05] Schumann, H.; Oettel, H.: *Metallografie*. 14. Auflage, Wiley-Vch Verlag, Weinheim, 2005
- [Sto97] Storr, M.: Geölter Blitz - Öl als Kühlschmiermedium beim Schleifen. *Fertigung das Fachmagazin für die Metallbearbeitung*. Band 25 (1997) Heft 12, S. 26-27
- [Taw90] Tawakoli, T.: *Hochleistungs-Flachschleifen; Technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [TBP⁺05] Thilow, A. P; Berger, K.; Maier, R.; Przyklenk, K.; Schäfer, F.; Pießlinger-Schweiger, S.: *Entgrat-Technik – Entwicklungsstand und Problemlösungen*. Expert Verlag, Renningen, 2005
- [TEN⁺04] Tanaka, T.; Esaki, S.; Nishida, K.; Nakajima, T.; Ueno, K.: Development and Application of Porous Vitrified-Bonded wheel with Ultra-Fine Diamond Abrasives. *Key Engineering Materials*, Vols. 257-258 (2004) S. 251-256
- [Ter11] Terwey, I.: *Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen*. Dissertation, Dortmund, 2011
- [TFH00] Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Hessel, D.: *Technologie des Werkzeugschleifens*. 2. Schleiftechnisches Kolloquium, Bremen (2000), S. 1-19
- [TK76] Tönshoff, H. K.; Kaiser, M.: *Schleifen von Hartmetall im Pendel- und Tiefschliff*. *Industrieanzeiger*, Band 98 (1976) Heft 79, S. 1393-1395
- [Tön97] Tönshoff, H. K.: *Technologie des Werkzeugschleifens*. 3. Tübinger Schleiftage, Konferenzbeitrag (1997)
- [TK93] Tikal, F.; Kammermeier, D.: *Vollhartmetallbohrer und -fräser. Qualität und Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1993
- [UB10] Uhlmann, E.; Byrne, F.: Einfluss der Eigenspannungen CVD-diamantbeschichteter Werkzeuge auf das Einsatzverhalten. *DIHW Diamant Hochleistungswerkzeuge*, 2 (2010) Heft 1, S. 28-34
- [US04] Uhlmann, E.; Szulczynski, H.: *Strömungsschleifen von Hochleistungskeramik*. *Industrie Diamanten Rundschau* Band 38 (2004) Heft 1, S. 52-58
- [Vit85] Vits, R.: *Technologische Aspekte der Kühlschmierung beim Schleifen*. Dissertation, Aachen, 1985
- [WBH06] Wittmann, M.; Brinksmeier, E.; Heinzl, E.: Einfluss des Kühlschmierstoff-Zufuhrsystems auf die Wirkmechanismen im Schleifspalt. *International Colloquium Tribology* 15, 2006, Ostfildern, Technische Akademie Ostfildern, S. 1-17

- [Wei07] Weißbach, W.: Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 16. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2007
- [WG08] Webster, J. A.; Grün, P.: Improving Grinding Process Economics Through More Effective Fluid Application. Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis, Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 7 (2008) S. 1-24
- [Wil98] Willsch, C.: Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet. Dissertation, Dortmund, 1998
- [Wit07] Wittmann, M.: Bedarfsgerechte Kühlschmierung beim Schleifen. Dissertation, Bremen, 2007
- [WJS⁺00] Weinert, K.; Johlen, G.; Schneider, M.; Finke, M.: Werkzeugschleifen: Problematik bei Hartmetallen und Cermets. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 59. Ausgabe (2000), Vulkan-Verlag Essen, S. 262-272
- [WJS01] Weinert, K.; Johlen, G.; Schulte, M.: Wirtschaftliches Schleifen von Hartmetall- und Cermet-Werkzeugen. VDI-Zeitschrift Integrierte Produktion Special, (2001) Heft II Werkzeuge, S. 59-62
- [WK04] Wang, S. B.; Kou, H. S.: Selections of working conditions for creep feed grinding. Part (I)-thermal partition ratios. The international journal of advanced manufacturing technology, 23 (2004) 9-10, S. 700-706
- [WM81] Werner, P. G.; Minke, E.: Technologische Merkmale des Tiefschleifens – Erhöhte Schnittkräfte und reduzierte Werkstücktemperaturen – Teil 1. TZ für praktische Metallbearbeitung, 75 (1981) 3, S. 11-15
- [WMW06] Walter, A.; Meyer, L.; Wittmann, M.: Ganzheitliche Optimierung des Einsatzes von Kühlschmierstoffen in der Zerspanung. 47. Tribologie Fachtagung; Gesellschaft für Tribologie Aachen, 2006, S. 1-10
- [WS03] Weinert, K.; Schulte, M.: Kompensation der prozessbedingten Deformation beim Werkzeugschleifen. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 93 (2003) Heft 7/8, S. 550-554
- [WSN⁺05] Weinert, K.; Schulte, M.; Noyen, M.; Kresing, I.: Prozessstrategie beim Werkzeugschleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62. Ausgabe (2005), Vulkan-Verlag Essen, S. 212-220
- [WSW96] Weinert, K.; Schneider, M.; Willsch, C.: Werkzeugschleifen – ein richtungsweisender Fertigungsprozess. VDI-Zeitschrift Integrierte Produktion Special 138 (1996) Heft1/2, S. 46-49
- [WWS95] Weinert, K.; Willsch, C.; Schneider, M.: Werkzeugschleifen – auf die Richtung kommt es an. Der Werkzeugschleifer. Offizielles Organ des FDPW und des VSPW, Band 8 (1995) Heft 3, S. 3-7
- [Wür11] Würz, E.: Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden. Dissertation, Dortmund 2011
- [YPR⁺05] Yin, L.; Pickering, J. P.; Ramesh, K.; Huang, H.; Spowage, A. C.; Vancoille, E. Y. J.: Planar nanogrinding of a fine grained WC-Co composite for an optical

-
- surface finish. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 26 (2005), S. 766-773
- [YS11] Yusoff, A. R.; Sims, N. D.: Optimization of variable helix tool geometry for regenerative chatter mitigation. International Journal of Machine Tools and Manufacture 51 (2011) 2, S. 133-141
- [YXX⁺08] Yanhong, D.; Xingai, Y.; Xingxiang, W.; Shichun, Y.: Study on the Performance on the Ferromagnetic Poles Based on the Curved Surface Magnetic Abrasive Finishing. Key Engineering Materials, Vols. 359-360 (2008), S. 365-368
- [YYK07] Yoshihara, N.; Yan, J.; Kuriyagawa, T.: Development of a Rubber-Bonded Grinding Wheel – Studies an Aspherical Grinding. Key Engineering Materials Vol. 329 (2007), S. 465-470
- [Zun11] Zunke, R.: Technological Analysis of Advanced Ceramics Polishing. Dissertation, Aachen, 2011

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Tobias Heymann
Geburtsdatum: 15. März 1982
Geburtsort: Dortmund

Schulbildung

1988 – 1992 Bach Grundschule, Dortmund Wickede
1992 – 2001 Immanuel-Kant-Gymnasium, Dortmund

Zivildienst

2001 – 2002 Städtische Kliniken Dortmund

Hochschulstudium

2002 – 2004 Grundstudium an der Technischen Universität Dortmund:
Diplom Wirtschaftsingenieurwesen
2004 – 2008 Hauptstudium an der Technischen Universität Dortmund:
Vertiefungsrichtung: Produktionsmanagement

Beruf

2008 – 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund
2010 – 2014 Leiter der Abteilung Schleiftechnologie
Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund
seit Juli 2014 Leiter Technologie und Anwendungstechnik
TBT Tiefbohrtechnik in Dettingen/Erms

Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

Mehnen, J.

Band H1: Mehrkriterielle Optimierungsverfahren für produktionstechnische Prozesse

Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8760-9

Zabel, A.

Band H2: Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen

Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2

Adams, F.-J.

Band 1: Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5

Friedhoff, J.

Band 2: Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen-, und Modellbau

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3

Willsch, Ch.

Band 3: Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1

Enselmann, A.

Band 4: HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X

Thamke, D.

Band 5: Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8707-2

Gillmeister, F.

Band 6: Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4

Mumm, A.

Band 7: Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6

Albersmann, F.

Band 8: Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9

Schneider, M.

Band 9: Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0

Schroer, M.

Band 10: Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0

Schulte, K.

Band 11: Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2

Mehnen, J.

Band 12: Evolutionäre Flächenrekonstruktion

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9

Bruchhaus, T.

Band 13: Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7

Meng, J.

Band 14: Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen-, und Modellbau

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5

Buschka, M.

Band 15: Formgedächnistechnik – Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3

Liedschulte, M.

Band 16: Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6

Finke, M.

Band 17: Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X

Löbbe, H.

Band 18: Tiefbohren auf Bearbeitungszentren

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8

Opalla, D.

Band 19: Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1

Zabel, A.

Band 20: Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräsworkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-X

Schwietering, C.

Band 21: Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8

Johlen, G.

Band 22: Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8722-6

Guntermann, G.

Band 23: Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeug- und Formenbau

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4

Lange, M.

Band 24: Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8724-2

Schulte, M.

Band 25: Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0

Du, S.

Band 26: Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9

Loichinger, A.

Band 27: Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9

Koehler, W.

Band 28: Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5

Kalveram, M.

Band 29: Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8729-3, 978-3-8027-8729-4

Hagedorn, M.

Band 30: Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen – Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8730-7, 978-3-8027-8730-0

Peters, C.

Band 31: Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8731-5, 978-3-8027-8731-7

Stautner, M.

Band 32: Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4

Surmann, T.

Band 33: Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsiges Fräsen von Freiformflächen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1

Damm, P.

Band 34: Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8

Hesterberg, S.

Band 35: Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle – Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5

Kötter, D.

Band 36: Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2

Petzoldt, V.

Band 37: Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von NiTi

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9

Zhang, L.

Band 38: Accuracy enhancement of a Hexapod Machine Tool

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6

Webber, O.

Band 39: Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3

Wittkop, S.

Band 40: Einlippenbohren nichtrostender Stähle

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9

Kress, J.

Band 41: Auswahl und Einsatz von polykristalinem kubischen Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6

Hammer, N.

Band 42: Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstragpressprofile

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3

Jansen, T.

Band 43: Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0

Noyen, M.

Band 44: Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7

Khanis, P.

Band 45: Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4

Bergmann, S.

Band 46: Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1

Kersting, M.

Band 47: Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2

Enk, D.

Band 48: Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräswerkzeugen zur HSC-Bearbeitung

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5

Rautenberg, J.

Band 49: Simultane fünfachsiges Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbauteilen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6

Mohn, T.

Band 51: Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5

Kahleyß, F.

Band 52: Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünffachsigen Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8753-9

Weckerle, T.

Band 53: Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0

Marschalkowski, K.

Band 54: Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4

Kersting, P.

Band 55: Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7

Hossam, M.

Band 56: Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1

Faraz, A.

Band 57: Experimental Study On Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4

Paffrath, K.-U.

Band 58: Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1

Kessler, N.

Band 59: Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8

Felderhoff, J.-F.

Band 60: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle

Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2

Engbert, T.

Band 61: Fließbohrbearbeitung und Innengewindenfertigung an Leichtbaustrukturen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5

Würz, E.

Band 62: Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6

Terwey, I.

Band 63: Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahspanen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9

Pantke, K.

Band 64: Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge

Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0

Scheidler, A.-V.

Band 65: Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3

Heilmann, M.

Band 66: Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6

Machai, C.

Band 67: Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0

Feldhoff, M.

Band 68: Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3

Baschin, A.

Band 69: Analyse und Simulation der Prozessdynamik und –stabilität beim NC-Mikrofräsen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7

Sacharow, A.

Band 70: Kompensation von Formabweichung durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4

Wagner, T.

Band 71: Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1

Zhang, L.-J.

Band 72: Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8

Schlenker, J.

Band 73: Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen

Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8777-5