

Untersuchungen zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Timo Bathe

aus

Plettenberg

Tag der mündlichen Prüfung: 26.Juni 2020

1. Gutachter/-in: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann
2. Gutachter/-in: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann

Dortmund, 2020

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über *www.dnb.de* abrufbar

ISBN: 978-3-8027-8920-5

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann, der als Institutsleiter allzeit ein wachsames Auge auf die wissenschaftliche Förderung und Arbeit hatte sowie durch das entgegengebrachte Vertrauen und die hervorragenden Anregungen und Unterstützungen bei Fragestellungen zur Realisierung dieser Dissertation sowie der durchgeführten Entwicklungen beigetragen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Wolfgang Tillmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkstofftechnik (LWT) der Technischen Universität Dortmund, danke ich für die Übernahme des Korreferats. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, dem Leiter des Fachgebiets für Werkstoffprüftechnik der Technischen Universität Dortmund, für das Mitwirken in der Prüfungskommission sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Teile der durchgeführten Dissertation wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert, wofür ich mich ebenfalls bedanken möchte. Insbesondere möchte ich mich auch bei den Unternehmen des Erkenntnistransferprojektes, der TBT Tiefbohrtechnik GmbH + Co, der Robert Bosch GmbH sowie der Firma Oerlikon Balzers bedanken. Hierbei gilt besonderer Dank den Ansprechpartnern Dr.-Ing. Thomas Bruchhaus, Christian Scholl, Thomas Voigt sowie Dirk Schmidt und Jens Eggemann, die auch bei den ergänzenden Untersuchungen gerne mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Ing. Fabian Felderhoff, der bereits frühzeitig die Motivation und mein Interesse an der Optimierung von Zerspanungswerkzeugen geweckt und somit einen der Grundsteine für das Gelingen dieser Arbeit gelegt hat.

Besonderen Spaß machte der kollegiale und freundschaftliche Austausch über relevante und irrelevante Themen mit allen Kollegen am ISF. Für die stets offenen Ohren und dadurch entfachten Diskussionen und Denkanstöße möchte ich mich herzlichst bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen aus der Abteilung Schleiftechnologie sowie den ehemaligen und aktuellen Bürokollegen Dr.-Ing Christian Rautert, Monika Kipp, Karolin Kamplade und Marie Denstorf. Herrn Alexander Ott danke ich für die teilweise kontroversen Diskussionen, die oft zu guten Denkanstößen und Ergebnissen geführt haben. An Dr.-Ing. Michael Kansteiner richtet sich mein Dank für die Durchsicht des Manuskripts. Für die geleisteten Hilfestellungen bei Versuchen und Vorbereitungen möchte ich mich bei den Technikern des ISF bedanken. Besonderer Dank gilt auch den Projekt- und Abschlussarbeitern Fabian Spaetling, Lorina Schmolke, Steffen Wagner, Jan Peters, Floris Weber sowie Jeremias Knop und Andreas Ratuschny.

Im privaten Bereich möchte ich den Holthäuser Jungs und der Mittwochsrunde danken, die durch die Treffen und Termine immer zu einem Ausgleich zum wissenschaftlichen Arbeiten beigetragen haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mich zu jeder Zeit mit allen Mitteln unterstützt und somit den eingeschlagenen Weg erst ermöglicht hat. Besonderer Dank gilt hierbei meiner Mutter Birgit, die alle Möglichkeiten ausgeschöpft hat, um mich zu unterstützen. Gleichermassen danke ich meiner Frau Theresa für die liebevolle und verständnisvolle Unterstützung während des gesamten Weges sowie meinen beiden Kindern Maja und Ella, die auch nach stressigen Tagen das Lächeln zurückbringen konnten.

Kurzfassung

Die zunehmende Elektrifizierung der Automobile sowie die sinkende Nachfrage nach Fahrzeugen mit Dieselmotoren führen zu einer Steigerung des Kosten- und Fertigungsdrucks in der spanenden Fertigungsbranche. Der Wandel im Automobilsektor sowie der prognostizierte Konjunkturabschwung führen dazu, dass aktuell bestehende Prozesse hinsichtlich der resultierenden Fertigungskosten durch eine gezielte Auswahl verschiedener Verfahren zu optimieren sind. Zur Gewährleistung einer erfolgreichen Umsetzung und Implementierung von Optimierungsmaßnahmen ist es erforderlich, nahezu die gesamte Prozesskette bei der Herstellung von Zerspanungswerkzeugen zu betrachten. Aus diesem Grund erfolgt in der vorliegenden Arbeit die Untersuchung einer Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung am Beispiel von Einlippentiefbohrwerkzeugen unter Berücksichtigung der branchenüblichen Prozesskette. Der Einlippentiefbohrprozess findet in verschiedenen Industriebereichen Anwendung, weshalb die folgenden Untersuchungen auch bei zunehmender Elektrifizierung der Automobilbranche einen Mehrwert für andere Wirtschaftszweige bieten. Da der asymmetrische Werkzeugaufbau spezielle Anforderungen an den Zerspanungsprozess stellt und besondere Kontaktbedingungen bestehen, werden unterschiedliche Maßnahmen zur Optimierung der Prozesskette untersucht.

Zur Erfüllung dieser Zielstellung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine fundierte Untersuchung verschiedener Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Einlippentiefbohrwerkzeugen. Erreicht wird dies durch die Untersuchung einer definierten Beeinflussung der Schneidkantenmikrogestalt durch das etablierte Nassstrahlspanen sowie die Entwicklung eines neuen, in bestehende Herstellungsketten integrierbaren, Schneidkantenpräparationsprozesses. Bedingt durch die Möglichkeit eines neuen Präparationsverfahrens lassen sich bestehende Prozessketten verkürzen und optimieren und gleichzeitig höhere bzw. gleichwertige Fertigungsqualitäten erreichen. Neben der Schneidkantenpräparation erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Werkzeugfunktionsflächen sowie der Werkzeugkontur durch das Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen. Im Fokus dieser Untersuchungen steht sowohl die gezielte Veränderung der erzeugbaren Oberflächentopographie als auch die Beeinflussung der Werkzeugumfangsgestalt und des Stirnübergangs zwischen Stirn- und Umfangsfläche. Aufgrund des Einsatzes von Hartstoffschichten zur Beschichtung von Zerspanungswerkzeugen bei der Stahlbearbeitung sind zusätzliche Untersuchungen hinsichtlich der Schichtvor- und -nachbehandlung durch verschiedene Verfahren erforderlich. Zum Abschluss der Untersuchung der verschiedenen Optimierungsmaßnahmen erfolgt eine Validierung der Weiterentwicklungen durch Einsatzversuche der angepassten Werkzeuge sowie eine Bewertung der durchgeführten Maßnahmen in Bezug auf die Implementierung in bestehende Herstellungsketten sowie die erreichbare Fertigungsqualität und Standzeit. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine Bewertung der optimierten Prozesskette durchgeführt, um eine Einordnung der ergänzenden Maßnahmen und der erreichten Substitutionen zu ermöglichen.

Abstract

The growth in electrification of automobiles as well as the declining demand for vehicles with diesel engines lead to an increase in cost and production pressure in the metal cutting manufacturing industry. This change in the automotive sector as well as the predicted economic downturn lead to the fact that currently existing processes must be optimized with regard to the resulting manufacturing costs. To ensure the successful implementation and execution of optimization measures, it is necessary to consider almost the entire process chain in the manufacture of cutting tools. For this reason, the present thesis investigates the optimization of both topography and circumferential shape using the example of single-lip deep hole drilling tools, considering the usual process chain in the industry. The single-lip deep hole drilling process is used in various industrial sectors, which is why the following investigations offer additional value for other branches of industry, even with the increasing electrification of the automotive industry. Since the asymmetrical tool design places special demands on the cutting process and special contact conditions exist, different measures for optimizing the process chain are investigated.

Within the scope of this work, a well-founded investigation of different optimization measures to fulfill the described requirements for increasing the performance of single-lip deep hole drilling tools is carried out. Regarding to this, the investigation of a defined influence of the cutting edge microstructure by the established wet abrasive jet machining process as well as the development of a new cutting edge preparation process, which can be integrated into existing manufacturing chains, is necessary. Due to the possibility of a new preparation process, existing process chains can be shortened and optimized. At the same time higher manufacturing qualities can be achieved by those optimization methods. Additionally, to the cutting edge preparation, a detailed examination of the tool functional surfaces and the tool contour by polishing with elastically bonded grinding wheels is carried out. The focus of these investigations is the specific modification of the resulting surface topography but also the influence on the circumferential shape and especially on the transition between flank face and circumferential surface. Another aspect which has to be considered, is the usage of hard material coatings for the coating of cutting tools. Therefore, additional investigations of the coating pre- and post-treatment by different processes are necessary to interlink the knowledge of the influences of the developed and investigated process steps. At the end of the investigations of the different optimization measures, a validation of the further developments is accomplished by application tests of the adapted tools. Furthermore, an evaluation of the measures is carried out with regard to the implementation in existing production chains and the achievable production quality and tool life. Based on these findings, an evaluation of the optimized process chain is carried out to enable a classification of the supplementary measures and the achieved substitution.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Stand der Technik	3
2.1.	Prozesskette zur Herstellung von Einlippentiefbohrwerkzeugen.....	3
2.1.1.	Schneidstoff Hartmetall	4
2.1.2.	Werkzeugschleifen	4
2.1.3.	Schneidkantenpräparation.....	5
2.1.4.	Schichtvorbehandlung	6
2.1.5.	Beschichtung	7
2.1.6.	Schichtnachbehandlung	9
2.2.	Charakterisierung präparierter Werkzeuge	9
2.2.1.	Schneidkantengestalt	9
2.2.2.	Beschreibung der Oberflächentopographie an Schneidkanten	10
2.3.	Präparationsverfahren	11
2.3.1.	Strahlspanen	12
2.3.2.	Bürstspanen	14
2.3.3.	Schleppscheifen	14
2.3.5.	Sonstige Verfahren.....	15
2.3.6.	Polierschleifen von VHM-Werkzeugen	16
2.4.	Tiefbohren	16
2.4.1.	Mechanische Werkzeugbelastungen beim Einlippentiefbohren	19
2.4.2.	Spanbildung beim Einlippentiefbohren	20
2.5.	Werkzeugverschleiß	21
2.6.	Einsatzverhalten präparierter Zerspanungswerkzeuge	21
2.6.1.	Einfluss der Führungsleisten auf den Bohrprozess	22
2.6.2.	Verschleiß von Führungsleisten	23
2.6.3.	Variation der Führungsleistengestalt.....	23
2.7.	Bohrungsqualität.....	23
3.	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	25
4.	Experimentelle Randbedingungen	29
4.1.	Versuchsstände zur Präparation und der Einsatzversuche von Einlippentiefbohrwerkzeugen	29
4.1.1.	Gezielte Anpassung der Umfangsgestalt und Oberflächentopographie durch lokales Polierschleifen	29
4.1.2.	Schneidkantenpräparation der untersuchten Einlippenbohrer	31

4.2.	Versuchswerkzeuge sowie Werkzeugbeschichtung	35
4.3.	Versuchsmaschine zur Tiefbohrbearbeitung.....	36
4.4.	Werkstoffe	37
4.5.	Mess- und Analysetechnik	38
4.5.1.	Analyse der erzeugten Topographien der Tiefbohrwerkzeuge und Polierschleifscheiben	38
4.5.2.	Analyse und Auswertung der Schneidkantenmikrogestalt.....	40
4.6.	Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen beim Tiefbohren	41
4.7.	Analyse des Verschleißverhaltens	41
4.8.	Analyse der Bohrungsgüte.....	42
4.9.	Fotografische Analyse der Späne sowie In-situ- Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen der Spanbildung.....	43
5.	Optimierung der Schneidkantenmikrogestalt von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch verschiedene Präparationsverfahren	45
5.1.	Analyse der Schneidkantenpräparation an Einlippentiefbohrwerkzeugen durch das abrasive Nassstrahlspanen	45
5.2.	Entwicklung eines neuartigen Präparationsverfahrens zur Schneidkantenpräparation und Optimierung der Funktionsflächen an Einlippentiefbohrwerkzeugen	51
5.2.1.	Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugschleifen.....	51
5.2.2.	Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugnachsleifen (teilbeschichteter Werkzeuge).....	57
5.3.	Zwischenfazit zur Schneidkantenpräparation an unbeschichteten und teilbeschichteten Einlippentiefbohrern	60
6.	Gezielte Beeinflussung der Werkzeugfunktionsflächentopographie und Umfangsgestalt sowie des Stirnfasenübergangs mit elastischen Schleifscheiben durch lokales Polierschleifen.....	63
6.1.	Versuche an unbeschichteten Einlippentiefbohrwerkzeugen.....	63
6.2.	Beeinflussung der Oberflächentopographie durch abrasives Nassstrahlspanen auf industriellen Anlagen.....	80
7.	Untersuchung der Beeinflussung der Oberflächentopographie durch Werkzeugbeschichtungen sowie Analyse einer Schichtnachbehandlung	85
7.1.	Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben	85
7.2.	Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung.....	93
8.	Einsatzverhalten von schneidkanten- und umfangsgestaltoptimierten Einlippentiefbohrwerkzeugen in verschiedenen Beschichtungszuständen.....	101

8.1.	Beeinflussung der Werkzeugstandzeit und der Bohrungsgüte durch hinsichtlich der Schneidkantenmikrogestalt präparierten Werkzeuge.....	101
8.1.1.	Untersuchung von vollbeschichteten Werkzeugen in verschiedenen Präparationsstufen	101
8.1.2.	Untersuchung von teilbeschichteten/nachgeschliffenen Werkzeuge	108
8.2.	Beeinflussung der erreichbaren Bohrungsgüte und des Führungsleistenverschleißes durch Variation der Umfangstopographie und -kontur sowie des Stirnfasenübergangs	111
8.2.1.	Einsatzverhalten von topographie- und umfangsgestaltoptimierten Einlippentiefbohrwerkzeugen bei der Bearbeitung von Vergütungsstählen	111
8.2.2.	Untersuchungen zum Einfluss einer gezielt veränderten Stirnübergangsgestalt auf das Einsatzverhalten sowie die Bohrungsgüte	115
8.2.3.	Zwischenfazit zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung.....	120
8.3.	Standzeitevaluierung topographie- und umfangsgestaltoptimierten Einlippentiefbohrwerkzeuge bei der Bearbeitung von Vergütungsstählen	120
8.4.	Beurteilung der Spanbildung durch Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen bei unterschiedlichen Präparationszuständen.....	125
8.5.	Fazit der Einsatzversuche der optimierten Tiefbohrwerkzeuge.....	127
9.	Beurteilung der Prozesskettenanpassung zur gezielten Gestalt- und Schneidkantenpräparation von Tiefbohrwerkzeugen	129
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
11.	Literaturverzeichnis	137

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Edelkorund (weiß)
AlCrN	Aluminiumchromnitrid
AlTiN	Aluminiumtitannitrid
AS	Außenschneide
BTA	Boring and Trepannung Association
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
C	Kohlenstoff
Co	Cobalt
Co.	Compagnie
Cr	Chrom
CTS18D	Hartmetallbezeichnung des Herstellers Ceratizit
Cu	Kupfer
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung
D15	Diamantkörner mit Korndurchmesser d _k = 10...15 µm
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
ELB	Einlippentiefbohrwerkzeug
F220	FEPA-Körnung 220
F500	FEPA-Körnung 500
F1200	FEPA-Körnung 1200
Fa.	Firma
Fe	Ferrum (Eisen)
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
FL	Führungsleiste
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HC	Beschichtetes Hartmetall
HRC	Härte nach Rockwell
HSK	Hohlschaftkegel
HV	Härte nach Vickers
HW	Unbeschichtetes Hartmetall
IHVA	In-Situ-Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse
IRHD	International Rubber Hardness Degree
IS	Innenschneide
ISF	Institut für Spanende Fertigung

ISO	International Standardization Organization
IT	ISO-Toleranzklasse
KSS	Kühlschmierstoff
LMI	Messtechnik Hersteller
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
NbC	Niobcarbide
Ni	Nickel
NS	Nebenschneide
O	Sauerstoff
OT	Ölflasche
P	Phosphor
PVD	physikalische Gasphasenabscheidung
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schwefel
Si	Silizium
SiC	Siliziumcarbide
Sn	Zinn
TaC	Tantalcarbide
Ti	Titan
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiC	Titancarbid
TiCN	Titancarbonitrid
TiN	Titannitrid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHM	Vollhartmetall
WC	Wolframcarbide
WZ	Werkzeug
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
42CrMo4	Vergütungsstahl
50CrMo4	Vergütungsstahl
+QT	Vergütet (quenched and tempered)

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
a_d	Einzelzustellung beim Abrichten	μm
a_e	Arbeitseingriff	μm
$a_{e,nom}$	nomineller Arbeitseingriff	μm
b	Bildwiederholrate	fps
d	Durchmesser	mm
d_{Abr}	Durchmesser des Abrasivkörpers	mm
d_d	Düsendurchmesser	mm
d_c	Schichtdicke	μm
d_{ELB}	Werkzeugdurchmesser	mm
d_k	Korngröße	μm
d_m	mittlere Korngröße	μm
d_{rund}	Durchmesser der Rundproben	mm
d_s	Schleifscheibendurchmesser	mm
f	Vorschub	μm
f_z	Zahnvorschub	μm
f_{Ab}	Abtastfrequenz	Hz
h	Eindringtiefe	μm
h_{cu}	Einzelkornspanungsdicke	μm
h_d	Düsenabstand	mm
h_{Sp}	Abstand zwischen Werkzeugspitze und dem Bohrerzentrum	
l	Länge	mm
l_{abt}	Länge des Beschichtungsabtrages	μm
l_b	Bearbeitungslänge	mm
l_b	Kantenlänge	mm
l_m	Länge der Messstrecke	mm
l_t	Präparationstiefe	mm
m_{Bainit}	Massenanteil von bainitischem Gefüge	%
n	Drehzahl	min^{-1}
$n_{Aufnahme}$	Drehzahl der Werkzeugaufnahme	min^{-1}
n_d	Anzahl von Strahldüsen	
n_{ELB}	Drehzahl des Einlippentiefbohrwerkzeuges	min^{-1}
n_{PS}	Drehzahl der Polierschleifscheibe	min^{-1}
n_{Pu}	Pumpendrehzahl	min^{-1}
O_{st}	Anzahl der Überläufe	-
p_{KSS}	Kühlmitteldruck	bar

p_{st}	Strahldruck	bar
$p_{st,max}$	maximaler Strahldruck	bar
q_d	Geschwindigkeitsverhältnis	-
r_K	Krümmungsradius	mm
r_x	Radiale Abweichung in x-Richtung	μm
r_y	Radiale Abweichung in y-Richtung	μm
s_{AS}	zurückgelegter Weg je Umdrehung der Außenschneide	mm
$s_{Fü}$	Führungsspiel bei einer Bohrbuchse	μm
s_{IS}	zurückgelegter Weg je Umdrehung der Innenschneide	mm
s_{Punkt}	Punkt Abstand bei Messtechnik	μm
t	Standzeit	min
t_{Ab}	Abstand zur Abstützung	mm
t_{BRZ}	Tiefe der Beeinflussung der Bohrungsrandzone	μm
$t_{Präp}$	Präparierter Bereich am Werkzeug	mm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min bzw m/s
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
$v_{f,St}$	Strahlvorschubgeschwindigkeit	mm/s
$v_{r,wp}$	Drehgeschwindigkeit des Werkstücks	min^{-1}
v_{osz}	Oszillationsgeschwindigkeit	mm/min
\bar{x}	Mittelwert	μm
α_a	Eintrittswinkel	°
Δd	Durchmesserabweichung der Bohrung	mm
Δd_{Auf}	Aufmaß des Abrasivkörpers	mm
Δp	maximale Abnahme der Profilhöhe	μm
Δr	Profilabflachung	μm
ϕ	Symmetriewinkel	°
ϕ_r	Rotationsrichtung	-
ϕ_A	Anstellwinkel	°
γ_d	Strahlwinkel	°
γ_{eff}	Effektiver Spanwinkel	°
γ_{St}	Strahlmittelkonzentration	°
μ	Reibbeiwert	-
σ	Standardabweichung	
ψ	Öffnungswinkel der Sicke	°
A	Bruchdehnung	%
A_{AS}	Zerspante Fläche je Umdrehung der Außenschneide	mm^2

A_{Def}	Durschnittliche Fläche der Schichtdefekte	μm^2
A_{IS}	Zerspante Fläche je Umdrehung der Innenschneide	mm^2
A_M	Einzelmessfeldgröße	mm^2
$A_{M,ges}$	Gesamtmessfeldgröße	mm^2
DAR	Defekt-Flächen-Quotient	%
DR	Fehlerquote	mm^{-2}
$F_{FL,BTA}$	Wirkende Kraft an den Führungsleisten von BTA-Werkzeugen	N
$F_{FL,ELB}$	Wirkende Kraft an den Führungsleisten von Einlippenbohrern	N
F_N	Normalkraft	N
F_R	Radialkraft	N
F_r	Reibkraft	
F_z	Vorschubkraft in z-Richtung	
L_{C1}	Kritische Last bei der erste Rissinitiierungen auftreten	N
L_{C2}	Kritische Last bei der erste Schichtdelaminationen auftreten	N
M_B	Bohrmoment	Nm
$Mr1$	Kleinster Materialtraganteil	%
$Mr2$	Größter Materialtraganteil	%
M_z	Drehmoment	Nm
P_L	Antriebsleistung	kW
R_a	arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_k	Kernrautiefe	μm
R_{max}	Maximale Höhe des Rauheitsprofils	μm
R_{mr}	Relatives Materialverhältnis	%
R_{pk}	Reduzierte Spitzenhöhe	μm
R_{vk}	Reduzierte Muldentiefe	μm
R_z	gemittelte Rautiefe	μm
R_m	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p0,2}$	Dehngrenze	MPa
R_s	Schartigkeit	μm
$R_{s,max}$	maximale Schneidkantenschartigkeit	μm
\bar{S}	mittlere Schneidkantenverrundung	μm
S_a	mittlere arithmetische Durchschnittshöhe der Oberfläche	μm
S_{dv}	Durchschnittliches Muldenvolumen der Oberfläche	μm^3
S_z	maximale Höhe der Oberfläche	μm
S_{10z}	Zehn-Punkt-Höhe der Oberfläche	μm

S_{FL}	Tangentenabschnitt an der Führungsleiste	μm
S_{St}	Tangentenabschnitt an der Stirnfläche	μm
\bar{S}_{FL}	mittlere Verrundung des Stirnübergangs	μm
S_{α}	Schneidenabschnitt an der Freifläche	μm
S_{γ}	Schneidenabschnitt an der Spanfläche	μm
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{präp}}$	Dauer der Präparation	
T_k	Bohrungsrundheit	μm
U_d	Überdeckungsgrad	-
V	Volumenstrom	l/min
VB	Verschleißmarkenbreite	μm
VB_{max}	maximale Verschleißmarkenbreite	μm
V_{vv}	Mulden-Luftvolumen bzw. Dale-Void-Volumen	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$
K	Formfaktor	-
K_{Stirn}	Formfaktor der Stirnverrundung	-
K_1	Einstellwinkel der Außenschneide	$^{\circ}$
K_2	Einstellwinkel der Innenschneide	$^{\circ}$

1. Einleitung

Die zunehmende Elektrifizierung der Automobile sowie die sinkende Nachfrage nach Fahrzeugen mit Dieselmotoren führen zu einer Steigerung des Kosten- und Fertigungsdrucks in der spanenden Fertigungsbranche [101]. Zeichneten sich innerhalb der vergangenen Dekade von 2010-2019 nahezu durchgehende Steigerungen der Auftrags- und Produktionslage ab, so zeigen aktuelle Prognosen, dass es in den kommenden Jahren zu einer sinkenden Nachfrage kommen kann [195]. Der Wandel im Automobilsektor sowie der prognostizierte Konjunkturabschwung führen dazu, dass aktuell bestehende Prozesse hinsichtlich der resultierenden Fertigungskosten durch eine gezielte Auswahl verschiedener Verfahren zu optimieren sind. Diese Maßnahmen sind erforderlich, da insbesondere das Hochlohnland Deutschland aufgrund der engen Verknüpfung zwischen dem Maschinenbau und der Automobilindustrie ansonsten Gefahr laufen würde, dass die wirtschaftliche Stellung geschwächt und der Produktionsstandort Deutschland unwirtschaftlich wird.

Insbesondere die Herstellung von Zerspanungswerkzeugen hatte innerhalb der vergangenen Dekade einen bedeutenden Anteil an dem Gesamtvolumen der hergestellten Präzisionswerkzeuge. Statistiken aus dem Jahr 2018 zeigen, dass der Gesamtanteil bei ca. 34 % lag, was einem Produktionswert von 3,5 Milliarden Euro entspricht [195]. Dieser Anteil weist den besonderen Stellenwert der Herstellung von Zerspanungswerkzeugen auf.

Die zumeist aus Vollhartmetall bestehenden Zerspanungswerkzeuge waren bereits innerhalb der vergangenen Jahrzehnte im Fokus stetiger Weiterentwicklungen. Die daraus resultierende Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Qualität erfolgte in den Bereichen der Schneidstoffe, der Herstellungs- und Beschichtungsverfahren sowie der Schichtvor- und -nachbehandlung. Nach *Byrne* entfallen zwischen 16...24 % der Herstellungskosten auf die Schneidkantenpräparation sowie eine Schichtvorbehandlung [6, 60]. Eine Verbesserung und Optimierung von Prozessketten bietet somit weiterhin Potential, um die Herstellungskosten der Zerspanungswerkzeuge zu reduzieren und die Leistungsfähigkeit zu steigern. Somit wird eine Möglichkeit geboten, um die bevorstehenden Herausforderungen zu meistern.

Zur Gewährleistung einer erfolgreichen Umsetzung und Implementierung von Optimierungsmaßnahmen ist es erforderlich, nahezu die gesamte Prozesskette bei der Herstellung von Zerspanungswerkzeugen zu betrachten. Aus diesem Grund erfolgt in der vorliegenden Arbeit die Untersuchung einer Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung am Beispiel von Einlippentiefbohrwerkzeugen unter Berücksichtigung der branchenüblichen Prozesskette. Der Einlippentiefbohrprozess findet in verschiedenen Industriebereichen Anwendung, weshalb die folgenden Untersuchungen auch bei zunehmender Elektrifizierung der Automobilbranche einen Mehrwert für andere Wirtschaftszweige bietet. Da der asymmetrische Werkzeugaufbau spezielle Anforderungen an den Zerspanungsprozess stellt und besondere Kontaktbedingungen bestehen, werden unterschiedliche Maßnahmen zur Optimierung der Prozesskette untersucht.

Zu Beginn erfolgt eine fundierte Untersuchung der gezielten Beeinflussung der Schneidkantenmikrogestalt durch das etablierte Nassstrahlspanen sowie die Entwicklung eines neuen, in bestehende Herstellungsketten integrierbaren, Schneidkantenpräparationsprozess. Im Anschluss findet eine detaillierte Betrachtung der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Werkzeugfunktionsflächen sowie der Werkzeugkontur durch das Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen statt. Aufgrund der erforderlichen Beschichtung von Zerspanungswerkzeugen zur Stahlbearbeitung finden zusätzliche Untersuchungen zur Schichtvor- und -nachbehandlung durch verschiedene Verfahren statt. Zuletzt wird eine Validierung der untersuchten Weiterentwicklungen durch Einsatzversuche der optimierten Werkzeuge sowie eine Bewertung der Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf die Implementierung in bestehende Herstellungsketten durchgeführt.

2. Stand der Technik

Im Vordergrund der Optimierungsmaßnahmen bei Zerspanungswerkzeugen steht die Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit. Dies lässt sich durch unterschiedliche Maßnahmen erreichen. Zu nennen sind hierbei zum einen die Wahl des Schneidstoffs und zum anderen die Verwendung einer verschleißhemmenden Hartstoffbeschichtung. Neben den bereits seit geraumer Zeit bekannten Faktoren, zeigen insbesondere aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen, dass vor allem durch die makro- und die mikroskopische Werkzeuggestalt sowie die Oberflächentopographie der Funktionsflächen Optimierungsmaßnahmen bestehen, die bisher noch nicht vollumfänglich untersucht wurden. So besteht durch Weiterentwicklungen von Präparationsverfahren die Möglichkeit, die mikroskopische Werkzeuggestalt und die Oberflächentopographie zu verändern und durch, dem Schleif- oder Beschichtungsprozess nachgelagerte, Präparationsverfahren positive Effekte auf das Einsatzverhalten zu ermöglichen. Im folgenden Kapitel dient eine Darstellung des aktuellen Erkenntnisstandes zur Herstellung und Präparation durch etablierte Schichtvor- und -nachbehandlungsverfahren sowie zum Einsatzverhalten von Zerspanungswerkzeugen dem besseren Verständnis. Um eine detaillierte Beurteilung der im Rahmen dieser Arbeit im Fokus stehenden Einlippentiefbohrwerkzeuge zu ermöglichen, erfolgt eine Übertragung der Erkenntnisse aus Bereichen der Wendelbohrwerkzeuge. Zur Gewährleistung eines umfassenden Überblicks dient eine grundlegende Betrachtung der Herstellungskette von Einlippentiefbohrwerkzeugen sowie der relevanten Präparationsverfahren. Darüber hinaus findet eine Einordnung des spezifischen Einflusses der Werkzeugpräparation auf das Einsatzverhalten im Bohrprozess statt. Basierend auf dieser Zusammenfassung des Stands der Technik wird der für diese Arbeit relevanten Forschungsbedarf abgeleitet.

2.1. Prozesskette zur Herstellung von Einlippentiefbohrwerkzeugen

Nach aktuellem Stand der Technik kommen bei der spanenden Fertigung hauptsächlich Zerspanungswerkzeuge aus Vollhartmetall (VHM) zum Einsatz, da sich diese durch eine hohe Variantenvielfalt und ein breites Einsatzspektrum auszeichnen [39, 128]. Im Ausgangszustand liegen gesinterte Rohlinge vor. Bei konventionellen Schaftwerkzeugen ist der Rohling in der Regel ein Rundstab. Die Werkzeugrohlinge durchlaufen nach dem Sintern eine komplexe Herstellungskette, die aus unterschiedlichen Einzelprozessen besteht, welche in Abbildung 2.1.1 dargestellt sind.



Abbildung 2.1.1. Prozessabfolgen in der Prozesskette von VHM-Werkzeugen (eigene Darstellung nach [60])

In den meisten Fällen ist es nicht erforderlich alle Prozessschritte durchzuführen [95]. Die Auswahl der jeweiligen Prozesse erfolgt zumeist je nach Werkzeugtyp und dem späteren Einsatz. So ist es beispielsweise bei Einlippentiefbohrwerkzeugen so, dass die Werkzeuge auch in unterschiedlichen Varianten, als VHM-Ausführung, VHM-Schaftwerkzeug mit zylindrischer Stahlspannhülse oder aber als gelöteter Bohrkopf auf einem Stahlschaft vorliegen. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Anforderungen und Möglichkeiten bspw. bei der Schneidkantenpräparation dieser Werkzeuge. Ein weiteres Beispiel stellen einfach gestaltete Wendeschneidplatten dar, da es bei diesen Werkzeugen bereits durch den Sinterprozess zu einer Endkonturnahen Herstellung kommt [103]. Hierdurch ist es möglich auf das Werkzeugschleifen zu verzichten und direkt mit der Vorbehandlung oder Schneidkantenpräparation zu starten. Je nachdem, ob oder welche Beschichtung appliziert wird, werden andere Prozesse innerhalb

der dargestellten Kette erforderlich oder können unberücksichtigt bleiben. In den folgenden Kapiteln werden daher die Prozesse der dargestellten Prozesskette betrachtet und die spezifischen Eigenschaften sowie die Anforderungen der jeweiligen Schritte erläutert. Zusätzlich erfolgt ein Bezug der teilweise allgemeinen Anwendung für Zerspanungswerkzeuge auf den für diese Arbeit relevanten Teil der Einlippentiefbohrwerkzeuge.

2.1.1. Schneidstoff Hartmetall

Hartmetalle zählen zu den Verbundwerkstoffen und setzen sich aus Hartstoffpartikeln und einer duktilen Bindephase zusammen. Als Hartstoffe kommen verschiedene Carbide, Nitride, Boride und Silizide zum Einsatz [13, 162]. Aufbauend auf der DIN ISO 513 sind nach heutigem Stand lediglich die im industriellen Einsatz vorwiegend verwendeten Schneidstoffe mit dem Hauptbestandteil Wolframcarbide (WC) als Hartmetall zu bezeichnen [75]. Bedingt durch Verunreinigungen kann es jedoch auch zu geringfügigen Bestandteilen von Titan- (TiC), Tantal- (TaC) und Niobcarbiden (NbC) kommen [13, 129]. Mit Hartstoffpartikeln versetzte Verbundwerkstoffe mit den Hauptbestandteilen Titancarbid (TiC) oder -nitrid (TiN) werden als sogenannte Cermets bezeichnet. Als Bindemittel findet üblicherweise Cobalt Anwendung, wobei jedoch auch Nickel (Ni) und zum Teil Eisen (Fe) in speziellen Fällen eingesetzt wird [122, 127, 162]. WC-Co-Hartmetalle erreichen mengenmäßig den größten globalen Marktanteil. Dies lässt sich auch durch die hohe Bandbreite des Einsatzbereiches begründen. Hauptsächliche Variationsmöglichkeiten bestehen durch die jeweilige Bindephase oder die mittlere WC-Korngröße. Diese Varianten führen zu unterschiedlichen Eigenschaften. Die Härte und Verschleißbeständigkeit wird hierbei durch die prozentuale Zusammensetzung der Bestandteile bestimmt und resultiert bei höherem Karbidanteil in höheren Härten bei geringeren Zähigkeiten und Biegefestigkeiten [129]. Weitere Beeinflussung dieser Eigenschaften ergeben sich durch die Auswahl der Korngröße und des Bindephasenanteils. Bei hauptsächlich in der Zerspannung verwendeten WC-Co-Hartmetallen liegt der Binderanteil im Bereich von 6 ... 13,5 % [127]. Hinsichtlich der Korngröße d_K kommen im Bereich der Zerspannung üblicherweise die Klassen Feinkorn mit $d_K = 0,8 \dots 1,3 \mu\text{m}$, Feinstkorn mit $d_K = 0,5 \dots 0,8 \mu\text{m}$ und Ultrafeinkorn mit $d_K = 0,2 \dots 0,5 \mu\text{m}$ zum Einsatz [122, 174]. Die bereits beschriebene Beeinflussung der Zähigkeit und Biegefestigkeit ist jedoch nicht allgemeingültig. So ergibt sich bei Hartmetallen mit einer durchschnittlichen Korngröße von $d_K < 1 \mu\text{m}$ mit Verringerung der Korngröße neben der Härtezunahme gleichzeitig eine Erhöhung der Biegefestigkeit [122, 127]. Dieser Zusammenhang ist die Hauptursache dafür, dass bei Zerspanungswerkzeugen in den meisten Fällen diese Korngrößen $d_K < 1 \mu\text{m}$ Verwendung finden, da in diesen Fällen neben einer hohen Härte im Bereich der Schneidkante auch eine ausreichende Zähigkeit im Schaftbereich erforderlich ist [181].

2.1.2. Werkzeugschleifen

Im Gegensatz zur Herstellung von Wendeschneidplatten ist es bei Schaftwerkzeugen aufgrund der hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Oberflächengüte nicht möglich, dass nach dem Sintern eine Einsatzbereitschaft solcher Werkzeuge vorhanden ist. Insbesondere die Schwindung und die daraus resultierende Formabweichungen sowie die schlechte Oberflächengüte der Werkzeuge sind hierbei als Ursachen zu nennen [162]. Daher erfolgt nach dem Sintern der Rohlinge ein Schleifprozess, um das Werkzeug in der endgültigen Form und Gestalt herzustellen [127, 162]. Für die Schleifbearbeitung der VHM-Rohlinge kommen hauptsächlich Diamantschleifscheiben mit Bindungen aus Kunstharz, aber auch metallische, keramische und hybride Bindungssysteme zum Einsatz [95, 114, 118]. Die genaue Auswahl der beschriebenen Kombinationen hinsichtlich der Diamantkorngröße und des Bindungssystems haben einen signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis und somit die Qualität des erzeugten Werkzeuges. Insbesondere wird das spätere Einsatzverhalten dieser Werkzeuge durch

die erzeugte Oberflächentopographie, die Werkstoffrandzone, aber auch die Gestalt der Schneidkante festgelegt [140, 182, 198, 199]. Neben den beschriebenen Aspekten haben auch die Prozesseinstellgrößen, wie die Zustellung a_e , die Schnitt- v_c und die Vorschubgeschwindigkeit v_f , die Schleifstrategie, das Kühlschmierstoffkonzept sowie die dadurch resultierenden thermomechanischen Werkstückbelastung einen Einfluss auf das Prozessergebnis. Die Vielzahl an Einflussgrößen verdeutlicht die Komplexität des Prozesses, welcher Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten ist [95, 114, 118, 140, 182, 198, 199].

Die thermomechanischen Belastungen beeinflussen in besonderem Maße die Ausbildung der Schneidkante. Ursächlich hierfür sind zum einen der sich aufbauende Wärmestau und die mechanischen Belastungen, die aufgrund des sprödharten Bruchverhaltens und der fehlenden Stützwirkung an den Schneidkanten zu Mikrodefekten in Form von kleinen Ausbrüchen und Abplatzungen führen [113, 130, 152]. Diese so erstellten Schneidkanten, insbesondere die resultierenden Mikrodefekte, lassen sich über die Schartigkeit quantifizieren, welche ein Maß für die Rauheit entlang der Schneide und damit für die Güte der Schneidkante ist [113]. Bei einer hohen Schartigkeit lassen sich negative Einflüsse auf die Kantenstabilität und damit auch die Verschleißbeständigkeit des Werkzeugs feststellen [113, 198, 199]. Bedingt durch die verbesserte Stützwirkung resultiert insbesondere bei vergrößerten Keilwinkeln eine geringe Schartigkeit [113, 130]. Des Weiteren haben eine geringe Karbidkorngröße des Hartmetalls [96], die Zusammensetzung der Schleifscheiben in Form von geringen Diamantkorngrößen d_k und geringe Einzelkornspannungsdicken h_{cu} [95, 130, 140] sowie eine angepasste Prozessführung zur Vermeidung eines Wärmestaus an der Schneidkante [130] positive Effekte auf die Ausbildung einer geringen Schartigkeit.

2.1.3. Schneidkantenpräparation

Seit geraumer Zeit hat sich gezeigt, dass eine gezielte Präparation der Schneidkanten zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit führt. Die Schneidkantenpräparation ist demnach ein Prozessschritt in der Produktionskette, mit dem die Gestalt der Schneidkante eingestellt wird [95, 155, 178]. Die Materialabtragsmechanismen können hierbei von unterschiedlicher Natur sein. So bestehen neben den oft eingesetzten mechanischen Verfahren auch Prozesse, die chemische oder thermische Verfahren verwenden [63]. Vorzugsweise werden zur Schneidkantenpräparation die mechanischen Verfahren Strahlspanen, Schleppscheifen und Bürsten im industriellen Umfeld eingesetzt. Eine detaillierte Vorstellung der relevanten Verfahren erfolgt in einem späteren Kapitel. Wie bereits in Abbildung 2.1.1 dargestellt, geschieht die Schneidkantenpräparation normalerweise zwischen dem Werkzeugschleifen und der Beschichtung [95, 155, 178]. Die Schneidkantenpräparation verfolgt das Ziel, die aus dem Werkzeugschleifprozess resultierenden Schartigkeiten an der Schneidkante zu verringern [130] und gleichzeitig eine definierte Schneidengestalt und Verrundung einzustellen [70, 130]. Die jeweilige Ausführungsform der Schneidkantenpräparation kann als gefaste oder verrundete Schneidkante Anwendung finden, wobei auch Kombinationen oder mehrere Fasen möglich sind [63, 68, 205]. Die so eingestellte und definierte Schneidkantengestalt verfolgt das Ziel einer Verbesserung des Einsatzverhalten sowie der Leistungsfähigkeit gegenüber unpräparierten Werkzeugen. Meist steht die Zielstellung einer Erhöhung der Verschleißbeständigkeit [22, 156, 178], der erreichbaren Bearbeitungsgüte und der gezielten Randzonenbeeinflussung des Werkstücks [139, 206] im Vordergrund. Durch eine an den Anwendungsfall angepasste Schneidkantenverrundung oder -gestaltung lassen sich die Werkzeuge an die jeweiligen Einsatzbedingungen anpassen, um somit speziellen Belastungen entgegen zu treten [15, 20, 68, 73, 188]. Die Charakteristika, die sich zur Beschreibung der präparierten Schneidkanten etabliert haben, werden in Kapitel 2.5 näher erläutert. Eine Schneidkantenpräparation wirkt sich neben der Beeinflussung der Leistungsfähigkeit des Werkzeuges ebenfalls auf eine Verbesserung der Schichthaf-

tung im Schneidkantenbereich aus. So ergeben sich insbesondere an unpräparierten Schneidkanten Schichtagglomerate. Das auch als Antenneneffekt beschriebene Phänomen kann jedoch auch an scharfkantigen Übergängen auf Oberflächen mit einer geringen Isotropie entstehen, da es dort bei einem hohen Ionisierungsgrad zu einem Mikroantenneneffekt kommt. Hierdurch ergeben sich hohe Zugeigenspannungen in der Hartstoffschicht [151], die sich in Form von Abplatzungen direkt nach dem Beschichten oder aber beim Einwirken von geringen mechanischen Belastungen darstellen. Aufgrund des abgeplatzten Beschichtungsmaterials an den Schneidkanten, welche zumeist bis zum beschichteten Grundsubstrat reichen, wird die Verschleißbeständigkeit der Schneide nachweislich reduziert und das Werkzeug erreicht nicht die gewünschten Standwege [41, 151].

Zum aktuellen Zeitpunkt bestehen zu dieser Thematik nur wenige Untersuchungen, welchen genauen Einfluss eine Schneidkantenpräparation hat. So lassen sich Untersuchungen finden, die eine Beeinflussung der Schichthaftung durch die größere Verrundung der Schneidkante beschreiben [49]. Zu den Eigenschaften der Beschichtung bei gradierten und asymmetrischen Schneidkantengestalten sind jedoch kaum Ergebnisse bekannt. Lediglich *Wolf* konnte anhand seiner Untersuchungen zeigen, in welcher Form sich die Beschichtung bei gradierten oder asymmetrisch verrundeten Schneidkanten ausbilden und welche Beeinflussungen resultieren [203].

2.1.4. Schichtvorbehandlung

Die gezielte Schneidkantenauslegung durch verschiedene Verfahren ist bereits in einem breiten Umfeld der Herstellung von Zerspanungswerkzeuge aus Hartmetall etabliert. Dies wurde unter anderem durch die Arbeit von *Aßmuth* gezeigt [6]. Neben der Schneidkante hat sich der Fokus bei der Werkzeugherstellung vor dem Beschichten auch auf die peripheren Oberflächen eines Bohrwerkzeuges erweitert. Hintergrund dieser Fokuserweiterung sind die gewonnenen Erkenntnisse darüber, dass auch die peripheren Oberflächen eine Beeinflussung des Einsatzverhaltens bewirken. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass es durch eine gezielte Präparation der Werkzeugfunktionsflächen zu einer Beeinflussung der Werkzeugrandzone kommt, die sich günstig auf das Einsatzverhalten auswirken kann. Aufgrund der Bearbeitung der Funktionsflächen vor dem Beschichten werden diese vorgeschalteten Prozesse als Schichtvorbehandlung bezeichnet [52, 95, 190]. Hierbei sollen verschiedene Effekte erreicht werden. So handelt es sich um eine Oberflächenpräparation, die eine erhöhte Schichthaftung als auch eine Reinigung des zu beschichtenden Werkzeuges verfolgt. Meist finden die gleichen Verfahren Anwendung, die auch bei der Schneidkantenpräparation eingesetzt werden, wodurch sich die Möglichkeit zur Kombination von Schneidkantenpräparations- und Schichtvorbehandlungsprozessen ergibt [37, 138, 190]. Im Allgemeinen soll durch die Schichtvorbehandlung eine Reduzierung der Kobaltbindephase in der Randzone erreicht werden [43, 138, 143], da sich diese positiv auf die mechanische Verankerung der nachfolgend zu applizierenden Hartstoffschicht auswirkt [42, 43, 46, 184]. Je nach Wahl des Verfahrens, insbesondere bei Strahlprozessen, besteht die Möglichkeit, dass Druckeigenspannungen in die Werkzeugrandzone induziert werden und sich so die Verschleißbeständigkeit des Grundsubstrats erhöht [42, 43, 45, 143]. Beim Einsatz solcher Verfahren ist jedoch meist eine zusätzliche, intensive Reinigung unmittelbar vor dem Beschichtungsprozess erforderlich [190], der inner- oder außerhalb der Beschichtungskammer möglich ist [19, 37]. Im letzten, unmittelbar vor der Einschleusung erfolgenden, Reinigungsschritt der Werkzeuge handelt es sich jedoch nur um einen sehr geringen Abtrag der Oberfläche, welcher auf einige Nanometer begrenzt ist [19].

2.1.5. Beschichtung

Bereits seit einigen Jahrzehnten werden Zerspanungswerkzeuge zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit gegenüber thermomechanischen und abrasiv wirkenden Belastungen mit einer Verschleißschicht versehen [38, 52, 122]. Somit kann in den meisten Fällen die Verschleißbeständigkeit durch die hohe Härte und die thermische Barrierewirkung der Beschichtung gesteigert werden. Die thermische Barriere bietet die Möglichkeit einer erhöhten Temperaturbeständigkeit, wodurch aufgrund der höheren Temperaturen während des Zerspanungsprozesses die Reibungseigenschaften sowie die Vermeidung von adhäsiven Materialablagerungen verbessert werden können. Typischerweise sind diese Effekte bereits durch die Applikation einer wenige Mikrometer dicken Hartstoffschicht möglich. In der Regel erfolgen die Beschichtungen durch zwei zu unterscheidende Verfahren. Diese werden als chemische Gasphasenabscheidung (CVD) bzw. physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) bezeichnet [41, 67, 122].

Beim CVD-Verfahren wird das Beschichtungssubstrat durch hohe Temperaturen in die Gasphase gebracht und kondensiert durch verschiedene chemische Prozesse auf dem zu beschichtenden Substrat, wodurch eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Werkzeug und Hartstoffschicht entsteht. Die Reaktion wird hierbei durch reaktive Gase erreicht. Aufgrund der für die chemischen Vorgänge erforderlichen hohen Temperaturen, die üblicherweise $T = 700 \dots 1100 \text{ °C}$ betragen [37, 122], sind durch dieses Verfahren ausgezeichnete Schichthaftungen möglich. Allerdings bestehen aufgrund der hohen Temperaturen Restriktionen in Bezug auf die beschichtbaren Werkstoffe. Außerdem besteht die Gefahr der Versprödung oder des Einbringens von thermischen Schädigungen in das Grundsubstrat [122]. Jedoch ist durch das CVD-Verfahren die Abscheidung von relativ großen Schichtdicken, $d_c = 5 \dots 20 \text{ }\mu\text{m}$, möglich.

Im Gegensatz zur CVD-Beschichtung erfolgt die PVD-Beschichtung durch rein physikalische Vorgänge. Bei diesem Prozess wird das für die Beschichtung relevante Ausgangsmaterial durch einen physikalischen Vorgang in die Gasphase gebracht. Das meist als Feststoff vorliegende Targetmaterial kann sowohl in Reinform als auch als fertige Schichtkomposition vorliegen. Durch die Anordnung von verschiedenen Targets in einer Beschichtungskammer besteht auch die Möglichkeit, dass unterschiedliche Materialien miteinander eine Phasenverbindung eingehen und somit als keramikähnliche Beschichtungen auf der Substratoberfläche abgeschieden werden. Insbesondere bei metallischen Targetmaterialien sind auch bei diesem Prozess reaktive Gase notwendig, um eine Schichtausbildung zu ermöglichen. Gegenüber dem CVD-Verfahren erfolgen jedoch keinerlei chemische Interaktionen zwischen Substrat und Beschichtungswerkstoff. Das PVD-Verfahren wird als gerichteter Prozess bezeichnet, da das Targetmaterial durch das Verdampfen beschleunigt und durch das Anlegen einer Kathoden- und Anodenspannung auf das Werkzeug gerichtet wird. Die Abscheidung geschieht im Anschluss durch Kondensation auf der Oberfläche [37, 52]. Aufgrund der fehlenden Notwendigkeit einer thermisch bedingten chemischen Reaktion, verlaufen Prozesse beim PVD-Verfahren bei deutlich geringeren Beschichtungstemperaturen, $T = 160 \dots 600 \text{ °C}$, wodurch thermisch bedingte Beeinflussungen des Werkzeugsubstrates nahezu ausgeschlossen werden können [122]. Das PVD-Verfahren lässt sich aufgrund der physikalisch ablaufenden Prozesse in verschiedene Prozessvarianten unterteilen, wobei diese durch die jeweilige Überführung des Targetmaterials in die Gasphase unterschieden werden. Prinzipiell ist hierbei das Zerstäuben (Sputtern) und das Verdampfen, welches in der Regel unter Einsatz eines Lichtbogens erfolgt (Arc-Verdampfen), zu unterscheiden [52, 154].

Bedingt durch die Unterteilung nach den physikalischen Abläufen ergeben sich in Bezug auf die erreichbaren Eigenschaften der Beschichtungen spezifische Einflüsse, die sich auf das Einsatzverhalten des Werkzeugs auswirken. So erfolgt das Sputtern durch den Beschuss des

Targetmaterials mit hochenergetischen Ionen. Die Ionen führen beim Auftreffen auf das Target (Kathode) zum Herausschlagen des Beschichtungsmaterials, die sich in atomarer Form in der Beschichtungskammer bewegen und auf dem zu beschichtenden Substrat (Anode) kondensieren. Da dies zu relativ geringen Abscheideraten führt, kommen in der Regel Permanentmagnete hinter dem Target zum Einsatz. Das somit als DC-Magnetronspütern zu bezeichnende Verfahren führt zu bogenförmigen Magnetfeldlinien, wodurch die Elektronen der Anode in eine zyklodische Bahn abgelenkt werden und aufgrund des dadurch verlängerten Weges zur Anode eine verstärkte Ionisierung der Inertgas-Atome erfolgt [142]. Dies ist gewünscht und meist sogar essentiell, da der hauptsächliche Nachteil des Spüterns im geringen Ionisationsgrad, $< 5\%$, der herausgeschlagenen Metallatome liegt. Der niedrige Ionisationsgrad wirkt sich negativ auf die Härte, die Dichte und die Haftfestigkeit der Beschichtung aus [90, 102]. Stetige Weiterentwicklungen der Beschichtungstechnologie haben es möglich gemacht, dass mittlerweile erhöhte Ionisierungsgrade erreichbar sind. Diese Technologien werden dementsprechend als High Ionization Sputtering (HIS) und High Ionization Pulsing (HIP) bezeichnet und weisen Ionisierungsgrade von ca. 50% auf [87, 135]. Insbesondere aktuellste Verfahrensentwicklungen, High Power Pulsed Magnetron Sputtering (HPPMS) oder auch High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS), haben dazu geführt, dass sogar Ionisierungsgrade bis zu 90% möglich sind. Dadurch lassen sich auch durch das früher noch als nachteilig zu bezeichnende Spüternverfahren sehr gute Schichteigenschaften erzeugen [52, 87, 189].

Im Gegensatz zur Zerstäubung erfolgt beim Verdampfen die Überführung des Targets in die Gasphase mittels thermischer Energie. Im Falle des Arc-Verfahrens geschieht dies über einen Lichtbogen. Dieser Prozess zeichnet sich aufgrund der sehr kurzen Bogenentladung durch einen hohen Ionisierungsgrad, $> 90\%$, aus. Die hohe Ionisierung führt zu günstigen Schichteigenschaften, wie einer erhöhten Härte, Dichte und Haftfestigkeit [5, 37, 142]. Als nachteilig lässt sich bei diesem Prozess jedoch der Umstand nennen, dass es beim Arc-Verfahren zu keiner vollständigen Phasenumwandlung kommt und ein gewisser Anteil als flüssige Tropfen auf dem Substrat abgeschieden werden. Diese Schichtinhomogenitäten werden auch als Droplets bezeichnet und setzen sich zu verschiedenen Zeitpunkten des Beschichtungsvorgangs auf der Oberfläche ab [37, 65, 142]. Bedingt durch die hohe Varianz der Ausprägung dieser Droplets, welche in einer Größe von $l_d = 0,1 \dots 10 \mu\text{m}$ [161], aber auch teilweise bis zu $l_d = 100 \mu\text{m}$ [59] vorliegen, werden die Werkzeugfunktionsflächen unterschiedlich stark beeinflusst. Alle Bestrebungen die der Reduzierung von Droplets dienen, führen zu einer deutlichen Verringerung der Abscheiderate [89, 161, 170, 209], sodass eine vollständige Vermeidung von Droplets in industriellen Beschichtungsprozessen meist nicht möglich ist [59, 131]. Die beschriebenen Schichtinhomogenitäten können jedoch auch durch andere Effekte entstehen. Hierzu gehören sogenannter Flitter und Beschichtungsrückstände von vorhergehenden Beschichtungsprozessen [191]. Die erforderliche Prozesssicherheit bei Tiefbohrprozessen mit Einlippenbohrern stellt einen besonderen Anspruch an die Spanabfuhr, weshalb die Abscheidung von Droplets bzw. allgemeinen Schichtinhomogenitäten zu vermeiden ist. Dies kann durch eine Schichtnachbehandlung oder eine Anpassung oder Verbesserung bestehender Beschichtungsprozesse erfolgen [59, 65, 144].

Üblicherweise nutzen beide beschriebenen PVD-Verfahren eine sogenannten Bias-Spannung. Durch die negative Bias-Spannung am Werkstück werden die in der Beschichtungskammer befindlichen Ionen von dem Substrat angezogen und scheiden sich nach dem Auftreffen ab. Diese Prozessvariante wird auch als Ionenplattieren bezeichnet [88, 122, 154]. Im Bereich der Zerspanungswerkzeuge finden meist PVD-Schichten der Varianten TiN, TiCN, AlCrN (Aluminiumchromnitrid) und das weit verbreitete TiAlN (Titanaluminiumnitrid) Einsatz [38, 52]. Die

TiAlN-Beschichtung wird ab einem Al/Ti-Verhältnis von mehr als 1 auch als AlTiN (Aluminiumtitannitrid) bezeichnet [122]. Das Hinzulegieren von Aluminium führt dabei sowohl zu einer Steigerung der Härte als auch der Warmfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit [37, 52, 116].

2.1.6. Schichtnachbehandlung

Bei der Schichtnachbehandlung handelt es sich um den letzten Schritt innerhalb einer konventionellen Herstellungskette für Zerspanungswerkzeuge. Bei diesem Verfahrensschritt erfolgt eine Präparation der applizierten Hartstoffschicht [46, 95], die den Fokus hat eine Aufbereitung des Werkzeuges nach der Beschichtung zur Steigerung der Leistungsfähigkeit sowie der Schichteigenschaften zu erreichen [42, 46, 51]. Zusätzlich lassen sich bei der Verwendung bestimmter Prozesse der Eigenspannungszustand verändern [18, 46] und Schichthaftungseigenschaften beeinflussen. Darüber hinaus steht analog zur Schichtvorbereitung auch die Spanntopographie nach dem Beschichten im Fokus, da vor allem bei den von Droplets geprägten Arc-PVD-Beschichtungen diese als nachteilig zu bezeichnen sind [71, 132, 144]. Zur Schichtnachbehandlung lassen sich verschiedene mechanische Verfahren einsetzen. Bedingt durch die hohe Wertschöpfung vor der abschließenden Schichtnachbehandlung ist die Prozessauslegung als herausfordernd einzustufen, da eine fehlerhafte Prozessauslegung zu einer Beschädigung der Beschichtung führen kann und so die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges beeinträchtigt [47]. Beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen ist der Schneidenecke und der Nebenschneide aufgrund der exponierten Lage ein besonderer Stellenwert zu zuschreiben [47, 50, 51]. Des Weiteren sind Substratfreilegungen und Schichtdickenreduzierungen zu vermeiden, da diese sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges auswirken [203].

2.2. Charakterisierung präparierter Werkzeuge

Aufgrund von mehreren wissenschaftlichen Arbeiten innerhalb der letzten Jahrzehnte haben sich verschiedene Verfahren zur Beschreibung und Charakterisierung von Zerspanungswerkzeugen hinsichtlich ihrer Form und Gestalt im Stand der Technik etabliert. Ergänzend sind auch Beschreibungen zur Charakterisierung der Oberflächentopographie der Funktionsflächen erarbeitet worden. Makroskopisch werden hierbei die Kenngrößen des Durchmessers, der Werkzeuglänge und die Zerspanungswinkel beschrieben [68]. Die Mikrogestalt wird nach *Denkena et al.* [68] durch eine Beeinflussung des effektiven Spanwinkels γ_{eff} definiert. In den Bereich der Mikrogestalt fällt auch die Schneidkante, die zwischen Span- und Freifläche liegt und aufbauend auf den Erläuterungen von *Denkena et al.* [68] ebenfalls in die Makro- und Mikrogestalt aufgeteilt werden kann. Im Folgenden wird eine detailliertere Beschreibung der Methoden zur Beschreibung der Schneidkantengestalt und der Oberflächentopographie an Zerspanungswerkzeugen sowie deren Besonderheiten und der Anforderungen an diese Flächen dargelegt.

2.2.1. Schneidkantengestalt

Zentraler Bestandteil der Charakterisierung von Schneidkanten an Zerspanungswerkzeugen ist die Beschreibung ihrer Mikrogestalt. Hierfür haben sich unterschiedliche Methoden und Kenngrößen etabliert. Die Kenngrößen des Schneidkantenprofils werden zumeist durch orthogonale Schnitte der Schneidkante charakterisiert [68]. Neben schlichscharfen Schneiden erfolgt eine Unterteilung der mikroskopischen Gestalt nach Form und Art der Ausprägung. Es lässt sich hierbei zwischen Schneiden mit einfacher oder mehrfacher Fase sowie verrundeten Schneidkanten unterscheiden. Zusätzlich bestehen auch Kombinationen aus den beiden genannten Varianten [63, 68, 95, 204].

Die Gestalt von verrundeten Schneiden ist hinsichtlich ihrer Beschreibung als komplex zu bezeichnen, sodass für deren Charakterisierung eine Vielzahl von Kenngrößen besteht. Trotz der fehlenden Eindeutigkeit des Kennwertes lässt sich in vielen industriellen Anwendungen

der Schneidkantenradius r_{β} als gebräuchlicher Kennwert wiederfinden [68, 204]. Dies lässt sich durch die einfache Ermittlung erklären. Bei Verwendung dieses Kennwertes wird jedoch eine symmetrische Verrundung vorausgesetzt und birgt insbesondere bei der Beschreibung von asymmetrischen Schneidkanten Nachteile. Zumeist liegen jedoch verkippte Schneidkantenformen vor, weshalb die von *Denkena et al.* entwickelte Formfaktormethode zur Beschreibung der Schneidkantengestalt verwendet werden sollte [69]. Bei dieser Methode werden zwei Tangenten an die Frei- und Spanfläche mit einer ermittelten Steigung gelegt, wobei der resultierende Schnittpunkt die ideale, scharfe Schneidkante symbolisiert, siehe Abbildung 2.2.1..

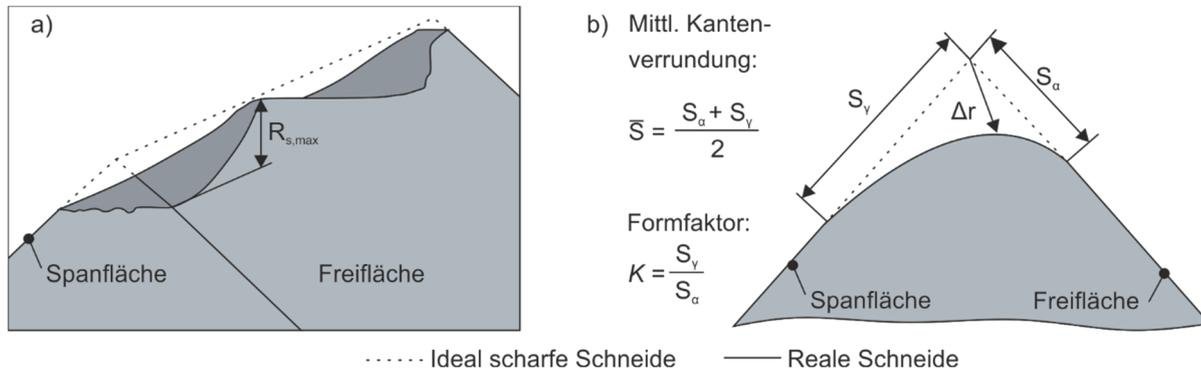


Abbildung 2.2.1.: Formfaktormethode zur Beschreibung der Kantenschartigkeit (a) sowie der Kantengestalt (b) [68, 69]

Dieser Schnittpunkt ist der Ausgangspunkt für die Ableitung von verschiedenen Kenngrößen, die anhand des Abstandes zwischen den Ablösepunkten, an Span- bzw. Freifläche bestimmt werden können. Die dadurch entstehenden Abschnitte, S_a und S_y , beschreiben den Materialabtrag an der Span- oder Freifläche. Der arithmetische Mittelwert dieser beiden Abschnitte wird als mittlere Schneidkantenverrundung \bar{S} bezeichnet. Die Verkipfung der Schneidkante kann durch das beschriebene Modell durch den Quotienten der Abschnitte beschrieben werden und wird als Formfaktor K bezeichnet. Zusätzlich beschreiben die Kennwerte Δr und φ die Abflachung des Schneidkantenprofils bzw. die Verschiebung des Scheitelpunktes. Durch dieses Modell wird eine eindeutige Beschreibung der Schneidkante ermöglicht, weshalb sich dieses Verfahren in immer mehr Bereichen durchsetzt [68]. Zur detaillierten Beschreibung einer Schneidkantenverrundung ist eine hohe Genauigkeit der Messwerte erforderlich. Die Genauigkeit wird durch die zu vermessenden Schneidwerkzeuge, insbesondere aufgrund des Reflexionsverhaltens unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten, aber auch durch die verwendeten Algorithmen bestimmt [68, 204].

Neben den beschriebenen Methoden bestehen noch weitere Ansätze zur definierten Beschreibung der Schneidkantengestalt [63, 179, 204]. Diese haben sich jedoch bis zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht in der industriellen Praxis etabliert. Als mögliche Begründung hierfür lässt sich erhöhte Anforderung hinsichtlich der Komplexität nennen und zum anderen die Schwierigkeit einer standardisierten Messung.

2.2.2. Beschreibung der Oberflächentopographie an Schneidkanten

Die Beschreibung der definierten Schneidkantengestalt steht auch die Untersuchung der Schneidkantentopographie im Fokus aktueller Untersuchungen [70, 113, 152]. Meist wird zur Beschreibung der Rauheit entlang der Schneide die Schartigkeit R_s verwendet, siehe Abbildung 2.2.1., welche einer nicht normierten Variante des arithmetischen Mittenrauwertes R_a aus der Oberflächenauswertung entspricht [113]. Hintergrund des vermehrten Untersuchungsschwerpunktes auf die Oberflächentopographie der Schneide selbst, sind die Erkenntnisse aus den durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen, dass die Ausbrüche und Abplattungen in einer deutlich erhöhten Schartigkeit resultieren und somit die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge herabsetzen.

2.3. Präparationsverfahren

Sowohl für die Schneidkantenpräparation als auch für die Schichtvor- und -nachbehandlung kommen meist Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide zum Einsatz, da in der Regel nur ein geringer Materialabtrag im Bereich der Schneidkante sowie den angrenzenden Funktionsflächen erwünscht ist. Im industriellen Umfeld kommen daher in der Regel das Strahlspanen, das Bürsten, das Schleppschleifen sowie das Schleifen in verschiedenen Varianten zum Einsatz [68]. Ergänzt werden diese Verfahren durch Sonderverfahren wie das Drillpolishverfahren [56, 159]. Im Bereich der Oberflächentopographieeinstellung erhalten vermehrt in Prozessketten integrierte Verfahren wie das Polierschleifen von Spannuten Beachtung, da es durch solche Verfahren auch mit gebundenem Korn möglich ist, eine Topographieveränderung zu erreichen [24, 114]. Ein weiterer Ansatz zum Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben besteht in der definierten Schneidkantenverrundung durch diese Verfahren [28, 81]. Durch den Einsatz unterschiedlicher Bindungshärten lassen sich auch Kombinationen aus einer oder mehrerer Fasen und einer Verrundung erreichen. Zur Schichtnachbehandlung von beschichteten Zerspanungswerkzeugen sind das Strahlspanen und das Schleppschleifen als meist verbreitet zu bezeichnen, wobei auch bereits Untersuchungen zur Schichtnachbehandlung durch gebundene Abrasivmittel bestehen [17].

Jede der genannten Technologien hat spezifische Eigenschaften, die die erzeugbaren Schneidkantengestalten und Oberflächentopographien und somit deren Einsatzgebiet bestimmen [68]. Die folgende Abbildung 2.5 zeigt die genannten Technologien und mögliche Anwendungsfälle.

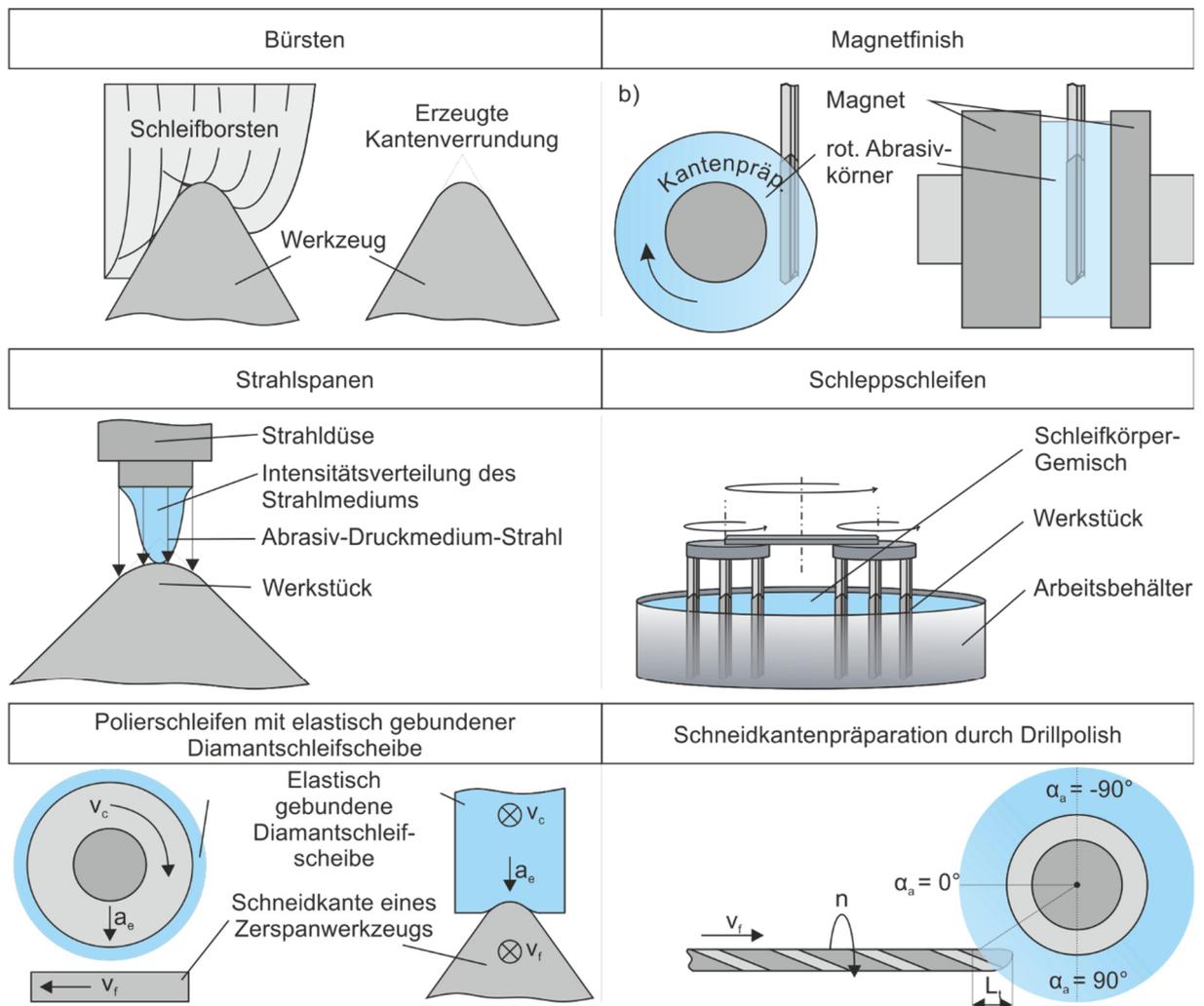


Abbildung 2.3.1: Schematische Gegenüberstellung verschiedener Präparationsverfahren

2.3.1. Strahlspanen

Als Strahlspanen wird ein Verfahren bezeichnet, welches einen Materialabtrag unter Verwendung von Strahlmittel, welches meist keramischer Natur ist und mit hoher Geschwindigkeit auf das zu bearbeitende Werkstück trifft. Das Verfahrensprinzip erfolgt dabei meist durch zwei unterschiedliche Varianten. Oft wird ein Trägermedium in gas- oder flüssiger Form als Trägermedium oder aber rein mechanisch ein Schleuderrad zur Beschleunigung des Abrasiv verwendet [117, 134, 168]. Ersteres wird meist als Nass- und Trockenstrahlspanen für die Präparation von Zerspanungswerkzeugen eingesetzt [68]. Das Verfahrensprinzip erfolgt so, dass es beim Aufprall auf das Werkstück zu einer Umwandlung der kinetischen Energie des jeweiligen Strahlkorns kommt und diese in eine elastisch-plastische Deformation von Werkstück und des Abrasivmittels umgewandelt wird [117, 187]. Beim in dieser Arbeit verwendeten Nassstrahlspanen resultiert im Vergleich zum Trockenstrahlen nur ein geringfügiger Wärmeeintrag in das Werkstück [207]. Der das Strahlmedium umhüllende Wasserfilm führt darüber hinaus zu Dämpfungsvorgängen, die in einer verbesserten Prozessführung und -qualität resultieren [117]. Insbesondere das ungerichtete und wiederholte Auftreffen von Abrasivmittel führt zu einer Oberflächenzerrüttung, die in einem Materialabtrag resultiert [67, 187]. Unter Verwendung von kantigen, mineralischen Abrasiven, welche die hauptsächlich zur Werkzeugpräparation verwendeten Abrasivmittel sind [63, 130, 204], lässt sich die erreichbare Abtragsleistung steigern [67, 117]. Bei der Verwendung zur Präparation von VHM-Werkzeugen führt die für den Materialabtrag dominante plastische Deformation der Kobaltbindephase zu einem Herausbrechen der Karbidkörner. Dieser Effekt tritt insbesondere bei einer Schneidkantenpräparation auf, da in diesem Fall zu meist die notwendige Stützwirkung durch umliegendes Material fehlt [40, 41, 130, 183]. Zusätzlich wird dieser Mechanismus durch einen abrasiven Abtrag der Bindephase überlagert und der Effekt von sich aus dem Verbund lösender Karbide verstärkt [35, 43, 143, 186, 204]. Insbesondere beim Einsatz von feineren Strahlmittelkörnungen erhöht sich der Abtrag der Kobaltbindephase wodurch sich eine Reduzierung des Binderanteils im Randzonenbereich ergibt [143, 185, 186, 204]. Des Weiteren wird durch eine feinere Kornfraktionen die durch den Strahlprozess charakteristische Grübchenstruktur hervorgerufen [35, 204]. Beim Einsatz von sphärischem Strahlgut ist aus der Stahlbearbeitung bekannt, dass Druckeigenspannungen durch Strahlprozesse induziert werden. Dieser Effekt ist auch bei der Bearbeitung von Hartmetallwerkzeugen durch scharfkantige Abrasivkörner festzustellen, allerdings lässt sich dieser Effekt hauptsächlich auf die Verformung der Bindephase zurückführen [52, 86, 178, 185].

Aufbauend auf den beschriebenen Mechanismen und Beeinflussungen lässt sich ableiten, dass dieses Verfahren für die Schneidkantenpräparation und die Beeinflussung der Topographie von Funktionsflächen geeignet ist. Zur prozesssicheren Umsetzung und Anwendung dieses Verfahrens sind jedoch gewisse Gegebenheiten und Anforderungen notwendig [35, 68, 178]. Unter Verwendung einer geeigneten, geführten und frei programmierbaren Kinematik lassen sich auch asymmetrische Schneidkantenverkippen herstellen [6, 35, 68, 204]. Die Reduzierung der Kobaltbindephase innerhalb der Randzone übt einen positiven Effekt auf die Haftung und Haltbarkeit der aufzubringenden Beschichtung aus [43, 51, 52]. Allerdings ergeben sich aufgrund dieser Mechanismen auch Veränderungen der peripheren Funktionsflächen. Insgesamt lässt sich der Strahlspanprozess aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und dem teilweise hohen Programmieraufwand bei freien Bewegungsbahnen als komplex einstufen.

Besonderen Stellenwert für das Prozessergebnis haben die Prozesseinstell- und Eingriffsgrößen, wie der Strahldruck p_{st} , die Strahldauer t_{st} oder die Strahlvorschubgeschwindigkeit $v_{f,st}$, der Düsenabstand h_d sowie der Strahl- und der Auftreffwinkel. Zusätzlich sind die Auswahl der

Form und Größe der Düsenöffnung, die Düsengestalt sowie des Abrasivmediums als besonders beeinflussende Faktoren zu bezeichnen [63, 130, 178, 204]. Die resultierenden Schneidkantenverrundungen sind neben den dargestellten Einstell- und Prozessgrößen auch von der Schneidengestalt und dem jeweiligen Hartmetall abhängig. In der Literatur werden diesbezüglich bei verschiedenen Charakterisierungsmethoden jedoch unterschiedliche Auswirkungen beschrieben [35, 63, 130, 178, 203]. Die hohe Varianz der Ergebnisse unterstützt zum einen die Aussage über die Komplexität des Prozesses als auch die Herausforderung hinsichtlich einer standardisierten Auswertemethodik zur Charakterisierung von präparierten Schneidkanten.

Die für das Strahlspanen typische Grübchenstruktur [6, 35, 203, 204], lässt sich als isotrope Oberfläche beschreiben. Diese entsteht dadurch, dass das ungerichtete Aufprallen des Abrasivmittels zu einem Abtrag von Profilsitzen führt, aber gleichzeitig die herausbrechenden Karbide und deformierte Bindephase in einer tendenziell raueren Oberflächentopographie resultieren [3, 40, 41, 46]. Die Erzeugung der typischen Struktur können insbesondere durch kleinere Korngrößen der Abrasivmittel [70, 143, 183], schnellere Verfahrgeschwindigkeiten und/oder verringerte Strahldrücke [7, 70] erreicht werden. Höhere Strahldrücke mit grobem Korn führen hingegen zu einer vermehrten Oberflächenzerrüttung, wodurch ein ausgeprägtes Auswaschen der Bindephase resultiert [6, 203].

Bisherige Untersuchungen zur detaillierten Beschreibung der Beeinflussung der Schneidkantengestalt und der Schichtvorbehandlung erfolgten durch *Terwey* und *Wolf* lediglich bei Wendelbohrwerkzeugen [178, 203]. *Terwey* hat sich dabei auf symmetrisch verrundete Werkzeuge beschränkt und konnte durch den Einsatz eines Industrieroboters darstellen, dass eine Präparation durch das Nassstrahlspanen möglich ist. *Wolf* ergänzte die gegebenen Prozesse durch eine erweiterte, noch komplexere Bahnbewegung, damit auch asymmetrische Schneidkantengestalten mithilfe des Industrieroboters herstellbar sind [203].

Der Einsatz von Nassstrahlspananlagen hat sich neben der Schneidkantenpräparation auch bei der Schichtvor- und -nachbehandlung als zielführend erwiesen. In der industriellen Praxis werden solche Maschinen gerne aufgrund ihrer Universalität und dem relativ hohen Durchsatz verwendet. Wissenschaftliche Arbeiten, die die Präparation von Zerspanungswerkzeugen durch solche Prozesse beschreiben, lassen sich hingegen nur vereinzelt finden. *Wolf* konnte jedoch innerhalb seiner Arbeit darstellen, dass das Nassstrahlspanen auf industriellen Anlagen gute Ergebnisse zur Schichtvor- und -nachbehandlung liefert [203]. Für den Aufbau von Wissen über die jeweiligen Wirkmechanismen muss jedoch im industriellen Umfeld eine umfangreiche Datenbasis bestehen. Des Weiteren stellt sich der Kornverschleiß als mögliches Fehlerpotential dar, da mit stumpferem Korn nur geringere Abtragsleistungen erreicht werden können [6].

Im Allgemeinen zeigen die Untersuchungen zum abrasiven Nassstrahlspanen, dass die Möglichkeit besteht, die mechanischen Eigenschaften der Beschichtung durch das Strahlspanen zu verändern. Die Erklärung hierfür liegt wie bei der Schichtvorbehandlung bei den wiederholt aufprallenden Körnern, die zu einer Verfestigung und damit zu einer Erhöhung der Schichthärtigkeit führen [42, 43, 46, 51]. Erhöhte Strahldrücke bergen jedoch die Gefahr, dass es zu einem spontanen Schichtversagen aufgrund einer auch beim Hartmetall auftretenden Oberflächenzerrüttung sowie zu einem abrasiven Abtrag der Schicht und somit einer Schichtdickenreduzierung kommen kann [48, 51, 53]. Bedingt durch die zum Teil kontroversen Ergebnisse des Strahlspanens, lässt sich keine abschließende Einschätzung geben, in welchem Maße eine Beeinflussung der Schneidkantengestalt und der Oberflächentopographie bei Einlippenbohrern reproduzierbar möglich ist. Des Weiteren ergeben sich auch aufgrund der vermehrten

Forderung nach Prozessen, die den Zielkonflikt einer Schneidkantenpräparation bei gleichzeitig minimaler Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen durch dieses Verfahren nicht endgültig lösen.

2.3.2. Bürstspanen

Gegenüber dem Strahlspanen ist es durch das Bürstspanen möglich eine Verrundung der Schneidkante zu erreichen, ohne das gesamte Werkzeug zu beeinflussen. Beim Bürstspanen handelt es sich um ein Verfahren, bei dem ein mit Abrasivmitteln versetztes Bürstwerkzeug, welches aus mit Abrasivmittel durchsetzten Filamenten besteht, zur Werkzeugpräparation eingesetzt wird [15, 63, 70]. Im Rahmen der Schneidkantenpräparation kommen meist weiche und flexible Polymerfilamente, wie Nylon, aber auch Naturfasern, zum Einsatz [15, 63, 149]. Als Abrasivmitteln finden Korund, Siliziumkarbid und auch Diamant Anwendung [16, 63, 149]. Die auf dem Werkzeug auftreffenden Filamente erzeugen eine Abrasivwirkung, die auf die in den Filamenten enthaltenen Abrasivmittel zurückzuführen ist. Auch Materialablagerungen innerhalb der Bürste können die Abtragsleistung begünstigen [148]. Das Bürstspanen lässt sich entgegen dem Strahlspanen direkt in bestehende Prozessketten integrieren, da dieser Prozess auch auf Werkzeugschleifmaschinen nutzbar ist. Hierdurch ergibt sich eine hohe Produktivität und die Herstellung von verschiedenen Verrundungsgrößen [15, 68]. Ähnlich zum Strahlspanen lässt sich die Leistungsfähigkeit des Prozesses durch die Einstellparameter und des Bürstwerkzeugs beeinflussen [63, 70, 71]. Auch bei diesem Verfahren lassen sich Spezialmaschinen [15, 16, 72] oder auch der Einsatz von Industrierobotern finden [156]. Trotz der geringen Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen an Zerspanungswerkzeugen lässt sich dieser Prozess nicht als Universalprozess bezeichnen. So bestehen nach aktuellem Erkenntnisstand nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen, die den Einfluss des Filamentverschleiß betrachten. Daher ist großes Prozesswissen, insbesondere beim Einsatz von frisch abgerichteten Bürsten notwendig, um eine hohe Schwankung des Materialabtrags zu vermeiden. Des Weiteren lassen sich durch dieses Verfahren keine kleinen, filigranen bzw. langauskragenden Werkzeuge präparieren, was ein weiterer Nachteil für die Präparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen darstellt.

2.3.3. Schleppscheifen

Eine weiteres, im industriellen Umfeld etabliertes Verfahren, stellt das Schleppscheifen dar. Das auch als Tauchgleitläppen bezeichnete Verfahren ist eine Variante des Gleitschleifens, bei dem das zu präparierende Zerspanungswerkzeug durch ein mit Abrasivmedium gefülltes Behältnis geführt wird. Hierbei wird der Materialabtrag durch die Rotation des Werkzeuges bzw. durch Bewegung des Abrasivmittels erreicht [77]. Hauptsächlich werden bei diesen Prozessen feinkörnige Abrasivgemische auf Basis von Korund oder Siliziumkarbid sowie mit Polierpaste versetztes Walnussschalengranulat verwendet [98, 137, 157]. Für die erreichbaren Materialabträge und damit verbunden die resultierende Schneidkantenverrundung haben neben dem Medium auch die Eintauchtiefe, die Relativgeschwindigkeit und die Bearbeitungszeit einen besonderen Einfluss auf das Prozessergebnis [98, 137, 157]. Der hydrostatische Druck im Medium wird insbesondere durch die Eintauchtiefe beeinflusst. Die somit erhöhte Anpresskraft innerhalb des Abrasivmediums resultiert in einem vermehrten Materialabtrag. Einen vergleichbaren Effekt hat die Bearbeitungsdauer, die vornehmlich beim Ziel einer erhöhten Schneidkantenverrundung Verwendung findet [98, 157].

Die Prozesskinematik kann prinzipiell durch zwei Varianten umgesetzt werden. Die gebräuchlichste Variante ist die Montage der Werkzeuge auf einen Träger, der als Rotor funktioniert und durch das stehende Abrasivmittel geführt wird. Hierbei lassen sich je nach Ausführung Werkzeuge einzeln oder durch die Verwendung eines ergänzenden Halters am Rotor mehrere

Werkzeuge bei gleichsinniger oder gegensinniger Rotationsbewegung präparieren. Somit ergeben sich auch bei diesem vermeintlich einfachen Verfahren komplexe Bewegungen, die unterschiedliche Ziele hinsichtlich der Schneidkantenpräparation oder auch der Schichtnachbehandlung verfolgen. Mittels einer Anpassung und Abstimmung der Eintauchtiefe, der Rotationsgeschwindigkeiten, des Rotationssinns und des Abrasivmaterials lassen sich über den Werkzeugradius konstante Verrundungen einstellen [98, 137, 157]. Aufgrund der Prozesskinematik erfolgt an den exponierten Schneidkanten und insbesondere im Bereich der Schneidenecke ein vermehrter Materialabtrag, der sich beim Einsatz von Bohrwerkzeugen im Allgemeinen als ungünstig bezeichnen lässt [115, 203]. Trotz dieser Nachteile ist dieses Verfahren in vielen Industriebetrieben zu finden. Die Begründung hierfür ist, dass durch das Gleitschleppschleifen hohe Oberflächengüten der Funktionsflächen erreicht werden können, wenngleich eine vermehrte Schneideneckenverrundung und hohe Bearbeitungszeiten erforderlich sind [98, 137]. Auch beim Schleppschleifen erfolgt durch das mit im Vergleich zum Strahlspanen und Bürsten deutlich geringerer kinetischer Energie auftreffende Korn auf die Werkzeugrandzone eine Oberflächenzerrüttung, die in einer Reduzierung des Kobaltbindephasenanteils und einer Oberflächenaktivierung resultiert [137]. Aufgrund des meist vollumfänglichen Eintauchens des zu präparierenden Werkzeuges erfolgt eine ganzheitliche Bearbeitung des Werkzeuges. Hierdurch lässt sich ableiten, dass bereits vorher durch den Schleifprozess eingestellte Oberflächen beeinflusst werden. Das Verfahren eignet sich auch zur Schichtnachbehandlung, wobei bei Verwendung des Verfahrens insbesondere im Bereich der Schneidecken ein vermehrter Materialabtrag und damit eine Schichtdickenreduzierung zu vermeiden ist [68, 98]. Durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Bearbeitung von mehreren Werkzeugen können die spezifischen Prozesszeiten reduziert werden, jedoch lässt sich der Prozess insgesamt als langwierig und aufwendig beschreiben [68, 98]. Für die Schneidkantenpräparation an nachgeschliffenen Werkzeugen bestehen durch dieses Verfahren noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen.

2.3.4. Drillpolishverfahren

Beim Drillpolishverfahren handelt es sich um einen Schneidkantenpräparationsprozess, welcher ähnlich zum Bürsten in bereits bestehende Prozessketten integriert werden kann. Bei dem beschriebenen Verfahren wird eine Bohrung in eine elastisch gebundene Schleifscheibe hergestellt, wodurch an den für die Schneidarbeit relevanten Schneidkanten ein Materialabtrag resultiert. Die Umsetzbarkeit des Verfahrens konnte bereits gezeigt und für die Schneidkantenpräparation an Mikrofräswerkzeugen und Wendelbohrern validiert werden [23, 56]. Somit zeichnet sich dieses Verfahren durch eine schnelle Schneidkantenpräparation aus, die reproduzierbare Ergebnisse liefert [23, 56]. Als nachteilig bei dieser Verfahrensvariante zeigt sich jedoch, dass es durch das in diesem Fall angewendete Vollbohren zur einer unvermeidlichen Verrundung der exponierten Schneidenecke kommt. Des Weiteren sind für die gewünschte Prozesskinematik nur vereinzelte Maschinen geeignet. Dies wird dadurch bedingt, dass zu jedem Zeitpunkt Kenntnis über die Drehlage der für die Präparation verwendeten Schleifscheibe bestehen muss. Selbst beim meist erforderlichen automatischen Schleifscheibenwechsel darf diese Information nicht verloren gehen. Dieser Umstand und die aufwendige Nachbearbeitung durch ein umfangreiches Abrichten der Schleifscheiben nach der Präparation haben dazu geführt, dass sich das beschriebene Verfahren trotz des hohen Potentials nicht am Markt etablieren konnte.

2.3.5. Sonstige Verfahren

Neben den beschriebenen Verfahren lassen sich noch weitere Verfahren zur Schneidkantenpräparation finden. Unter anderem findet die Schneidkantenpräparation durch den Einsatz verschiedener Schleifverfahrensvarianten Anwendung. Hierbei wird primär der Ansatz verfolgt, dass durch dieses Verfahren eine oder mehrere Fasen am Werkzeuge erzeugt werden [95,

126]. Aktuelle Maschinenkonzepte mit Linearmotoren und hohen Genauigkeiten haben somit die Option durch eine Überlagerung von mehreren Fasen eine Annäherung einer verrundeten Schneidkante herzustellen [196]. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch durch den Einsatz von elastisch gebundenen Schleifscheiben erreichen. Neben dem bereits oben beschriebenen Drillpolishverfahren erfolgt durch eine definierte Zustellung orthogonal zur Schleifscheibe eine definierte Schneidkantenverrundungen. Zur definierten Verrundung der Schneidkante wird hierbei die hohe elastische Nachgiebigkeit des Schleifscheibenbelags ausgenutzt, um einen verrundeten Übergang zwischen Span- und Freifläche zu erreichen [10, 11, 28, 82]. Die Schneidkantenpräparation durch Schleifen mit elastisch gebundenen Schleifkörpern bietet die Möglichkeit einer hohen Reproduzierbarkeit und zusätzlich die Möglichkeit, asymmetrische Kantengestalten herzustellen [145]. Ein besonderer Vorteil ist die unmittelbare Durchführbarkeit nach dem Werkzeugschleifen ohne ein Umspannen des Werkzeugs [68]. Darüber hinaus werden Verfahren mit gebundenem Korn auch zur Vorbehandlung eingesetzt. Hierunter zählt beispielsweise das Polierschleifen zur Einstellung der Oberflächentopographie bei Spannuten [114].

2.3.6. Polierschleifen von VHM-Werkzeugen

Wie bereits erwähnt, können elastisch gebundene Schleifscheiben zur definierten Schneidkantenpräparation eingesetzt werden [28, 81]. Der ursprüngliche Ansatz für die Verwendung solcher Schleifscheibenkonzepte kommen jedoch aus der Oberflächenfeinstbearbeitung [24, 114]. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die meist mit Diamanten oder Siliziumcarbid durchsetzten Schleifscheibenbeläge ein hohes Verformungsvermögen aufweisen und sich somit an die erforderlicher Werkzeugkontur anpassen können. Primär werden diese Verfahren zur Oberflächentopographieoptimierung an Zerspanungswerkzeugen, insbesondere der für den Spanabtransport relevanten Spannuten eingesetzt. Durch diese Verfahren ist bekannt, dass die Möglichkeit einer Einstellung von Oberflächentopographien besteht [24, 114]. Das bereits von *Heymann* beschriebene Verformungsvermögen, welches auch prinzipiell bei der Schneidkantenpräparation eingesetzt wird [81], kann darüber hinaus auch zur gezielten Beeinflussung anderer Werkzeuggestalten und -konturen, wie bspw. der Umfangsgestalt sowie des Stirnübergangs von Einlippentiefbohrwerkzeugen, verwendet werden. Hierzu sind zum aktuellen Zeitpunkt aber keine wissenschaftlichen Untersuchungen bekannt. Insbesondere bei der Gestaltoptimierung lassen sich hierzu Ansätze finden, die eine Verbesserung des Einsatzverhaltens nach sich ziehen können.

2.4. Tiefbohren

Das Tiefbohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Bohrungen mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen von $l/d = 10 \dots 400$ [193]. Durch die hohe Produktivität und hervorragenden Bohrungsqualitäten kommt das Tiefbohren auch bei l/d -Verhältnissen $l/d < 10$ zum Einsatz [192, 193]. Die Bezeichnung der Tiefbohrverfahren wird dabei in Abhängigkeit des herzustellenden Bohrungsdurchmessers bestimmt, wobei es je nach Anwendungsfall Überschneidungen der Durchmesserbereiche gibt. Abbildung 2.4.1 zeigt diese durchmesserbezogene Zuordnung der mechanischen Tiefbohrverfahren.

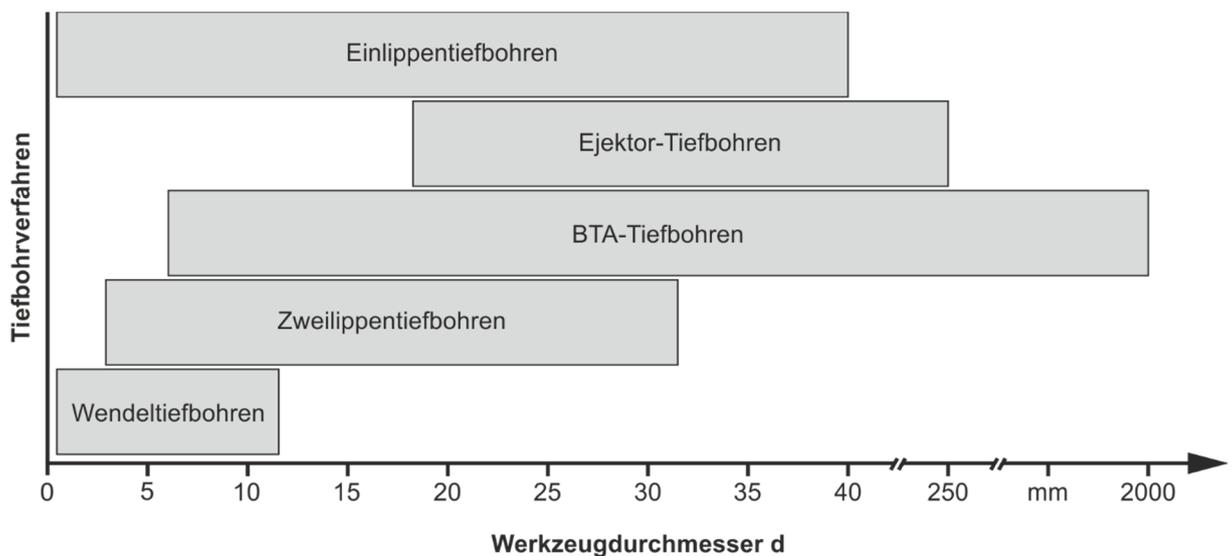


Abbildung 2.4.1. Durchmesserbezogene Klassifizierung der Tiefbohrverfahren nach [192–194]

Klassischerweise zeichnen sich die Tiefbohrverfahren durch einen asymmetrischem Werkzeugaufbau aus. Die Unterscheidung der Verfahrensvarianten erfolgt zwischen dem Einlippentiefbohren ($d = 0,5 \dots 80 \text{ mm}$), dem Ejektor-Tiefbohren ($d = 18 \dots 250 \text{ mm}$) und dem BTA (Boring and Trepanning Association)-Tiefbohren ($d = 6 \dots 2000 \text{ mm}$) unterschieden [192, 193]. Das Zweilippentiefbohren ($d = 2,8 \dots 32 \text{ mm}$) wird aufgrund des verringerten Spanraums hauptsächlich bei kurzspanenden Materialien bis zu I/D -Verhältnis $I/D \geq 30$ eingesetzt und zählt zu den erweiterten Tiefbohrverfahren [194]. Getrieben durch Weiterentwicklungen und den Einsatz unbeschichteter und kopfbeschichteter Werkzeuge hat sich auch das Wendeltiefbohren in gewissen Prozessen etabliert [1, 84]. Beim Einsatz von Werkzeugen kleiner Durchmesser $d_{\text{ELB}} \leq 5 \text{ mm}$ finden beim Einlippentiefbohren zumeist VHM-Werkzeuge Einsatz. Industrielle Anwendungsbeispiele sind z.B. die Fertigung von Getriebewellen, Kurbelwellen, Ventilen und Injektoren für die Automobilindustrie, die Produktion von Gewehrläufen für die Waffenindustrie, die Fabrikation von Lebens- und Futtermittelmatrizen für die Lebensmittel- und Agrarindustrie, die Herstellung von Kühlluftbohrungen in Flugantrieben der Luft- und Raumfahrt sowie die Erzeugung von gebohrten Implantaten und chirurgischen Instrumenten. Diese Aufzählung zeigt, dass das Einlippentiefbohren in einem breiten Anwendungsfeld zu finden ist. Im allgemeinen Maschinenbau ergibt sich eine Vielzahl weiterer Anwendungen, da es insbesondere bei hydraulischen und/oder pneumatischen Systemen auf hohe Bohrungsgüten ankommt, die zumeist nur durch Tiefbohrverfahren prozesssicher abgebildet werden können [91, 99, 136, 202].

Je nach Anwendungsfall können die Werkzeuge in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt werden. Der jeweilige Werkzeugaufbau ist meist auch von dem Anwendungsfeld und der geforderten Genauigkeit des Prozesses abhängig. Den verhältnismäßig größten Teil decken dabei Werkzeuge ab, welche aus drei verschiedenen Elementen, dem Bohrkopf, dem Werkzeugschaft und der Einspannhülse, bestehen. Bei diesen Werkzeugen ist nur der aufgelötete Bohrkopf aus Hartmetall. Dieser und der Werkzeugschaft hingegen aus gehärtetem Stahl. Die verschiedenen Teile sind über eine stoffschlüssige Lötverbindung oberhalb der Richthülse miteinander verbunden. Bei kleineren Durchmessern kann der Werkzeugschaft inklusive des Bohrkopfes oder aber das komplette Werkzeug aus Vollhartmetall hergestellt werden [109, 193]. Die Werkzeugaufnahme und die Einleitung des Drehmomentes beim Tiefbohren erfolgt über die Einspannhülse (Abbildung 2.4.2).

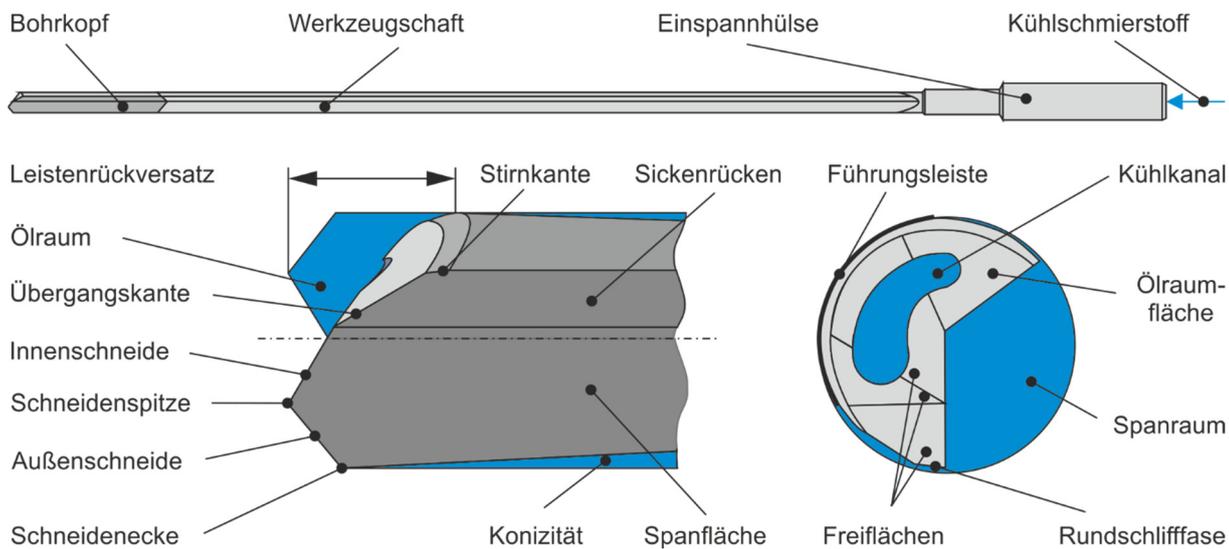


Abbildung 2.4.2. Grundlegender Werkzeugaufbau eines Einlippentiefbohrers nach [193]

Wie in Abbildung 2.4.2 dargestellt, erfolgt die Zufuhr des Kühlschmierstoffes über einen Kühlkanal innerhalb des Werkzeuges, welcher, insbesondere bei kleineren Werkzeugdurchmessern bzw. bei der Ausführung als VHM-Variante auch bei größeren Durchmessern, nierenförmig ausgebildet ist und ein besseres Durchflussverhalten gegenüber den zwei-Loch-Varianten aufweist [108, 202]. Die Spanabfuhr geschieht durch die in das Werkzeug geschliffene Sicke, welche einen Öffnungswinkel $\psi = 110^\circ \dots 130^\circ$ aufweist. Ein sicherer Abtransport der Späne ist essentiell, da es durch Spanklemmer zu Beschädigungen der erzeugten Bohrungswand oder aber sogar zu einem Werkzeugbruch kommen kann. Die Tendenz zu vermehrten Werkzeugbrüchen wird insbesondere durch die ins Werkzeug eingebrachte Längsnut begünstigt. Somit verfügen Einlippentiefbohrer gegenüber Wendelbohrern über eine deutlich geringere Steifigkeit. Dieser Aspekt stellt sich auch bei der Erzeugung von Bohrungen mit einem hohen l/d -Verhältnisses $l/d > 30 \dots 50$ oder aber der Präparation dieser Werkzeuge durch mechanische Verfahren dar. Daher werden Werkzeuge mit solchen l/d -Verhältnissen oft über Lünetten abgestützt [36, 85, 150, 171, 193]. Bedingt durch den asymmetrischen Werkzeugaufbau lässt sich das Einlippentiefbohren auch durch die verwendete Anbohrstrategie unterteilen. Hierbei erfolgt die notwendige Abstützung beim Anbohren entweder durch eine Anbohrbuchse (konventionelle Tiefbohrmaschinen) oder einer Pilotbohrung (Bearbeitungszentren und Drehmaschinen). Die Genauigkeit bzw. das Anbohrführungsspiel und die Form der Pilotbohrung beeinflussen maßgeblich die resultierende Bohrungsqualität und das Standzeitverhalten der Werkzeuge [36, 62, 160, 193]. Höchste Genauigkeiten werden nach wissenschaftlichen Untersuchungen bei einem Führungsspiel $s_{f\dot{u}} = 10 \mu\text{m}$ erreicht [36, 172, 173, 192], wobei in industriellen Anwendungen auch Untermaß Pilotbohrungen genutzt werden, um eine verbesserte Bohrungsgröße zu erreichen. Bei den praxisbewährten Standardanschleifen teilt sich die Schneide im Bereich der Schneidenspitze in eine Außen- und Innenschneide. Die Außen- und Innenschneide sind unter definierten Einstellwinkeln von $K_1 = 20 \dots 40^\circ$ und $K_2 = 15^\circ \dots 30^\circ$ angeschliffen. Der Einstellwinkel der Schneiden ist vom Werkzeugdurchmesser abhängig und wird meist so festgelegt [36, 193]. Im industriellen Umfeld lassen sich hingegen aber auch an den Anwendungsfall angepasste Bohrkopfauslegungen finden, die auf erarbeiteten Ergebnissen beruhen.

Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus des Bohrkopfes eines Einlippentiefbohrers ist eine Abstützung des Bohrkopfes im stationären Prozess über die Führungsleisten am Umfang des Werkzeuges erforderlich. Abbildung 2.4.3 zeigt die standardisierten Umfangsformen für Einlippentiefbohrer gemäß VDI3208 [193]. Neben den gezeigten Umfangsformen existiert noch eine Reihe weiterer herstellerspezifischer und auf verschiedene Anwendungen angepasster Umfangsformen [36, 193, 202].

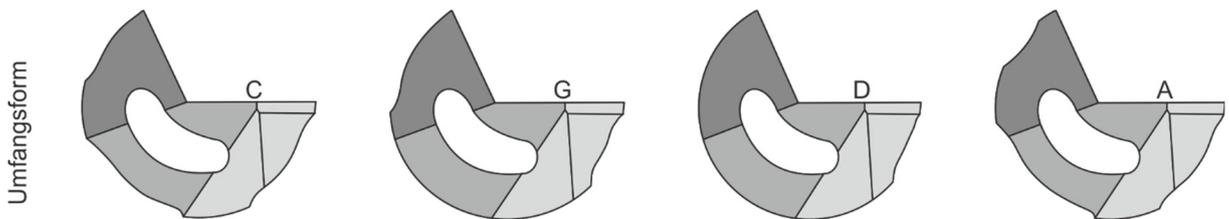


Abbildung 2.4.3: Anordnung der Führungsleisten nach [193]

Die durch die Führungsleisten resultierende Selbstführung des Werkzeugs bietet die Option zur Herstellung von Bohrungen bis zu einem l/d -Verhältnis von $l/d = 400$ [26, 100, 160]. Die verschiedenen Varianten der Führungsleistenanordnung ergeben sich durch die unterschiedlichen Anforderungen bei der Bearbeitung verschiedener Materialien [36, 193]. Je nach Belastungskollektiv während des Bohrprozesses ist die Auswahl der Führungsleistengestalt so zu wählen, dass ein Maximum an Stabilität erreicht und eine gleichmäßige Flächenpressung zur Erzielung eines günstigen Verschleißverhaltens möglich wird [150]. Die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen, Oberflächengüte und Randzonenintegrität werden durch die Umfangsform maßgeblich beeinflusst [8, 26, 146, 200]. Die Beeinflussung der Randzonenintegrität durch die Variation einer Verrundung des axialen Einlaufbereichs und der Umfangsgestalt finden hingegen bisher beim Einlippentiefbohren noch keinerlei Berücksichtigung.

2.4.1. Mechanische Werkzeugbelastungen beim Einlippentiefbohren

Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus der Einlippenbohrer ergeben sich bei der Betrachtung der mechanischen Belastungen Besonderheiten. Die durch die Materialzerspanung resultierenden mechanischen Belastungen lassen sich demnach in einen inneren und äußeren Kraftfluss unterteilen. Wie die Bezeichnung bereits suggeriert, handelt es sich beim äußeren Kraftfluss um das durch die Rotationsbewegung der Spindel erzeugte Drehmoment, welches die Spanabnahme an den Schneidkanten bewirkt. Die somit an den Schneidkanten resultierende Zerspankraft lässt sich wiederum in die einzelnen Kraftkomponenten, die Schnitt-, die Vorschub- und die Passivkraft, aufteilen. Die Schnitt- und Vorschubkräfte werden maßgeblich durch die Schneidkantengestalt und die verwendeten Prozessparameter bestimmt und an der Innen-, Außen- und Nebenschneide erzeugt. Als Resultat dieser Kraftkomponenten ergibt sich die Passivkraft. Bedingt durch den asymmetrischen Werkzeugaufbau heben sich die Schnitt- und Passivkräfte nicht wie beim Wendelbohrer durch die zweite Schneide auf, weshalb eine Radialkraft entsteht, welche über das Werkzeug abgeleitet werden muss. Somit entsteht ein weiterer geschlossener, innerer Kraftfluss. Dieser, durch die Radialkraft F_R erzeugte, innere Kraftfluss resultiert in Normal- und Reibkräften, welche über die Führungsleisten sowie die Rundschliffase auf die Bohrungswand wirken und so zu einer Einebnung, Glättung und Verformung der Bohrungswand inklusive der Bohrungsrandzone führen [100, 150]. Unter gewissen Voraussetzungen lassen sich durch eine geschickte Auswahl der Prozessparameter gezielte Beeinflussung der Bohrungsrandzone einstellen [146]. Neben den Zerspankräften resultiert bei diesem Prozess auch ein Bohrmoment, welches sich primär aus dem Schnitt- und Reibmoment, welches hauptsächlich durch die Reibkräfte an den Führungsleisten und der Rundschliffase resultiert, zusammensetzt [93, 150, 171]. Die Axialkraft, die das Werkzeug in Vorschubrichtung belastet, teilt sich in die Vorschubkraft und die Kühlschmierstoffkraft auf [136]. Die mechanischen Belastungen werden beim Einlippentiefbohren auch von der Bohrkopfgestaltung und den Einstellwinkeln beeinflusst [99, 109, 202]. Die Innenschneide ist dabei über das Bohrerzentrum hinaus ausgeführt, um hohe plastische Materialverformungen im Werkzeugzentrum und ein Verkleben des Werkzeuges auszuschließen. Das resultierende Bohrmoment führt zu einer Verdrehung und Verbiegung des Werkzeugschaftes, was bei ungünstiger Prozessführung zu Schwingungen und einer verringerten Bohrungsgüte führen kann [108].

2.4.2. Spanbildung beim Einlippentiefbohren

Zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit ist die Spanbildung und der sichere Spanabtransport beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen von besonderer Bedeutung. Ziel ist es daher, möglichst kurz gebrochene Spanformen zu erreichen, da lange Späne zu Spanklemmern führen, die wiederum in Beschädigungen der Bohrungen als auch in Werkzeugbrüchen resultieren. Zur Verbesserung der Spanbildung und somit der Prozesssicherheit besteht die Möglichkeit, diese durch Prozess- und Werkzeugengrößen zu beeinflussen. Hierzu zählen zum einen die günstige Auswahl der Schnittdaten und zum anderen auch die gezielte Einstellung des Schneidenanschliffs sowie die Möglichkeit einer Schneidkantenpräparation [27, 29, 58, 93, 124]. Bei prozessgünstiger Kombination aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub entstehen vermehrt gewendelte bzw. zylindrische Faltspäne, welche eine große Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff bieten und zuverlässig aus der Bohrung gespült werden. Bei einer Erhöhung des Vorschubs ergibt sich eine Erhöhung der Spanungsdicke bei gleichzeitiger Steigerung der Spandickenstauchung. Hierdurch erhöhen sich die Biegesteifigkeit und -festigkeit der erzeugten Späne, was sich positiv auf das Spanbruchverhalten und die Bohrungsgüten auswirken kann. Allerdings zeigen die Untersuchungen von *Heisel et al.* [111], dass es durch die Vorschubsteigerung zu negativen Effekten hinsichtlich des Verschleißverhaltens kommt.

Beim Einlippentiefbohren höherfester Werkstoffe kann es mitunter bei niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten und hohen Vorschüben zur Ausbildung von Band- und Kommaspänen kommen, die sich beim Abtransport leicht verklemmen und zu einem Werkzeugbruch führen. Die Einstellung hoher Schnittgeschwindigkeiten führt hingegen oft zur Bildung langer Wirrspäne, die insbesondere bei der Erzeugung von tiefen Bohrungen und den dafür notwendigen prozesssicheren Abtransport als ungünstig einzustufen sind [112].

Die Werkzeuggestaltung klassischer Einlippentiefbohrwerkzeuge sieht vor, dass die Werkzeuge mit einer Innen- und Außenschneide ausgeführt werden. Der allgemein für das Bohren typische Abfall der Schnittgeschwindigkeit bis zur Schnittgeschwindigkeit $v_c(d = 0 \text{ mm}) = 0 \text{ m/min}$ führt zusammen mit der oben beschriebenen Werkzeuggestalt zu einer Scherspanbildung im Zentrum des Bohrwertes, der sich teilweise mit den Spanlamellen der Innen- und Außenschneide verschweißst und zu einem Einreißen des Spans führt [58, 93]. Bei steigenden Gradienten des Schnittgeschwindigkeitsverhältnisses entlang der Innen- und Außenschneide des Einlippenbohrers geht der Scherspan in einen Fließspan über [58, 112]. Durch diese Annahmen haben sich zwei unterschiedliche Spanbildungstheorien beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen etabliert. Die ältere und im Stand der Technik bereits etablierte Theorie erfolgte durch *Fink* [93]. Nach seinen Untersuchungen entstehen bei der Zerspanung mit Einlippentiefbohrern an der Innen- und Außenschneide zwei separate Spanteile mit unterschiedlichen Krümmungsradien. Diese so entstehenden einzelnen Spanteile verlaufen so, dass es zu einem Kontakt zwischen diesen beiden Spänen kommt und die fürs Einlippentiefbohren typischen Faltspäne ausbilden. Aufgrund der höheren Schnittgeschwindigkeit an der Außenschneide läuft dieser Span schneller über die Spanfläche ab und führt zu einem Ein- und Abreißen des stärker gekrümmten Spans an der Innenschneide. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die Scherspanbildung im Zentrum begünstigt [83, 93].

Eine weitere Spanbildungstheorie wurde hingegen von *Heilmann* beschrieben [109]. Bei dieser jüngeren Beschreibung der Spanbildung konnte bei kleineren Werkzeugdurchmessern und der Bearbeitung von nichtrostenden Stählen gezeigt werden, dass es bei der Verwendung des Standardanschliffes zu keiner Spanteilung an der Schneidenspitze kommt. Die Untersuchung der erzeugten Späne zeigt sogar, dass sich die Werkzeuggestalt bei diesen Werkzeugen in der Ausformung der Späne wiederfinden lässt [109]. Auch *Kirschner* konnte diese Ergebnisse beim Einsatz von kleinsten Werkzeugdurchmessern bei der Bearbeitung verschiedener Werkstoffe bestätigen [31, 121].

Zur Analyse der Spanbildung beim Einlippentiefbohren mit größerem Werkzeugdurchmesser $d_{ELB} \geq 5$ mm erfolgten zumeist Untersuchungen der Spanbildungsmechanismen durch eine spontane Beendigung des Bohrprozesses mittels einer Bohrunterbrechvorrichtung. Der dadurch eingefrorene Zustand in der Wirkzone ermöglichte nach der metallographischen Präparation eine mikroskopische Analyse zur Bestimmung der Spanbildungsmechanismen [30, 32, 93, 100, 202]. Weitere Untersuchungen erfolgten durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie beim Einlippentiefbohren, die insbesondere durch die Untersuchungen und Weiterentwicklungen von Kirschner zur Beobachtung und Beurteilung der Spanbildung mit stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück geeignet sind [121].

2.5. Werkzeugverschleiß

Analog zur Bewertung des Verschleißverhaltens bei anderen Bohrverfahren lassen sich die dominierenden Verschleißerscheinungsformen beim Einlippentiefbohren in den Schneidkantenverschleiß, die Verschleißmarkenbreite und -länge auf der Rundschliffase, die Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche, den Kolkverschleiß sowie den Schneideneckenverschleiß unterteilen (vgl. Abbildung 2.5.1). Insbesondere Schneidenausbrüche an der Innen- und Außenschneide sowie Ermüdungserscheinungen durch Kamm- und Querrisse können die Leistungsfähigkeit von Einlippenbohrern herabsetzen.

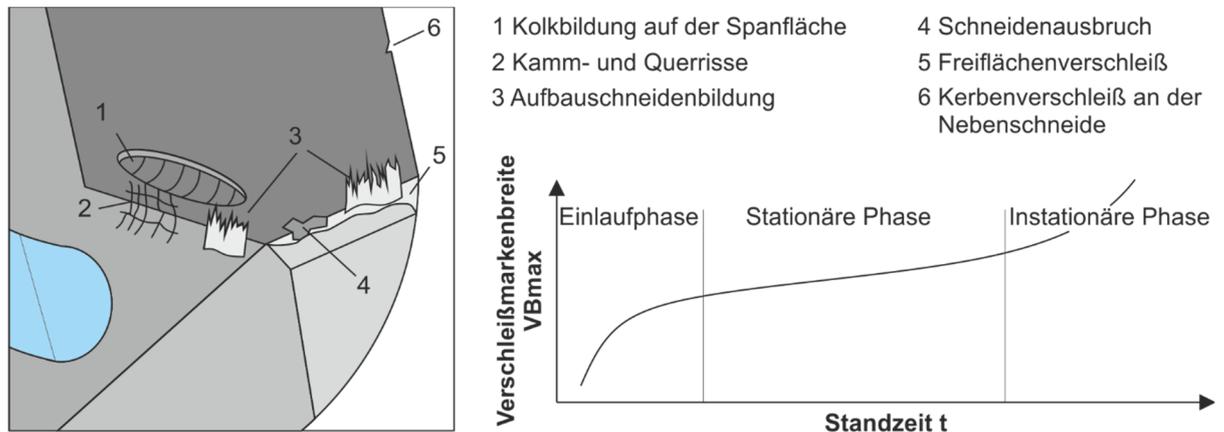


Abbildung 2.5.1: Beschreibung der Verschleißmechanismen

Untersuchungen im Stand der Technik haben gezeigt, dass auch bei Einlippentiefbohrwerkzeugen durch eine Schneidkantenpräparation zu Verbesserungen des Prozessverhaltens und der Leistungsfähigkeit kommen kann. Bei kleinsten Werkzeugdurchmessern führt dies sogar dazu, dass die Spanbildung im Bereich der Schneidkantenverrundung liegt und kein bzw. ein nur geringfügiger Kontakt mit der Spanfläche entsteht. Dieser Effekt kann auch durch den Schneidkantenverschleiß hervorgerufen werden, wie es bereits durch verschiedene Untersuchungen gezeigt wurde [83, 93]. Durch den Übergangsbereich zwischen Scher- und Fließspanbildung kann es darüber hinaus beim Einlippentiefbohren von Stahlwerkstoffen entlang der Schneide zur Aufbauschneidenbildung kommen [93]. Die Führungsleisten am Werkzeugumfang unterliegen einem axialen und radialen Verschleiß, wobei sich meist ein dreieckiger Verschleiß im Auslaufbereich der Führungsleisten einstellt [136].

2.6. Einsatzverhalten präparierter Zerspanungswerkzeuge

Zur Verbesserung der Werkzeugstandzeit und Prozessstabilität erfolgt eine Einstellung der Schneidkantenmikrogestalt von Zerspanungswerkzeugen, siehe Kapitel 2.1.3. Wie bereits beschrieben, verfolgt die Schneidkantenpräparation das Ziel, dass die Werkzeuge an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden [25, 27, 30, 34, 122]. Aufgrund der Tatsache, dass die bereits beschriebenen Verfahren nur in seltenen Fällen für die Präparation von Tiefbohrwerkzeugen aufgrund der Komplexität der Präparationsprozesse und der Besonderheiten zur

gezielten Präparation von Einlippenbohrern eingesetzt werden können, erfolgte eine Einordnung in den allgemeinen Erkenntnisstand für die Bohrbearbeitung mit schneidkantenpräparierten Werkzeugen. Im Fokus stehen dabei zum einen die kurze Beschreibung der Beeinflussung der Spanbildung durch die Schneidkantenpräparation sowie die Beeinflussung des Verschleißverhaltens.

Die bereits in Kapitel 2.2.1 beschriebene Schneidkantenmikrogestalt hat maßgeblich Einflüsse auf den Zerspanungsprozess. Insbesondere durch die Untersuchungen zum Ploughing-Effekt in Zusammenhang mit der Spanbildung durch Albrecht hat hierbei einen bedeutenden Erkenntnisprung geliefert. Beim Ploughing wird das Material unmittelbar, unter hohem Druck in den durch die Schneidkante entstehenden Span verformt. Aufgrund der hierdurch resultierenden Spantrennung läuft jedoch ein kleiner Materialanteil als unzerspanter Werkstoff unter der verrundeten Schneidkanten hindurch, wodurch dieses Material in die neuentstandene Oberfläche gedrückt wird [4]. Ploughing beschreibt somit das Materialverhalten im Bereich der Mikroschneidkantengestalt. Der Anteil des durch Ploughing verformten Materials ist von der Größe der Schneidkantenverrundung abhängig und nimmt mit größer werdender Verrundung zu [4]. Diese Effekte lassen sich insbesondere beim Einlippenbohrer auch auf andere Schneidbereiche übertragen. Bedingt durch die Prozesskinematik erfolgt durch die Rundschliffphase eine letztliche Bearbeitung der Bohrungswand. Da diese erzeugte Oberfläche im Anschluss nur noch geringfügig durch die nachlaufende Führungsleiste und der axialen Stirnphase eingeebnet wird, lässt sich ein übermäßiger Verschleiß als dominant für die Ausbildung der Bohrungsgüte bezeichnen. Bei einer starken Verrundung der exponierten Schneidenecke und der Rundschliffphase wird der Ploughing-Effekt begünstigt und es besteht die Möglichkeit, dass sich Materialablagerungen ergeben, die nachträglich durch die Führungsleiste umzuformen sind. Die Berechnung und Ermittlung der auf die Führungsleisten wirkenden Normalkräfte ist von großer Bedeutung für die Beurteilung des auftretenden Verschleißes und war daher bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [2, 57, 136]. Die Untersuchung dieser Mechanismen erfolgt bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen, sondern lediglich beim BTA-Tiefbohren.

2.6.1. Einfluss der Führungsleisten auf den Bohrprozess

Die Oberflächengüte der erzeugten Bohrungen wird beim Tiefbohren im Gegensatz zu konventionellen Bohrverfahren primär durch die Führungsleisten beeinflusst [100, 160]. Wie bereits beschrieben wird hierbei durch den inneren Kraftfluss eine Radialkraft F_R erzeugt, die zu einer Einebnung führt. Mit steigenden Zerspankräften ergeben sich Erhöhungen der über die Führungsleisten abzuführenden mechanischen Belastungen auf die Bohrungswand. Beim BTA-Tiefbohren, bei dem die Einebnung mit deutlich höheren mechanischen Belastungen von statten geht, hat sich gezeigt, dass es hier zu einem Zielkonflikt zwischen der möglichen Einebnung und dem hinsichtlich der Bohrungsgüte idealen Vorschubwerte kommt, da die durch den Bohrprozess erzeugten Vorschubrillen nicht ausreichend eingeebnet werden [153]. Dieser Effekt lässt sich im Allgemeinen auch auf die Bearbeitung mit Einlippentiefbohrwerkzeugen übertragen, da die standardmäßig eingesetzte Stirnphase am Übergang zwischen Frei- und Umfangsfläche eine ungünstige Materialumformung hervorruft, da es bei der Fase zu einer sehr kleinen Kontaktfläche zwischen Führungsleiste und umzuformender Bohrungsrandzone kommt. Erschwerend kommt hinzu, dass es bei der Umformung über geringe Kontaktflächen zu einer hohen spezifischen Energieeinbringung kommt und es aufgrund des Abschreckeffektes durch das verwendete Kühlmittel zu einer Aufhärtung der Randzone kommen kann [97, 100].

Neben der Beeinflussung des Einebnungsverhalten zeigen Untersuchungen von *Pfleghar*, dass die Auswahl der Führungsleistenvarianten einen Einfluss auf der erzeugbaren Bohrungsdurchmesser haben. So ergeben sich je nach Auswahl der Anordnung sowohl kleinere als

auch größere Durchmesser. Dieser Effekt ist davon abhängig, welche der Führungsleisten, insbesondere für den Fall, dass es mehrere gibt, für die primäre Ableitung der entstehenden mechanischen Belastungen verantwortlich ist. Bei Verwendung der Führungsleistenanordnung G ergeben sich meist kleinere Durchmesser als der Söldurchmesser der zu erzeugenden Bohrungen [150].

2.6.2. Verschleiß von Führungsleisten

Das in Kapitel 2.6 beschriebene thermomechanische Belastungskollektiv resultiert in Verschleiß an den Führungsleisten. Insbesondere bei der Bearbeitung von nichtrostenden oder höherfesten Stählen lässt sich hierbei ein Verschleiß an den Führungsleistenausläufen feststellen [91, 136, 201, 202]. Beim BTA-Tiefbohren konnte gezeigt werden, dass die erzeugten Funktionsflächen von großer Bedeutung sind [2, 33, 57]. Bei auftretendem Verschleiß bilden sich auf dieser Oberfläche ein oder mehrere Tragbereiche aus, die nicht mehr denselben Radius und dieselbe Oberflächengüte wie die Ausgangstopographie haben [104].

Um den Verschleiß an den Führungsleisten zu verringern bzw. bei einsetzendem Führungsleistenverschleiß die Vergrößerung der Tragbereiche zu verlangsamen, bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Zum einen ist eine Anpassung der Gestalt der Führungsleiste möglich, zum anderen besteht die Möglichkeit die Schmierung und Oberflächenbeschaffenheit der Führungsleiste zu optimieren. Diese Untersuchungen sind für den Einsatz bei wechselbaren Führungselementen bei BTA-Tiefbohrwerkzeugen bereits untersucht [2]. Für den Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen bestehen diese Untersuchungen noch nicht und sind daher näher zu betrachten.

2.6.3. Variation der Führungsleistengestalt

Die Variation der Führungsleistengestalt bietet die Möglichkeit eine Veränderung der mechanischen und tribologischen Beeinflussung der Führungsleiste zu erreichen. Diese Aspekte lassen sich zum einen durch eine Veränderung der Werkzeugmakrogestalt und zum anderen durch die Mikrogestalt bzw. die Oberflächengüte der Führungsleistenoberfläche beschreiben. Beim Einlippentiefbohrwerkzeug lässt sich die Makrogestalt der Führungsleiste durch eine Anpassung des Übergangs zwischen der Führungsleiste und der Öltasche beschreiben. Bei etwas globalerer Betrachtung kann auch der axiale Einlaufbereich von der Freifläche auf die Führungsleiste sowie die entsprechende Verrundung dieses Übergangs als Makrogestaltänderung benannt werden. Durch die Veränderung des axialen Einlaufbereichs konnte bereits beim BTA-Tiefbohren gezeigt werden, dass durch diese Maßnahmen eine Verbesserung des Einebnungsverhaltens resultiert [2, 57, 97]. Eine Untersuchung dieser Maßnahmen bei Einlippentiefbohrwerkzeugen sind zum aktuellen Zeitpunkt nur wenig erforscht. Selbiges gilt für die Untersuchungen einer Beeinflussung des Benetzungsverhaltens der Führungsleisten durch eine Veränderung der Makrogestalt in Form einer Verrundung der Übergänge zwischen der Führungsleiste und der Öltasche des Werkzeuges.

2.7. Bohrungsqualität

Das Einlippentiefbohren ermöglicht aufgrund des asymmetrischen Werkzeugaufbaus und der Abstützung des Bohrkopfes über die Bohrungswand die Herstellung enger Maß- und Formtoleranzen sowie Oberflächenqualitäten. Die in der Literatur angegebenen Toleranzklassen liegen dabei im Bereich von IT5...IT10 [110]. Die hohe Bohrungsgüte, Rundheit und der meist geringe Mittenverlauf führen dazu, dass nachgelagerte Prozesse unnötig werden [192]. Bedingt durch die Einebnung der Oberfläche durch die nachlaufende Führungsleiste erfolgt die bereits beschriebene Einebnung der Bohrungswand. Durch diese Einebnung ist bis zu einem gewissen Maß die Möglichkeit gegeben, dass Materialaufwürfe eingeebnet und Riefen und

Rillen in der Oberfläche eigeibnet werden [97, 202]. Je nach Wahl und Gestaltung der Umfangsgestalt bei Einlippentiefbohrwerkzeugen können die erzeugbaren Bohrungsdurchmesser vom Nenndurchmesser abweichen [121]. Die Abweichung vom Nenndurchmesser kann neben der Umfangsgestalt jedoch auch vom zerspannten Material abhängen [107].

Prozessführung	Werkzeug	Maschine	Prozess	Werkstück	Temperatur
<ul style="list-style-type: none"> - rotierendes Werkzeug - rotierendes Werkstück - Werkzeug und Werkstück rotieren im Gegenlauf 	<ul style="list-style-type: none"> - Verschleiß - Steifigkeit - Gestalt 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluchtung - Anbohrbuchse - Spannelement - Lünette 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnittgeschwindigkeit - Vorschub - KSS 	<ul style="list-style-type: none"> - Material - Gefüge - Gestalt - Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> - Verteilung - Gradient

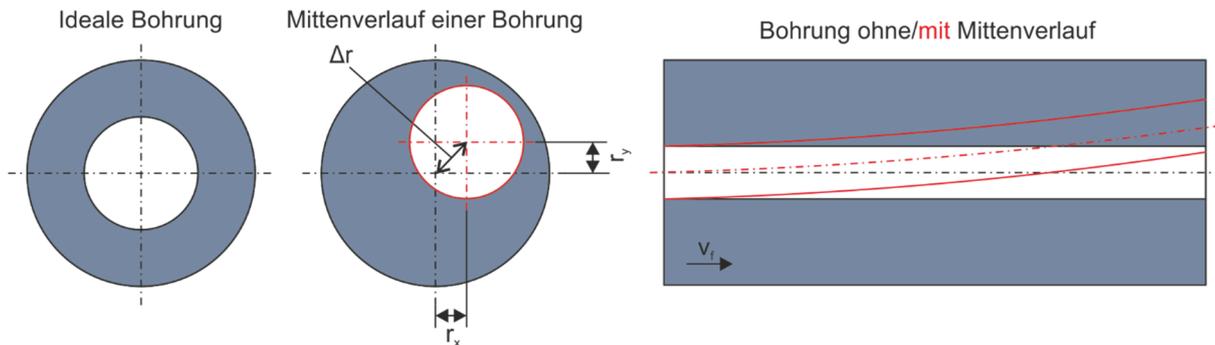


Abbildung 2.7.1: Maßgebliche Beeinflussungsfaktoren auf den Mittenverlauf

Maßgebend für die Vermeidung von hohen Mittenverläufen sind neben den eingestellten Schnittdaten und der verwendeten Werkzeuggestalt auch die jeweilige Arbeitsweise von besonderer Bedeutung. Daher wird beim Einlippentiefbohren in drei Arbeitsweisen unterschieden. Zum einen handelt es sich hierbei um das Einlippentiefbohren mit feststehendem Werkstück und rotierendem Werkzeug, dem Einlippentiefbohren mit rotierendem Werkstück und nicht rotierendem Werkzeug und dem Einlippentiefbohren mit gegenläufig rotierendem Werkstück und Werkzeug. Die gegenläufige Kinematik für rotationssymmetrische Werkstücke ermöglicht die Erzielung der geringsten Bohrungsverläufe [85, 160, 173, 193]

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

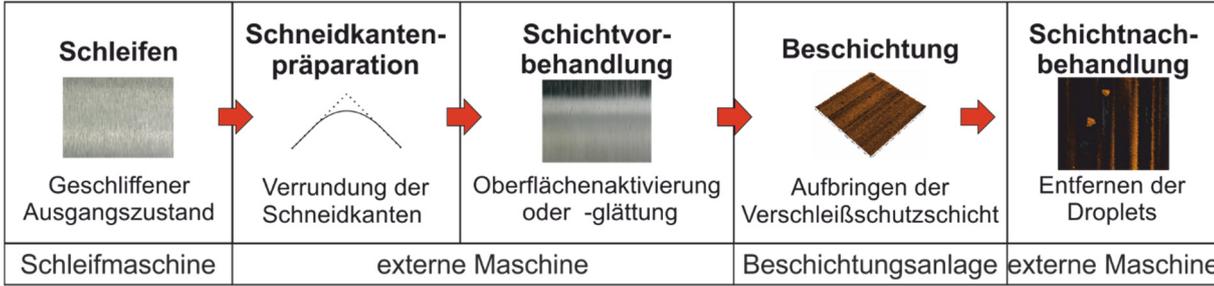
Aus dem dargestellten Stand der Technik lässt sich die Notwendigkeit und die Relevanz zur Entwicklung und Untersuchung einer optimierten Prozessabfolge zur Herstellung und Präparation von Zerspanungswerkzeugen ableiten. Der Fokus der Betrachtung und Optimierung dieser Prozesskette wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die Herstellung von Einlippentiefbohrwerkzeugen gelegt. Begründet ist dies in der besonderen Relevanz für Werkzeuge mit hohem Fertigungs- und Präparationsaufwand und den dadurch verbundenen hohen Kosten zur Herstellung dieser. Somit besteht durch eine angepasste und optimierte Prozesskette die Möglichkeit einen mehrfachen Nutzen zu realisieren. Speziell für die Tiefbohrbearbeitung im Durchmesserbereich $d \leq 5$ mm werden, aufgrund der Vorteile bei Standzeit, Verschleißbeständigkeit und erreichbarer Bauteilqualität, Vollhartmetallwerkzeuge bevorzugt eingesetzt. Bedingt durch das hohe l/d -Verhältnis haben diese Werkzeuge bereits bei der Rohteilbeschaffung bedeutend höhere Kosten als konventionelle Einlippentiefbohrwerkzeuge mit gelöteten Schneidelementen. Zusätzlich zu diesen Kosten ergeben sich durch die Schleifbearbeitung lange Prozesszeiten, die zusammen mit den hohen Genauigkeitsansprüchen bedeutende Kostentreiber darstellen [60, 95].

Im Anschluss an die Schleifbearbeitung erfolgen zusätzliche Prozessschritte, die die Wertschöpfung der Prozesskette weiter erhöhen und die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges sicherstellen. Jeder, der Schleifbearbeitung folgende, Prozessschritt birgt die Gefahr, dass es durch fehlerhafte manuelle Handhabung beim Umrüsten auf andere notwendige Maschinen oder aber dem Transport zu diesen Maschinen und Gerätschaften zu Fehlern, Verschmutzungen und Beschädigungen und somit verbundenem Ausschuss kommen kann. Neben den zusätzlichen Kosten für Transport und Handhabung ergeben sich durch die Produktion von Ausschuss Kosten, die es zu vermeiden gilt.

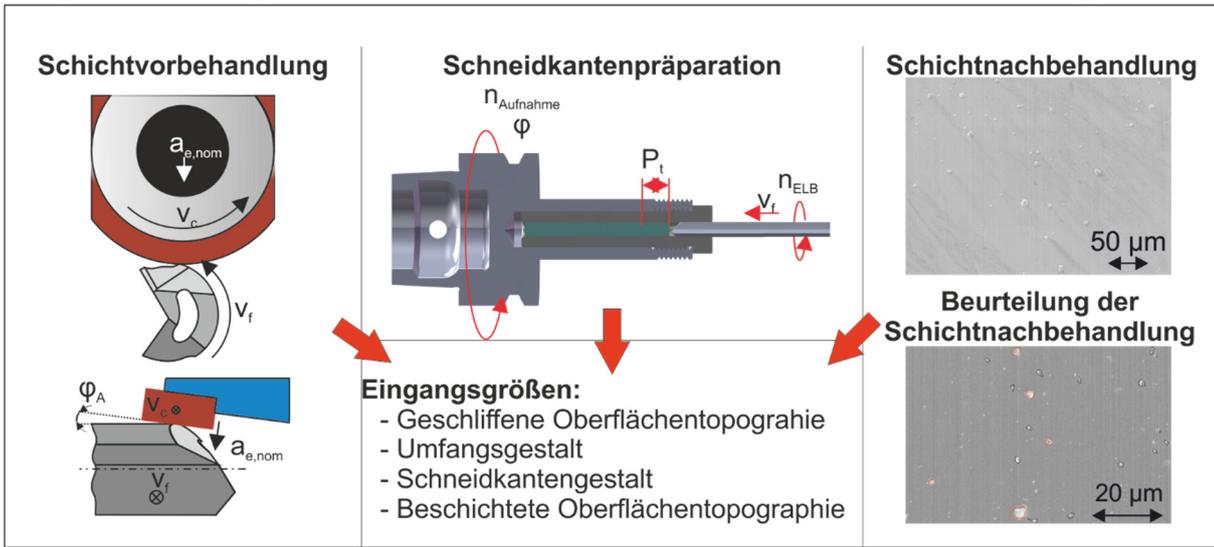
Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Arbeit eine alternative und optimierte Prozesskette entwickelt und untersucht werden, um die Produktion von Ausschuss minimal zu halten und eine sichere und reproduzierbare Produktion von Einlippentiefbohrwerkzeugen zu ermöglichen. Hierzu ist es notwendig, alternative Prozesse zu identifizieren, zu entwickeln, zu untersuchen und zu bewerten, um eine optimierte Prozesskette abzuleiten. Die vor diesem Hintergrund als ideal zu bezeichnende Prozesskette ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Hintergrund der Optimierungsmaßnahmen ist eine angepasste Prozesskette, welche es ermöglicht, ein optimales Werkzeug mit allen relevanten Anforderungen des Stands der Technik in Bezug auf Werkzeugqualität, Leistungsfähigkeit und erreichbarer Bauteilqualität herzustellen, ohne zusätzliche kostenintensive Prozesse zu verwenden. Erreicht wird dies durch die Vermeidung von zusätzlichen Maschinen und Gerätschaften zur Durchführung der bekannten Präparationsschritte und die dadurch bedingten Handhabungsmaßnahmen. Als möglicher Lösungsansatz wurde hierfür die Komplettbearbeitung auf Werkzeugschleifmaschinen zusammen mit einer neuen Beschichtungsmethodik identifiziert. Hierdurch besteht die Möglichkeit, das herzustellende Werkzeug in einer Aufspannung zu schleifen, die Schichtvorbehandlung durch lokales Polierschleifen durchzuführen, um nach der Schneidkantenpräparation ein komplettpräpariertes Werkzeug zu erhalten, welches im Anschluss an die Beschichtung direkt an den Endkunden versendet werden kann. Durch diese Maßnahmen ergeben sich neben den verkürzten Durchlaufzeiten auch geringere Werkzeugherstellkosten und gleichbleibende Qualitätskenngrößen.

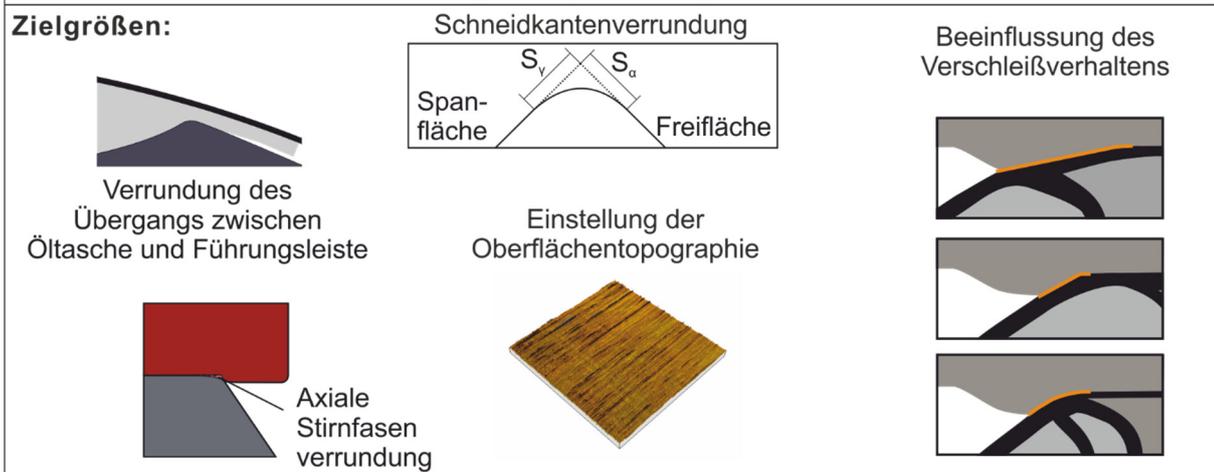
Konventionelle Prozesskette zur Herstellung von Tiefbohrwerkzeugen



Integration von Präparationsschritten in bestehende Prozessketten beim Werkzeugschleifen



Validierung der Optimierungsmaßnahmen



Ableitung einer optimierten Prozesskette zur Herstellung von Tiefbohrwerkzeugen

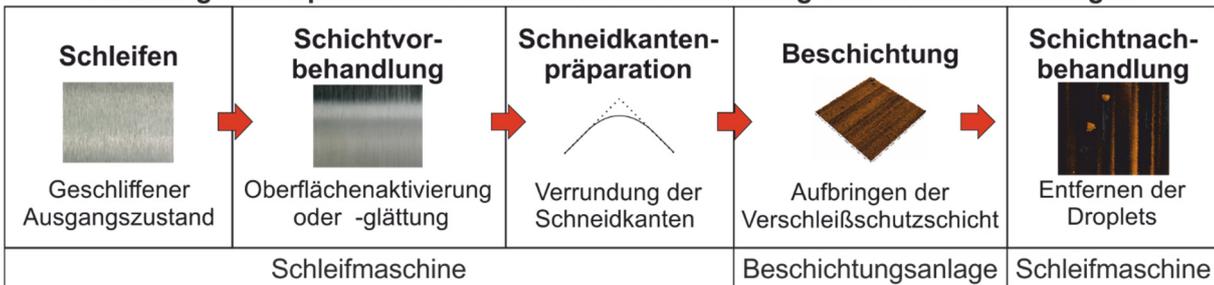


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung zur Entwicklung der optimierten Prozesskette

Nach der Identifizierung und Entwicklung einer optimierten Prozesskette, steht die Validierung der Optimierungsmaßnahmen und die Bestimmung der Notwendigkeit sowie des jeweiligen

Nutzens dieser Maßnahmen im Vordergrund. Daher werden im Rahmen dieser Prozesskettenoptimierung alle notwendigen Schritte einzeln betrachtet und analysiert, um das Optimum eines jeden Prozessschrittes zu identifizieren. Das Zusammenspiel dieser einzelnen Untersuchungsschwerpunkte wird in späteren Einsatzversuchen analysiert und bewertet. Des Weiteren werden zusätzliche, für die ökonomische und ressourceneffiziente Verwendung von Vollhartmetallwerkzeugen relevante Aspekte untersucht. Hierzu zählen zum einen die Schichtnachbehandlung von beschichteten Werkzeugen, die als Ergänzung der optimierten Prozesskette zu sehen ist, als auch die Schneidkantenpräparation an nachgeschliffenen, teilbeschichteten Werkzeugen, für die es nach aktuellem Stand der Technik noch kein effektives Präparationsverfahren gibt.

Im ersten Schritt wird zur Analyse und Bewertung der Optimierungsmaßnahmen der Ausgangszustand nach dem Werkzeugschleifen aufgenommen. Hier stehen insbesondere unvermeidliche Schwankungen innerhalb einer Werkzeugcharge bedingt durch notwendige Abricht- und Konditionierzyklen der Schleifscheiben oder chargenübergreifende Schwankungen der Herstellungsqualität in Bezug auf die erreichbare Oberflächentopographie der Umfangsflächen und Spannt sowie die erreichte Schneidkantenqualität im Fokus. Analog zur dargestellten optimierten Prozesskette werden im Nachgang verschiedene Untersuchungen zur Präparation dieser Funktionsflächen durch lokales Polierschleifen durchgeführt und in Zusammenhang zu bekannten, dem aktuellen Stand der Technik zu zuordnenden, Verfahren als Bewertungsgrundlage gestellt. Neben der Beeinflussung der Oberflächentopographie wird zusätzlich eine gezielte Einstellung des Stirnfasenübergangs analysiert. Das gleiche Vorgehen wird zur Untersuchung der Schneidkantenpräparation durchgeführt. Hierbei wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes, neuartiges Schneidkantenpräparationsverfahren, [Tool]Prep¹, einem robotergestützten Nassstrahlspanprozess gegenübergestellt und bewertet. Aufgrund der unterschiedlich ausgelegten Problemstellung hinsichtlich der Politur von Funktionsflächen an Zerspanungswerkzeugen bspw. zur verbesserten Spanabfuhr wird die Beeinflussung der Funktionsflächen durch die notwendige Schneidkantenpräparation durch abrasive Nassstrahlspanverfahren untersucht und der Bedarf und die Notwendigkeit zur Entwicklung eines minimalinvasiven Verfahrens zur Schneidkantenpräparation an Werkzeugen mit hohem I/D-Verhältnis abgeleitet. Nach der Untersuchung der Oberflächentopographie von verschiedenen Funktionsflächen an Zerspanungswerkzeugen erfolgt eine Analyse der Beeinflussung dieser durch die erforderliche Beschichtung mit einer Verschleißschutzschicht. Um eine negative Auswirkung von Schichtinhomogenitäten minimal zu halten, wird hierbei auf eine neue Beschichtungstechnologie zurückgegriffen, die es ermöglicht, Schichten mit einer verringerten Anzahl von Defekten aufzubringen. Zur Bewertung der Beeinflussung der Schichtqualitäten wird eine neue Bildauswertemethodik zur Charakterisierung und Quantifizierung der Schichtinhomogenitäten entwickelt und an den hier zu untersuchenden Werkzeugen etabliert. Dasselbe Verfahren wird zur Bewertung eines Schichtnachbehandlungsverfahrens durch lokales Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen eingesetzt und hinsichtlich der erreichbaren Oberflächentopographien, der Veränderung von Anzahl und Größe der Schichtinhomogenitäten sowie der Schichthaftung untersucht. Abschließend sollen Einsatzversuche die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen indem die Einflüsse der Präparationsmaßnahmen auf das Prozessergebnis analysiert werden. Zur Bewertung des Einsatzverhaltens steht die Bohrungsgüte und das Verschleißverhalten der eingesetzten Werkzeuge im Fokus der Untersuchungen.

Nur durch die Betrachtung der kompletten Prozesskette besteht die Möglichkeit ein umfangreiches und vollständiges Verständnis über die durchgeführten Maßnahmen zu erhalten. Um

¹ [Tool]Prep bezeichnet den eingetragenen Markennamen des Schneidkantenpräparationsverfahrens, welches unter dem Anmeldenummer 10 2019 005 692.2 am 14.08.2019 beim Deutschen Patent- und Markenamt zum Patent angemeldet wurde.

einen zwischenzeitlichen Überblick zu geben, erfolgt nach jedem Kapitel eine kurze Zusammenfassung, die als Basis zur Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen verwendet wird. Zum Ende der Untersuchungen steht somit eine gesamtheitliche Betrachtung der Prozesskette zur Herstellung von Einlippentiefbohrwerkzeugen zur Verfügung, die durch abschließende Einsatzversuche bei der Zerspanung von Vergütungsstählen evaluiert werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen zu bewerten und den Nutzen abzuleiten.

4. Experimentelle Randbedingungen

Bedingt durch die umfangreiche Betrachtung eines Großteils der Prozesskette zur Werkzeugherstellung und den daran abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen sowie die bestehende Notwendigkeit der Validierung der Untersuchungsmaßnahmen ergibt sich ein breites Repertoire der verwendeten Maschinen und Messmethoden. Das folgende Kapitel ist in die verschiedenen Werkzeugkonzepte, die Werkzeugschleif- und -präparationsmaßnahmen sowie die Bearbeitungsmaschinen und den Werkstoff untergliedert. Ergänzt werden diese Informationen durch die diversen zum Einsatz gebrachten Messgeräte. Somit wird ein vollumfänglicher Überblick über die verwendeten Maßnahmen zur Beschreibung der erfolgten Untersuchungen gegeben.

4.1. Versuchsstände zur Präparation und der Einsatzversuche von Einlippentiefbohrwerkzeugen

Zur Gestaltoptimierung der Werkzeugumfangsgestalt und der Schneidkantengestalt als auch zur Schichtvor- und -nachbehandlung sowie der Einsatzvalidierung durch In-Situ-Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen (IHVA) und Einsatzversuchen kommen unterschiedlichste Versuchsstände zum Einsatz. Im Folgenden werden diese Versuchsstände vorgestellt und die Eigenschaften und Besonderheiten beschrieben.

4.1.1. Gezielte Anpassung der Umfangsgestalt und Oberflächentopographie durch lokales Polierschleifen

Kernaspekt der durchgeführten Untersuchungen ist die Präparation der Funktionsflächen durch lokales Polierschleifen mit elastisch gebundenen Schleifscheibenbelägen. Zur verbesserten Implementierung von neuen Präparationsprozessen in bestehende Herstellungsabläufe, soll dieses Verfahren sowohl für die Schichtvorbehandlung als auch die Schichtnachbehandlung zum Einsatz kommen. Dies wird durch die Bearbeitung der relevanten Funktionsoberflächen erreicht, wodurch sich eine Veränderung der radialen Umfangsgestalt, des axialen Stirnfasenübergangs und der Oberflächentopographie ergibt, welche zu späterem Zeitpunkt näher beschrieben werden. Die durchgeführten Untersuchungen zur gezielten Anpassung der Werkzeugumfangsgestalt finden auf der Werkzeugschleifmaschine *Schütte 305 micro* statt, siehe Abbildung 4.1.1.1.

Schleifspindel	Arbeitsbereich
Drehzahlbereich: 0...12000 min ⁻¹	Vorschubgeschw.: 0...24000 mm/min
Antriebsleistung: 10 kW	x-Achse: 400 mm
Werkzeugsystem: HSK-50	y-Achse: 250 mm
	z-Achse: 250 mm
Universal-Rotationsachse	Auflösung: <0,0001°
Auflösung: <0,0002°	
Drehzahlbereich: 0...4000 min ⁻¹	
Drehmoment: 20 Nm	
Aufnahmekegel: HSK-50 E	

Werkzeugschleifmaschine
Schütte 305 micro



Abbildung 4.1.1.1: Versuchsmaschine zur Anpassung der Umfangsgestalt und Oberflächentopographie

Die 5-Achs-CNC-Werkzeugschleifmaschine verfügt über vier Linearmotoren, die die Hauptpositionierachsen (X-, Y-, Z- und C-Achse) bewegen und die hohe Positioniergenauigkeit der Maschine sicherstellen. Die zu präparierenden Werkzeuge werden durch eine Präzisionsspannzange aufgenommen. Bei langauskragenden Werkzeugen wird durch eine Abstützvorrichtung, die durch das Eigengewicht und die geringe Biegesteifigkeit bedingte elastische Verbiegung minimiert. Um eine möglichst geringe Beeinflussung der teilweise filigranen Werkzeuge beim Präparationsprozess zu verursachen, werden standardmäßige Formlünetten verwendet, die aus einem weichen Gummimaterial mit Untermaß gefertigt sind. Somit ergibt sich

30 4.1.1 Gezielte Anpassung der Umfangsgestalt und Oberflächentopographie durch lokales Polierschleifen

eine Führung des zu präparierenden Werkzeuges, ohne die empfindlichen Funktionsbereiche durch Ausbrüche und Abplatzungen der Schneidenecke sowie einem Verkratzen der Umfangsflächen zu beschädigen.

Um die Auswirkungen von verschiedenen Eingriffsbedingungen betrachten zu können, kommen im Rahmen der Untersuchungen unterschiedliche Prozessvarianten, die sich hinsichtlich der Kinematik unterscheiden, zum Einsatz. Diese unterscheiden sich durch die resultierenden Korneingriffsbahn und die Kontaktbedingungen zwischen Polierschleifscheibe und Einlippentiefbohrwerkzeug, siehe Abbildung 4.1.1.2.

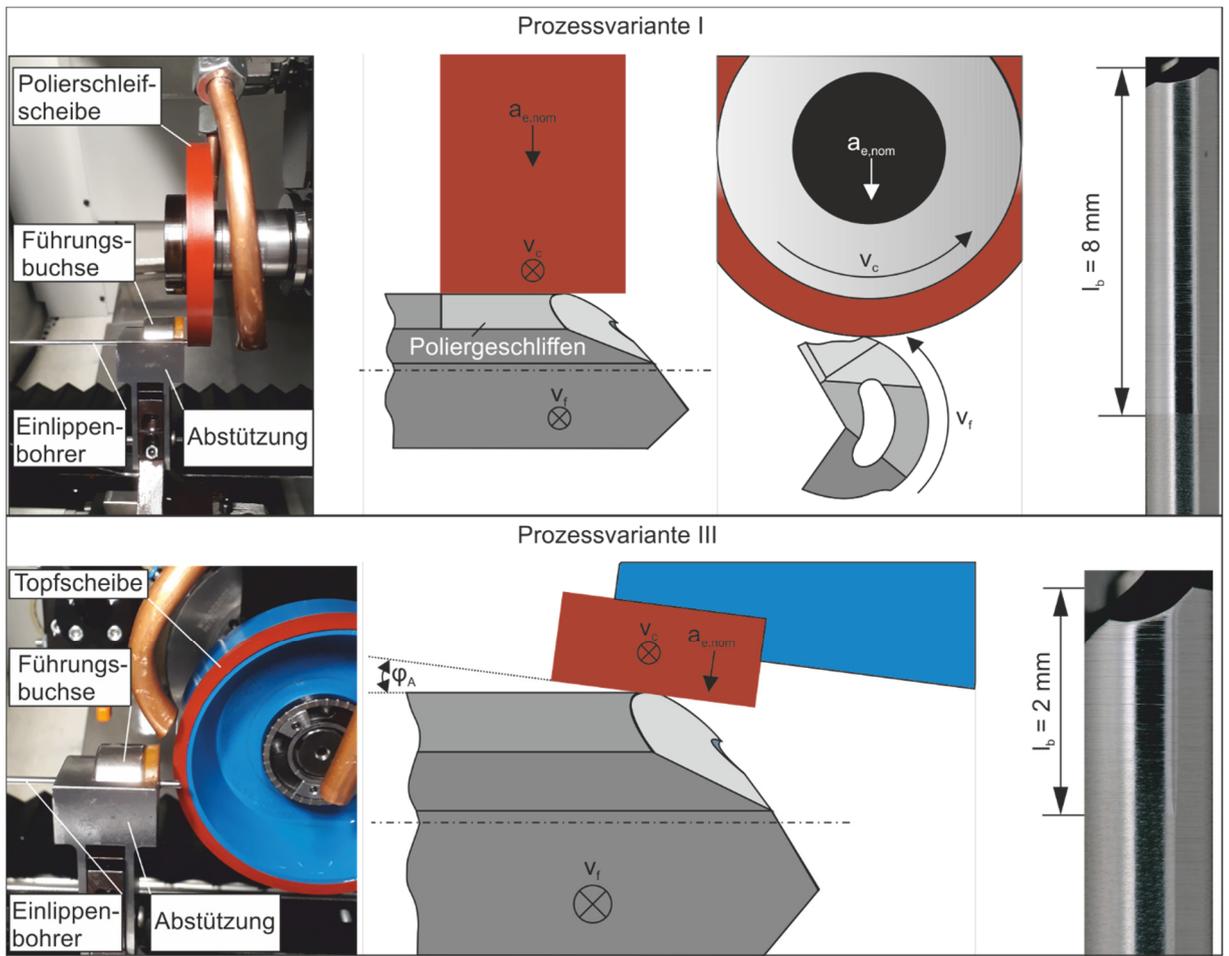


Abbildung 4.1.1.2: Darstellung der Prozessvarianten

Eine detaillierte Gegenüberstellung der unterschiedlichen Prozessvarianten und unterschiedlichen Härtegrade der eingesetzten Bindungen sind in Abbildung 4.1.1.3 dargestellt. Prozessvariante I ist mit dem Einstechschleifen nach *DIN 8589* vergleichbar, da die Polierschleifscheibe zugestellt und im Anschluss lediglich eine Rotation des zu präparierenden Werkzeuges erfolgt [74]. Hierdurch ergibt sich eine als ungünstig zu beschreibende Korneingriffsbahn, da es zu keiner Überdeckung von unterschiedlichen Korneingriffsbahnen über den Umfang des Werkzeuges bei der Rotationsbewegung kommt. Ein ähnliches Verhalten lässt sich anhand der schematischen Darstellung der Prozessvariante II feststellen. Hierbei wird die Umfangsschleifscheibe mit Ziel einer vermehrten Präparation der Stirnfase unter einem Winkel φ_A an- und zugestellt und wiederum lediglich durch das zu präparierende Werkzeug die Rotationsbewegung vollzogen. Durch die Veränderung der Schleifscheiben Form ergibt sich bei der Prozesskinematik III die Möglichkeit zur Überdeckung von verschiedenen Korneingriffsbahnen über den Umfang des Werkzeuges.



Abbildung 4.1.1.3: Darstellung der Prozessvarianten sowie der Polierschleifscheiben

Die eingesetzten Polierschleifscheiben werden von der Fa. *Günter Effgen GmbH* hergestellt. Für die Scheibe der Form 1A1 sowie der Form 6A9 wird eine Bindungshärte IRHD = 90 eingesetzt [114]. Als Abrasivmaterial sind in die elastische Schleifscheibenbindung Diamantkörner mit einer Korngröße von $d_k = 10 \dots 15 \mu\text{m}$ eingebunden. Somit entsprechen die verwendeten Korngrößen einer D15-Körnung nach der FEPA-Klassifizierung [92]. Zur detaillierten Einstellung der Polierschleifscheiben werden diese vor jeder Versuchsreihe mit gleichbleibenden Abrichtparametern konditioniert. Auf einen nachfolgenden Schärfprozess wird aufgrund der im Vergleich zu konventionellen Schleifscheibenbindungen weichen Bindung verzichtet. Für das Abrichten unter Emulsion mit einer Siliziumcarbid-schleifscheibe, Körnung C60, wird ein Geschwindigkeitsverhältnis von $q_d = -0,71$ bei einer Drehzahl der Polierschleifscheibe von $n_{PS} = 500 \text{ min}^{-1}$ und einem Überdeckungsgrad von $U_d = 8$ verwendet. Nach dem Erreichen der Gesamtzustellung unter Verwendung einer Schrittweite von $a_d = 1 \mu\text{m}$ erfolgt zum Abschluss des Abrichtvorgangs ein Ausrollen mit drei Hüben. Somit können eventuell vorhandene Verformungen der Polierschleifscheibe durch den Abrichtprozesses minimiert werden.

Neben der Schichtvorbehandlung durch lokales Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen erfolgt zusätzlich eine Analyse der Beeinflussung der Oberflächentopographie und der damit einhergehenden Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen. Hierbei werden zwei unterschiedliche Zielstellungen verfolgt. Zum einen wird ein Teil der Versuchswerkzeuge durch einen abrasiven Nassstrahlspanprozess zur Einstellung der Schneidkantenmikrogestalt präpariert. Zusätzlich erfolgt eine Analyse der Änderung der Oberflächentopographie und Beeinflussung der Umfangsgestalt durch einen Nassstrahlspanprozess auf einer industriellen Nassstrahlspananlage. Hierbei stehen die Analyse der Beeinflussung der Oberflächentopographie und die Beeinflussung der Umfangsgestalt im Vordergrund.

4.1.2. Schneidkantenpräparation der untersuchten Einlippenbohrer

Zur Schneidkantenpräparation der Versuchswerkzeuge sind unterschiedliche Verfahren zum Einsatz gekommen. Hauptbestandteil der Untersuchungen war das robotergestützte Nassstrahlspanen, welches bereits in Untersuchungen von *Wolf* und *Abmuth* Anwendung gefunden hat [6, 203]. Ergänzend erfolgen für die Werkzeuge mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 10 \text{ mm}$ eine Untersuchung der Schneidkantenpräparation durch das Gleitschleppscheifen und die Entwicklung eines neuen Schneidkantenpräparationsprozesses, [Tool]Prep, für Werkzeuge mit einem Durchmesser $d = 3$ und 5 mm .

Die Schneidkantenpräparation durch das abrasive Nassstrahlspanen erfolgt auf einer Strahlanlage, die am Institut für Spanende Fertigung (ISF) konstruiert und entwickelt wurde. Das Gestell, bestehend aus Aluminium-Systembauprofilen, ist an den Außenseiten mit Acrylglasplatten verkleidet, und bildet somit die Strahlkabine. Der Manipulator der Roboter-Einheit erhält durch eine frontseitige Öffnung Zugang zur Strahlkabine und ermöglicht somit eine flexible Prozessführung. Die Anlage arbeitet auf Basis des Abrasiv-Wasser-Gemisch-Prinzips, wobei Wasser als Trägermedium und Aluminiumdioxid, Al_2O_3 , als Abrasivmaterial mit einer FEPA-Körnung F220, Nennkorngröße $d_k = 53 \dots 75 \mu\text{m}$, vorliegt und trocken über eine Injektordüse, welche den Venturi-Effekt ausnutzt, dem Wasserstrahl zugeführt. Gemäß *DIN 8200* entspricht dies dem Druckflüssigkeitsstrahlen [76]. Durch die Vermischung des Strahlguts innerhalb der

Düse wird bei jedem Präparationsvorgang neues Abrasivmaterial verwendet. Somit sind der Verschleiß und Splitterungen der Körner zu vernachlässigen. Die Eignung dieser Vorgehensweise konnte bereits durch mehrere Untersuchungen belegt werden [6, 130, 178, 203]. Die Bereitstellung eines ausreichenden Wasserstrahldrucks wird durch eine Kreiselpumpe erreicht, welche einen maximalen Strahldruck $p_{st,max} = 18 \text{ bar}$ zur Verfügung stellen kann. Die Austrittsdüse, Düsendurchmesser $d_d = 5 \text{ mm}$, wird anschließend in der Strahlkabine ausgerichtet. Eine Druckeinstellung erfolgt durch ein Durchflussregulierungsventil. Der maximal erzielbare Volumenstrom beträgt $V = 40 \text{ l/min}$ bei einer Antriebsleistung von $P_L = 2,6 \text{ kW}$ und einer Drehzahl von bis $n_{Pu} \leq 2850 \text{ min}^{-1}$. Die technischen Daten des Roboters sowie der Pumpe der Strahlanlage können Abbildung 4.1.2.1 entnommen werden.

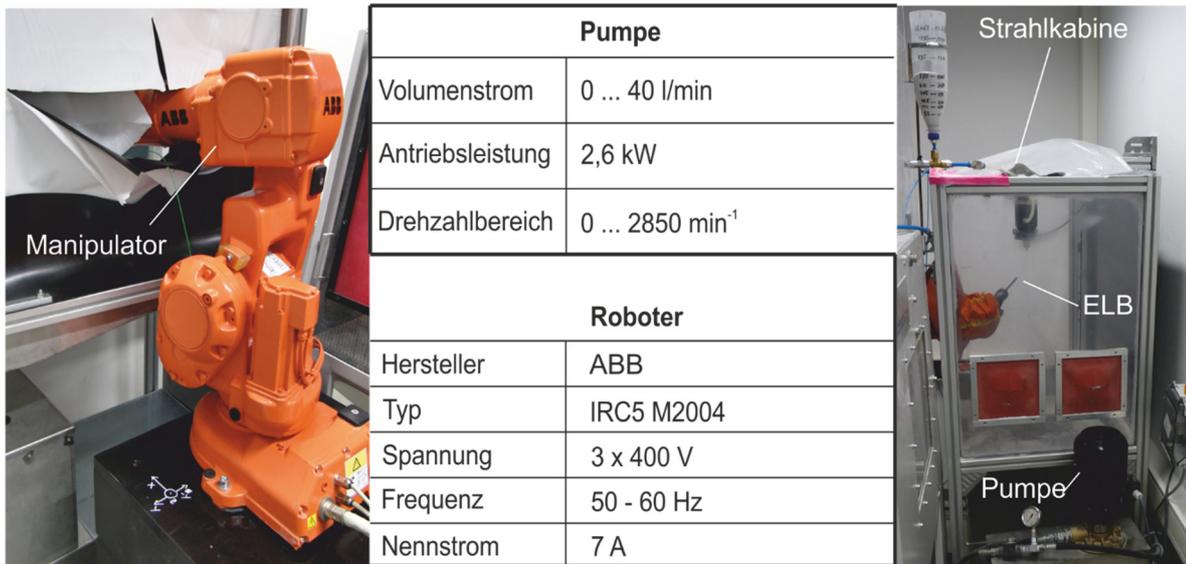


Abbildung 4.1.2.1: Versuchsstand Nassstrahlspanen mit technischen Daten

Bedingt durch den asymmetrischen Aufbau der eingesetzten Einlappentiefbohrwerkzeuge ist vor der Schneidkantenpräparation eine Bahnplanung des Roboters notwendig. Dies erfolgt auf Basis der Entwicklungen von *Aßmuth* [6]. Um eine gleichmäßige Schneidkantenverrundung an der Innen- als auch der Außenschneide der Einlappentiefbohrwerkzeuge zu gewährleisten muss diese Bahnplanung zunächst mit Hilfe eines Simulationsprogramms durchgeführt werden. Für diese Programmierarbeiten wird das Offline-Programmiersystem *FAMOS robotic v9* genutzt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Verfahrenswege des Manipulators geplant und mögliche Kollisionen mit dem Sensor oder der Düse frühzeitig erkannt werden können. Zur Implementierung der unterschiedlichen Werkzeugdurchmesser und Werkzeuglängen ist ein Import der CAD-Datensätze des Manipulators, der Strahldüse und der verwendeten Werkzeugtypen notwendig. Nach der Verknüpfung der einzelnen Komponenten erfolgt die Bahnplanung, wobei Bewegungsbahnen entlang der zu präparierenden Innen- und Außenschneide auszulegen sind. Um eine gleichmäßige Verrundung an beiden Schneidenbereichen zu ermöglichen, wird der Abstand zur Düse während des Prozesses auf $h_d = 10 \text{ mm}$ eingestellt. Die flexible Ausrichtung des Werkzeuges mittels des Manipulators bietet eine hohe Vielfalt an verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten der Schneidkantenverkipfung. In diesem Fall erfolgte eine Einstellung des Formfaktors K auf $K \approx 1$. Die grafische Darstellung der Simulationsoberfläche ist in Abbildung 4.1.2.2 ersichtlich. Diese Abbildung zeigt eine beispielhafte Bearbeitung der Innen- sowie der Außenschneide. Ergänzend ist die zuvor notwendige Schneidkantendetektion mit Hilfe des Lasersensors dargestellt. Durch den von *Aßmuth* [6] entwickelten Prozess zur Schneidkantendetektion mittels eines Lichtschrankensensors war es möglich, die Orientierung der Schneidkante eindeutig zu ermitteln und die Prozesssicherheit des Präparationsprozesses zu erhöhen.

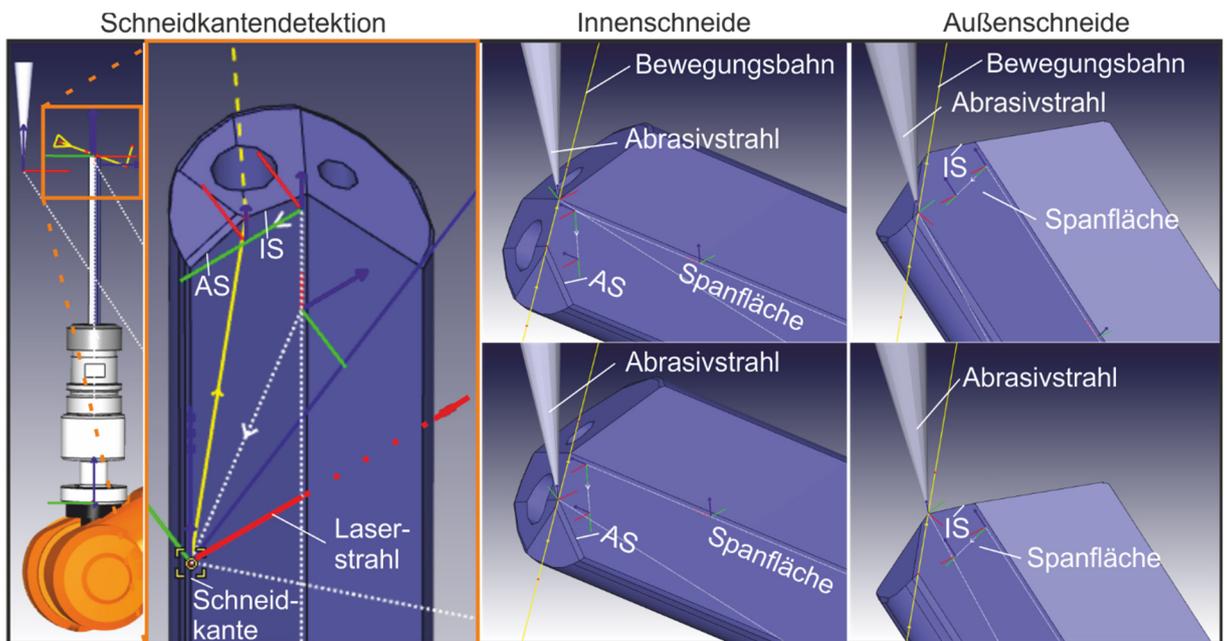


Abbildung 4.1.2.2: Grafische Darstellung der Bahnplanung des Nussstrahlprozesses mit FAMOS robotic v9

Neben der Bahnprogrammierung und -planung lassen sich innerhalb der eingesetzten Simulationssoftware auch die Strahlvorschubgeschwindigkeit $v_{f, \text{st}}$ in die Robotersteuerung integrieren. Aufbauend auf bereits gewonnenen Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen ist diese auf $v_{f, \text{st}} = 2 \text{ mm/s}$ festgelegt. Der Strahlruck p_{st} dieser Anlage wurde auf $p_{\text{st}} = 10 \text{ bar}$ eingestellt. Somit war es möglich, eine an den jeweiligen Werkzeugdurchmesser angepasste Schneidkantenverrundung zu realisieren. Es ist zu erwähnen, dass eine hohe Verfahrgeschwindigkeit einer Bearbeitung mit weniger Überläufen aufgrund der Gefahr des Verstopfens der Strahldüse vorgezogen wird. Der Strahlprozess ist in Abbildung 4.1.2.3 dargestellt. Hierbei wird der Strahlaustritt exemplarisch gezeigt. Diese Abbildung verdeutlicht neben der bereits aufgezeigten Prozesskinematik, dass die Bahnplanung mit der fixierten Strahldüse unterhalb des Düsenaustritts erfolgt. Es ist weiterhin gut zu erkennen, dass das zu präparierende Werkzeug mit einem definierten Strahlwinkel α_{st} unter der Düse orientiert sein muss, um eine symmetrische Schneidkantenverrippung zu erreichen. Des Weiteren fällt auf, dass zur Präparation der Innen- und Außenschneide zwei komplett unterschiedliche Orientierungen des Werkzeuges notwendig sind. Somit lässt sich der Aufwand der Programmierung als hoch ansetzen, da zur Erstellung der Programmierung ein ausreichendes Prozess- und Programmierungswissen vorliegen muss. Zusätzlich zeigen die beschriebenen Problemstellungen und Anforderungen, dass dieser Prozess für eine industrielle Umsetzung in dieser Form als nur bedingt geeignet einzustufen ist. Begründung hierfür sind die geringe Prozesssicherheit aufgrund sich zu setzender Strahldüsen und die vergleichsweise hohen Durchlaufzeiten sowie der hohe Programmieraufwand.

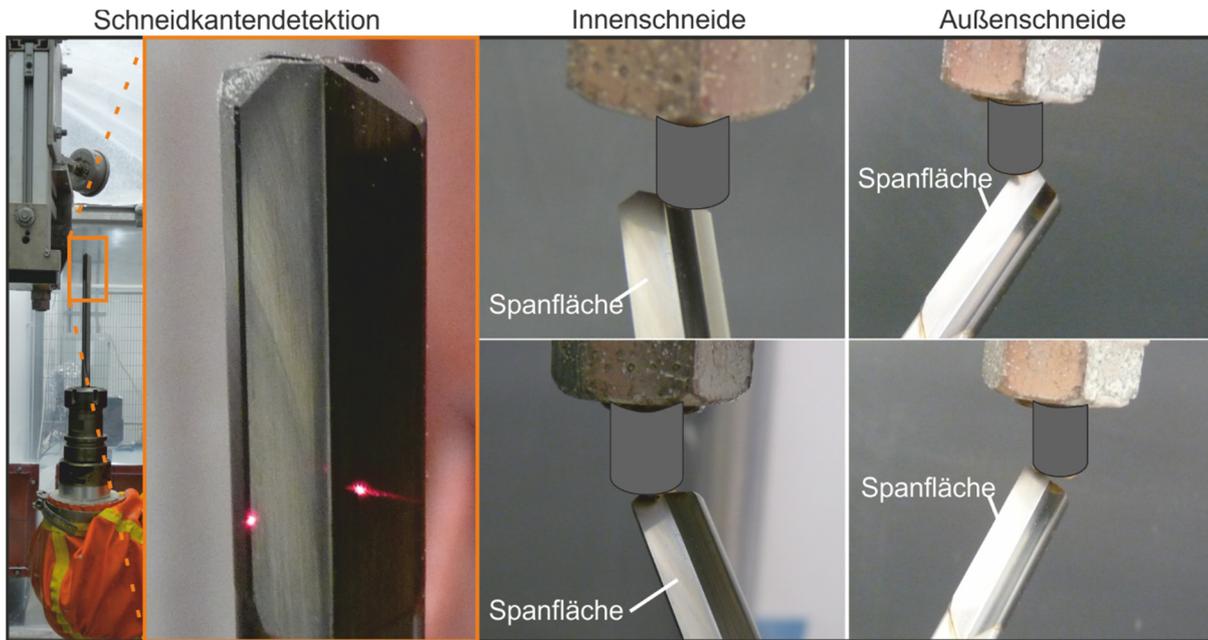
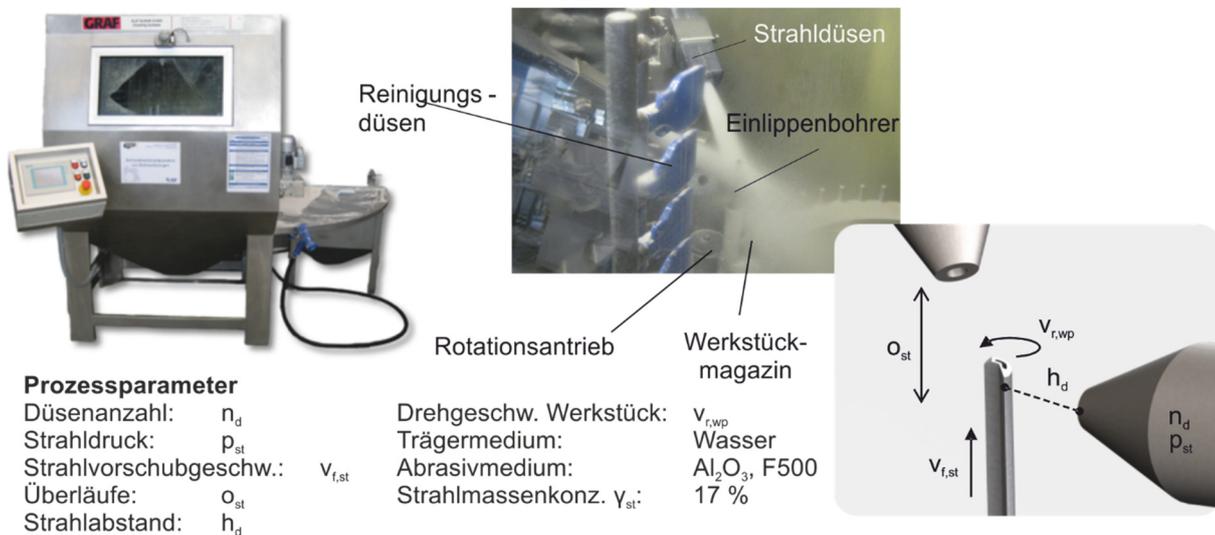


Abbildung 4.1.2.3: Darstellung der Bahnplanung des Nussstrahlprozesses innerhalb der Versuchsmaschine

Zur Untersuchung der Beeinflussung der peripheren Oberflächentopographien im Rahmen einer Schichtvorbehandlung wird die Nassdruckstrahlanlage *Graf Compact II Plus Automatik* der Fa. Graf-Technik GmbH eingesetzt, siehe Abbildung 4.1.2.4. Die Anlage arbeitet auf Grundlage des Druckstrahlprinzips, wobei das vermengte Wasser-Abrasiv-Gemisch unter Verwendung von Druckluft beschleunigt wird. Der Abrasivstrahl wird dabei durch zwei Strahldüsen, Strahldüsendurchmesser $d_d = 10,2 \text{ mm}$, auf das Werkstück, hier einem Einlippentiefbohrwerkzeug, ausgerichtet und fokussiert. Die Anlage bietet die Option, dass gleichzeitig bis zu vier Strahldüsen zum Einsatz kommen. Durch den simplen Aufbau, lassen sich die Düsen je nach Anwendungsfall und erforderlichen Spezifikationen des Präparationsprozesses hinsichtlich der Ausrichtung und des Strahlabstandes einstellen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde auf zwei der vier möglichen Strahldüsen zurückgegriffen. Als Abrasivmedium wurde weißes Edelkorund, Al_2O_3 , mit einer Nennkorngöße von $d_k = 5 \dots 25 \text{ }\mu\text{m}$, FEPA-Klassifizierung F500, eingesetzt. Das Wasser-Abrasiv-Gemisch lag mit einem Massenanteil des Abrasivmediums im Trägermedium Wasser von $\gamma_{st} \approx 17 \text{ \%}$ vor.



Prozessparameter

Düsenanzahl:	n_d	Drehgeschw. Werkstück:	$v_{r,wp}$
Strahlendruck:	p_{st}	Trägermedium:	Wasser
Strahlvorschubgeschw.:	$v_{f,st}$	Abrasivmedium:	Al_2O_3 , F500
Überläufe:	o_{st}	Strahlmassenkonz. γ_{st} :	17 %
Strahlabstand:	h_d		

Abbildung 4.1.2.4: Nassdruckstrahlanlage Graf Compact II Plus Automatik

Die Nassdruckstrahlanlage ist für eine automatisierte, flächige Präparation von Werkstücken, wie beispielsweise von Einlippentiefbohrwerkzeugen, mit dem Anwendungszweck der Schichtvor- und Schichtnachbehandlung entwickelt. Über ein Werkstückmagazin werden die Werkstücke der Düsenbatterie einzeln zugeführt. In der Folge wird das Werkstück durch einen Rotationsantrieb unter dem Abrasivstrahl gedreht und die Düsenbatterie gleichzeitig linear oszillierend entlang der Werkstückoberfläche verfahren. Die Kinematik des Strahlprozesses ist in Abbildung 4.1.2.4 verdeutlicht. Das Prozessergebnis kann durch verschiedene Stellparameter variiert und optimiert werden. Neben der Auswahl der Anzahl an Strahldüsen n_d , zählen dazu bspw. die Rotationsgeschwindigkeit des Werkstücks $v_{r,wp}$ sowie die Strahlvorschubgeschwindigkeit $v_{f,st}$. Durch die Anzahl der Überläufe o_{st} definiert sich die Oszillationsbewegung der Düsenbatterie bei vorgegebener Bewegungslänge und Strahlvorschubgeschwindigkeit. Der Abstand der Düsen zum Werkstück h_d bleibt während des Strahlvorgangs konstant. Als maßgebende Stellparameter lassen sich die Anzahl der Überläufe als auch der gewählte Strahldruck nennen.

4.2. Versuchswerkzeuge sowie Werkzeugbeschichtung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen sind Einlippentiefbohrwerkzeuge der Fa. TBT Tiefbohrtechnik GmbH + Co. zum Einsatz gekommen. Aufgrund der höheren industriellen Relevanz kommen vorwiegend Vollhartmetallwerkzeuge (VHM-Werkzeuge) zum Einsatz. Um weniger komplexe Prozessaufbauten verwenden zu können und die beschriebene Verbiegung der Proben durch das nachfolgende Präparationsverfahren so gering wie möglich zu halten, erfolgen die grundlegenden Untersuchungen vermehrt an kurzen VHM-Werkzeugen. Die aus diesen Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse sollen im Anschluss auf Werkzeuge mit einem erhöhten l/d -Verhältnis übertragen und validiert werden. Alle Werkzeuge haben gemein, dass es sich um die gleiche Hartmetallsorte, CTS 18D, handelt. Die durch den Werkzeugdurchmesser festgelegten und somit variierenden Spitzenanschliffe der Werkzeuge haben keinerlei Relevanz für die Präparationsversuche und können daher vernachlässigt werden.

Das verwendete Hartmetall CTS18D der Fa. Ceratizit entspricht gemäß Herstellerangaben einer speziellen Feinstkornsorte, die für die Hochleistungszerspanung von Stahl sowie nichtrostendem Stahl geeignet ist [61]. Die spezifischen Werkstoffkennwerte des Hartmetalls sowie die geometrischen Einstellgrößen der Werkzeuge können Abbildung 4.2.1 entnommen werden.

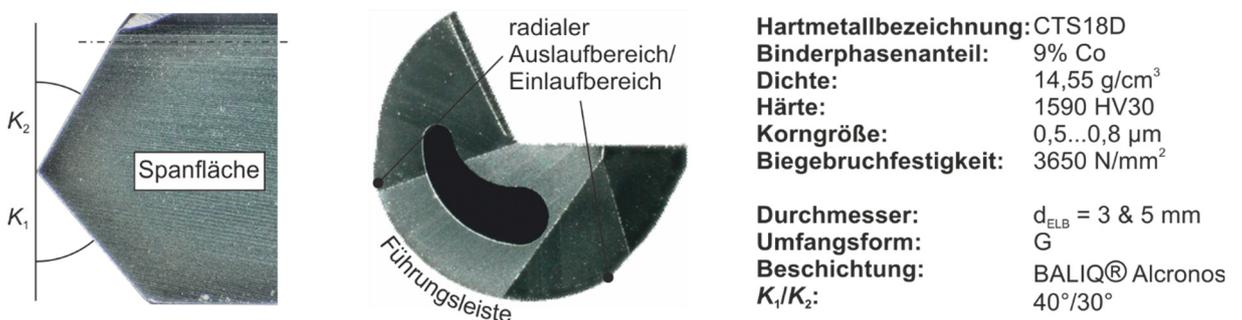


Abbildung 4.2.1: Exemplarische Darstellung eines Einlippentiefbohrwerkzeuges mit $d = 3 \text{ mm}$

Die Einlippentiefbohrwerkzeuge besitzen einen Standardanschiff, die Einstellwinkel an Außen- und Innenschneide werden auf $\kappa_1 = 40^\circ$ und $\kappa_2 = 30^\circ$ eingestellt. Die Umfangsform entspricht der Umfangsform G gemäß VDI-Richtlinie 3208, sodass die Werkzeuge über eine breite Führungseiste verfügen, die im radialen Ein- und Auslaufbereich Öltaschen aufweist. Zur Gewährleistung des Spanabtransports und der Kühlung der Wirkstellen verfügen die Werkzeuge über einen nierenförmigen Kühlkanal [193].

Nach der in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Präparation der Werkzeuge erfolgte eine Beschichtung mit zwei verschiedenen PVD-Verfahren. Die Eigenschaften der beiden Beschichtungen sowie die jeweiligen Spezifikationen sind in Tabelle 1 dargestellt. Beide verwendeten Beschichtungen wurden durch die der *Fa. Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH* durchgeführt. Auf eine standardmäßige Schichtvor- und -nachbehandlung der Versuchswerkzeuge beim Beschichtungsunternehmen wurde verzichtet, um eine Beeinflussung der in dieser Arbeit untersuchten Optimierungsmaßnahmen zu vermeiden. Die beschriebenen Beschichtungen kommen zum Einsatz, um insbesondere nach aktuellem Stand der Technik eingesetzte Beschichtungen zu berücksichtigen und die Effektivität der Schichtnachbehandlung zu bewerten. Einsatzversuche mit diesen Werkzeugen und dieser Beschichtung werden hingegen nicht ausführlich betrachtet, sondern nur exemplarisch aufgezeigt, um eine Gegenüberstellung und das Potential der optimierten Prozesskette abzuleiten. Die Einlippentiefbohrwerkzeuge mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 3$ und 5 mm werden mit einer AlCrN-Beschichtung versehen, die den Firmennamen BALIQ® Alcronos trägt. Ursächlich für die Wahl dieser Beschichtung, welche über die *S3p®-Technologie* mit einer Schichtdicke von $d_c = 1...4 \mu\text{m}$ auf den Werkzeugen abgeschieden wurde, ist die hohe Schichthaftung und die nahezu Defektfreie Applizierung der Hartstoffschicht. Die AlCrN-basierte Hartstoffschicht zeichnet sich gemäß Herstellerangaben durch eine höchstmögliche Glattheit bei gleichzeitig hoher Defektfreiheit und hoher Haftfestigkeit aus. Insbesondere für den Einsatz bei hohen Temperaturen soll die Beschichtung aufgrund der Hitzebeständigkeit eine hervorragende Verschleißbeständigkeit aufweisen. Die exemplarisch untersuchten Werkzeuge mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 10$ mm sind mit einer TiAlN-Beschichtung versehen. Auch bei diesen Werkzeugen wurde auf eine mechanische Schichtvor- und -nachbehandlung beim Beschichter verzichtet, um eine nachträgliche Beeinflussung der Oberflächentopographien und der Schneidkantenpräparation zu vermeiden.

Tabelle 1: Eigenschaften der eingesetzten Beschichtungen

Bezeichnung	Bestandteile	Technologie	Schichtdicke d_s	Mikrohärte	Hitzebeständigkeit
BALIQ® Alcronos	AlCrN	S3p®	1...4 μm	3200 HV30	< 1000°C
BALINIT® Latuma	TiAlN	PVD-Arc	2...4 μm	3500 HV30	< 1000°C

4.3. Versuchsmaschine zur Tiefbohrbearbeitung

Die Einsatzversuche der Werkzeuge mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 3$ und 5 mm erfolgen auf einer Tiefbohrmaschine des Typs TBT ML 200, die mit einer Hochfrequenzspindel ausgestattet ist und in horizontaler Bauweise ausgeführt ist, siehe Abbildung 4.3.1. Diese Maschine bietet die Möglichkeiten sowohl mit einer Pilotbohrung als auch einer Bohrbuchse zur Führung des Werkzeuges zu arbeiten.



Technische Daten

Spindelleistung: $P_s = 4 \text{ kW}$

Spindeldrehzahl: $n_{\max} < 36.000 \text{ min}^{-1}$

Durchmesser: $d = 0,5 \dots 6 \text{ mm}$

KSS-Druck: $p_{\text{KSS,max}} = 230 \text{ bar}$

Eilgang: $v_{r,\max} = 15 \text{ m/min}$

Steuerung: SINUMERIK 840D

Tiefbohröl: Motorex Ortho NF-X

Viskosität: $\nu = 10 \text{ mm}^2/\text{s} (40^\circ\text{C})$

Abbildung 4.3.1: Versuchsaufbau und Spezifikationen der Tiefbohrmaschine

4.4. Werkstoffe

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgen Tiefbohrversuche von verschiedenen Vergütungsstählen, einen 42CrMo4+QT und einen 50CrMo4+QT. Beide Stähle lassen sich sowohl in der Automobilindustrie als auch im allgemeinen Maschinenbau als häufig verwendete Werkstoffe finden. Hauptsächliche Anwendungsbereiche des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT sind Bauteile des Antriebstranges von Automobilen, wie bspw. Pleuel, Nockenwellen oder Rails für Commonrailssystemen. Der Vergütungsstahl 50CrMo4 wird bei hochbelasteten Motorenkomponenten eingesetzt. Hierbei ist vornehmlich der Dieselinjektor bei Commonrailssystemen zu nennen. Beide verwendeten Materialien liegen vorwiegend in gezogener Form vor. Unterschiede ergeben sich lediglich dadurch, dass beim 42CrMo4 ein rechteckiger Stab mit einer Kantenlänge von $l_k = 120 \times 200 \text{ mm}$ und beim 50CrMo4 Rundproben mit einem Durchmesser $d_{\text{rund}} = 29,35 \text{ mm}$ vorlagen. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe sowie dessen charakteristische Werkstoffeigenschaften können Tabelle 2 entnommen werden. Der Wärmebehandlungsprozess erfolgt beim 50CrMo4 über eine induktive Einzelstabvergütung, um eine über den Querschnitt erhöhte Homogenität der Werkstoffeigenschaften zu erzeugen. Das vergütete Gefüge wird gemäß Norm als ein Anlassgefüge aus Martensit und einem Bainitanteil von $m_{\text{Bainit}} < 10 \%$ charakterisiert [79].

Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften der untersuchten Vergütungsstähle

Chemische Zusammensetzung 50CrMo4 [Ma.-%]		Werkstoffeigenschaften 50CrMo4+QT	
C: 0,44...0,56	Mo: 0,12...0,33	Dichte:	7,85 g/cm ³
Si: <0,43	Cr: 0,85...1,25	Dehngrenze $R_{p0,2}$:	>820 MPa
Mn: 0,46...0,84	Ni: <0,3	Zugfestigkeit R_m:	1110...1235 Mpa
P: <0,03	Cu: <0,3	Bruchdehnung A:	>6%
S: 0,005...0,019	Sn: <0,03	Härte:	35...39 HRC
Al: 0,12...0,33	O: <0,002	Wärmebehandlung:	Vergütet
Chemische Zusammensetzung 42CrMo4 [Ma.-%]		Werkstoffeigenschaften 42CrMo4+QT	
C: 0,38...0,45	Mo: 0,15...0,30	Dichte:	7,72 g/cm ³
Si: <0,40	Cr: 0,9...1,2	Dehngrenze $R_{p0,2}$:	>550 MPa
Mn: 0,60...0,90	Ni: <0,3	Zugfestigkeit R_m:	750...900 Mpa
P: <0,025	Cu: <0,3	Bruchdehnung A:	>14%
S: max. 0,035	Sn: <0,03	Härte:	29...35 HRC
	O: <0,002	Wärmebehandlung:	Vergütet

4.5. Mess- und Analysetechnik

Zur Beschreibung und Analyse der Beeinflussung der Umfangsgestalt, der Topographie sowie der Schneidkantenmikrogestalt der Einlippentiefbohrwerkzeuge durch das Polierschleifen, der Schleifscheibentopographie sowie der verwendeten Schneidkantenpräparationsverfahren sind sowohl taktile als auch optische Messverfahren zum Einsatz gekommen. Zur Bewertung und Charakterisierung des Einsatzverhaltens der unterschiedlichen Einlippentiefbohrwerkzeuge erfolgten messtechnische Aufzeichnungen und licht- sowie rasterelektronenmikroskopische Auswertungen. Die Beurteilung der Spanbildung in verschiedenen Präparations- und Verschleißzuständen erfolgte durch eine In-situ-Hochgeschwindigkeitsanalyse. Um eine detaillierte Erläuterung der Analysemethoden geben zu können, sind diese nach unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkt gegliedert.

4.5.1. Analyse der erzeugten Topographien der Tiefbohrwerkzeuge und Polierschleifscheiben

Oberflächentopographien von Funktionsflächen lassen sich wie in Kapitel 0 beschrieben, durch verschiedene Verfahren und Auswertemethoden beurteilen. Die Auswertung der Topographie der Einlippentiefbohrwerkzeuge erfolgt auf Grundlage der Messdaten, die durch ein konfokales Weißlichtmikroskop der Fa. *NanoFocus* vom Typ $\mu Surf$ gewonnen werden. Hierfür sind die Funktionsflächen der Werkzeuge zu jedem Präparationsschritt vermessen und mit der Software $\mu soft$ Analysis von *DigitalSurf* ausgewertet worden. Um eine ausreichende Genauigkeit bei der Aufnahme der Messwerte zu gewährleisten wurde bei der Vermessung der Oberflächentopographien ein Objektiv mit 50-facher Vergrößerung verwendet. Die Gestalt der untersuchten Einlippentiefbohrwerkzeuge bietet somit trotz des geringen Arbeitsabstandes die Möglichkeit, sowohl die Spanfläche als auch die Führungsleisten der Werkzeuge durch dieses Messverfahren zu untersuchen. Zur Sicherstellung einer ausreichenden und übergreifenden Vergleichbarkeit der untersuchten Werkzeuge für alle Werkzeugdurchmesser, wurden die Messbereiche bereits frühzeitig festgelegt. Zur Darstellung der verwendeten Messbereiche an den verschiedenen Werkzeugen dient die folgende Abbildung 4.5.1.1. Der Messbereich der Untersuchungen befindet sich auf der Führungsleiste unmittelbar neben dem axialen Einlaufbereich.

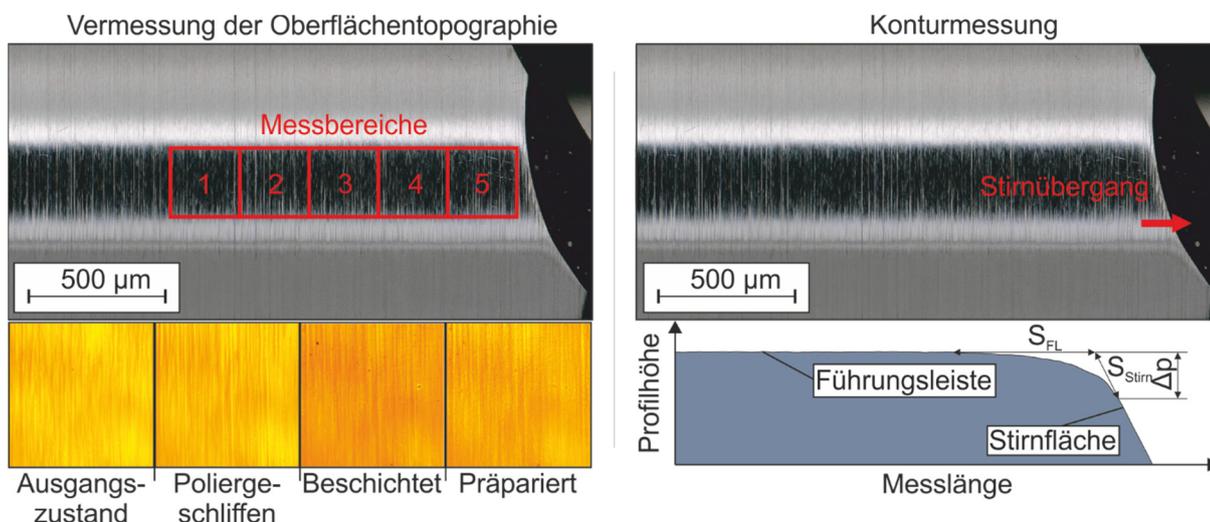


Abbildung 4.5.1.1: Darstellung der Messbereiche auf der Führungsleiste und des Stirnübergangs

Aus diesem Bereich, der einem Messfeld von $A_{M,ges} = 0,3 \text{ mm} \times 1,4 \text{ mm}$ entspricht, sind fünf voneinander unabhängige Oberflächen mit einer Abmessung von $A_M = 0,25 \text{ mm} \times 0,25 \text{ mm}$ extrahiert worden. Eine Einschränkung der Messfeldgröße ist notwendig, um eine normgerechte Messung der Oberfläche zu ermöglichen. Des Weiteren dient die Aufteilung in fünf un-

terschiedliche Messfelder einer statistischen Absicherung der Auswertung der Flächenparameter S_a sowie S_{10z} über den gesamten Messbereich. S_a entspricht hierbei der mittleren arithmetischen Durchschnittshöhe der Oberfläche während S_{10z} der Summe des Mittelwerts der fünf höchsten Spitzen und der fünf tiefsten Senken innerhalb des Auswertebereichs entspricht [78]. Zur Beschreibung der Gestaltoptimierung des Umfangs werden die Profilschnitte orthogonal zur Rotationsachse über den Messbereich gelegt und somit die Auswertung der Beeinflussung des Übergangs zwischen der Führungsleiste und der Öltasche möglich. Aufgrund der zum Teil polierten und somit reflektierenden axialen Stirnfasenübergänge war eine Auswertung durch optische Messverfahren nicht oder nur eingeschränkt möglich. Daher erfolgte die in Abbildung 4.5.1.1 dargestellte taktile Konturmessung auf einem Messgerät des Typs *MarSurf XCR 20* der *Fa. Mahr GmbH*. Der aufgenommene Messbereich umfasst eine Messlänge von $l_M = 0,25 \dots 2,5$ mm und wird mit Hilfe der Software *µsoft Analysis* ausgewertet. Die Variation des Messbereichs ist durch die unterschiedlichen Verrundungsgrößen der Stirnübergänge bedingt. Zur Charakterisierung von Schneidkanten hat sich die Formfaktormethode nach *Denkena* als zielführend erwiesen [69]. Daher erfolgte eine Adaptierung dieser Messmethodik in Analogie zur Schneidkantencharakterisierung zur Bestimmung der Form des axialen Stirnfasenübergangs im Vergleich zur Ausgangsgestalt. Zur Beschreibung des axialen Stirnfasenübergangs wird die mittlere Kantenverrundung \bar{S}_{Stirn} als arithmetischer Mittelwert der Tangenten an die Kontur der Führungsleiste S_{FL} sowie des Stirnanschliffes S_{St} eingeführt. Neben diesen Punkten wird zusätzlich der Quotient dieser beiden Tangenten in Analogie zum Formfaktormodell als K_{Stirn} eingeführt, womit der zugehörige Formfaktor ermittelt werden kann. Des Weiteren gibt Δp die maximale Abnahme der Profilhöhe an, siehe Abbildung 4.5.1.1. Ergänzend zur Analyse der Oberflächentopographie und Werkzeuggestalt erfolgte eine Charakterisierung der Polierschleifscheibentopographie. Diese Auswertungen und Untersuchungen werden mittels des Messgeräts *InfiniteFocus G5* der *Fa. Alicona Imaging GmbH* durchgeführt. Dieses auf dem Prinzip der Autofokusvariation basierende Messgerät eignet sich für die quantitative Beschreibung von Oberflächentopographien bei großflächigeren Messungen die eine ausreichende Oberflächenrauheit und ein geringes Reflexionsverhalten aufweisen.

Neben den quantitativen Messungen der Oberflächentopographie durch die oben beschriebenen Verfahren, wurden zur qualitativen Beurteilung der präparierten Oberflächen Analysen durch ein Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt. Das verwendete REM ist vom Hersteller *TESCAN* und wird unter der Typenbezeichnung *MIRA3 XM* geführt.

Im Rahmen der Schichtnachbehandlung der untersuchten Versuchswerkzeuge hat sich herausgestellt, dass es nach aktuellem Stand der Technik keinerlei standardisierte und vereinheitlichte Auswertemethodik zur Beschreibung der Effektivität von Schichtnachbehandlungsverfahren in Bezug auf die schichtnachbehandelten Funktionsflächen besteht. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Ansatz erarbeitet, der eine quantitative Beurteilung von Beschichtungen ermöglicht. Hierbei wird mithilfe der Bildanalysesoftware *ImageJ* durch das Threshold-Verfahren rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen so modifiziert, dass Schichtinhomogenitäten nach dem Beschichtungsprozess sowie entfernte Schichtinhomogenitäten und dadurch resultierende Ausbrüche nach der Schichtnachbehandlung identifiziert und bestimmt werden können. Dies bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Oberflächeninhomogenitäten anhand der Größe oder Umfangsform zu erkennen. Mit dieser Methode wird die Bewertung der Effektivität verschiedener Nachbehandlungsprozesse durch Bestimmung der Anzahl der Oberflächeninhomogenitäten oder der Fehlerquote (DR) ermöglicht. Diese bezogene Größe gibt die Anzahl der erkannten Fehler pro mm^2 an. Ein weiterer Bewertungsfaktor ist der Defektflächen-Quotient (DAR), der das prozentuale Verhältnis der betroffenen Fläche durch die Anzahl der Oberflächeninhomogenitäten beschreibt. Für jede Probe werden mehrere Bereiche

im beschichteten und nachbehandelten Zustand untersucht und verglichen, um eine statistische Absicherung zu ermöglichen. Zur abschließenden Evaluierung der Beeinflussung der Schichtnachbehandlung durch lokales Polierschleifen erfolgen Querschliffe der beschichteten Werkzeuge. Abbildung 4.5.1.2 zeigt repräsentative Ergebnisse eines beschichteten und schichtnachbehandelten Werkzeugs.

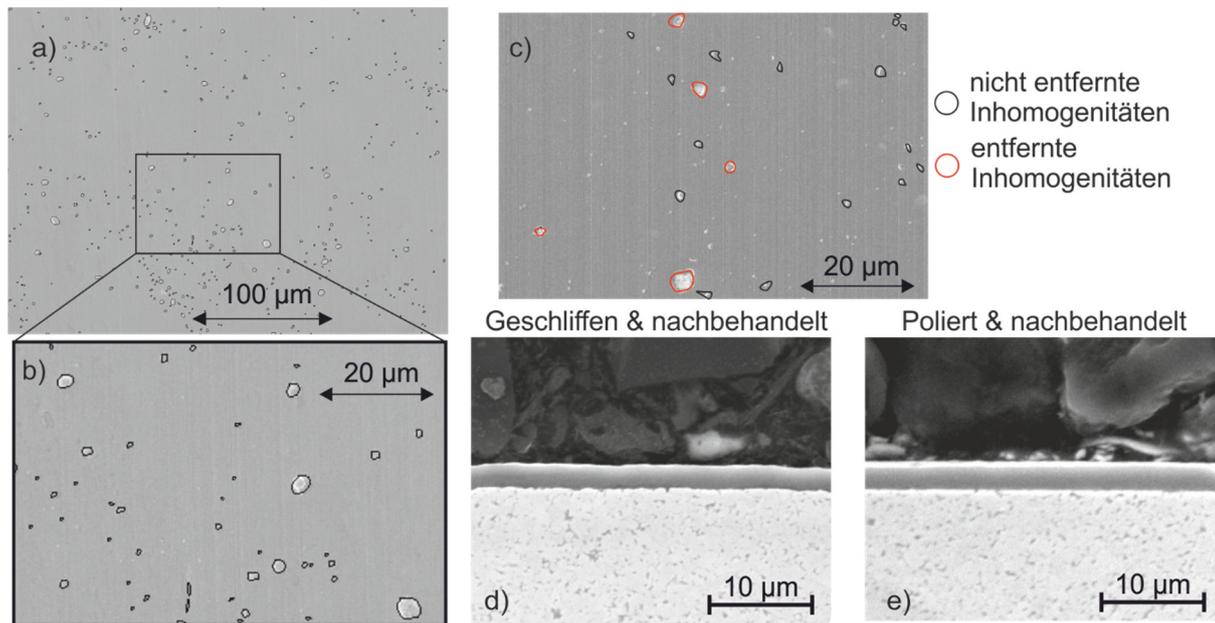


Abbildung 4.5.1.2: Darstellung der Auswertung von Schichtinhomogenitäten a) beschichtet (Übersicht) b) beschichtet (Detail) c) schichtnachbehandelt d) & e) Querschliffe präparierter Proben

4.5.2. Analyse und Auswertung der Schneidkantenmikrogestalt

Die Analyse der Schneidkantenmikrogestalt erfolgte nach jedem einzelnen Bearbeitungsschritt. Hierzu zählen der Neuzustand nach dem Schleifen der Werkzeuge, die Schneidkantenverrundung nach der Präparation durch die unterschiedlichen Präparationsverfahren sowie die Beeinflussung der Schneidkantenverrundung durch das abschließende Beschichten der Tiefbohrwerkzeuge. Zur Beschreibung der Schneidkantenmikrogestalt kam das optische 3D-Messsystem der Fa. LMI vom Typ *MikroCAD plus* zum Einsatz. Dieses Messgerät misst die Schneidkantengestalt auf Basis der Streifenlichtprojektion. Hierbei wird ein Streifenmuster auf die Schneidkante projiziert, dessen Beugungsprofil von einer senkrecht zur Schneidkante ausgerichteten Kamera erfasst wird. Das Messsystem ist aufgrund seiner hohen Auflösung insbesondere für die Messung von Schneidkanten kleiner Werkzeuge geeignet. Die laterale Auflösung des verwendeten Messsystems beträgt $d_{lat} = 0,07 \mu\text{m}$ und die horizontale Auflösung $d_{hor} = 0,7 \mu\text{m}$. Somit kann sichergestellt werden, dass die Beschreibung der Schneidkantengestalt hinreichend genau ist. Bei der Beschreibung der Schneidkantenschartigkeit entlang der Schneidkante, führt der vergleichsweise hohe Messpunktastand jedoch nur bei ausreichenden Messbereichsbreiten zu verlässlichen Ergebnissen. Bei diesen Messungen werden bei jedem Werkzeug die gleichen Bereiche auf der Innen- und Außenschneide ausgewählt und durch ein Messprogramm innerhalb der Software *ODSCAD* ausgewertet. Durch die Verwendung des gleichen Algorithmus für die jeweiligen Durchmesservarianten kann eine ausreichende Messsicherheit gewährleistet werden. Messungengenauigkeiten ergeben sich hingegen bei der Vermessung von teilbeschichteten Werkzeugen. Hierbei ist insbesondere das unterschiedliche Reflektionsverhalten als mögliche Fehlerquelle zu nennen, da eine Vermeidung der Reflektion an der nachgeschliffenen Stirnfläche zu einer Unterbelichtung der beschichteten Führungsleiste führt und somit keine Oberflächeninformationen bestimmt werden können und somit keine Schneidkantenauswertung möglich ist. Demgegenüber kommt es bei ausreichender Belichtung der beschichteten Fläche zu einer Überbelichtung der Schneidkante und

der nachgeschliffenen Fläche, wodurch sich Messfehler bei der Bestimmung der Schartigkeit, der Schneidkantenverrundung sowie die korrekten Positionierung der Ablösepunkte der anliegenden Tangenten ergeben. Neben der Analyse der beiden Schneidkanten erfolgten zusätzlich Aufnahmen im Bereich der Schneidenecke. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass zum einen eine Bearbeitung der Schneidenecke infolge des Polierschleifprozesses ausgeschlossen ist und zum anderen zusätzliche Informationen über das Einsatzverhalten der auch an den exponierten Schneidkanten bearbeiteten Werkzeugen zu erhalten. Die Bewertung der Schneidkantenverrundung auf Basis der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Formfaktormethode nach *Denkena* [69], welche als Basis der Untersuchungen Verwendung findet.

4.6. Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen beim Tiefbohren

Im Rahmen der Einsatzversuche werden bei unterschiedlichen Werkzeugdurchmessern unterschiedliche Kraftmesssysteme eingesetzt. Für die Untersuchungen zur Bearbeitung des 42CrMo4 mit dem Werkzeugdurchmesser von $d_{ELB} = 10$ mm erfolgt die Aufnahme der mechanischen Werkzeugbelastung durch ein piezoelektrisches Rotationsdynamometer, Typ 9125A, der Fa. *Kistler*. Bei diesem System erfolgt die Ladungsverstärkung innerhalb des Dynamometers und das Messsignal wird mit einer Abtastfrequenz $f_{Ab} = 10\,000$ Hz aufgenommen. Somit kann eine ausreichende Absicherung der Ergebnisse in Bezug auf die eingesetzten Drehzahlen gewährleistet werden. Die Aufnahme der übermittelten Daten erfolgt nach der Umwandlung des Signals durch eine Messkarte, *NI PCI-4452* der Fa. *National Instruments*, durch die Aufnahmesoftware *LabView* der Fa. *National Instruments*.

Für die Versuche bei der Zerspanung des 50CrMo4 mit dem Werkzeugdurchmesser $d = 5$ mm erfolgt die Aufnahme der mechanischen Werkzeugbelastungen durch ein Vier-Komponenten-Dynamometer der Fa. *Kistler* vom Typ 9272. Das Signal wird mit einem Kistler-Ladungsverstärker vom Typ 5011 verstärkt und mit einer Messkarte vom Typ *Pxi-6120* (mit einem *BNC-2110* Anschlussblock) übertragen. Als Messsoftware wird auch in diesem Fall *LabView* von *National Instruments* eingesetzt. Die Aufnahme der Daten erfolgt auch bei diesem Versuchsstand mit $f_{Ab} = 10\,000$ Hz. Der Probenhalter ist zentrisch und in gleicher Achse auf die Deckplatte des Dynamometers aufgeschraubt. In den Versuchen werden die Vorschubkraft F_z und das Bohrmoment M_B aufgezeichnet. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt für alle Versuche mithilfe der Software *Diadem* von *National Instruments*.

4.7. Analyse des Verschleißverhaltens

Die Auswertung und Analyse des Verschleißverhaltens der präparierten Werkzeuge erfolgt durch Standzeitversuche. Versuchsbegleitend werden in festgelegten Intervallen, welche sich nach dem Bohrweg l_f richten, die eingesetzten Werkzeuge hinsichtlich der Verschleißmarkenbreite durch lichtmikroskopische Aufnahmen analysiert. Zur Bewertung des Verschleißzustandes erfolgen Aufnahmen der Span- und Freifläche, der Schneidenecke als auch der Führungsleiste inklusive Stirnfasenübergang. Das hierfür verwendete Lichtmikroskop der Fa. *Keyence* mit der Typenbezeichnung *VHX-5000* funktioniert auf Basis der Autofokusvariation, wobei über eine motorisierte Z-Achse Schärfebereiche einzelner Aufnahmen miteinander verrechnet und zu einem Bild zusammengesetzt werden. Als Verschleißkriterium der folgenden Untersuchungen dient die mittlere Verschleißmarkenbreite VB und die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{max} . Die mittlere Verschleißmarkenbreite wird als Mittelwert von fünf Einzelmessungen über die beiden Schneidkanten berechnet. Die maximale Verschleißmarkenbreite repräsentiert den maximalen Wert der neun Einzelmessungen.

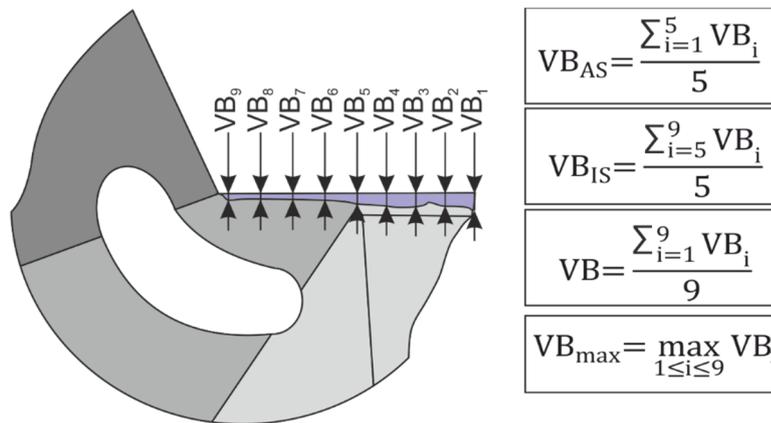


Abbildung 4.7.1: Beschreibung der Verschleißmarkenauswertung

Die Auswertung der Verschleißmarkenbreite erfolgt über die durch die *Fa. Keyence* bereitgestellte Software *VHX-5000* Kommunikationssoftware. Als Abbruchkriterium der durchgeführten Versuche dient entweder der definierte maximale Bohrweg oder das Erreichen des Verschleißkriteriums von $VB_{max} \approx 200 \mu\text{m}$. Zusätzlich wird als ergänzendes Verschleißkriterium bei den Werkzeugen mit $d_{ELB} = 3$ und 5 mm der Schneidenausbruch im Bereich der Innenschneide herangezogen. Unterschreitet die Schneidenlänge der Innen- und Außenschneide den Wert von $d_{ELB}/2$, so erfolgt auch in diesem Fall ein Abbruch der Einsatzversuche.

4.8. Analyse der Bohrungsgüte

Zur Beurteilung von Tiefbohrprozessen ist neben den bereits beschriebenen Verschleißkriterien in vielen Fällen die erzeugte Bohrungsgüte eines der maßgebenden Bewertungskriterien. Insbesondere aufgrund der hohen Oberflächengüte und dem geringen Mittenverlauf der Bohrungen werden Einlippentiefbohrprozesse eingesetzt. Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Bewertung der Bohrungsgüte auf Basis der Analyse der erzeugten Oberflächenqualität durch die gemittelte Rautiefe R_z und der maximalen Rautiefe R_{max} , des Bohrungsdurchmessers d , der Bohrungsrundheit T_k sowie des radialen Mittenverlaufs Δr der erzeugten Bohrung. Zur Messung der Oberflächenqualität werden an fünf Stellen innerhalb der Bohrungen bei vorher definierten Standzeitintervallen die Bohrungen vermessen. Die Rauheitsmessungen erfolgen auf einem stationären Rauheitsmessgerät, Typ *MahrSurf XR20*, der *Fa. Mahr GmbH*. Durch die nacheinander erfolgende Vermessung von fünf Einzelmessungen innerhalb einer Bohrung kann ein Bereich von $l_{M,tot} = 24$ mm abgedeckt werden. Somit wird sichergestellt, dass kurzfristige Prozessinstabilitäten erkannt werden können. Die Messlänge jeder Einzelmessstrecke beträgt $l_M = 4,8$ mm. Alle Messungen werden mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8$ mm ausgewertet. Die Vermessung des Mittenverlaufs Δr , der Bohrungsrundheit T_k und dem Bohrungsdurchmesser d erfolgt durch eine Koordinatenmessmaschine der *Fa. Zeiss*, Typenbezeichnung *Prismo 5*.

Ergänzend zu den taktilen Verfahren erfolgte eine exemplarische Analyse der Bohrungsrandzone. Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Randzonenbeeinflussung durch die Stirnfasenverrundung. So würde sich z.B. bei der Auswertung eine möglicherweise auftretende thermische Überbelastung der Bohrungsrandzone in Form von sich ausbildenden weißen Schichten darstellen. Zur Analyse werden die relevanten Proben mittig getrennt und durch eine metallographische Präparation als Querschliffe senkrecht zur Vorschubbewegung vorbereitet. Im Anschluss daran erfolgt eine Gefügeätzung, damit die Bohrungsrandzonen an einem Lichtmikroskop der *Fa. Zeiss* sowie im REM ausgewertet werden können.

4.9. Fotografische Analyse der Späne sowie In-situ-Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen der Spanbildung

Zur Analyse der Spanbildung in verschiedenen Präparations- und Verschleißzuständen kommen neben der Dokumentation der erzeugten Späne zusätzlich In-situ-Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen zum Einsatz. Die Aufnahmen der erzeugten Späne nach dem Einsatz erfolgt durch eine fotografische Aufnahme mittels einer Digitalkamera, *Panasonic DMC-FZ28*, und einer Auswertung durch die Software *GIMP*. Durch diese Maßnahmen können die Formen und Längen der erzeugten Späne dokumentiert und ausgewertet werden. Bei der In-situ-Analyse der Spanbildung wird auf den von *Kirschner* [121] entwickelten Versuchsstand zurückgegriffen. Die Spanbildung wird dabei durch eine Hochgeschwindigkeitsvideokamera, *Keyence VW-9000*, mit einer Bildwiederholrate $b = 6\,000$ fps bei stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück aufgenommen.

5. Optimierung der Schneidkantenmikrogestalt von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch verschiedene Präparationsverfahren

Bedingt durch erforderliche Verbesserungen der Fertigungsqualität und die damit verbundene stetige Steigerung der Leistungsanforderungen an Zerspanungsprozesse sind kontinuierliche Weiterentwicklungen und Anpassungsmaßnahmen bei Zerspanungswerkzeugen notwendig. Die hierfür erforderlichen, dem Werkzeugschleifen nachgeschalteten, Prozesse sind bereits in Kapitel 0 beschrieben. Für die Leistungssteigerung von Bohrwerkzeugen hat sich im vergangenen Jahrzehnt die Schneidkantenpräparation als probates Mittel erwiesen. Hierbei kommen unterschiedlichste Verfahren mit verschiedenen Wirkmechanismen zum Einsatz. Im folgenden Kapitel 0 erfolgt die Fokussierung auf die Untersuchung von zwei dieser Schneidkantenpräparationsprozesse. Zum einen wird das abrasive Nassstrahlspanen als etabliertes Verfahren zur Einstellung der Schneidkantenmikrogestalt und zum anderen eine Weiterentwicklung des Drill-polishverfahrens zur prozesskettennahen Anpassung der Schneidkantengestalt untersucht. Im Rahmen der unterschiedlichen Präparationsverfahren sollen sowohl die Möglichkeiten zur Schneidkantenpräparation von unbeschichteten Werkzeugen als auch von nachgeschliffenen, teilbeschichteten Werkzeugen entwickelt und analysiert werden. Ziel des Vergleichs der beiden Präparationsprozesse und der unterschiedlichen Beschichtungsvarianten, unbeschichtet und teilbeschichtet, ist ein Erkenntnisgewinn über die Möglichkeiten zur Entwicklung eines Schneidkantenpräparationsprozesses, der es sowohl erlaubt eine Schneidkantenverrundung an unbeschichteten als auch teilbeschichteten Werkzeugen durchzuführen. Ein weiteres Ziel ist es, einen prozesskettennahen Präparationsprozess von VHM-Werkzeugen zu entwickeln, um eine kosten- und zeiteffiziente Einstellung der Schneidkantenmikrogestalt zu gewährleisten.

5.1. Analyse der Schneidkantenpräparation an Einlippentiefbohrwerkzeugen durch das abrasive Nassstrahlspanen

Ausgangspunkt für die Präparation von Zerspanungswerkzeugen ist immer das geschliffene Werkzeug. In dem hier vorliegenden Fall werden Einlippentiefbohrwerkzeuge unterschiedlicher Durchmesser, vgl. Kapitel 4.2, betrachtet und die Einflüsse des robotergestützten, abrasiven Nassstrahlspanens auf die Schneidkantenmikrogestalt sowie die peripheren Funktionsflächen beschrieben und analysiert. Im Fokus der Schneidkantenpräparation steht die Leistungssteigerung und Erhöhung der Verschleißbeständigkeit durch eine Anpassung der Schneidkantenmikrogestalt in Form einer Verrundung gegenüber dem schlichscharfen Zustand. Die sich ausbildende Schneidkantenmikrogestalt nach dem Werkzeugschleifen ist exemplarisch in Abbildung 5.1.1 dargestellt und in Kapitel 2 beschrieben.

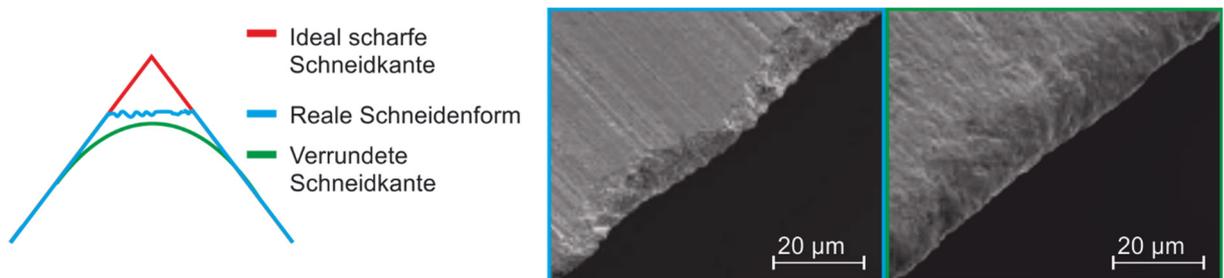


Abbildung 5.1.1: Motivation der Schneidkantenpräparation [70]

Bei der Schneidkantenpräparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen ergeben sich insbesondere aufgrund des großen l/d -Verhältnisses besondere Herausforderungen. Eine Problemstellung stellt z.B. das Werkzeughandling dar. Bei Werkzeugen mit hohen l/d -Verhältnissen sind bei der Verwendung des robotergestützten Nassstrahlspanverfahrens aufwendige Bahnpro-

grammierungen und große Arbeitsräume notwendig. Somit ergeben sich kostenintensive Nebenzeiten. Aufgrund der Nachgiebigkeit und dem daraus resultierenden Nachschwingen des Werkzeuges bei zu hohen Beschleunigungen während der Präparation können nicht die maximal möglichen Verfahrensgeschwindigkeiten des Vertikalknickarmroboters verwendet werden. Des Weiteren sind eine Durchbiegung und Abdrängung des Werkzeuges durch die resultierende Kraft festzustellen. Daher ist eine Anpassung des Strahlwinkels und der programmierten Bahn iterativ zu bestimmen. Durch eine solche iterative Anpassung des Strahlwinkels und der Bahnprogrammierung ist es möglich, auch bei unterschiedlichen l/d-Verhältnissen eine gleichmäßige Verrundung zu erzielen. Nachteilig zeigt sich hierbei allerdings, dass es aufgrund der iterativen Herangehensweise zu einer Produktion von Ausschuss kommt.

Die erreichten Schneidkantenverrundungen der eingesetzten Werkzeugvarianten sind in Abbildung 5.1.2 dargestellt. Bei allen Werkzeugen wurden abgesehen vom Strahlwinkel und der Bahnprogrammierung identische Präparationsparameter verwendet und lediglich die Anzahl der Überläufe variiert. So war es sowohl bei den Werkzeugen mit Durchmesser $d_{ELB} = 10$ mm als auch den Einlippentiefbohrwerkzeugen mit $d_{ELB} = 5$ mm möglich, die geforderten Schneidkantenverrundungen zu erreichen. Die Messwerte der Schneidkantenverrundung und des Formfaktors zeigen, dass dieser Präparationsprozess erfolgreich und reproduzierbar ist und sich sowohl an der Außen- und Innenschneide die geforderten Verrundungsgrößen von $\bar{S} = 13 \mu\text{m}$ vor dem Beschichten bei einer Schneidkantenverkippung $K = 1,0$ einstellen lässt. Zusätzlich zeigen die Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops, dass es lediglich zu einer geringfügigen Beeinflussung der Spanfläche kommt. Diese Beeinflussung ist durch das über die Spanfläche ablaufende Wasser-Abrasiv-Gemisch sowie den im Vergleich zum Werkzeugdurchmesser deutlich größeren Strahldurchmesser zu erklären.

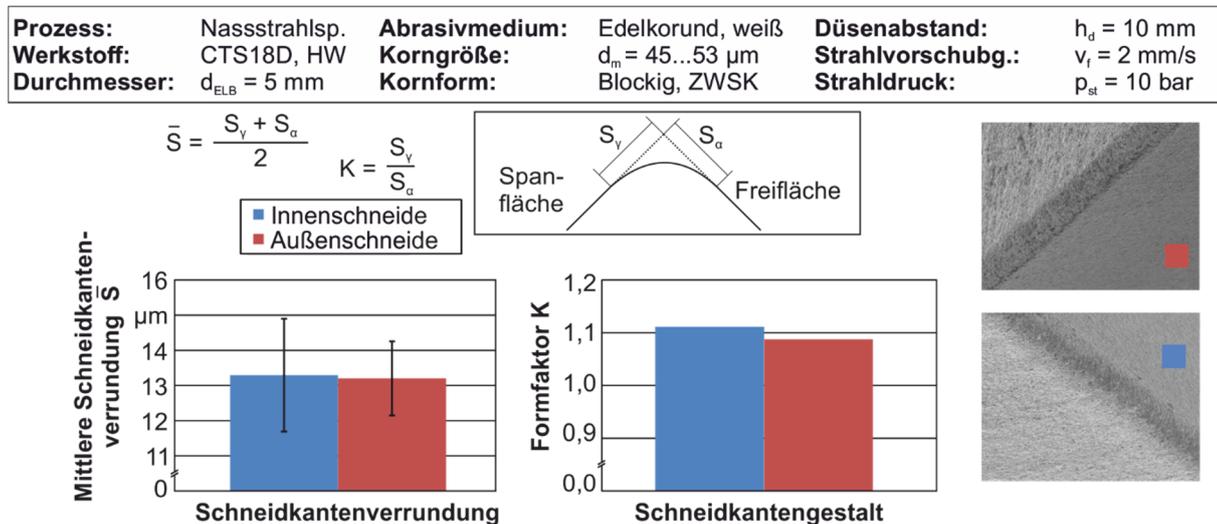


Abbildung 5.1.2 Schneidkantenverrundung durch abrasives Nassstrahlspanen beim robotergestützten System

Bedingt durch die Prozesskinematik und die großflächige Präparation des Werkzeuges, die durch den sich auffächernden Abrasivstrahl bedingt ist, ergeben sich Beeinflussungen der peripheren Schneidkanten und Funktionsflächen. Hierdurch kommt es zu einer Veränderung der Schneidkantenmikrogestalt an der Nebenschneide und der Oberflächentopographie im Bereich der Frei- und Spanfläche. Diese Funktionsflächen und Schneidkanten haben einen bedeutenden Einfluss auf die Prozesssicherheit sowie die Bearbeitungsqualität. Durch eine Verringerung der Oberflächengüte der Spanfläche im Bereich der Innen- und Außenschneide kann es zu einer Änderung der tribologischen Kontaktsituation durch eine Änderung des Reibkoeffizienten kommen und somit eine Beeinflussung der Spankrümmung sowie des Spanablaufs entstehen. Hierdurch ergeben sich verringerte Bohrungsgüten aufgrund von adhäsiven Materialablagerungen an den Schneidenecken oder eine Beeinflussung der Prozesssicherheit

durch Spanklemmer. Zur Beschreibung der Beeinflussung der Schneideneckenverrundung sind in Abbildung 5.1.3 unterschiedlich präparierte Werkzeuge dargestellt.

Prozess:	Nassstrahlsp.	Abrasivmedium:	Edelkorund, weiß	Düsenabstand:	$h_d = 10 \text{ mm}$
Werkstoff:	CTS18D, HW	Korngröße:	$d_m = 45...53 \text{ }\mu\text{m}$	Strahlvorschubg.:	$v_f = 2 \text{ mm/s}$
Durchmesser:	$d_{\text{Elb}} = 5 \text{ mm}$	Kornform:	Blockig, ZWSK	Strahlruck:	$p_{\text{st}} = 10 \text{ bar}$

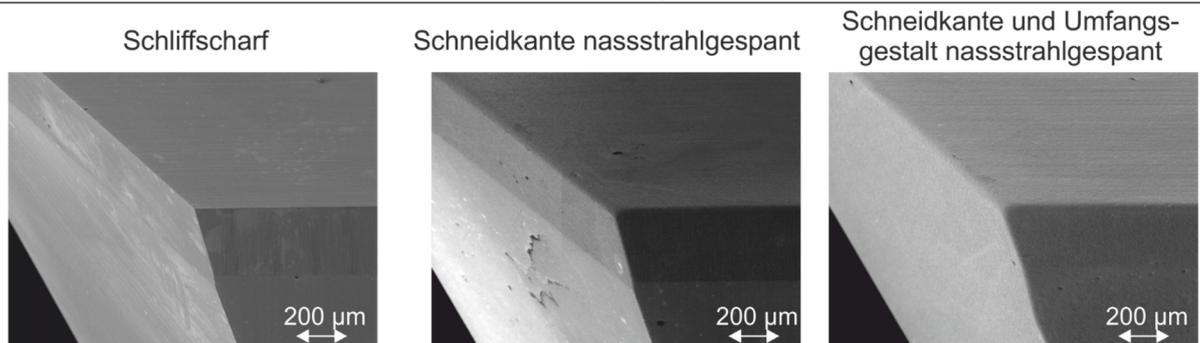


Abbildung 5.1.3: Beeinflussung der peripheren Schneidkanten durch das abrasive Nassstrahlspanen

Die dargestellten Aufnahmen zeigen, dass es aufgrund der unvermeidbaren Strahlaufweitung zu einer Verrundung der exponierten Schneidenecke kommt. Bedingt durch die fehlende Stützwirkung resultiert dort im Vergleich zur Innen- und Außenschneide ein vermehrter Materialabtrag. Verstärkt wird dieser Effekt durch ein nachfolgendes Strahlen des Werkzeuges zur Oberflächenaktivierung für den nachfolgenden Beschichtungsprozess. Durch diese Verrundungen ergeben sich ungünstige Eingriffssituationen an der Schneidenecke, die einen erhöhten Verschleiß und damit einhergehend eine verringerte Bohrungsgüte verursachen.

Neben der positiven Beeinflussung der Spanbildung und der Erhöhung der Verschleißbeständigkeit steht die Verbesserung der Schichthaftung an den Schneidkanten im Fokus von Schneidkantenpräparationsprozessen. Ursächlich sind dafür die bereits in Kapitel 0 beschriebenen Schichteigenspannungen an scharfkantigen Übergängen. Die Beeinflussung der Schichthaftung an den Schneidkanten von Zerspanungswerkzeugen wird im Folgenden für die verschiedenen Schneidkantenverrundungen gezeigt. Aufgrund der erhöhten Schneidkantenverrundung bei Werkzeugen mit dem Durchmesser $d_{\text{ELB}} = 10 \text{ mm}$ neigt die Beschichtung zu geringeren Eigenspannungen, wodurch weniger Abplatzungen gegenüber Schneidkanten mit geringeren Verrundungen resultieren. Demgegenüber lassen sich jedoch aufgrund der nicht vermeidbaren Verrundung der Schneidenecke sowie der Rundschliffase Nachteile dieses Präparationsprozesses feststellen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, lassen der Verschleißzustand und die Verrundung der Außenschneide einen Rückschluss auf die erzeugte Oberflächentopographie der Bohrung zu. So zeigen insbesondere stark verrundete Schneidenecken ein ungünstiges Materialtrennverhalten und es kommt zu einem Verdrängen des Werkstoffs unterhalb der Schneidenecke [27, 203]. Aufgrund der geringeren Spannungsdicken beim Tiefbohren mit Einlippentiefbohrwerkzeugen lässt sich dieser Effekt für diesen Fall nicht eindeutig reproduzieren.

Die bereits beschriebene Strahlaufweitung durch das abrasive Nassstrahlspanen hat zusätzlich den Effekt, dass es aufgrund des insbesondere im Wirkungsbereich des Abrasivstrahls sowie über die Spanfläche ablaufenden Wasser-Abrasiv-Gemisches zu einer Beeinflussung der Spannuttopographie kommt. Diese nivelliert die durch vorherige Prozesse erzeugte Oberflächengüte im Bereich der Spannut. Eine Auswertung des Einflusses dieser Präparation ist in der folgenden Abbildung 5.1.4 dargestellt.

48 5.1 Analyse der Schneidkantenpräparation an Einlippentiefbohrwerkzeugen durch das abrasive Nassstrahlspanen

Prozess:	Nassstrahlsp.	Abrasivmedium:	Al ₂ O ₃ , weiß	Düsenabstand:	h _d = 10 mm
Werkstoff:	CTS18D, HW	Korngröße:	d _k = 45...53 µm	Strahlvorschubgeschw.:	v _f = 2,5 mm/s
Durchmesser:	d _{ELB} = 5 mm	Kornform:	Blockig, ZWSK	Strahldruck:	p _{st} = 10 bar

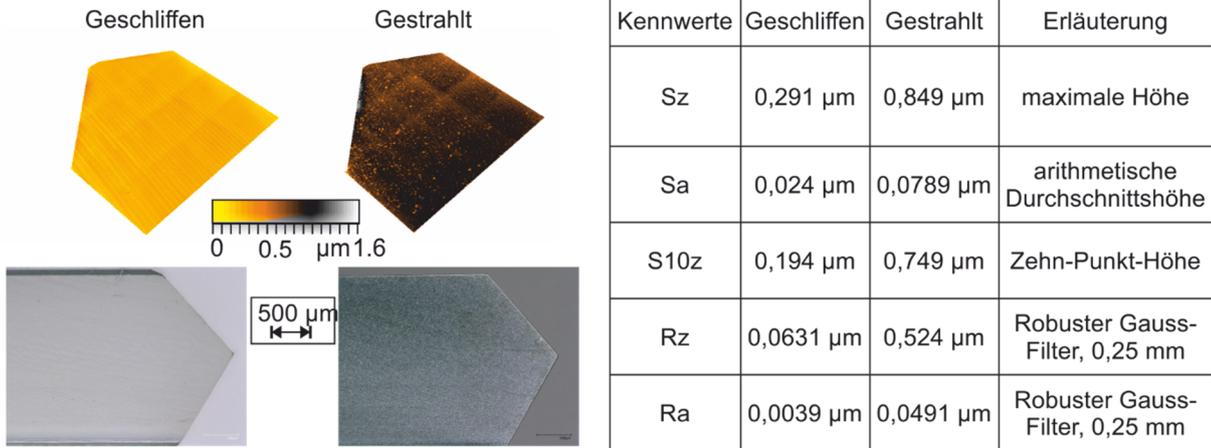


Abbildung 5.1.4: Beeinflussung der Spanntopographie durch das robotergestützte Abrasiv-Wasserstrahlspanen. Anhand der ermittelten Oberflächenkennwerte und der licht- sowie weißlichtmikroskopischen Aufnahmen lässt sich eindeutig erkennen, dass durch die durchgeführte Schneidkantenpräparation eine maßgebliche Veränderung der Spanntopographie resultiert. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei den durch das abrasive Nassstrahlspanen präparierten Werkzeugen trotz der matten Oberfläche um Werkzeuge und Spannuten mit sehr hohen Oberflächengüten handelt, da diese weiterhin bei zwei- und dreidimensionaler Betrachtung der Oberflächenkennwerte von Rz < 0,6 µm und S10z < 0,8 µm aufweisen. Der beeinflusste Bereich durch ablaufendes Wasser-Abrasiv-Gemisch ist über einen großen Bereich festzustellen, welcher sich auch noch auf möglicherweise nachfolgend stattfindende Nachschleifprozesse auswirken wird.

Schneidkantenpräparation auf industrieller Anlage

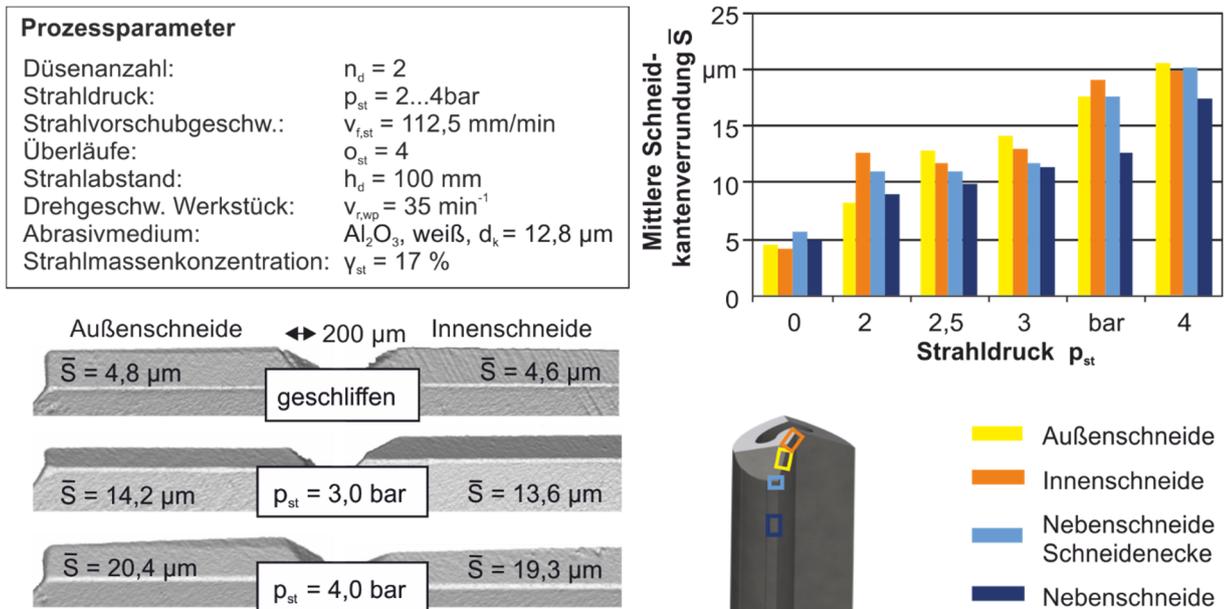


Abbildung 5.1.5: Einfluss des Nassstrahlspanens auf die Schneidkantenmikrogestalt in Abhängigkeit des Strahldrucks

Der Einsatz der im Forschungsumfeld funktionierenden Systeme stellt für industrielle Anwendungen meist aufgrund der hohen Nebenzeiten und des zusätzlichen Werkzeughandlings nur in seltenen Fällen eine wirtschaftliche Alternative dar. Aus diesem Grund wird in den meisten industriellen Prozessen auf das Strahlen mit vollautomatisierten Strahlkabinen, wie bspw. der

Graf Compact Plus II, zurückgegriffen. Durch diese Prozesskinematik und Abläufe wird neben einer Präparation der Funktionsflächen auch an den Schneidkanten des Einlippentiefbohrwerkzeuges eine Präparation durch das Nassstrahlspanen möglich. In Abbildung 5.1.3 sind die Ergebnisse des Strahlprozesses auf der industriellen Anlage dargestellt. Anhand der Kantenvisualisierungen der Schneidkantenvermessung lässt sich die Mikrogestalt der präparierten Schneiden erkennen. Die gemessene Gestalt der Werkzeuge weist ein verrundetes Profil auf. Hierbei ist der Einfluss des Strahldrucks auf die Mikrogestalt der Schneidkanten am Einlippentiefbohrwerkzeug beim Nassstrahlspanen dargestellt. Es wurde die mittlere Schneidkantenverrundung \bar{S} an der Hauptschneide, unterteilt in Außen- und Innenschneide, sowie an der Nebenschneide und an der Schneidenecke hin zur Nebenschneide erfasst. Im Allgemeinen ist bereits bekannt, dass mit höherem Strahldruck die Schneidkantenverrundung der gestrahlten Kante steigt [29]. Auch im vorliegenden Prozess stellt sich beim Einsatz höherer Strahldrücke unverkennbar eine größere Verrundung in den charakteristischen Schneidenbereichen ein. So wird bei einem gewählten Strahldruck von $p_{st} = 4$ bar eine Verrundung von $\bar{S} \approx 22 \mu\text{m}$ an der Außenschneide erzeugt. Der Bereich der Schneidenecke weist hier eine vergleichbare Verrundungsgröße von $\bar{S} \approx 20 \mu\text{m}$ auf. Die mit höherem Druck einhergehend größere kinetische Energie der Abrasivkörner führt zu einem größeren Materialabtrag an der Frei- und Spanfläche der jeweiligen Schneidkanten. Im Vergleich zur Außen- und Innenschneide, wird die Nebenschneide hingegen weniger verrundet. Zum einen erfährt die Nebenschneide durch die Gestalt des Schneidteils mehr Materialunterstützung im Bereich der Schneidkante, zum anderen wirkt beim Strahlprozess die Rotationsbewegung des Einlippentiefbohrwerkzeuges und die vertikale Ausrichtung der Nebenschneide höheren Materialabträgen an der Kante entgegen. Unter Berücksichtigung einzelner Abweichungen gelten die vorgestellten Abhängigkeiten für die hier untersuchten Strahldrücke.

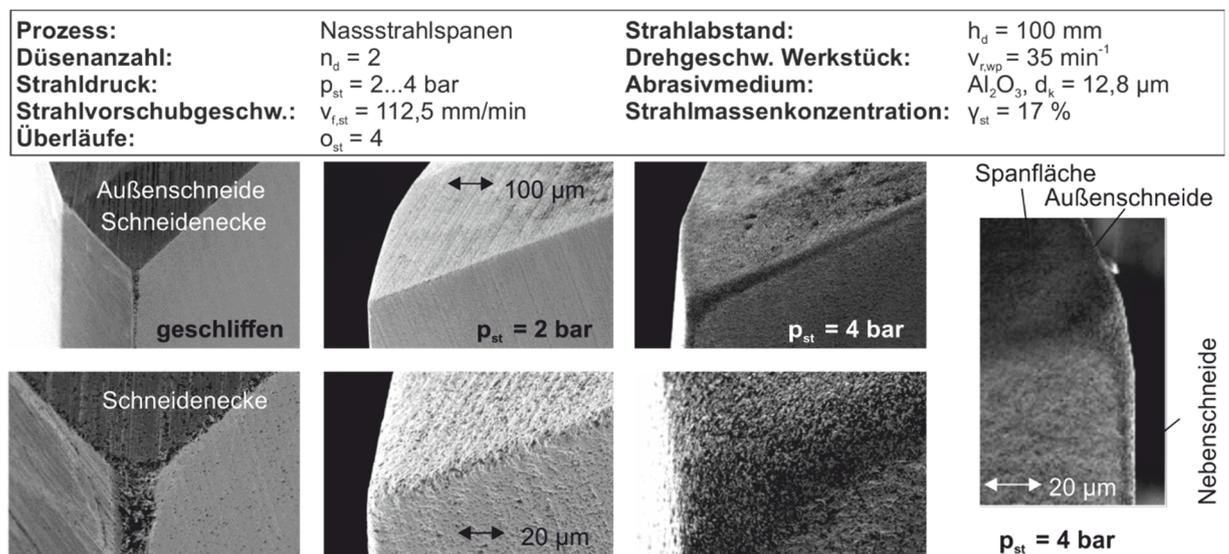


Abbildung 5.1.6: Einfluss des Nassstrahlspanens auf die Mikrogestalt im Bereich der Schneidenecke in Abhängigkeit des Strahldrucks

Aus den dargestellten Ergebnissen ergibt sich ein optimaler Strahldruckbereich zur Einstellung geforderter Oberflächenqualitäten und gewünschter Verrundungen der Schneidkantenmikrogestalt am Bohrwerkzeug. Der Zusammenhang beider Ergebnisgrößen kann gut anhand der dargestellten REM-Aufnahmen in Abbildung 5.1.6 nachvollzogen werden. In den Aufnahmen ist der Bereich der Schneidenecke nach Einsatz unterschiedlicher Präparationsstufen gezeigt. Im geschliffenen Ausgangszustand ist eine scharfkantige Außenschneide erkennbar, welche vereinzelt eine Schartigkeit in Form von Mikrodefekten aufweist. Insbesondere im Übergang zur Nebenschneide liegt ein größerer Ausbruch der Schneidenecke vor. Entlang der

Schneidkanten stellt sich eine geringe Verrundung von $\bar{S} \approx 12 \mu\text{m}$ ein. Es wird deutlich, dass kleine Mikrodefekte entlang der Schneide durch die Präparation mit einem Strahldruck von $p_{st} = 2 \text{ bar}$ verringert werden konnten. Bereits solch geringe Verrundungen und die Reduzierung der Mikrodefekte an der Hauptschneide können zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Zerspanungswerkzeugen beitragen [29, 70]. In Abhängigkeit des Prozesses, des zu zerspanenden Werkstoffes und der Schnittparameter existiert dabei jedoch ein optimaler Verrundungsbereich der Schneide. So konnten bei Einsatzversuchen mit Einlippentiefbohrwerkzeugen in den Stahlwerkstoffen 1.7225 und 1.4462 und Vorschüben bis $f = 0,05 \text{ mm}$ ein idealer Verrundungsbereich von $\bar{S} \approx 20 \mu\text{m}$ festgestellt werden [27, 29]. Eine solche Verrundung lässt sich jedoch nur durch Strahldrücke von $p_{st} = 4 \text{ bar}$ erreichen. Anhand der REM-Aufnahmen sind deutlich die Verrundungen entlang der Außenschneide und die große Verrundung der Schneidenecke zu erkennen. Letztere kann aus bereits vorhandenen Mikroausbrüchen nach dem Schleifen oder aber auch die exponierte Lage der Schneidenecke resultieren. Wie in der seitlichen Ansicht der Nebenschneide zu erkennen, hat sich neben einer Verrundung der Nebenschneide auch eine intensive Abflachung der Schneidenecke eingestellt. Zudem ist die veränderte Oberflächenstruktur im dargestellten Bereich auffällig. Die hohe kinetische Energie der Körner resultiert in einer ausgeprägten Grübchenstruktur bei einer vollständigen Beseitigung der Schleifriefen.

Neben einer Variation des Strahldrucks wurde eine längere Strahldauer hinsichtlich des Einflusses auf die Schneidkantenpräparation der Werkzeuge untersucht. In Abbildung 5.1.7 sind Messwerte der mittleren Schneidkantenverrundung \bar{S} und der Zehn-Punkthöhe der Spanntoberfläche in Abhängigkeit der Strahldauer dargestellt. Die Strahldauer wurde bei einem konstanten Strahldruck $p_{st} = 2 \text{ bar}$ mit bis zu $o_{st} = 8$ Überläufen der Oszillationsbewegung verdoppelt. Die zugehörigen Aufnahmen der Spanfläche lassen neben der eingebrachten Grübchenstruktur weiterhin deutlich die Riefen des vorherigen Schleifprozesses erkennen. In Verbindung mit der konstant niedrigen Kernrautiefe ist daher von einem annähernd gleichbleibenden Niveau des Materialtragflächenanteils auf der Spanfläche auszugehen. Gleichzeitig nehmen die Werte der mittleren Schneidkantenverrundung geringfügig zu. Im Bereich der Innen- und Außenschneide und Schneidenecke stellen sich Verrundungen zwischen $\bar{S} \approx 10 \dots 14 \mu\text{m}$ ein.

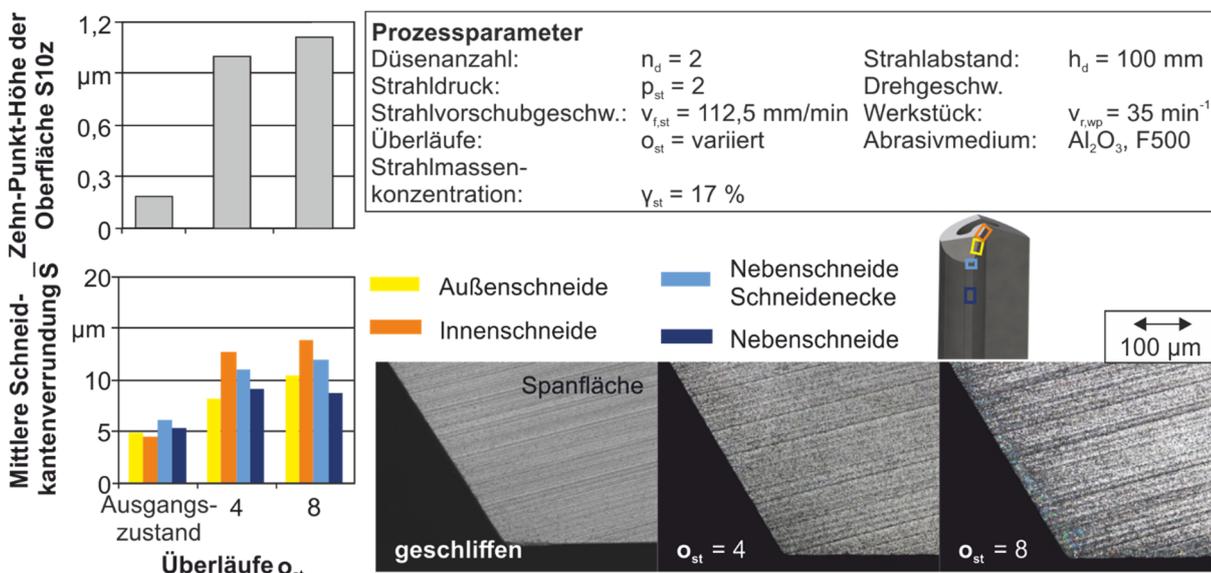


Abbildung 5.1.7: Einfluss des Nussstrahlspanens in Abhängigkeit der Strahldauer

Es ist festzustellen, dass im vorliegenden Präparationsprozess der Einfluss des Strahldrucks den Einfluss der Strahldauer deutlich überwiegt. Insbesondere höhere Strahldrücke bedingen

eine strukturelle Veränderung sowohl der erzeugten Schneidkantenverrundung als auch der Oberflächentopographie hin zu einer charakteristischen Grübchenstruktur. Es findet ein verstärkter Materialabtrag entlang der Schneidkanten statt, wodurch größere Verrundungen eingestellt werden können. Auch durch eine längere Strahldauer lässt sich die Verrundung an den Schneidkanten vergrößern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das abrasive Nassstrahlspanen sowohl unter Einsatz von industriellen als auch forschungsnahen Prozessabläufen für die Schneidkantenpräparation geeignet ist. Als positiv lassen sich beispielsweise die hohe Flexibilität und die homogen ausgebildeten Verrundungen nennen. Des Weiteren wird einer durch das Nassstrahlspanen aktivierten Oberfläche eine besondere Eignung und erhöhte Fähigkeit zur Anbindung von verschleißhemmenden Hartstoffschichten zu gesprochen, welche in nachfolgenden Untersuchungen näher betrachtet werden sollen. Unter dem Fokus einer hohen Oberflächengüte aller relevanten Funktionsflächen zeigt sich jedoch, dass es aufgrund des Verfahrensprinzips unvermeidlich zu einer Veränderung der Oberflächentopographie und der Ausbildung einer Grübchenstruktur kommt. Diese lässt sich je nach Prozesskinematik zwar auf gewisse Teilbereiche des Werkzeuges beschränken, allerdings an insbesondere der für die Spanbildung relevanten Spanfläche, nicht vermeiden. Ein wichtiger Aspekt bei der Präparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen ist das hohe l/d -Verhältnis, welches sich bei der Auslegung von Strahlprozessen aufgrund der elastischen Verformung des Werkzeuges nur schwierig berücksichtigen lässt. Insbesondere bei der Einstellung einer definierten Schneidkantengestalt ergeben sich besondere Anforderungen, die sich nur durch den Einsatz von Testwerkzeugen bei der Prozesseinrichtung lösen lassen. Des Weiteren kann es durch diese elastische Verformung zu Abweichungen bei der Präparation auf industriellen Anlagen kommen, da das Werkzeug je nach Strahldruck verformt wird und die Flexibilität solcher Anlagen eingeschränkt ist.

5.2. Entwicklung eines neuartigen Präparationsverfahrens zur Schneidkantenpräparation und Optimierung der Funktionsflächen an Einlippentiefbohrwerkzeugen

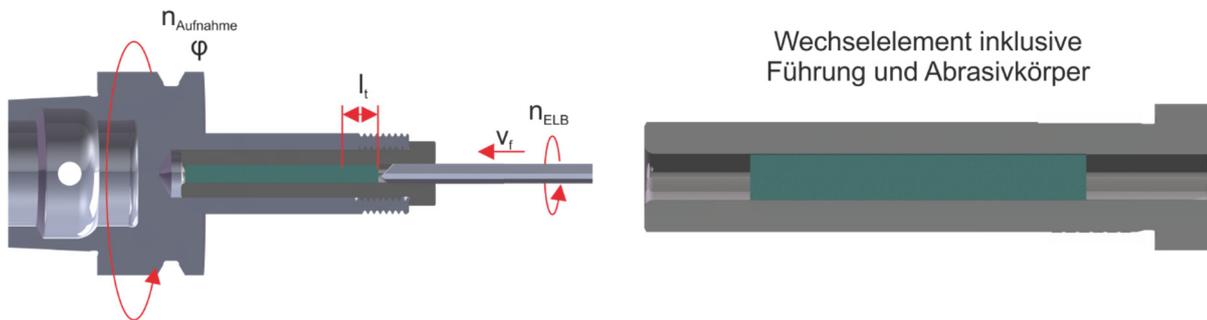
Neben den oben beschriebenen Beeinflussungen der peripheren Funktionsflächen sind für die Schneidkantenpräparation an Zerspanungswerkzeugen durch das abrasive Nassstrahlspanen zum aktuellen Zeitpunkt je nach Auslegung der Anforderungen an den Präparationsprozess Handlings- und Programmierungsaufgaben essentiell. Hierdurch ergeben sich bedeutende Kosten aufgrund von Nebenzeiten und Personalaufwand. Des Weiteren werden für solche Verfahren zusätzliche Maschinen oder Gerätschaften benötigt, die eine Kapitalbindung bedeuten und somit die Flexibilität des Unternehmens beschränken. Demgegenüber lassen sich durch bereits etablierte Verfahren, wie bspw. dem Bürsten von Zerspanungswerkzeugen, Prozesse innerhalb einer Fertigungskette integrieren. Diese beinhalten jedoch, wie bereits in Kapitel 0 beschrieben, Nachteile oder können nicht für den hier geforderten Einsatzfall verwendet werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Neuentwicklung eines angepassten Schneidkantenpräparationsverfahrens, um eine prozesskettennahe Schneidkantenpräparation an Zerspanungswerkzeugen ohne eine Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen zu ermöglichen.

5.2.1. Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugschleifen

Die Eignung eines Verfahrens zur Schneidkantenpräparation durch die Zerspanung eines elastischen Abrasivkörpers ist bereits in Kapitel 0 beschrieben und dargestellt. Aufgrund der gewählten Prozesskinematik und der Zerspanung des in diesem Fall verwendeten Schleif-

52 5.2.1 Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugschleifen

scheibengrundkörpers ergeben sich insbesondere an den Schneidenecken erhöhte Materialabträge, die in größeren Verrundungen resultieren. Große Verrundungen an den Schneidenecken führen zu negativen Effekten auf die Prozessqualität in Form von erhöhtem Verschleiß und verringerten Bohrungsgüten. Dadurch motiviert, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prozess entwickelt, der sich zur Präparation der Schneidkanten an schlanken und lang auskragenden Werkzeugen eignet. Im Vergleich zum im Stand der Technik beschriebenen Drillpolish-Verfahren wird anstelle des Schleifscheibengrundkörpers ein Stab aus einem elastischen, mit Abrasivpartikeln durchsetzten, Material verwendet. Durch eine Abstimmung des Stabdurchmessers an den zu bearbeitenden Werkzeugdurchmesser ergibt sich die Möglichkeit eine Schneidkantenpräparation durchzuführen, ohne eine den Prozess negativ beeinflussende Schneideneckenverrundung zu erhalten. Die nachfolgende Abbildung 5.2.1.1 zeigt die finale Entwicklungsstufe des Präparationsprozesses.



Kinematische Stellgrößen			
n_{Aufnahme}	Drehzahl der Schleifscheibenaufnahme	l_t	Bohrtiefe
n_{ELB}	Drehzahl des Einlippenbohrers	v_f	Vorschubgeschwindigkeit
φ	Rotationsrichtung der Schleifscheibenaufnahme		
Abrasive Körper Stellgrößen			
	Bindungsart		Kornart

Abbildung 5.2.1.1: Verfahrensprinzip und -aufbau von [Tool]Prep sowie relevante kinematische Stellgrößen

Für diese Ausgestaltung und Konstruktion wurden im Rahmen der Arbeit unterschiedliche Entwicklungsstufen erarbeitet, konstruiert und untersucht. Ausgangspunkt der technologischen Entwicklung war die Verwendung der bereits in der Werkzeugschleifmaschine bestehenden Abstützung durch die Implementierung einer Bohrbuchse in eine 3D-gedruckte Kunststoffvorrichtung. Aus Sicherheitsgründen und um eine Beschädigung der zu präparierenden Werkzeuge zu vermeiden, erfolgte die Auslegung des Abrasivkörpers mit einem Aufmaß von $\Delta d_{\text{Auf}} = 0,4 \text{ mm}$. Durch diese Maßnahme konnte das Verfahren erstmalig getestet und erprobt werden. Die komplexe Programmierung und Fertigungsungenauigkeiten sowie die durch den Aufbau resultierende Beschränkung im Arbeitsraum haben jedoch bereits frühzeitig die Nachteile des verwendeten Konzeptes offenbart. Zum einen kam es zu Positionierfehlern beim Einfädeln des Werkzeuges, was in Beschädigungen resultierte, und zum anderen war die Präparation von nachfolgenden Werkzeugen aufgrund des hohen Programmieraufwandes nicht einfach und reproduzierbar darstellbar. Das gewählte Aufmaß diente hauptsächlich dazu, um Fluchtungsfehler zu nivellieren und den Präparationsprozess zu ermöglichen. Somit wurde in der darauffolgenden Entwicklungsstufe geprüft, wie eine einfachere Programmierung und Implementierung bei gleichzeitig hoher Prozessqualität ermöglicht werden kann. Zur vollständigen Vermeidung von Fluchtungs- und Positionierfehlern wurde die Verwendung der Werkzeugspindel als zielführend identifiziert. Diese ist bereits standardmäßig eingemessen und fluchtet mit der Werkstückspindel, wenn die erforderliche Positionierung im Programm vorgegeben wird. Zur Umsetzung dieses zweiten Konzeptes wurde abermals auf eine Kombination aus zwei Bohrbuchsen zurückgegriffen. Die vordere, der Werkstückachse nächstgelegene,

Bohrbuchse diente hierbei der Führung des Werkstückes, hier dem Einlippentiefbohrwerkzeug, um ein Abbrechen des Werkzeuges bei der Beschleunigung auf Nenndrehzahl zu vermeiden. Die hintere Bohrbuchse konnte im Anschluss hinsichtlich der Auslegung der Abrasivkörper im Vergleich zu dem ersten Konzept deutlich enger toleriert werden. Die folgende Abbildung 5.2.1.2 zeigt die angepasste zweite Entwicklungsstufe, mit der die hauptsächlichen Präparationsversuche stattfanden.

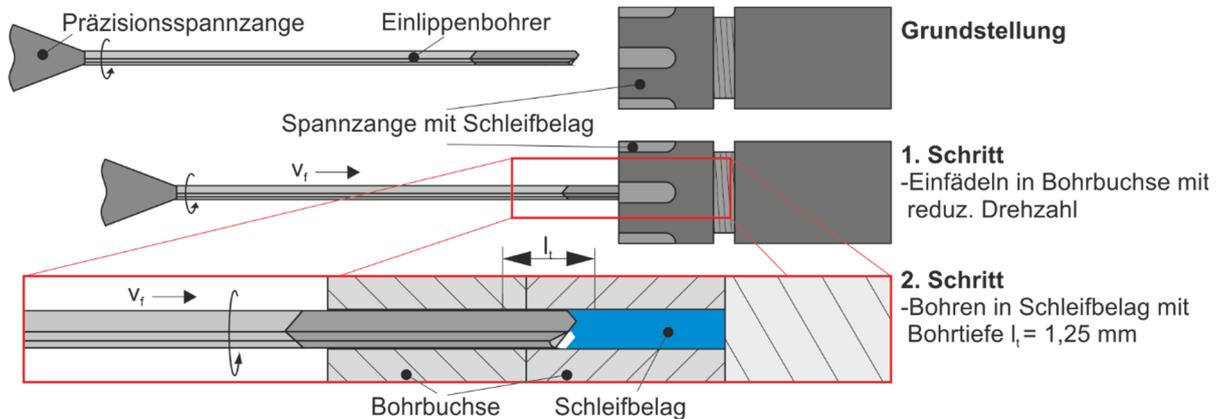


Abbildung 5.2.1.2: Darstellung des Präparationskonzeptes und der Prozesskinematik bei Entwicklungsstufe II

Aufbauend auf dieser Konstruktion und Konzeptionierung erfolgten die Versuche und Analysen zur gezielten Schneidkantenpräparation der Tiefbohrwerkzeuge. Um den Prozess unmittelbar in bestehende Prozessketten zu integrieren und eine hohe Flexibilität und Verfügbarkeit der Maschine zu ermöglichen, wurde die Entwicklungsstufe II zu der finalen Entwicklungsstufe weiterentwickelt. Dieser Schritt war die logische Schlussfolgerung aus diesem Konzept, da nahezu jede Schleifscheibenaufnahme bei Werkzeugschleifmaschinen einen Dorn verwendet, auf dem die für das Werkzeugschleifen notwendigen Schleifscheiben montiert sind. Bisher eingesetzte Schleifscheibenaufnahmen weisen keinerlei Funktionselemente im Bereich des Dorns auf. Eine massive Ausführung des Dorns ist in den meisten Fällen nicht erforderlich, da die Bearbeitungskräfte in normaler und tangentialer Richtung selten größer als $F = 200$ N sind (vgl. [114]). Somit ist eine Schwächung der Steifigkeit durch das Aufbohren des Dorns und der anschließenden Implementierung eines Wechselelementes vertretbar. Das Wechselelement wird in die so gefertigte Bohrung eingepresst und kann für die Präparation der Tiefbohrwerkzeuge verwendet werden. Durch dieses Konzept bietet das entwickelte Verfahren eine günstige Situation, um direkt im Anschluss an die Herstellung des Stirnanschliffes die Schneidkantenpräparation durchzuführen.

Bedingt durch die genauere Abstimmung des Abrasivkörperdurchmessers d_{Abr} an den Werkzeugdurchmesser erfolgt die Präparation nahezu ausschließlich im Bereich der Schneidkanten. Die bereits bei anderen Schneidkantenpräparationsverfahren festgestellte Verrundung der Schneidenecke und der Nebenschneiden wird durch diese Maßnahme vermieden. Somit ist es möglich, eine Präparation der Schneidkanten zu erreichen, die ein günstiges Prozessverhalten nach sich zieht.

In Abbildung 5.2.1.3 sind beispielhafte Präparationsergebnisse dargestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden iterative Versuche durchgeführt, um ein geeignetes Prozesswissen aufzubauen. Aus dem Kapitel 0 ist bereits von dem Drillpolish-Verfahren bekannt, dass dieses bei den durchgeführten Untersuchungen eher zu einer Profilabflachung geführt hat statt zu einer Verrundung der Schneidkante. Um dies zu umgehen und zu verbessern wird zur Präparation der Schneidkanten ein verhältnismäßig großer Vorschub pro Schneide $f_z = 80$ μm als für diesen Anwendungsfall optimal ermittelt.

54 5.2.1 Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugschleifen

Prozess:	[Tool]Prep	Abrasivmedium:	SiC	Schnittgeschw.:	$v_c = 12,5 \text{ m/min}$
Werkstoff:	CTS18D	Korngröße:	F 1200	Vorschub:	$f = 80 \text{ } \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Bindung:	Elastisch	Präparationstiefe:	$l_i = 1,25 \text{ mm}$

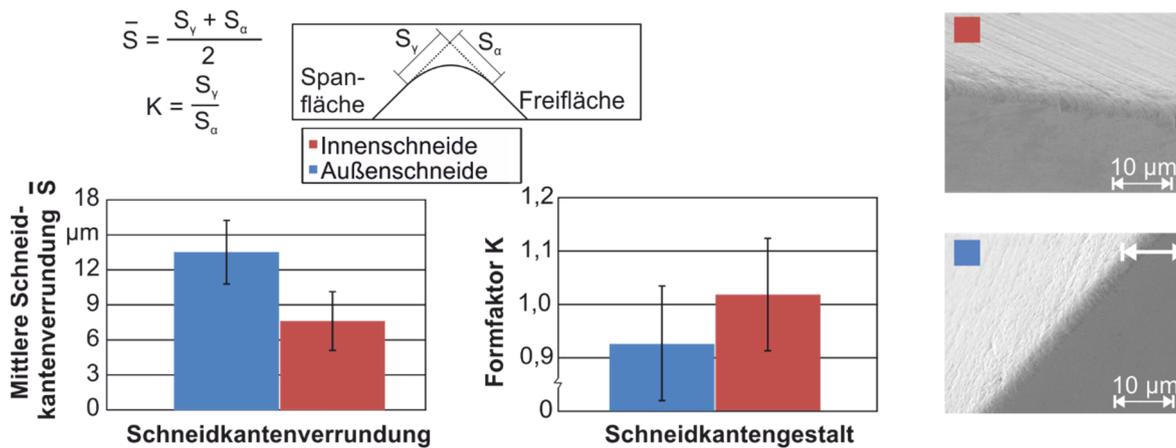


Abbildung 5.2.1.3: Gegenüberstellung der Präparation durch [Tool]Prep

Die in Abbildung 5.2.1.3 dargestellten Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Präparationsmöglichkeiten durch das [Tool]Prep-Verfahren zu. Weisen die Werkzeuge im schlichscharfen Zustand noch eine nahezu ideal scharfe Schneidkantengestalt, $\bar{S} \approx 4...7 \text{ } \mu\text{m}$, mit den in Kapitel 2.1.2 aufgeführten Defekten auf, so lassen sich durch den anschließenden Präparationsprozess deutliche Verbesserungen und eine Homogenisierung der Schneidkantenmikrogestalt anhand der REM-Aufnahmen erkennen. Die Schneidkantenausbrüche im geschliffenen Zustand verursachen eine hohe Schneidkantenschartigkeit, die sich sowohl beim nachfolgenden Beschichten als auch bei dem späteren Einsatz als ungünstig erweist [70]. Die Auswertung der Schneidkanten der Innen- und Außenschneide im unbeschichteten Zustand, Abbildung 5.2.1.3, zeigen, dass es hinsichtlich der Schneidkantenverrundung zu Unterschieden kommt. Ursächlich sind hierfür unterschiedliche Wirkmechanismen. Zum einen liegen, wie bei allen Bohrverfahren mit Vollbohrwerkzeugen, unterschiedliche Schnittgeschwindigkeitsverhältnisse entlang der Außen- und der Innenschneide vor. Verstärkt wird dieser Effekt durch das geringere Zerspanvolumen aufgrund des kleineren zerspannten Querschnitts. Dies führt zu veränderten Abtrags- und Zerspanungsmechanismen und resultiert in einem variierenden Abtrag an der Schneidkante. Auffällig ist jedoch, dass es im Verlauf der Messungen über die einzelnen Schnitte entlang der Schneidkante bis zum Erreichen von $d_{ELB}/2$ keinen signifikanten Einfluss gibt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die erzeugte Verrundung an der Innenschneide nur wenige Mikrometer größer ist als die mittlere Schneidkantenverrundung im schlichscharfen Zustand. Daher ist zu vermuten, dass es zu einer Überlagerung von mehreren Effekten kommt. Der zusätzlich auftretende Effekt lässt sich aus dem für Einlippentiefbohrwerkzeuge typischen Bohrungsgrund ableiten. Hierdurch ergibt sich im Bereich der Außenschneide das Resultat, dass der elastische Abrasivkörper nach außen an die begrenzende Wand der Hülse verformt wird und aufgrund der räumlichen Begrenzung nach dem Überschreiten der elastischen Verformung zerspannt wird. Im Bereich der Innenschneide ergeben sich hingegen andere Eingriffsbedingungen. Das Material in Richtung Bohrungsmitte formt sich bei zweidimensionaler Betrachtung zu einem Dreieck aus. Dreidimensional betrachtet handelt es sich um einen Kegel aus dem elastischen Material des Abrasivkörpers. Aufgrund der fehlenden Stützwirkung können keine ausreichenden Kräfte innerhalb des Materials aufgebaut werden, die für einen ausreichenden Materialabtrag an der Innenschneide notwendig wären (Abbildung 5.2.1.4). Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Flächen und Vorschubwege je Umdrehung zeigt, dass die zerspannte Fläche der Außenschneide der vierfachen Größe der Innenschneide und der zurückgelegte Weg der Außenschneide dem dreifachen

Weg der Innenschneide entspricht. Diese hohen Unterschiede spiegeln sich jedoch nicht innerhalb der Messwerte der Schneidkantenverrundung wieder und müssen daher näher betrachtet werden.

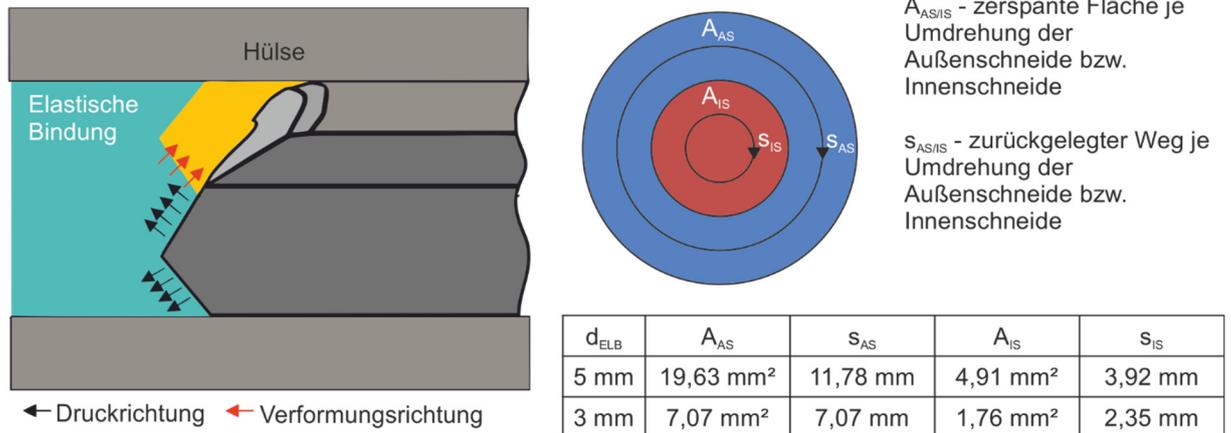


Abbildung 5.2.1.4: vereinfachte 2-D-Darstellung der Eingriffs- und Verformungsbedingungen bei [Tool]Prep

Zur Erläuterung und Analyse des Verformungsverhaltens dient eine vereinfachte zweidimensionale Darstellung. Dieses entspricht nicht den realen Eingriffsbedingungen, da in diesem Fall die Vorschub- und Rotationsbewegung des Werkzeuges vernachlässigt wird. Jedoch lässt sich das bereits beschriebene Verformungsverhalten des elastischen Abrasivkörpers in den Ölräum durch die zweidimensionale Darstellung ausreichend beschreiben und die Mechanismen ableiten. Die schematische Darstellung zeigt, dass durch den vom Einlippentiefbohrwerkzeug erzeugten Bohrungsgrund eine zu geringen Stützwirkung im Bereich der Innenschneide resultiert. Verstärkt wird dieser Effekt durch das bröckelige Zerspanungsverhalten des Materials. Neben den oben beschriebenen, sich unterscheidenden, zurückgelegten Wegen und zerspannten Flächen an der Innen- und Außenschneide sind an der Innenschneide geringere Schneidkantenverrundung festzustellen.

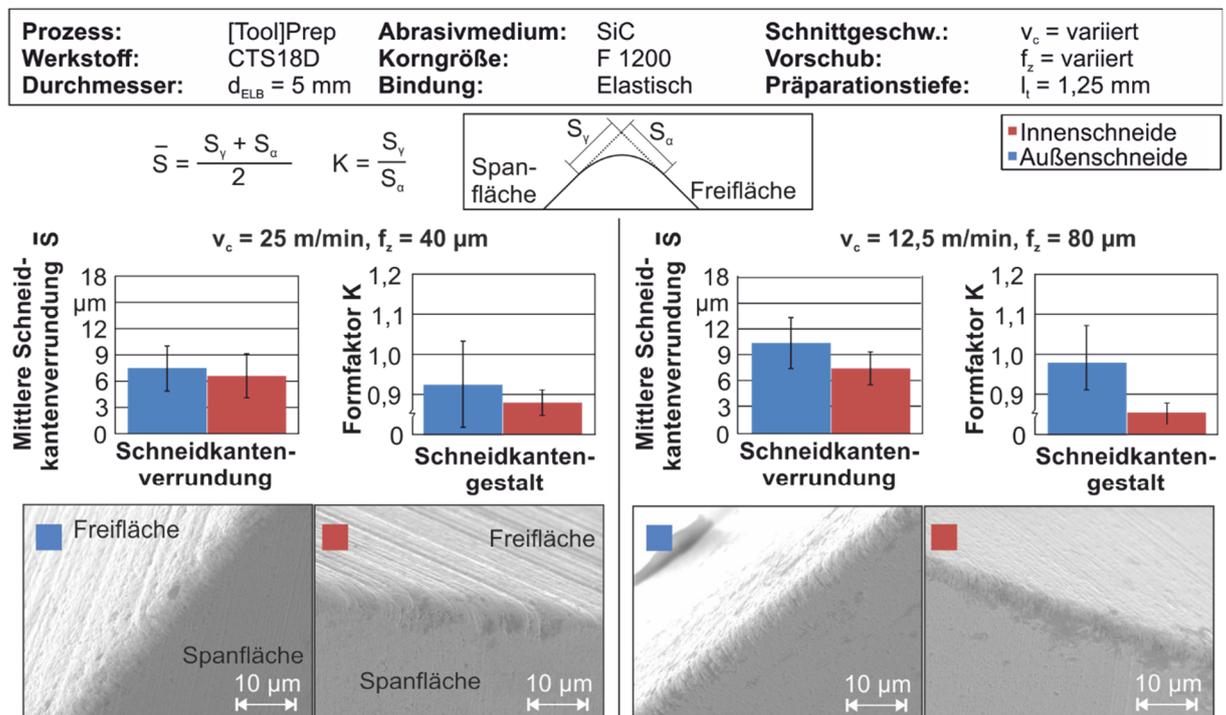


Abbildung 5.2.1.5: Beeinflussung der Schneidkantenmikrogestalt durch [Tool]Prep

56 5.2.1 Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugschleifen

Die Variation der Schnittgeschwindigkeit v_c zeigt, dass bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit im Vergleich zum als ideal identifizierten Prozessfenster zu einer geringeren Schneidkantenverrundung kommt. Bei Erhöhung des Vorschubes und Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit resultiert eine geringfügig kleinere Schneidkantenverrundung. Somit kann abgeleitet werden, dass die Schnittgeschwindigkeit nur eine untergeordnete Rolle hat. Der Vorschub lässt sich somit als dominanter Einfluss identifizieren. Begründen lässt sich dies durch das elastische Verformungsverhalten, welches dazu genutzt werden kann, um durch eine Variation des Vorschubes f_z eine Einstellung der Schneidkantenverkippung sowie der Schneidkantenverrundung zu ermöglichen. Wie in Abbildung 5.2.1.3 dargestellt, sind zum Erreichen eines Formfaktors $\kappa \approx 1$ deutlich erhöhte Verhältnisse von Vorschubwerte zu geplanter Verrundungsgröße einzustellen, damit die elastische Bindung über die Schneidkante abläuft und eine symmetrische Verrundung hervorruft. Die resultierenden Abtragsmechanismen lassen sich anhand der erzeugten Oberflächen der präparierten Werkzeuge ableiten. So zeigt sich, dass es im Bereich der Freifläche aufgrund des Reibkontaktes zwischen zerspantem und rückgefedertem Material zu einer im Vergleich zur Spanfläche andersartigen Topographieausbildung kommt. Die erzeugte Oberflächentopographie ähnelt der Grübchenstruktur von gestrahlten Werkzeugen. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die abrasiven Mechanismen zu einer Einebnung der Oberfläche führen und Schleifriefen entfernt werden. Anhand der REM-Aufnahmen in Abbildung 5.2.1.5 lässt sich auch die in Abbildung 5.2.1.4 dargestellte Verformung des elastischen Bindungsmaterials im Bereich der Innenschneide erklären. Bei kleineren Spanungsdicken ist eine geringere Beeinflussung der Freifläche festzustellen, was durch weiterhin vorhandene Schleifriefen und eine geringfügig geänderte Oberflächentopographie verdeutlicht wird (Abbildung 5.2.1.5). Die qualitative Betrachtung der geänderten Oberflächentopographie auf der Freifläche im Bereich der Innenschneide lässt den Schluss zu, dass nicht das zerspannte Volumen, sondern die unzureichende Stützwirkung als maßgebender Faktor zur Beeinflussung der Schneidkantenmikrogestalt der Innenschneide festzustellen ist.

Zur Verifizierung dieser Annahme, dass das zerspannte Volumen keinen signifikanten Einfluss auf die Verrundung der Innenschneide hat, werden im Folgenden die präparierten Schneidkanten der Tiefbohrwerkzeuge mit $d_{ELB} = 3$ mm untersucht. Bei kleinerem Durchmesser ergeben sich aufgrund des Standardanschliffes auch Änderungen hinsichtlich der Stützwirkung im Bereich der Innenschneide. Durch den kleineren Durchmesser reduziert sich zusätzlich der Abstand zwischen Werkzeugspitze und dem Bohrerzentrum, welcher im Folgenden als h_{Sp} bezeichnet wird.

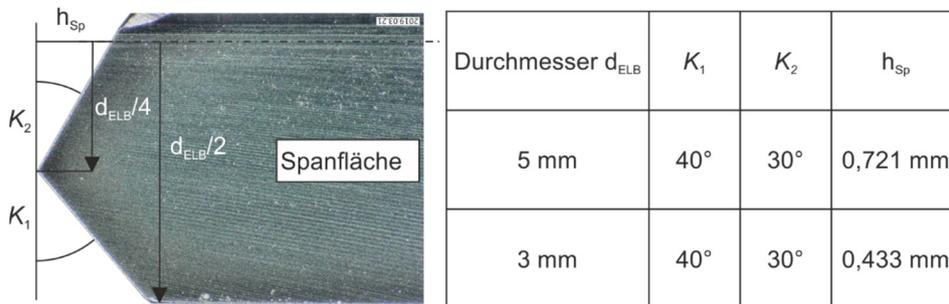


Abbildung 5.2.1.6: Gegenüberstellung der geometrischen Zusammenhänge in Abhängigkeit des Werkzeugdurchmessers

Zur Beschreibung des Abstandes h_{Sp} auf die resultierende Stützwirkung dienen im Folgenden die Auswertungen von präparierten Einlippentiefbohrwerkzeugen mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 3$ mm (siehe Abbildung 5.2.1.7). Es ist zu erkennen, dass die Verrundung und Verkippung dieser Werkzeuge sehr reproduzierbar möglich ist. Aufgrund des geringeren Abstandes zwischen der Werkzeugspitze und dem Bohrerzentrum h_{Sp} fallen die Unterschiede der resultierenden Schneidkantenverrundungen an der Außen- und Innenschneide geringer aus. Somit

lässt sich anhand dieser Auswertung ableiten, dass die Stützwirkung im Kern des zerspannten Abrasivkörpers geringfügig höher als bei einem größeren Durchmesser ausfällt und eine gleichmäßigere Verrundung an der Innenschneide resultiert. Gegen diese Annahme spricht hingegen die Erkenntnis, dass sich kein Verlauf der Verrundungsgrößen entlang der Schneide feststellen lässt. Ausgenommen des Bereichs an der Innenschneide, der $d_{ELB}/2$ unterschreitet, liegen die Messwerte der Schneiden in einem engen Toleranzband. Die Streuung um den Mittelwert \bar{x} liegt zwischen $\sigma = 0,55 \dots 1,2 \mu\text{m}$. Somit kann von keiner abfallenden Verrundung der Innenschneide gesprochen werden.

Prozess:	[Tool]Prep	Abrasivmedium:	SiC	Schnittgeschw.:	$v_c = 7,5 \text{ m/min}$
Werkstoff:	CTS18D	Korngröße:	F 1200	Vorschub:	$f_z = 80 \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 3 \text{ mm}$	Bindung:	Elastisch	Präparationstiefe:	$l_t = 1,25 \text{ mm}$

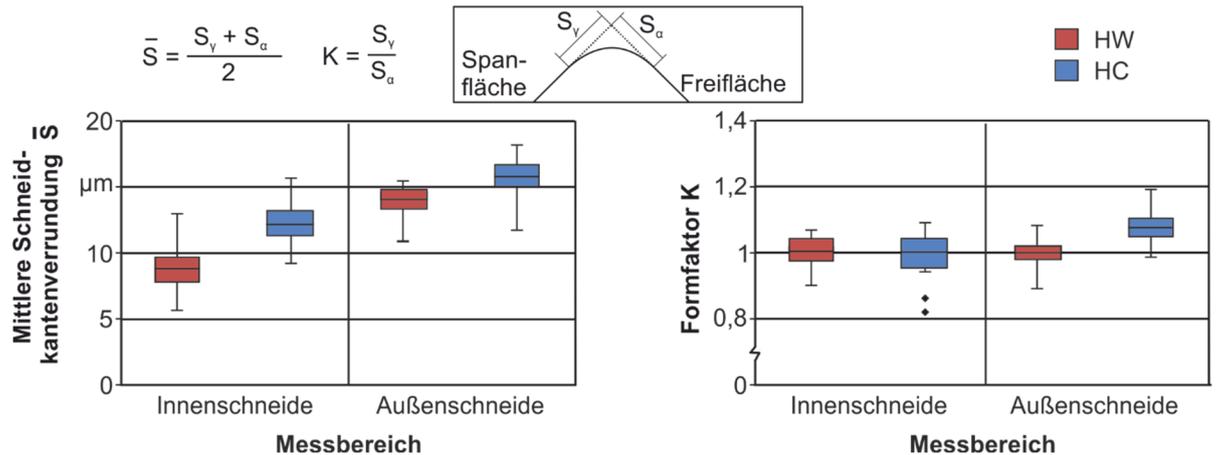


Abbildung 5.2.1.7: Gegenüberstellung der Schneidkantenverrundung bei Werkzeugen mit $d = 3 \text{ mm}$

Neben den beschriebenen Effekten hinsichtlich der Schneidkantenverrundung lassen sich, wie bereits oben beschrieben, bei der Betrachtung der in Abbildung 5.2.1.5 dargestellten REM-Aufnahmen Unterschiede der sich ausbildenden Oberflächentopographien an der Freifläche feststellen. Die auf der Freifläche zu beobachtenden Effekte und Mechanismen lassen sich im Vergleich dazu nicht auf der Spanfläche wiederfinden. Ursächlich hierfür ist die bereits beschriebene Rückfederung der elastischen Bindung unterhalb der Freifläche. Eine geringfügige Beeinflussung ist lediglich im Bereich der Schneidkante zu erkennen. Die Präparation lässt sich daher im Bereich der Spanfläche als minimalinvasiv bezeichnen. Als Ursache für die geringfügige Beeinflussung ist die Zerspanung des Materials zu nennen. Durch die Bohrbewegung entwickelt sich ähnlich zur konventionellen Zerspanung von metallischen Werkstoffen ein makroskopischer Span, welcher über die Spanfläche abläuft. Aufgrund des elastischen Werkstoffverhaltens und der freien Beweglichkeit des erzeugten Spans erfolgt keine nachträgliche Beeinflussung der Spannuttopographie und die vorher bestehende Topographie bleibt bestehen.

5.2.2. Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugnachsleifen (teilbeschichteter Werkzeuge)

Neben der Schneidkantenpräparation an neugeschliffenen Tiefbohrwerkzeugen stellt insbesondere die gezielte Einstellung der Schneidkantenverrundung bei nachgeschliffenen und somit teilbeschichteten Werkzeugen eine besondere Herausforderung dar. Diese Notwendigkeit wird durch den Anspruch einer ressourceneffizienten Verwendung von Vollhartmetallwerkzeugen und die bisher nicht umsetzbaren Optimierungsmaßnahmen an nachgeschliffenen Werkzeugen bestärkt. Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Schneidkantenpräparation von Tiefbohrwerkzeugen durch die Zerspanung eines elastischen Abrasivkörpers, [Tool]Prep, lassen sich auch nachgeschliffene Werkzeuge gezielt präparieren.

58 5.2.2 Prozessentwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses nach dem Werkzeugnachsleifen (teilbeschichteter Werkzeuge)

Prozess:	[Tool]Prep	Abrasivmedium: SiC	Schnittgeschw.:	$v_c = 12,5 \text{ m/min}$
Werkstoff:	CTS18D, HC	Korngröße: F 1200	Vorschub:	$f_z = 80 \text{ } \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Bindung: Elastisch	Präparationstiefe:	$l_1 = 1,25 \text{ mm}$

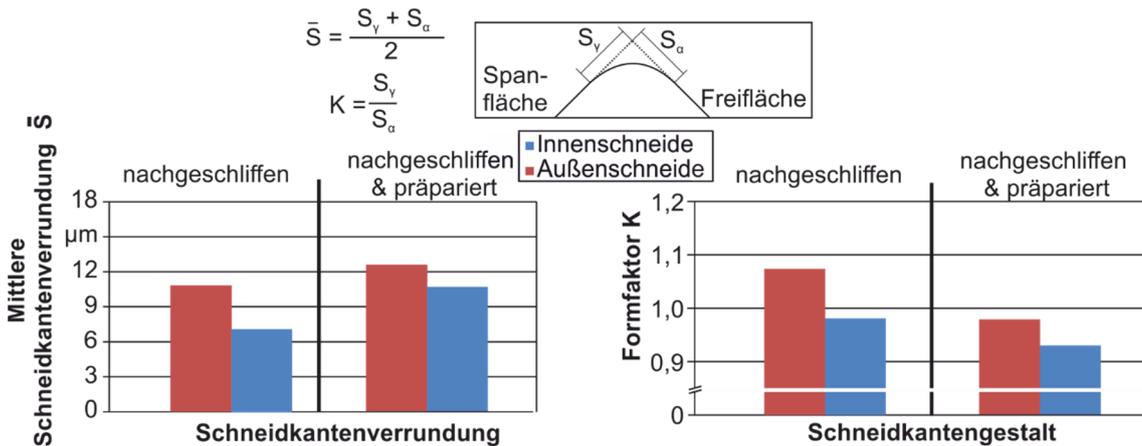


Abbildung 5.2.2.1: Gegenüberstellung Schneidkantenpräparation im nachgeschliffenen und nachgeschliffenen präparierten Zustand

Im Vergleich zu neuen, nicht nachgeschliffenen Werkzeugen zeigt sich, dass sich aufgrund des Nachschleifprozesses eine andere Schneidkantenverrundung einstellt als bei unbeschichtet geschliffenen Werkzeugen. Dieser im Vergleich deutlich höhere Materialabtrag an den Schneidkanten gegenüber dem Neuzustand lässt sich durch zwei Aspekte begründen. Zum einen kommt es aufgrund des Nachschleifprozesses und der damit verbundenen Abweichung beim Einmessen und Nachschleifen der Werkzeuge zu einer geringfügigen Änderung der Werkzeugmakrogestalt. Des Weiteren ergeben sich durch den Nachschleifprozess Beschädigungen der Werkzeugbeschichtung und Ausbrüche an der Schneidkante, die zu Messfehlern führen und somit die Messergebnisse beeinflussen. Die Beeinflussung der Messergebnisse durch ein sich deutlich unterscheidendes Reflexionsverhalten bei nachgeschliffenen Werkzeugen, blanke Freifläche und dunkle, beschichtete Spanfläche erschwert die Auswertung der Messergebnisse und kann zu einer Überbelichtung der zu vermessenden Schneidkante führen. Daher werden zur zusätzlichen Analyse und Auswertung der Schneidenqualität raster-elektronenmikroskopische Aufnahmen herangezogen. Diese verdeutlichen, dass der Unterschied der Schneidkantenverrundung qualitativ deutlich größer ausfällt als dies durch die Messergebnisse der Streifenlichtmikroskopie verdeutlicht wird. Diese Diskrepanz ist auf die unterschiedliche Belichtung der Flächen und die daraus resultierende Überbelichtung der Schneidkante zurückzuführen. Bedingt durch diese Erkenntnis ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Schneidkantenverrundung nach dem Nachschleifen nicht valide sind, da die Schneidkante bei qualitativer Betrachtung einen deutlich schärferen Eindruck vermittelt. Beim Vergleich der Schneidkanten im geschliffenen Neuzustand und im nachgeschliffenen Zustand lässt sich hinsichtlich der Verrundung bei Betrachtung der REM-Aufnahmen kein maßgeblicher Unterschied feststellen. Bedingt durch die Variation und fehlende Normung der Beschreibung von vermessenen Schneidkanten ist in diesem Fall jedoch auch ein Wechsel des Messsystems nicht zielführend. Auffällig ist hingegen, dass die geringe Schleifqualität und die Problematik der Werkstückeinspannung durch die im Vergleich zum Neuzustand hohe Schneidkantenschartigkeit, die das Maß für die Schleifqualität der Schneidkanten darstellt, gut zu erkennen ist. Insbesondere bei nachgeschliffenen Werkzeugen lassen sich tendenziell größer Ausbrüche an der Schneidkante feststellen, die die Schartigkeit R_s erhöhen und somit die Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit stark beeinflussen.

Prozess:	[Tool]Prep	Abrasivmedium:	SiC	Schnittgeschw.:	$v_c = \text{variiert}$
Werkstoff:	CTS18D	Korngröße:	F 1200	Vorschub:	$f_z = \text{variiert}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Bindung:	Elastisch	Präparationstiefe:	$l_i = 1,25 \text{ mm}$

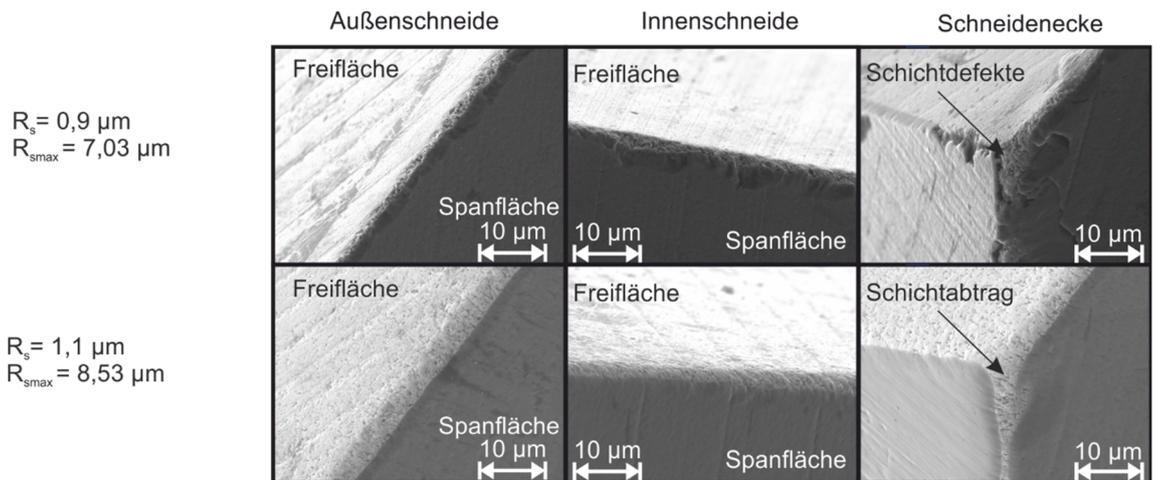


Abbildung 5.2.2.2: Gegenüberstellung der Schneidenqualität im nachgeschliffenen und nachgeschliffenen präparierten Zustand

Die dargestellten REM-Aufnahmen in Abbildung 5.2.2.2 zeigen, dass durch den Nachschleifprozess Schichtdefekte in Form von Abplatzungen und Schichtdelaminationen an den relevanten Schneidkanten resultieren und die Schneiden eine erhöhte Schartigkeit aufweisen. Durch die anschließende Schneidkantenpräparation mit dem [Tool]Prep-Verfahren können die Schichtdefekte entfernt werden und es bildet sich eine homogene Schneidkante aus. Die durch die Schneidkantenvermessungssoftware, ODSCAD, ermittelten Schartigkeiten lassen sich jedoch nicht nachvollziehen, da die Schneidkanten nachdem Präparationsprozess deutlich homogener ausgeprägt ist als im nachgeschliffenen Zustand. Als Ursache hierfür lassen sich die geringe horizontale Auflösung des Messgerätes, Punktabstand $s_{\text{Punkt}} = 0,7 \mu\text{m}$, sowie die durch das unterschiedliche Reflektionsverhalten der beiden Flächen resultierende Überbelichtung der Schneidkante nennen. Auch andere, vorhandene optische Messverfahren erreichen keine ausreichende Messgenauigkeit, was wiederum durch das unterschiedliche Reflektionsverhalten begründet werden kann. Daher erscheint eine qualitative Bewertung der Schneidkantenqualität anhand der aufgenommenen REM-Aufnahmen als geeignetere Ausgangsbasis. Auf Basis dieser Bewertung lässt sich die Qualität der Schneidkante nach der Präparation durch das [Tool]Prep-Verfahren als günstiger beschreiben, da es bei einer homogenen Schneidkante zu geringeren Verschleißeffekten und eine besseren Materialtrennung kommt [16]. Die REM-Aufnahmen zeigen, dass bedingt durch das Aufmaß von $\Delta d_{\text{Auf}} = 0,4 \text{ mm}$ eine Beeinflussung der Schneidenecke des Tiefbohrwerkzeuges resultiert und diese verrundet wird. Insgesamt werden die durch das Nachschleifen bedingten Schichtdefekte eliminiert und die bereits vorher beschädigte Beschichtung abgetragen. Dieser Effekt ist aufgrund der längeren und konstanten Eingriffssituation an der Nebenschneide deutlich stärker ausgeprägt als an der Außen- und Innenschneide. An diesen beiden Schneidteilen ist die Beeinflussung des Schichtabtrags durch das verwendete Verfahren als gering einzustufen. Die Abrasivwirkung der in den elastischen Abrasivkörper eingebetteten SiC-Partikel resultieren in einem Schichtabtrag an den Schneidkanten von $l_{\text{abt}} \approx 5 \mu\text{m}$. Somit liegt dieser deutlich unterhalb der Spannungsdicke regulärer Tiefbohrprozesse mit diesem Durchmesser. Analog zu den Ergebnissen an Werkzeugen im Neuzustand zeigt sich auch bei den teilbeschichteten Werkzeugen, dass an der Innenschneide ein verminderter Materialabtrag stattfindet. Dies ist plausibel, da sich an der verwendeten Kinematik keinerlei Änderung ergeben hat.

5.3. Zwischenfazit zur Schneidkantenpräparation an unbeschichteten und teilbeschichteten Einlippentiefbohrern

Die Untersuchungen und Ergebnisse zur gezielten Schneidkantenpräparation an Einlippentiefbohrwerkzeugen zeigen, dass es verschiedene Verfahren und Möglichkeiten gibt, um eine gezielte Einstellung der Schneidkantenverrundung und -gestalt an Einlippentiefbohrwerkzeugen zu erreichen. Je nach Anwendungsfall und Anforderungsprofil ist zwischen den beiden untersuchten Verfahrensvarianten zu unterscheiden und die zielführende Variante auszuwählen. Das robotergestützte Nassstrahlspanen zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität und eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten aus. Nachteilig an diesem Verfahren sind die komplexe Programmierung und die aufwendige Prozessvorbereitung. Ohne eine Abstützung der langauskragenden Tiefbohrwerkzeuge ließe sich dieses Verfahren für industrielle Einsatzfälle nur schwierig umsetzen. Bei Verwendung einer industriellen Nassstrahlanlage ist eine Schneidkantenpräparation der Tiefbohrwerkzeuge auch im industriellen Umfeld denkbar. In diesem Fall bestehen aufgrund der beschränkten Freiheitsgrade jedoch Einschränkungen hinsichtlich der einstellbaren Verrundungsgrößen und Formfaktoren. Beide Prozesse haben gemein, dass es zu einer Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen und Schneidkanten kommt. Bei Verwendung des robotergestützten Prozesses beschränkt sich die Topographiebeeinflussung auf die Spanfläche des Werkzeuges. Bei der industriellen Anlage erfolgt hingegen eine Komplettbearbeitung des Werkzeuges, sodass neben der Spanfläche auch die Umfangsflächen der Werkzeuge beeinflusst werden. Beide Verfahren verursachen einen deutlichen Materialabtrag an der Schneidenecke und der Nebenschneide, was beim nachfolgenden Einsatz der Werkzeuge zu verminderten Bohrungsgütern führen kann.

Demgegenüber konnte durch das [Tool]Prep-Verfahren ein alternativer Schneidkantenpräparationsprozess entwickelt werden, der sich auf die primären Schneiden beschränkt und eine Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen vermeidet. Im Rahmen von nachfolgenden Einsatzversuchen ist zu klären, welchen Einfluss eine ungleichmäßige Schneidkantenverrundung an der Innen- und Außenschneide auf das Einsatzverhalten hat, siehe Kapitel 8.1.1. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es durch dieses Verfahren möglich ist, eine Schneidkantenpräparation auch an teilbeschichteten Werkzeugen durchzuführen. Die Ergebnisse der Schneidkantenvermessung und die Erkenntnisse aus den rasterelektronischen Aufnahmen zeigen hingegen, dass die Messtechnik unter Verwendung der Streifenlichtmikroskopie keine verlässliche und reproduzierbare Bewertung der teilbeschichteten Werkzeuge zulässt. Diese Varianz zwischen den Messwerten und den REM-Aufnahmen ist durch das unterschiedliche Reflexionsverhalten von geschliffenen und beschichteten Oberflächen zu begründen. Ein ähnlicher Effekt lässt sich bei der Auswertung der zur Beurteilung der Schneidkantenqualität verwendeten Schartigkeit R_s feststellen. Die Ergebnisse, insbesondere der nachgeschliffenen Werkzeuge zeigen, dass aufgrund der resultierenden Beeinflussung der Nebenschneide und der Schneidenecke Anpassungen des Prozesses notwendig sind. Eine Vermeidung der übermäßigen Beeinflussung der Nebenschneide lässt sich durch eine genauere Durchmesserabstimmung des zu zerspanenden Abrasivkörpers erreichen.

Basierend auf den vorgestellten Untersuchungen lässt sich beim Vergleich des abrasiven Nassstrahlspanens sowie des [Tool]Prep-Verfahrens hinsichtlich der Qualität der Schneidkantenverrundung keines der beiden Verfahren als besser geeignet identifizieren. Lediglich die unterschiedlichen Verrundungsgrößen an der Innen- und Außenschneide könnten sich beim [Tool]Prep-Verfahren als nachteilig erweisen, jedoch sind hierfür die Auswertungen der nachfolgenden Einsatzversuche relevant, siehe Kapitel 8.1.1. Durch das weitverbreitete abrasive Nassstrahlspanen in industriellen Präparationsprozessen ergibt sich eine Veränderung der

Oberflächentopographie. Bedingt durch die meist ungerichteten Verfahrensschritte in industriellen Nassstrahlanlagen werden die durch Feinstbearbeitungsprozesse wie dem Polierschleifen erzeugten Oberflächen maßgeblich beeinflusst. Da diese Prozesse der Oberflächentopographieverbesserung dienen, ergibt sich hierdurch ein Zielkonflikt zwischen der Schneidkantenpräparation und der Topographieoptimierung bei Zerspanungswerkzeugen. Zusätzlich ergeben sich gegebenenfalls Unterschiede bei der Spanabfuhr und daraus folgend der Prozesssicherheit. Des Weiteren ist auch der Marketingeffekt von hochglanzpolierten Werkzeugen nicht zu vergessen, da Werkzeuge mit hoch reflektierenden Oberflächen neben den technologischen Vorteilen auch aus verkaufstechnischer Sicht einfacher zu veräußern sind.

Vor dem Hintergrund einer prozesskettennahen Präparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen lassen sich unterschiedliche Aspekte festhalten. Bei Verwendung der beiden Nassstrahlspanverfahren sind zusätzliche Prozessschritte erforderlich, die nicht auf einer einzelnen Maschine umgesetzt werden können. Dadurch ergeben sich erhöhte Handhabungskosten und zusätzlich zu beschaffende Maschinen. Des Weiteren sind die Beeinflussungen von peripheren Funktionsflächen durch diese beiden Prozesse zu klären. Demgegenüber stellt das entwickelte [Tool]Prep-Verfahren eine Möglichkeit dar, eine in die reguläre Herstellungskette einzugliedernde Präparation zu ermöglichen, die keine zusätzlichen Handhabungsschritte und Maschinen benötigt. Außerdem ergeben sich aufgrund der, im Vergleich zum Schleifprozess, geringen Prozesszeiten nur geringfügig verlängerte Herstellungszeiten für die zu präparierenden Werkzeuge. Dem gegenüber steht jedoch der Bedarf zur Untersuchung und Entwicklung zusätzlicher Prozesskenntnisse, um bspw. eine gleichmäßige Verrundung der Innenschneide ermöglichen. Durch Variation der Prozessparameter besteht die Möglichkeit unterschiedliche Verrundungen und Verkippungen der Schneidkante zu erzielen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit durch eine Änderung der Rotationsrichtung als auch einer ergänzenden Verweilzeit zum Ende des Bohrweges Variationen der Schneidkantenverkippung einzustellen. Diese Varianten müssen jedoch in weiterführenden Untersuchungen validiert werden.

6. Gezielte Beeinflussung der Werkzeugfunktionsflächentopographie und Umfangsgestalt sowie des Stirnfasenübergangs mit elastischen Schleifscheiben durch lokales Polierschleifen

Neben der Schneidkantenpräparation von Zerspanungswerkzeugen nimmt die Präparation von Funktionsflächen einen steigenden Stellenwert ein [24, 114]. Der Fokus bei der Polierschleifbearbeitung liegt dabei vornehmlich auf der Optimierung der Oberflächentopographie der Spannut von Zerspanungswerkzeugen. Ziel dieser Optimierungsmaßnahmen ist die Verbesserung der Spanabfuhr während des Prozesses sowie die Vermeidung von adhäsiven Materialablagerungen sowie einer Aufbauschneidenbildung. Im Folgenden wird das in Kapitel 4.1.1 beschriebene Polierschleifen mit elastisch gebundenen Polierschleifscheiben für die Oberflächenfeinstbearbeitung der Führungsleisten von Einlippentiefbohrwerkzeugen untersucht und analysiert. Ziel dieser Untersuchungen ist die gezielte Anpassung der Umfangsgestalt durch eine Verrundung des Übergangs zwischen Öltasche und Führungsleiste sowie eine Verbesserung der Oberflächentopographie nach dem Werkzeugschleifen. Neben der Oberflächenfeinstbearbeitung kommen im Rahmen der Untersuchungen unterschiedliche Prozesskinematiken zum Einsatz, um eine gezielte Verrundung des Stirnfasenübergangs zu erzielen. Zur Betrachtung der definierten Einstellung des Stirnfasenübergangs werden zwei unterschiedliche Stirnanschliffe untersucht, siehe Abbildung 6.1.

Versuchsaufbau Führungsleisten Präparation
Schütte 305 micro

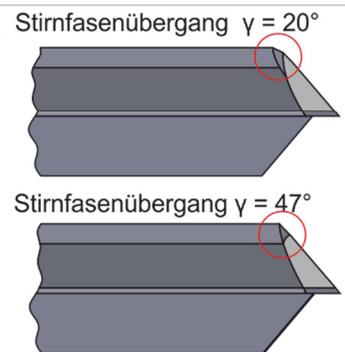
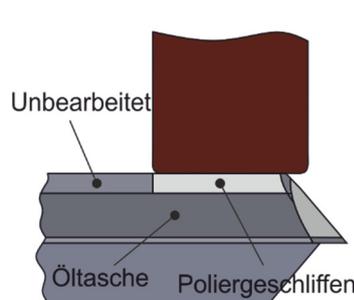
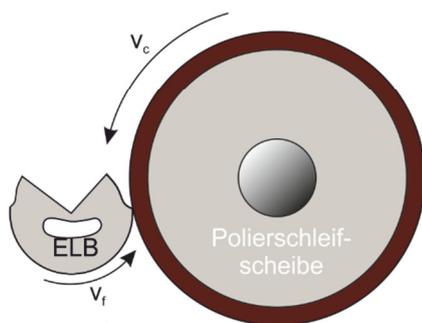
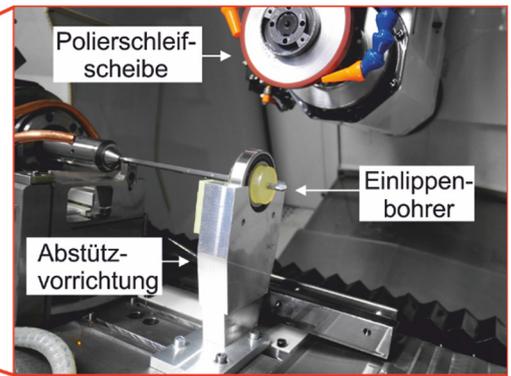


Abbildung 6.1: Übersicht des Versuchsaufbaus und der Werkzeugmakrogestalten

6.1. Versuche an unbeschichteten Einlippentiefbohrwerkzeugen

Im Rahmen der Untersuchungen der gezielten Anpassung der Führungsleistentopographie und der Werkzeugumfangsgestalt werden verschiedene Werkzeugdurchmesser mit unterschiedlichen Ausgangstopographien untersucht. Somit lässt sich die umfangreiche Betrachtung der erreichten Verbesserungen der Oberflächentopographie sowie der erzeugten Konturänderungen auf einen breiten Anwendungsbereich übertragen. Bedingt durch die geringe Steifigkeit von Werkzeugen mit einem hohen l/d -Verhältnisses und der dadurch bedingten Durchbiegung des Werkzeuges werden erste grundlegende Untersuchungen an kurzen VHM-Einlippentiefbohrwerkzeugen mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 10$ mm erprobt, um diese Erkenntnisse im An-

schluss auf Einlippentiefbohrwerkzeuge mit gelötetem Hartmetallkopf des gleichen Durchmessers und VHM-Tiefbohrwerkzeuge mit kleinerem Durchmesser $d_{ELB} = 3$ und 5 mm, zu übertragen. Die unterschiedlichen Werkzeugkonzepte werden durch verschiedene Verfahren und Herstellungsabläufe produziert. Somit ergeben sich sowohl in Bezug auf die resultierende Werkzeugumfangsgestalt als auch die erreichbaren Oberflächengüten nach dem Werkzeugschleifprozess unterschiedliche Gegebenheiten. Im Folgenden werden die grundlegenden Untersuchungen am Beispiel der VHM-Werkzeuge dargestellt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25$ m/s
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24$ mm/min
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10$ mm	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 35$ μ m
Werkstoff:	CTS18D, HW	Breite:	$b_s = 10$ mm	Durchmesser:	$d_s = 100$ mm

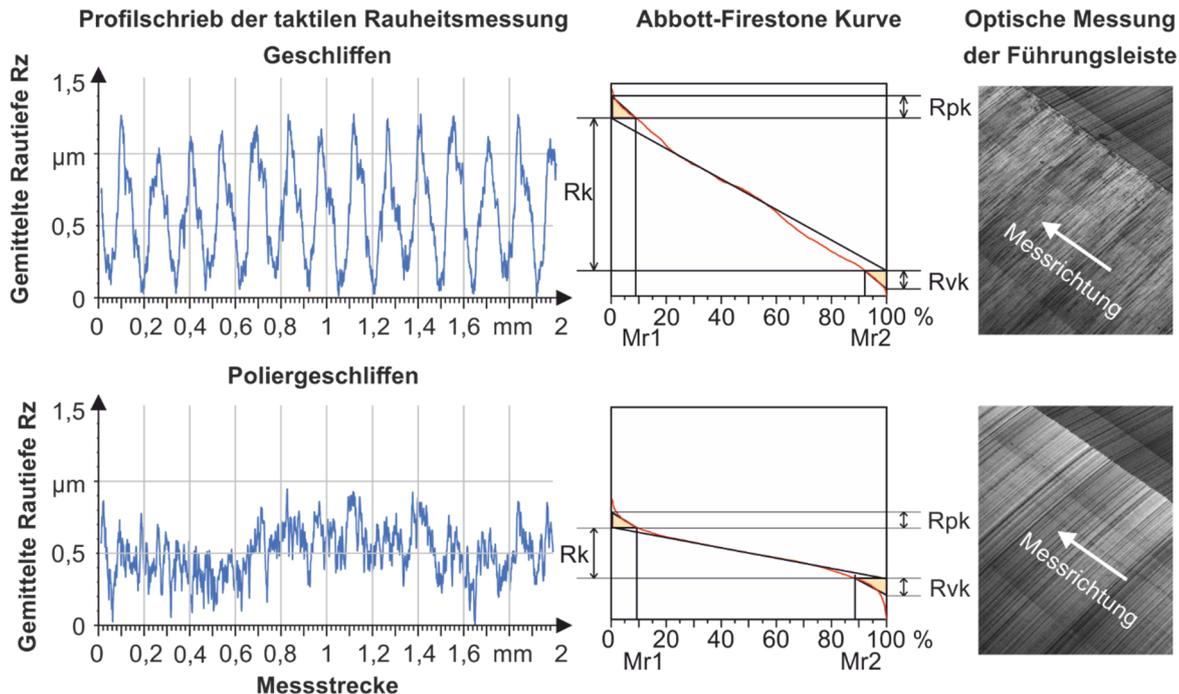


Abbildung 6.1.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Präparationszustände beim VHM-Einlippentiefbohrwerkzeug mit $d_{Elb} = 10$ mm

Die untersuchten Werkzeuge weisen nach dem Schleifprozess eine deutliche Schleifriefenstruktur auf. Die Ausbildung dieser Riefen können durch unsachgemäße Prozessführung oder einen ungünstigen Abrichtprozess begünstigt werden. Daher ist davon auszugehen, dass es sich bei den Schleifriefen um durch die Prozesskinematik beim Rundschleifen resultierende Schleifmarken handelt, die durch die sich überlagernden Vorschub- und Rotationsbewegungen entstehen. Innerhalb der untersuchten Werkzeugcharge tritt dieser Effekt bei vereinzelt Werkzeugen auf, weshalb davon auszugehen ist, dass diese zu Beginn der Charge geschliffen wurden. Aufgrund der Periodizität dieser Schleifmarken ergeben sich nur geringe Profilspitzen $R_{pk} = 0,129$ μ m und Profiltäler $R_{vk} = 0,109$ μ m. Diese Werte unterscheiden sich nur marginal gegenüber den gemessenen Werten der poliergeschliffenen Werkzeuge, da bei dieser Auswertung die Werte $R_{pk} = 0,105$ μ m und $R_{vk} = 0,126$ μ m bestimmt wurden. Auch in Bezug auf die Materialtraganteile, $Mr1_{ge} = 9,2$ % und $Mr1_{pol} = 9,4$ % sowie $Mr2_{ge} = 92,3$ % und $Mr2_{pol} = 88,7$ %, ergeben sich nur geringfügige Abweichungen. Unterschiede zeigen sich jedoch bei Betrachtung der Kernrauheit. Hier ergeben sich für die Kernrauheit R_k , $R_{k_{ge}} = 0,883$ μ m, beim geschliffenen Werkzeug hingegen erhöhte Messergebnisse gegenüber dem poliergeschliffenen Werkzeug, $R_{k_{pol}} = 0,333$ μ m. Dies wird durch die Abbott-Firestone Kurve verdeutlicht. Durch das nachträgliche Polierschleifen wird die Kernrauheit der Oberfläche verringert und somit ein im Vergleich zum geschliffenen Werkzeug verbessertes Einsatz- und Verschleißverhalten sichergestellt. Aufgrund des verringerten Kernrautiefe werden in der

Kontaktsituation entstehende Spannungsfelder zwischen den beiden tribologischen Kontaktpartnern sowie die Neigung zu Spannungsrissen und Abplatzungen im tribologischen Kontakt verringert [33, 141, 158]. Zusätzlich neigen glattere Oberflächen zu einer geringeren Adhäsionsneigung, die den tribologischen Kontakt zusätzlich begünstigt [165]. Die Beeinflussung der Kontaktsituation zwischen dem Werkzeug, genauer der Führungsleiste, inklusive einer Hartstoffschicht und dem zu bohrenden Material wird zu einem späteren Zeitpunkt weitergehend analysiert.

Der Vergleich der Oberflächenkennwerte zeigt, dass eine Betrachtung von zweidimensionalen Oberflächenparametern keine ausreichende Aussagekraft hinsichtlich der resultierenden Oberflächengüte liefert. Aus diesem Grund werden im Folgenden für die Bewertung der Oberflächentopographie zusätzlich dreidimensionale Kennwerte herangezogen. Durch die Gegenüberstellung der Profilschriebe der optischen Rauheitsmessungen lässt sich jedoch ableiten, dass die ursprüngliche Topographie trotz kleinem nominellem Arbeitseingriff, $a_{e,nom} = 35 \mu\text{m}$, nahezu vollständig entfernt wird. Die Ergebnisse unterschiedlicher Ausgangszustände zeigen, dass eine Einstellung der Oberflächentopographie unabhängig des Vorbehandlungszustand möglich ist, siehe Abbildung 6.1.2. Die erreichbaren Oberflächengüten sind somit von der Korngröße der in den elastischen Schleifbelag eingebetteten Diamantkörner abhängig. Die Verbesserung der Oberflächenqualität durch den Abtrag der Profilspitzen und Homogenisierung des Profils erfolgt in einem geringen Maße. Somit ist davon auszugehen, dass nur minimale Abweichungen des Werkzeugdurchmessers durch den Polierschleifprozess beim Einsatz solch geringer nomineller Arbeitseingriffe $a_{e,nom} < 50 \mu\text{m}$ beim Einsatz der verwendeten Polierschleifscheibe resultieren.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 35 \mu\text{m}$
Werkstoff:	CTS18D, HW	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Durchmesser:	$d_s = 100 \text{ mm}$

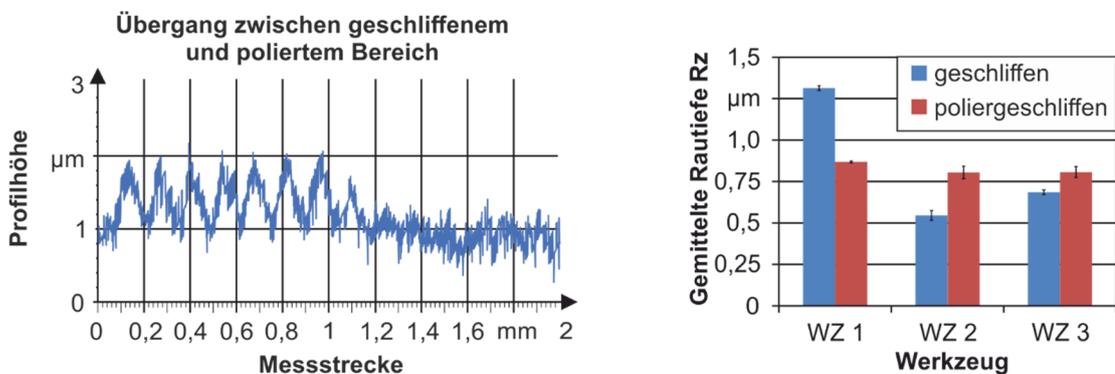


Abbildung 6.1.2: Einfluss des Ausgangszustandes auf die resultierende Oberflächengüte

Das Ergebnis zur Einstellung einer gleichmäßigen Oberflächentopographie nach dem Schleifen der Werkzeuge stellt insbesondere bei der Verwendung von Werkzeugen aus unterschiedlichen Chargen einen bedeutenden Aspekt dar. Insbesondere aufgrund der Verwendung von konditionierten und geschärften Schleifscheiben können sich innerhalb einer größeren Produktionscharge bzw. bei der Verwendung von mehreren Produktionschargen Schwankungen der Fertigungsqualität durch eine Änderung der Führungsleistentopographie ergeben [14, 118]. Dies beeinflusst die Prozessstabilität und die Prozessfähigkeit dieser Werkzeuge und es kommt zu Toleranzabweichungen und vergrößerten Streubreiten an den produzierten Bauteilen. Durch den nachgeschalteten Polierschleifprozess besteht die Möglichkeit, eine gleichbleibende Qualität unabhängig vom Schärfezustand der Schleifscheibe zu erreichen. Exemplarisch werden diese Erkenntnisse anhand der Abbildung 6.1.3 dargestellt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 6 \text{ }\mu\text{m}$
Werkstoff:	CTS18D, HW	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Durchmesser:	$d_s = 100 \text{ mm}$

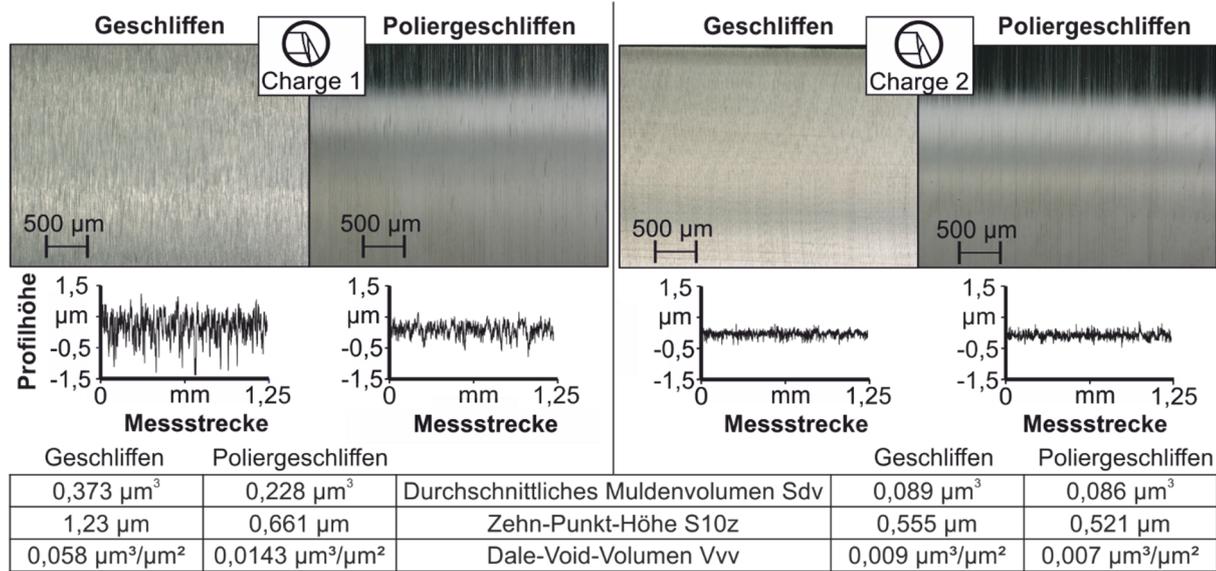


Abbildung 6.1.3: Einfluss des Polierschleifens auf die Oberflächentopographie bei unterschiedlichen Chargen

Durch diese Darstellung zeigt sich, dass die erreichbaren Oberflächengüten von der Korngröße der eingebetteten Diamanten und dem Konditionierzustand abhängig sind [14, 118]. Werden Werkzeuge beim Werkzeugschleifen bereits durch sehr feine Schleifscheiben hergestellt, lassen sich durch den Schleifprozess hohe Oberflächengüten erreichen [118]. Je nach Konditionierintervall kann es aber auch zu einem Einlaufverhalten der Schleifscheibe kommen, die in unterschiedlichen Herstellungsqualitäten resultiert [14]. Diese Oberflächen werden in diesem Fall durch das anschließende Polierschleifen aufgrund der größeren Korngrößen geringfügig verschlechtert. Demgegenüber können Werkzeuge mit eher schlechteren Oberflächengüten durch die nachträgliche Polierschleifbearbeitung deutlich verbessert werden. Auffällig bei diesen Ergebnissen ist jedoch, dass es trotz geringerer Zustellung der Schleifscheibe zu einem nahezu vollständigen Abtrag der Profilsitzen kommt. Durch die weiterhin bestehenden tieferen Riefen ergeben sich Möglichkeiten für eine Ausbildung eines Schmierstoffreservoirs auf den Oberflächen. Die Größe des Volumens dieser Schmierstoffreservoirs lässt sich bei der dreidimensionalen Betrachtung der Oberflächen durch das Mulden-Luftvolumen (Vvv), auch als Dale-Void-Volume bezeichnet, beschreiben. Die sich ähnlich ausbildenden Oberflächengüten lassen sich durch die Auswertung der dreidimensionalen Oberflächenparameter bestätigen, siehe Abbildung 6.1.3. Die geringe Differenz resultiert aus den bereits beschriebenen tieferen Riefen des vorhergehenden Schleifprozesses, welche nicht vollständig durch die geringe Zustellung von $a_{e,nom} = 6 \text{ }\mu\text{m}$ abgetragen werden. Der Vergleich unterschiedlicher Ausgangstopographien zeigt außerdem (vgl. Abbildung 6.1.3), dass es durch die Zustellung der Schleifscheibe bedingte Anpresskraft zu einem Abtrag der Profilsitzen ausreicht, aber bei Flächen mit hoher Oberflächengüte und hohem Traganteil nur eine geringe Veränderung möglich ist.

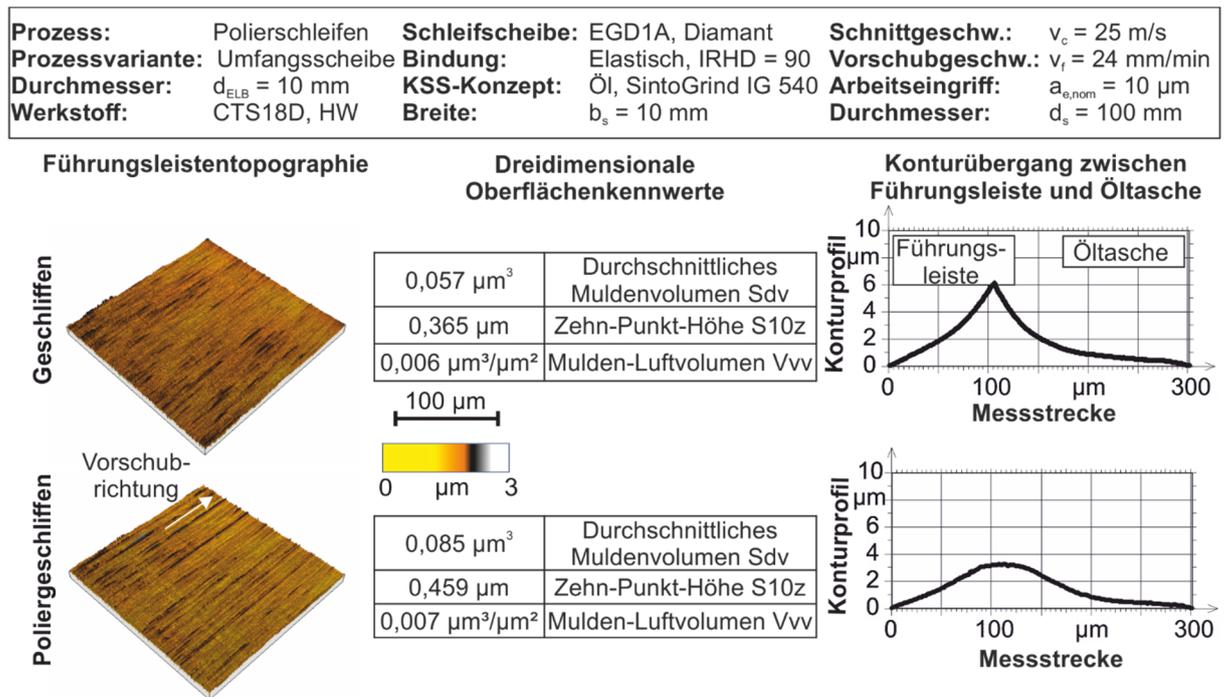


Abbildung 6.1.4: Einfluss des Polierschleifens auf die Oberflächentopographie bei kleineren Werkzeugdurchmessern $d = 5 \text{ mm}$

Dieser beschriebene Effekt ist in Abbildung 6.1.4 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Werkzeugen, die durch einen Feinschleifprozess mit Schleifscheiben kleiner Korngrößen geschliffen wurden, dass die Oberflächengüte der präparierten Oberflächen nicht durch den nachfolgenden Polierschleifprozess verbessert wird. Im Gegensatz dazu kommt es durch die bei den Polierschleifscheiben verwendeten Korngröße $d_k = 10 \dots 15 \text{ }\mu\text{m}$ zu einer geringfügigen Verschlechterung der Oberflächengüte, siehe Abbildung 6.1.4. Neben dem Einfluss der Korngrößen lässt sich in diesem Fall auch die elastische Verbiegung des zu präparierenden Werkzeuges als beschränkender Einfluss nennen, weshalb die Polierschleifscheibe nicht vollends zur Wirkung kommt. Dieser Effekt trifft jedoch nur bei den Werkzeugdurchmessern $d_{\text{ELB}} = 3$ und 5 mm auf, da diese Werkzeuge aufgrund des erhöhten l/d -Verhältnisses eine Abstützung benötigen, siehe Kapitel 4.1.1. Die ermittelten Messwerte in Abbildung 6.1.4 zeigen jedoch, dass die Oberflächen in beiden Fällen im Vergleich zu den Werkzeugen $d_{\text{ELB}} = 10 \text{ mm}$ deutlich höhere Güte aufweisen. So lassen sich bereits im geschliffenen Zustand Oberflächenkennwerte ermitteln, welche im Submikrobereich liegen und daher eine detaillierte Betrachtung des Unterschiedes eine unzureichende Absicherung bietet. Bedingt durch die geringe Vorschubgeschwindigkeit beim Polierschleifen gegenüber dem Rundschleifen der VHM-Stäbe bei der Herstellung, zeichnen sich auf der Oberfläche Schleifriefen ab, welche deutlich länger als bei den regulär geschliffenen Werkzeugen sind. Diese Riefen sind hauptsächlich für die Beeinflussung der erzeugten Oberflächengüten verantwortlich und durch die Korngröße der in den elastischen Schleifbelag eingebetteten Abrasivpartikel bedingt. Durch den Einsatz der elastisch gebundenen Schleifscheibe ergibt sich jedoch eine Veränderung der Umfangsgestalt, die in einem späteren Kapitel näher diskutiert wird, siehe Kapitel 6.1.

Werden neben den dreidimensionalen auch die zweidimensionalen Rauigkeitskenngrößen betrachtet, bestätigen sich die Ergebnisse aus der Analyse der dreidimensionalen Auswertung. Jedoch wird auch bei dieser Betrachtung erneut klar, dass eine reine Betrachtung der zweidimensionalen Rauheitskennwerte zur Beschreibung der Oberflächentopographie unzureichend ist. Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Mittelwerte der geschliffenen und poliergeschliffenen Werkzeuge bei einer Zustellung $a_{e,\text{nom}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$. Neben der qualitativen Bewer-

tung der konfokalen Weißlichtaufnahmen, kann durch die ermittelten Kennwerte der Kernrautiefe R_k , der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} und der reduzierten Spitzenhöhe R_{vk} die These des dominanten Einflusses der Abrasivpartikel im elastischen Schleifbelag bestätigt werden, siehe Tabelle 3. Jeder dieser Messwerte erhöht sich im Vergleich zum geschliffenen Ausgangszustand. Die Erhöhung der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} von $R_{pk_{ge}} \approx 0,08 \mu\text{m}$ zu $R_{pk_{po}} \approx 0,15 \mu\text{m}$ impliziert dabei einen resultierenden Materialaufwurf, der an den Kanten der durch die Diamantkörner erzeugten Furchen im Material resultiert. Die Furchung des Materials wird dabei durch die reduzierte Muldentiefe R_{vk} beschrieben, welche sich von $R_{vk_{ge}} \approx 0,06 \mu\text{m}$ auf $R_{vk_{po}} \approx 0,13 \mu\text{m}$ verdoppelt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen lassen sich die Erkenntnisse aus den Versuchen der Einlippentiefbohrwerkzeuge $d_{ELB} = 10 \text{ mm}$ bestätigen, da bei den Werkzeugen aus Charge 2, welche eine ähnliche Oberflächengüte nach dem Schleifen aufweisen, vergleichbare Ergebnisse erreicht werden.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der gemittelten zweidimensionalen Oberflächenkennwerte

				Geschliffen	Poliergeschliffen
		Kontext	Beschreibung	Mittelwert	Mittelwert
ISO 4287					
Amplituden-Parameter - Rauheitsprofil					
Rz	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.25 mm	Gemittelte Rautiefe	0,439	0,740
Ra	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.25 mm	Arithmetischer Mittenrauwert	0,0511	0,0868
Materialanteilsparameter - Rauheitsprofil					
Rmr	%	$c = 0.5 \mu\text{m}$ unter dem höchsten Punkt	Relatives Materialverhältnis	94,6	27,7
ISO 13565					
ISO 13565-2					
Rk	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.8 mm	Kern-Rauheitstiefe	0,181	0,337
Rpk	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.8 mm	Reduzierte Spitzenhöhe	0,0825	0,147
Rvk	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.8 mm	Reduzierte Muldentiefe	0,0624	0,136
Mr1	%	Robuster Gauß-Filter, 0.8 mm	Oberes Materialverhältnis	9,24	9,63
Mr2	%	Robuster Gauß-Filter, 0.8 mm	Unteres Materialverhältnis	90	88,7
Andere 2D-Parameter					
Rauheitsprofil-Parameter					
Rmax	μm	Robuster Gauß-Filter, 0.25 mm	Maximale Spitzen-zu-Muldenhöhe	0,527	0,882

Um die Verringerung der Oberflächengüte bei bereits durch das Feinschleifen bearbeiteten Werkzeugen näher zu analysieren, erfolgte eine Analyse der Polierschleifscheibenwirktopographie nach dem Abrichten der Polierschleifscheiben. Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass es bei vielen Werkzeugen bei der Bearbeitung innerhalb eines Abrichtintervalls zu vergleichbaren Riefenbildungen auf den Werkzeugen kommt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Ausbildung dieser Riefen durch einzelne hervorstehende Diamantkörner bzw. eventuell auch Kornagglomerate, auch Korninseln genannt, innerhalb des Schleifscheibenbelags kommt, welche sich während des Abrichtprozesses aufgrund der geringen Einzelzustellung, $a_d = 1 \mu\text{m}$, des geringen Überdeckungsgrades, $U_d = 8$, und des elastischen Verformungsverhaltens des Polierschleifscheibenbelages in die elastische Bindung bewegen und nach dem Überlauf ihre Ursprungsposition erneut einnehmen. Zu detaillierteren Beschreibung dieser Thematik dient die schematische Darstellung sowie die Auswertung der Schleifbelagstopographie in Abbildung 6.1.5.

Prozess:	Abrichten	Schleifscheibe:	EDG1A, Diamant	Drehzahlverhältnis:	$q_d = -0,71$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Abrichtscheibe:	SiC, C60	Überdeckungsgrad:	$U_d = 8$
Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	KSS-Konzept:	Emulsion, 7%	Einzelzustellung:	$a_d = 1 \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ps} = 100 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Ausfeuerhöhe:	$n_A = 3$

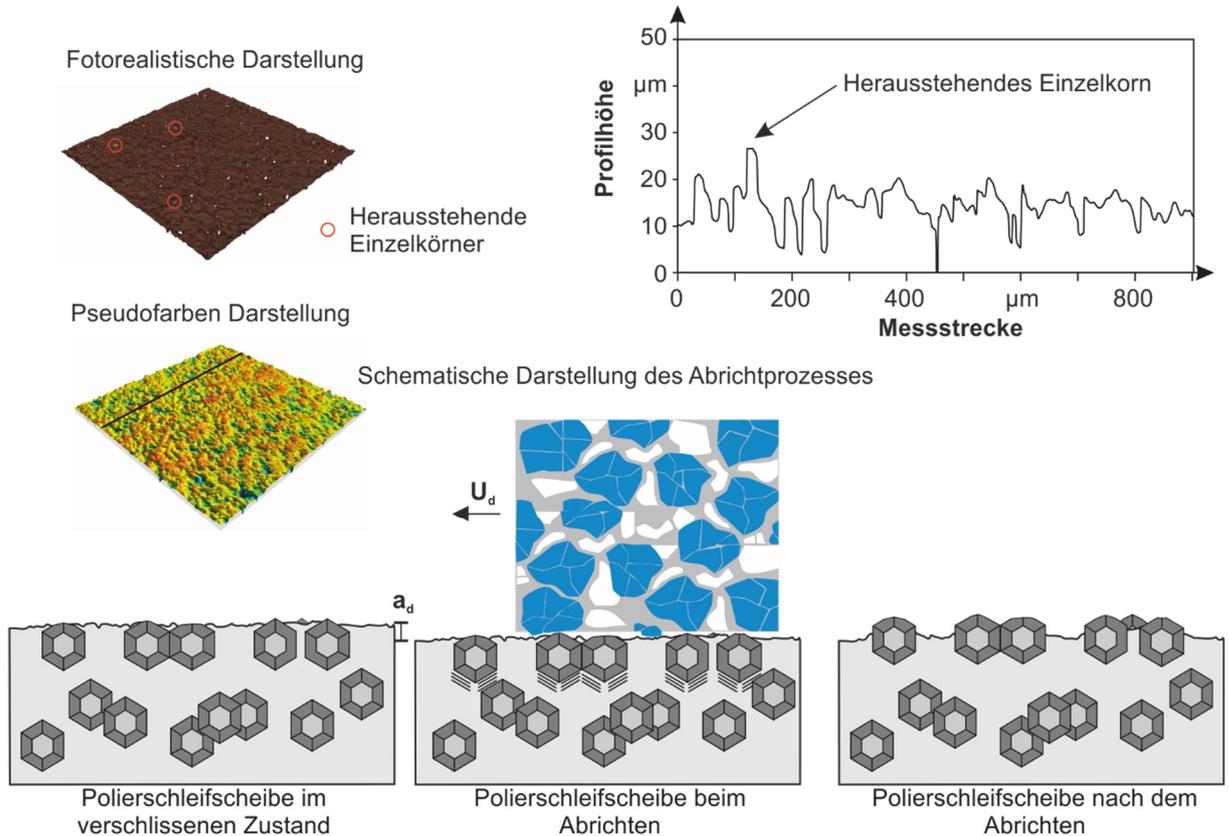


Abbildung 6.1.5: Schematische Darstellung der Verschiebung der Diamantkörner innerhalb der elastischen Bindung. Anhand der schematischen Abbildung lässt sich erkennen, dass einzelne Diamantkörner und Kornagglomerate durch die geringe Zustellung und den geringen Überdeckungsgrad lediglich in den Schleifscheibenbelag ausweichen und nur geringfügig abgerichtet werden. Nachdem die Abrichtscheibe die relevanten Körner und Kornagglomerate überlaufen hat, erfolgt eine elastische Rückfederung. Dadurch, dass der elastische Belag aufgrund der geringen Widerstandsfähigkeit gegenüber der SiC-Scheibe abgetragen wird, erhöht sich der resultierende Kornüberstand. Ein Abtragen der einzelnen Körner wird lediglich dann erreicht, wenn die Einbindung der Diamantkörner einen Grenzwert erreicht.

Das gleiche Phänomen wie beim Abrichten der Polierschleifscheiben wird sich auch beim Polierschleifen der Hartmetallwerkzeuge einstellen. Für den Fall einer Verwendung einer Prozesskinematik mit sich überlagernden Kornbahnen ist das Auftreten von einzelnen, hervorstechenden Diamantkörnern als unproblematisch zu bezeichnen. Auch für den Fall, dass die erzeugte Oberfläche eine hohe Riefentiefe aufweist, welche durch den Polierschleifprozess und den hier verwendeten Zustellungen nachweislich nicht grundlegend verändert wird, lässt sich das festgestellte Phänomen als unkritisch bezeichnen. Liegt jedoch eine Oberfläche mit einer geringen Rauheit in Kombination mit der ungünstigen Prozesskinematik ohne eine Überdeckung von unterschiedlichen Korneingriffsbahnen vor, so verursachen die hervorstechenden Diamantkörner und Kornagglomerate deutliche Riefen, die sich sowohl optisch als auch messtechnisch periodisch auf den Werkzeugen wiederfinden lassen. Zur Bestätigung dieser Annahmen und Phänomene nach dem Einsatz der elastisch gebundenen Polierschleifscheiben werden dreidimensionale Topographieaufnahmen der Polierschleifscheiben durch die Autofokusvariation herangezogen, siehe Abbildung 6.1.5. Die Echtfarbenaufnahme zeigt, dass es im

Polierschleifscheibenbelag zu lokal auftretenden Kornagglomeraten und einzeln herausstehenden Diamantkörnern kommt, welche auch nach der mehrfachen Bearbeitung verschiedener Werkzeuge bestehen bleiben. Dies wird zum einen durch die optischen Messungen der Topographien als auch die lichtmikroskopischen Auswertungen der Werkzeuge und Polierschleifscheiben ersichtlich. Eine Gegenüberstellung der erzeugten Topographien der präparierten Werkzeuge ist in Abbildung 6.1.6 dargestellt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EDG1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	CTS18D, HW	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = \text{var.}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 3 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$		

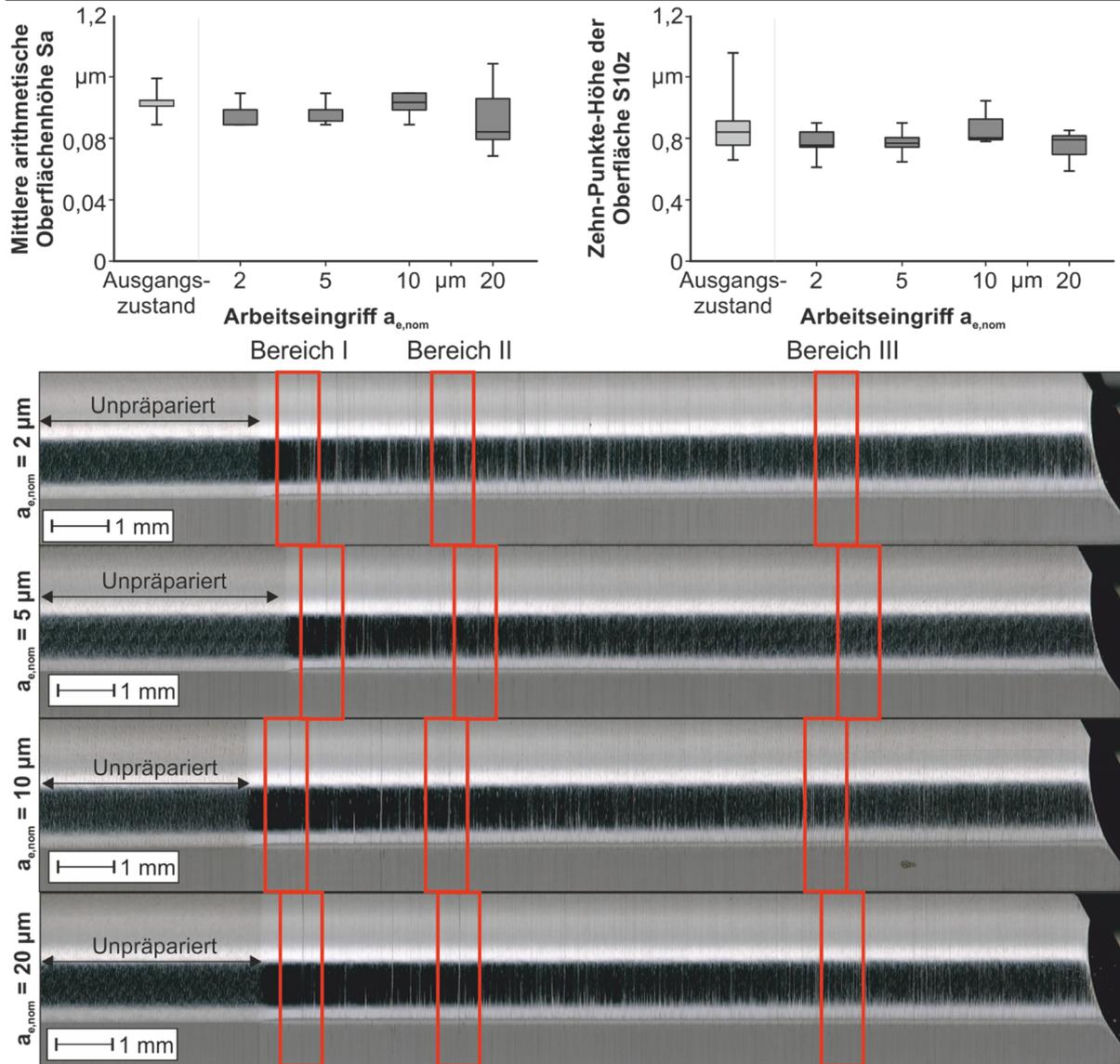


Abbildung 6.1.6: Einfluss hervorstehender Diamantkörner auf die Oberflächentopographie

Anhand der Bereiche I-III in Abbildung 6.1.6 ist die Bestätigung des Auftretens der lokal hervorstehenden Diamantkörner und Kornagglomerate zu finden. Die sichtbaren und messbaren Riefen auf der Oberfläche werden durch den Polierschleifprozess erzeugt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Riefen orthogonal zur Rotationsachse verlaufen. Würden diese durch den Rundschleifprozess verursacht, so würde sich ein Drall abzeichnen, wie er im unpräparierten Bereich zu erkennen ist. Da die Riefen jedoch orthogonal zur Rotationsachse verlaufen, können diese nur durch den Polierschleifprozess erzeugt worden sein. Dies lässt sich durch die Ergebnisse der Isotropiemessung der erzeugten Oberflächen in Abbildung 6.1.7

bestätigen. Die ermittelten dominierenden Texturrichtungen der Oberflächentopographie unterscheiden sich nur unwesentlich, was durch den vermutlich geringen Vorschub beim Rundschleifen der Werkzeuge bedingt ist. Auffällig ist allerdings, dass sich die Isotropie, also die Unabhängigkeit der Textur in Bezug auf die Messrichtung, deutlich unterscheidet. Dieser Effekt lässt sich dadurch begründen, dass es aufgrund der Überlagerung der Schleifscheibenrotation und der Drehzahl des Stabs beim Rundschleifen zu einer mehrfachen Überlagerung von verschiedenen Korneingriffsbahnen kommt. Aufgrund der fehlenden, für die Ausbildung von sich mehrfach überlagernden Korneingriffsbahnen notwendigen Mindestdrehzahl beim Polierschleifprozess, lässt sich die Oberfläche als anisotrop beschreiben. Bei tribologisch hochbelasteten Wirkpartnern gilt eine hohe Isotropie als verschleißhemmend und reibungsreduzierend, wodurch dementsprechend auch das Standzeitvermögen erhöht wird [120, 175, 176].

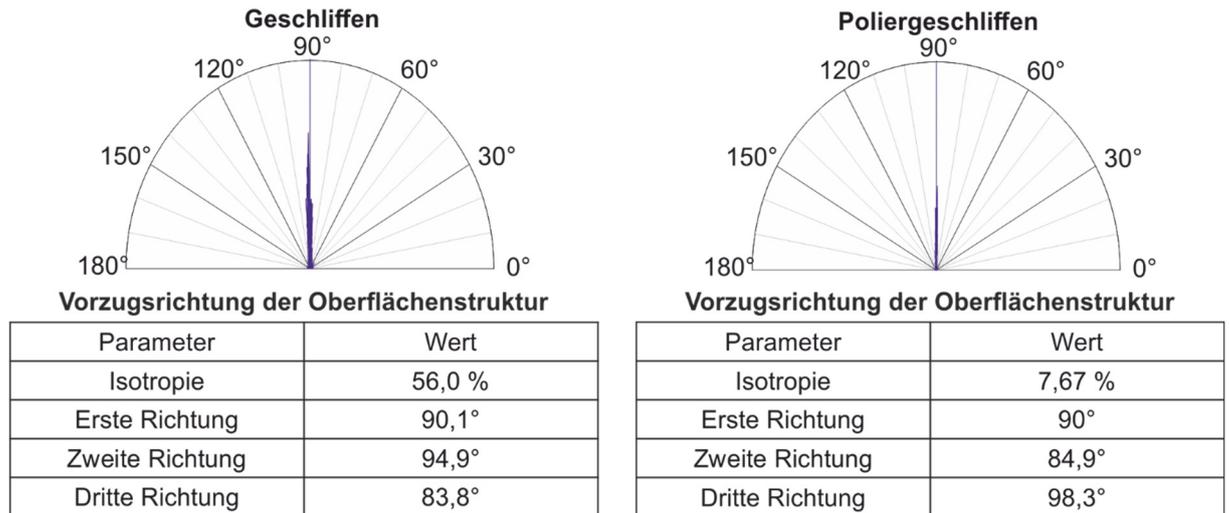


Abbildung 6.1.7: Isotropie in verschiedenen Präparationszuständen

Auffällig ist, dass die Ausprägung der Riefenbildung unabhängig von der eingestellten Zustellung ist. Dies lässt sich jedoch abermals durch die Elastizität des Systems bei der Präparation begründen. Ein weiterer Aspekt, welcher sich auf der präparierten Oberfläche finden lässt, sind einzelne eng aneinander liegende Riefen, die vermutlich durch die bereits in Abbildung 6.1.5 festgestellten Einzelkörner und Kornagglomerate begründet werden können. So erzeugen die herausstehenden Körner und Agglomerate bereits bei geringen Zustellungen die sich ausbildenden Riefen. Bei höheren Zustellungen tritt der in Abbildung 6.1.5 beschriebene Effekt auf. Die Körner weichen in den Belag aufgrund der durch die Zustellung resultierenden Anpresskraft aus und es entstehen die erkennbaren Riefen auf der präparierten Oberfläche. Die Gegenüberstellung der Präparationen an den Werkzeugen mit dem Durchmesser $d_{ELB} = 3$ mm in Abbildung 6.1.6 zeigt, dass es insbesondere bei diesen kleinen Durchmessern bei der Bearbeitung mit der 1A1-Polierschleifscheibe zu einer ungleichmäßigen Ausbildung der Oberflächengüte kommt. Die Abstützung des Werkzeuges erfolgt bei einem Abstand von $t_{Ab} = 13$ mm zur Werkzeugspitze. Hierdurch resultiert bei der Präparation des Werkzeuges im linken, der Stirnfläche des Werkzeuges am weitesten entfernten Bereich die Bearbeitung mit der höchsten Flächenpressung. Abgesehen von den durch die vorher bereits beschriebenen Riefen aufgrund von einzelnen herausstehenden Körnern, lassen sich hier optisch als auch messtechnisch die besten Oberflächenkennwerte feststellen. Je größer der Abstand zur Abstützung, desto geringer wird die Beeinflussung der Oberflächentopographie durch den Polierschleifprozess. Diese Erkenntnis lässt sich über alle untersuchten Zustellungen $a_e = 2 \dots 20$ μm feststellen. Bedingt durch die höhere Steifigkeit bei den Werkzeugen mit $d_{ELB} = 10$ mm lässt sich dieser Effekt nicht im gleichen Umfang feststellen, da bei diesen Werkzeugen zum einen im Ausgangszustand deutlich geringere Oberflächengüten vorliegen, als auch die Verbiegung aufgrund der erhöhten Biegesteifigkeit keinen nennenswerten Einfluss hat. Insbesondere jedoch

aufgrund der höheren Ausgangsrauheit der Werkzeuge lassen sich die festgestellten Phänomene nicht eindeutig bestätigen oder widerlegen.

Bedingt durch diese gewonnenen Erkenntnisse erfolgte eine Anpassung der vorher entwickelten Prozesskinematik. Dies hatte zum einen den Grund, dass es aufgrund der bereits diskutierten Riefenbildungen zu einer Furchung des Materials kommt und zum anderen bei der Präparation der Werkzeuge mit kleinem Durchmesser eine Präparation eines Bereichs von $t_{\text{Präp}} \approx 7$ mm offensichtlich ist. Daher kam eine Topfscheibe, E9A2, mit gleichen Spezifikationen, wie die Umfangspolierschleifscheibe zum Einsatz. Durch die Änderung der Prozesskinematik ergibt sich die Möglichkeit zur Verringerung der notwendigen Ausspannlänge. Dementsprechend erfolgt eine Reduzierung des Abstandes zwischen Werkzeugstirn und Abstützbe- reich auf $t_{\text{Ab}} = 5$ mm. So besteht die Möglichkeit zur Analyse des Einsatzverhalten dieser Polierschleifscheiben bei sich überdeckenden Kornbahnen sowie eine Variation des noch später diskutierten Übergangs zwischen der Stirn- und der Umfangsfläche.

Im Folgenden soll vorerst auf die Beeinflussung der Oberflächentopographie der Topfscheibe eingegangen werden. Zur Verdeutlichung der Prozesskinematik sei an dieser Stelle auf die schematische Darstellung in Kapitel 4.1.1 verwiesen. Wie bereits bei der Analyse der Oberflächenkennwerte beim Einsatz der Umfangspolierschleifscheibe werden zur Bewertung der Effektivität des Präparationsprozesses dreidimensionale Oberflächenkennwerte in Betracht gezogen. Die Ergebnisse der veränderten Prozesskinematik sind in Abbildung 6.1.8 dargestellt. Auch hier lässt sich feststellen, dass es aufgrund der hohen Oberflächengüte nach dem Werkzeugschleifen und der nur geringen Zustellungen lediglich zu einer geringfügigen Verbesserung der Oberflächengüte kommt. Jedoch bestätigen die ermittelten Messergebnisse die Erkenntnis aus den Versuchen der Werkzeuge mit dem Durchmesser $d_{\text{ELB}} = 10$ mm, da es zu einer Reduzierung einzelner Profilspitzen kommt. Dies ist auch durch die geringe Anzahl an Ausreißern in den in Abbildung 6.1.8 dargestellten Boxplotdiagrammen ersichtlich. Hinsichtlich des eingestellten Anstellwinkels φ_A lassen sich hingegen in Bezug auf die einzustellende Oberflächentopographie keine signifikanten Erkenntnisse feststellen. Bei optischer Betrachtung lässt sich zwar eine Verbesserung der Oberflächengüte erkennen, jedoch spiegelt sich diese nicht in den ermittelten Messwerten der arithmetischen Oberflächengüte S_a oder der Zehn-Punkt-Höhe der Oberfläche S_{10z} wider. Es zeigt sich, dass es aufgrund der Eingriffssituation bei der Umfangsbearbeitung auch bei dieser Kinematik und den gewählten Zustellungen a_e zu einem linienförmigen Kontakt kommt und das elastische Verformungsvermögen nicht vollumfänglich ausgenutzt werden kann. Dadurch ist die Materialfurchung durch einzelne hervorste- hende Diamantkörner aus dem elastischen Schleifbelag dominant, die in partiellen Bereichen der präparierten Führungsleisten eine ausgeprägte Riefenstruktur hervorruft. Mit der Erhöhung der Zustellung ist dieser Effekt vermehrt festzustellen, siehe Abbildung 6.1.8, was den Schluss zulässt, dass es bei geringen Zustellungen a_e zu der in Abbildung 6.1.5 beschriebenen elastischen Verschiebung von überstehenden Körnern in den Schleifbelag kommt und diese somit keinen dominanten Einfluss auf die Oberflächenausbildung haben. Demgegenüber zeigt sich bei erhöhten nominellen Zustellungen $a_{e,\text{nom}}$, dass die elastische Verdrängung vollständig ausgenutzt wird und ein Ausweichen der Diamantkörner in den Schleifbelag nicht mehr möglich ist. Entsprechend erzeugen diese Diamanten die ersichtlichen Riefen auf der Werkstückoberfläche und beeinflussen somit die erzeugte Oberflächenstruktur, siehe Abbildung 6.1.8, bis zu einem ausreichenden Verspannungsgrad belastet, wodurch die einzelnen Körner oder Korncluster eine Beeinflussung der Oberflächenstruktur bewirken.

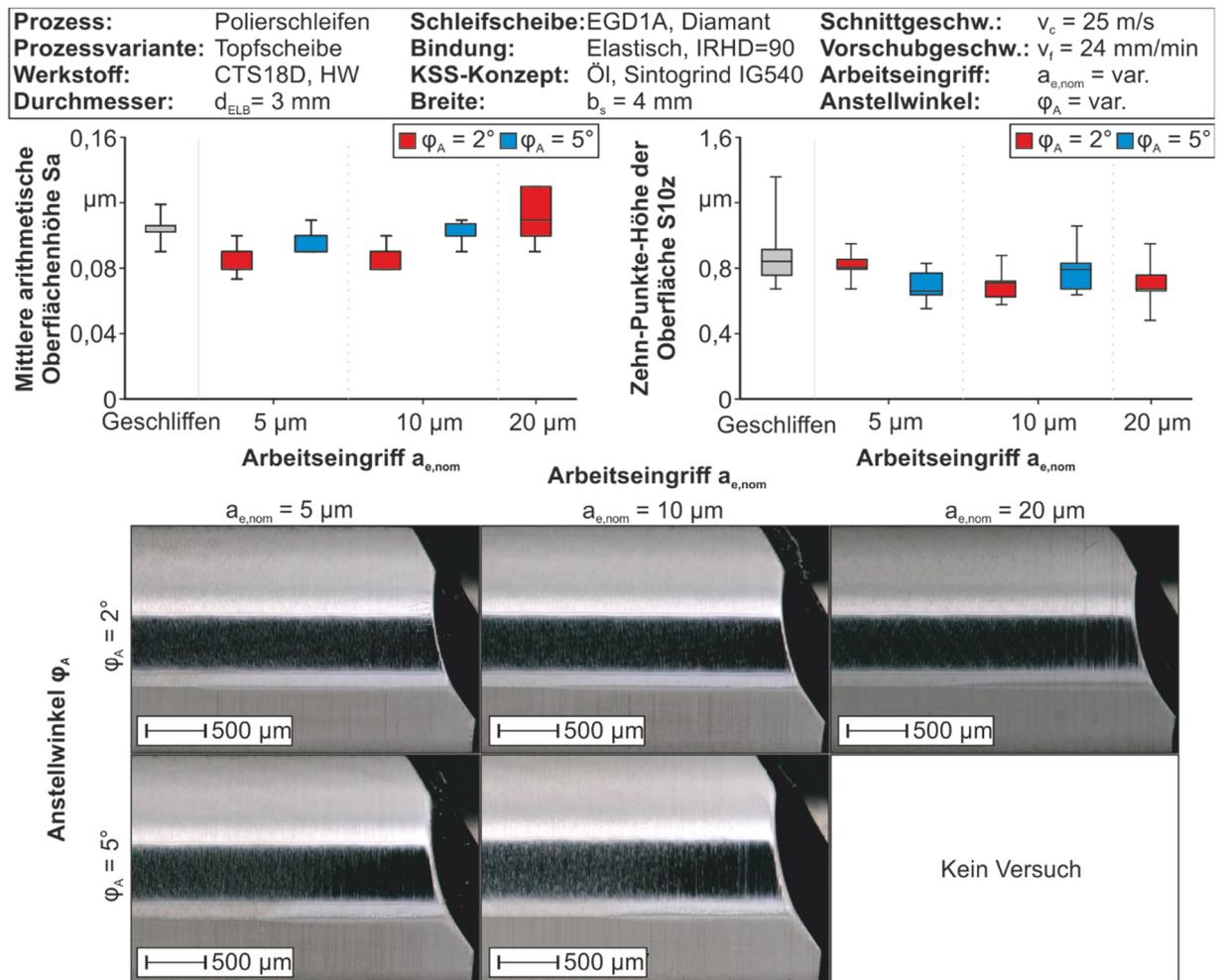


Abbildung 6.1.8: Beeinflussung der Oberflächentopographie durch die geänderte Prozesskinematik

Ziel der geänderten Prozesskinematik sollte eine Vermeidung solcher Riefen durch sich überlagernde Einzelkorneingriffsbahnen sein. Jedoch lässt sich auf Basis dieser Erkenntnisse eindeutig erkennen, dass dieser Effekt durch eine Änderung der Kinematik nicht zu vermeiden ist. Bei der Bearbeitung von planen Flächen tritt der Effekt einer Überlagerung der Kornbahnen bekanntermaßen auf [14, 95, 140]. Da in diesem Fall jedoch die Führungsleiste eine kreisförmige Form aufweist und die Zustellungen im niedrigen Mikrometerbereich liegen, lässt sich als Erklärung ableiten, dass die einzelnen herausragenden Abrasivkörner bei der gewählten Prozesskinematik eine Riefenbildung begünstigen.

Neben einer Beeinflussung der Oberflächentopographie lassen sich durch den Polierschleifprozess zusätzlich Änderungen der Umfangsgestalt feststellen. Die Prozesskinematik bei der Herstellung von Einlippentiefbohrwerkzeugen aus Vollhartmetall erfolgt wie in Kapitel 4.2 beschrieben. Hierdurch resultieren nach dem Schleifen scharfkantige Übergänge zwischen der Öltasche und der Führungsleiste. Scharfkantige Übergänge haben insbesondere bei dynamischen Prozessen Nachteile. Für den Fall des Einlippentiefbohrwerkzeuges stellt die Versorgung der Führungsleiste mit Kühlschmierstoff einen besonderen Stellenwert dar. Ein scharfkantiger Übergang kann in diesem Fall als Abstreifer fungieren und den in der Öltasche befindlichen Schmiermittelfilm, welcher aufgrund der Rotationsbewegung in Richtung Führungsleiste strömt, minimieren und somit zu einer Unterversorgung der tribologischen Kontaktsituation führen. Bei zu starker Verrundung des Übergangs besteht die Möglichkeit, dass das Werkzeug in den Zustand der Flüssigkeitsreibung übergeht. Hierdurch würde ein Kontakt zwischen Führungsleiste und Bohrungswand in abgeschwächter Form stattfinden. Durch den Polierschleifprozess lassen sich die exponierten Kanten und Übergänge definiert verrunden. Die elastische Verformbarkeit des Schleifbelags resultiert in einer Umschlingung des Übergangs

zwischen Führungsleiste und Öltasche und führt zu einer gleichmäßigen Verrundung. Diese Erkenntnisse lassen sich sowohl bei Werkzeugen mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 5$ mm, siehe Abbildung 6.1.4, als auch $d_{ELB} = 10$ mm, siehe Abbildung 6.1.9, feststellen.

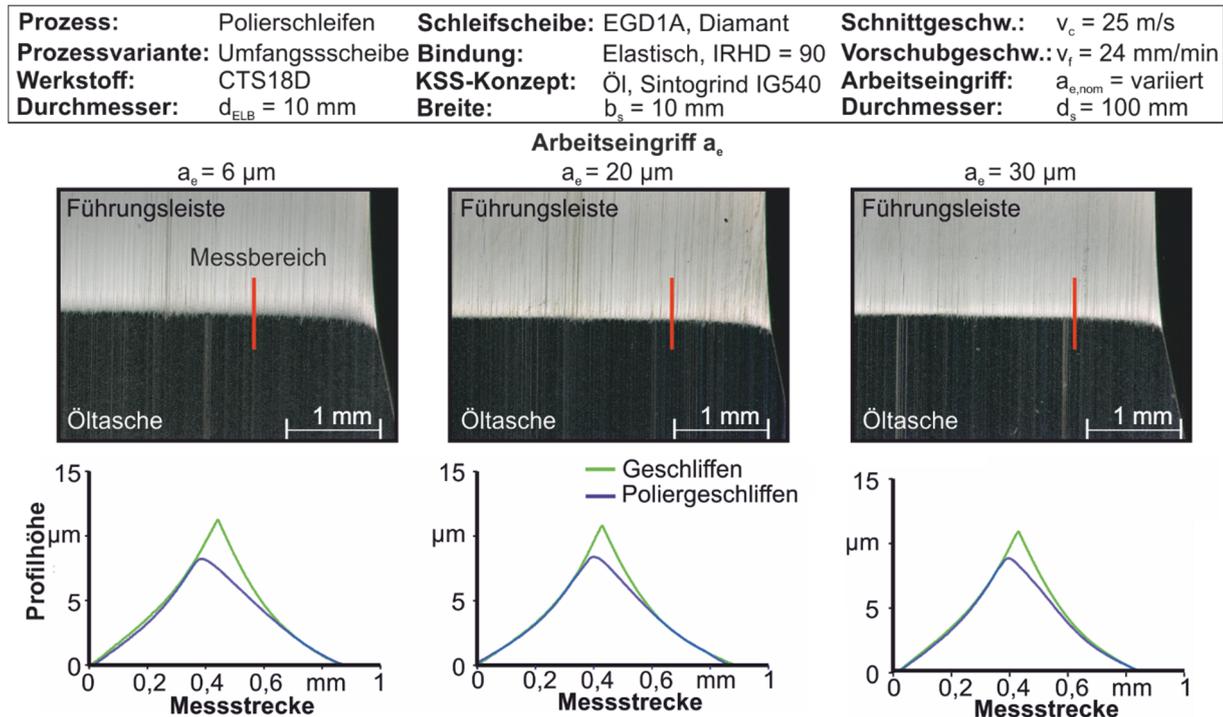


Abbildung 6.1.9: Gegenüberstellung der Umfangsgestaltänderung bei unterschiedlichen Zustellungen

Die Darstellung der Konturübergänge an den Führungsleisten der Werkzeuge zeigt, dass eine Veränderung der Umfangsgestalt möglich ist. Bei diesen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass das Verhältnis von Messstrecke zu Profilhöhe stark überhöht dargestellt ist. Somit dienen diese Erkenntnisse einer rein qualitativen Bewertung und zeigen das Potential der Möglichkeit einer gezielten Gestaltänderung an den Führungsleisten. Die elastische Nachgiebigkeit des Schleifscheibenbelags ergibt keinerlei Unterschiede durch eine Erhöhung der Zustellungen. Ursächlich hierfür ist der erhöhte Stützwirkung des Materials im Bereich des Übergangs sowie der geschliffenen Gestalt des Einlippentiefbohrwerkzeuges. Vor dem Kontakt mit dem Übergang bzw. der Führungsleiste befindet sich die Polierschleifscheibe im Bereich der Öltasche und hat keinerlei Kontakt zum präparierenden Werkzeug. Sie liegt somit im unverspannten Zustand vor. Mit voranschreitendem Vorschubweg kommt es durch die Rotation des Werkzeuges zu einem Kontakt des Schleifbelags mit dem Auslauf der Öltasche, welcher dazu führt, dass das elastische System verspannt wird und der Belag den Übergang zwischen Öltasche und Führungsleisten umschlingt. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen von *Effgen* [81]. Aufgrund der gleichbleibenden Bindungshärte innerhalb dieser Versuche sowie dem elastischen Verformungsverhalten der Abstützung ergeben sich somit keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Umfangsgestalt.

Durch die in diesem Fall verwendete Prozesskinematik, siehe Abbildung 6.1, und dem elastischen Verformungsverhalten der Polierschleifscheibenbeläge ergeben sich neben der beschriebenen Änderung der Werkzeugumfangsgestalt zusätzlich am Übergang zwischen Stirnfläche und der Führungsleiste Konturänderungen. Durch eine gezielte Einstellung des Stirnflächenübergangs sind neben dem Verschleiß auch Beeinflussungen des Einebnungsverhaltens der Bohrungswand durch die Führungsleisten der Einlippentiefbohrwerkzeuge möglich. Vergleichbare Erkenntnisse sind bereits durch Untersuchungen beim BTA-Tiefbohren bekannt und zeigen in diesen Anwendungsfällen günstige Eingriffsbedingungen, die zu verbessertem

Verschleißverhalten und einer höheren Oberflächengüte im Vergleich zu konventionell hergestellten Führungselementen führen [2, 57]. Beim Übertrag auf Einlippentiefbohrwerkzeuge sind unter anderem jedoch die wirkenden mechanischen Belastungen zu berücksichtigen, welche sich um ein Vielfaches unterscheiden. Je nach Prozessvariante kann auf Basis der Literaturwerte ein Kraftverhältnis der beim Einlippentiefbohren wirkenden Kraft $F_{FI,ELB}$ und der beim BTA-Tiefbohren wirkenden Kraft $F_{FI,BTA}$ von $F_{FI,ELB} / F_{FI,BTA} = 7 \dots 110$ bestimmt werden [97, 107, 121, 136]. Diese hohen Werte zeigen, dass die Belastungssituation nicht mit der Bearbeitung mit Einlippentiefbohrwerkzeugen vergleichbar ist. Da auch bei diesen Untersuchungen keine definierte Beschreibung des Stirnfasenübergangs erarbeitet wurde, dient zur Beschreibung der Veränderung des Stirnfasenübergangs daher eine Modifikation des Formfaktormodells nach *Denkena* [70]. Dieses Modell wird demnach im Folgenden abgeleitet und für die anschließenden Untersuchungen angewendet. Das Schneidkantenmodell nach *Denkena* [70] wurde hierfür nach der untenstehenden Annahme abgeändert und adaptiert.

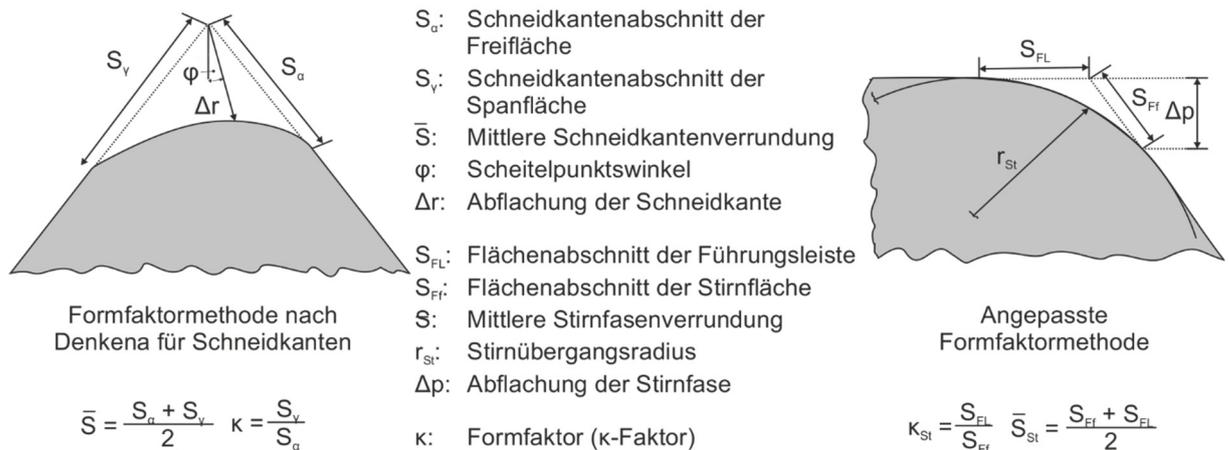


Abbildung 6.1.10: Beschreibung der Schneidkanten- und Stirnübergangskante mit dem Formfaktormodell nach *Denkena* [70]

Zur Beschreibung des Stirnfasenübergangs wurden die bekannten Kennwerte der Formfaktormethode übernommen und an den Anwendungsfall angepasst. Bedingt durch den großen Winkel zwischen Führungsleiste und Stirnfläche, von $\delta = 125^\circ$, im Vergleich zu Keilwinkeln von Bohrwerkzeugen, $\beta \approx 62,5^\circ$, weist die konventionelle Formfaktormethode nach *Denkena* [70] Schwächen bei der Beschreibung der realen Gestalt des verrundeten Bereichs auf. Daher wurde der Radius r_{FL} ergänzt, um eine Beschreibung von symmetrischen Schneiden zu ermöglichen. Diese Beschreibung ist jedoch bei asymmetrischen Verrundungsformen unzureichend, weshalb neben der Verwendung des Radius r_{FL} zusätzlich eine Anpassung zur Beschreibung der genauen Gestalt des Übergangs notwendig wird. Die bestehende Diskrepanz zwischen den ermittelten Werten der Standardmethode und des gemessenen Radius zeigt, dass die konventionelle Herangehensweise zu einer Abweichung der gemessenen Werte führt und somit eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Verrundungen nur schwierig möglich ist, siehe Abbildung 6.1.10. Daher muss an die erarbeitete Anpassung der Anspruch gestellt werden, dass durch eine Ergänzung von zusätzlichen Messgrößen eine nähere Beschreibung der Schneidengestalt möglich wird. Sinnvoll ist hierbei eine Berücksichtigung des zwischen den beiden, die verrundete Kante beschreibenden Abschnitte, bestehenden Winkels. Bei der Vermessung von Schneidkanten entspricht dieser Winkel dem Keilwinkel β des Schneidkeils. Dieser wird jedoch bei der Betrachtung mit der nach *Denkena* [70] beschriebenen Methode nicht berücksichtigt, weshalb ein Vergleich unterschiedlicher mittlerer Schneidkantenverrundungen \bar{S} aufgrund des variierenden Keilwinkels im Extremfall sogar bereits an einer Schneide nicht eindeutig möglich ist. Neue Ansätze zur Verbesserung dieser Methode werden von *Aßmuth* [6] beschrieben. Durch die Anpassung der neu eingeführten Kenngrößen ist eine detail-

lierte Beschreibung der Schneidkante möglich. Bedingt durch die weniger komplexe Beschreibung des Übergangs an der Stirnfase und zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit, wird im Rahmen dieser Arbeit zur Beschreibung der Schneidkantengestalt neben der Formfaktormethode zusätzlich die Profilabnahme Δp berücksichtigt.

Aufbauend auf den beschriebenen Erkenntnissen und den zusätzlich eingeführten neuen Kennwerten sollen im Folgenden die Ergebnisse der Stirnkantenpräparation sowie die daraus resultierenden Potentiale beschrieben werden. Somit soll eine Validierung der Präparationsmaßnahmen gegeben und die gezielte Beeinflussung des Stirnübergangs beschrieben werden. Zur Validierung erfolgt in Kapitel 8.2.1 die Analyse des Zusammenhangs zwischen den hier erarbeiteten Erkenntnissen und den Ergebnissen aus den Einsatzversuchen. Diese Maßnahme ist notwendig, um die Einflüsse dieser Optimierungsmaßnahme näher zu bestimmen.

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, sind im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen verschiedene Werkzeuge präpariert worden. Neben den unterschiedlichen Werkzeugdurchmessern sind zusätzlich verschiedene Stirnfasenübergänge zum Einsatz gekommen. Standardmäßig werden Einlippentiefbohrwerkzeuge mit einer $\delta_{\text{Fase}} = 25^\circ$ Fase versehen, um das Einfädeln des Werkzeuges zu verbessern [136]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf diese Stirnfase verzichtet und eine Variante ohne $\delta_{\text{Fase}} = 25^\circ$ Fase untersucht. Der resultierende Stirnfasenwinkel von $\delta \approx 135^\circ$ führt zu einer verstärkten Einebnung des Materials, da das Material über eine deutlich kleinere Fläche eingeebnet wird. Dies lässt sich über die resultierende Flächenpressung begründen, die neben der verstärkten Umformung zusätzlich einen erhöhten spezifischen Wärmeeintrag ins Material induziert. Vergleichbare Versuche lassen sich bereits bei anderen Tiefbohrprozessen finden. So zeigen beispielsweise die Untersuchungen von *Bruchhaus* [57] und *Abrahams* [2], dass die gezielte Beeinflussung des Stirnfasenübergangs bei wechselbaren Führungselementen in Kombination mit einer geeigneten und optimierten Hartstoffschicht zu einer deutlichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Werkzeuge führt und somit verbesserte Bohrungsgüten und Standwege erreichen. Aufgrund des makroskopischen Unterschieds zwischen den in den beschriebenen Arbeiten untersuchten wechselbaren Führungselementen und den Einlippentiefbohrwerkzeugen ohne wechselbare Schneidelemente lassen sich die Ergebnisse von *Bruchhaus* [57] und *Abrahams* [2] nicht direkt auf diesen Anwendungsfall übertragen. Ursächlich hierfür ist insbesondere die geringere Biegesteifigkeit der Einlippentiefbohrwerkzeuge und der bestehende Unterschied zwischen den Möglichkeiten zur Präparation der beanspruchten Kanten. Bedingt durch die unterschiedlichen Durchmesserbereiche ergeben sich bei der Beeinflussung des Stirnfasenübergangs an Einlippentiefbohrwerkzeugen andere Kenngrößen als bei Werkzeugen für den BTA-Bereich. Außerdem ergeben sich durch den Aufbau solcher Werkzeuge mit wechselbaren Schneidelementen Möglichkeiten, die eine separate Bearbeitung ermöglichen. Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Unterschied zwischen den beiden Varianten des Stirnfasenwinkels ist in Abbildung 6.1.11 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der standardmäßige Stirnfasenwinkel, $\delta \approx 160^\circ$, nur sehr geringfügig durch die nach dem Werkzeugschleifen erfolgende Präparation mittels elastischer Schleifscheiben beeinflusst wird. Begründet werden kann dies durch das Verformungsverhalten der eingesetzten Polierschleifscheiben (vgl. Abbildung 6.1.11). Bei einem flachen Übergang, dementsprechend einem stumpfen Winkel δ , wird die elastische Verformung der Polierschleifscheibe durch die Fase vermindert und eine Umschlingung der Kante verhindert. Demgegenüber zeigt sich für den Stirnfasenübergang $\delta \approx 135^\circ$ ein anderes Ergebnis. Die steilere Flanke nach der Stirnübergangskante vermeidet die Abstützung des elastischen Schleifscheibenbelags, wodurch eine freie Verformung und somit eine Umschlingung der bearbeiteten Kante möglich wird und eine Veränderung des Stirnfasenübergangs resultiert. Die bereits bei der Beeinflussung der Oberflächengüte durch das Polierschlei-

fen mit elastischen Schleifscheibenbelägen bekannte Verformung zeigt sich auch bei der Präparation des Stirnfasenübergangs. Das Verformungsvermögen scheint jedoch beschränkt zu sein, da sich bei steigender Zustellung a_e kein signifikanter Einfluss auf das Ergebnis der Stirnfasenverrundung feststellen lässt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25$ m/s
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24$ mm/min
Werkstoff:	CTS18D	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom}$ = variiert
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10$ mm	Breite:	$b_s = 10$ mm	Durchmesser:	$d_s = 100$ mm

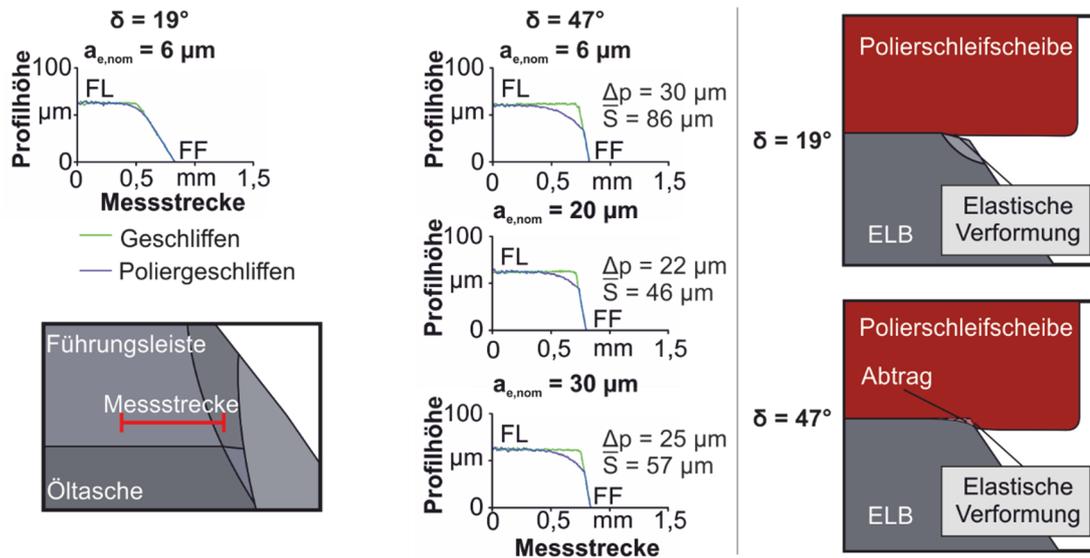


Abbildung 6.1.11: Beeinflussung des Stirnfasenübergangs bei verschiedenen Stirnübergängen

Zur Beschreibung des Stirnfasenübergangs wird die bereits beschriebene Methodik verwendet, welche sich durch die Anpassung auch zur Beschreibung dieser Kante eignet. Qualitativ lässt sich die Veränderung des Stirnfasenübergangs anhand der Profilgegenüberstellung analysieren. Bedingt durch die verwendete Prozesskinematik kommt es zu einem vermehrten Abtrag an der Führungsleiste, welcher durch das elastische Verformungsverhalten begründet werden kann. Es ist zu erkennen, dass es durch das Anbringen der Fase, welches die Standardvariante bei Vollhartmetall-Einlippentiefbohrwerkzeugen darstellt, zu einer großen Kontaktlänge zwischen Werkzeug und Bohrungswand kommt. Die dadurch bedingten Kräfte, die auf die Führungsleiste und die Stirnfase wirken können zu einer Beeinflussung des Mittenverlaufs und der Bohrungsgüte führen, da so eine Relativbewegung des Werkzeuges ermöglicht wird. Der Übergang zwischen Stirnfase und Führungsleiste ist im geschliffenen Zustand kantig, wodurch es zu einer Mikrospanbildung des Materials kommen kann und die Ausbildung von Riefen bzw. Rissen in der Oberfläche begünstigt werden. Bei der Variante ohne Stirnfase ergibt sich eine kleinere Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Bohrungswand, wodurch die Belastungen und die daraus resultierende Flächenpressung erhöht werden. Das Material wird durch diese Variante vermehrt und verstärkt umgeformt und eine Beeinflussung der Bohrungsrundzone ist durch den höheren Energieeintrag möglich, muss jedoch in Einsatzversuchen validiert werden. Um eine mögliche thermische Überbelastung zu vermeiden, wird eine dritte Variante herangezogen. Hierbei wird der Stirnfasenübergang im Vergleich zur vorherigen Variante verrundet, wodurch der Materialeintritt und die Materialeinebnung mit geringeren spezifischen Belastungen resultiert ohne die eine Mikrospanbildung in diesem Bereich zu bewirken. Bedingt durch kleineren Kontaktlängen sind höhere Spannungen im Material zu erwarten, die sich auch in den Bearbeitungskräften widerspiegeln können. So lässt sich durch den Verzicht auf die Stirnfase von einer Erhöhung des thermischen Eintrags ausgehen, wodurch die Fes-

tigkeit des Materials herabgesetzt wird und das Bohrmoment aufgrund der höheren Temperaturen sinkt. Die Umformarbeit resultiert hingegen in höheren Vorschubkräften, die in thermische Energie umgesetzt werden.

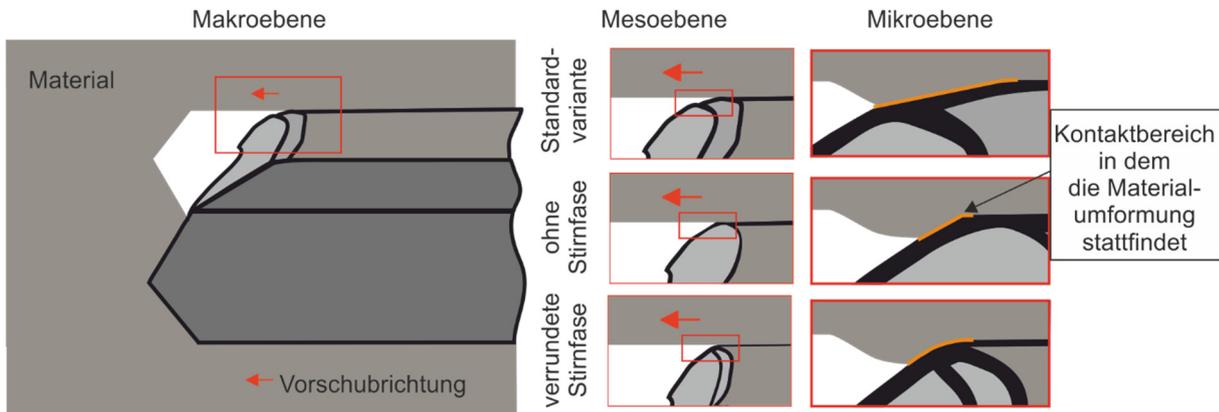


Abbildung 6.1.12: Gegenüberstellung der Kontaktbedingungen in Abhängigkeit der Stirnfasengestalt

Bedingt durch die Erkenntnis, dass das nachträgliche Polierschleifen aufgrund der Kinematik zu einer negativen Beeinflussung der Oberflächentopographie führt und zusätzlich der Effekt aus den Ergebnissen der Werkzeugdurchmesser $d_{ELB} = 10$ mm aufgrund der reduzierten Steifigkeit bei den kleineren Werkzeugdurchmesser $d_{ELB} = 3$ und 5 mm nicht übertragbar ist, erfolgte eine Anpassung der Prozesskinematik. Hierbei sind zum einen die bereits in vorherigen Versuchen eingesetzte 1A1-Polierschleifscheibe als auch Topfscheiben vom Typ 9A2 zum Einsatz gekommen. Um eine Beeinflussung der Führungsleistentopographie zu vermeiden, wurde eine Anstellung der Polierschleifscheiben parallel zur Kante zwischen Führungsleiste und Stirnfläche durchgeführt. Eine schematische Darstellung der verwendeten Prozesskinematiken ist in der folgenden Abbildung 6.1.13 zusammen mit exemplarischen Ergebnissen der jeweiligen Verfahrenskinetik dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bearbeitung unter einem Winkel von $\varphi_A = 10^\circ$ eine gleichmäßige Verrundung des Stirnübergangs einstellen lässt. Bedingt durch die verhältnismäßig große Zustellung bei der Verwendung der 1A1-Polierschleifscheibe resultiert auch ein erhöhter Abtrag. Des Weiteren erfolgt eine Beeinflussung der Führungsleiste über einem vergleichsweise großen Bereich, der zu einer unzureichenden Führung des Werkzeuges beim Anbohren führt und eine unzureichende Einebnung der Bohrungswand durch die Führungsleisten begünstigen kann.

Die Ergebnisse der Beeinflussung der Stirnfasenverrundung durch eine angepasste Anstellung der Polierschleifscheibe sowie der Variation des Scheibentyps sind in Abbildung 6.1.13 dargestellt. Anhand der dargestellten Profilschnitte der Varianten II und III lässt sich erkennen, dass sich eine symmetrische Verrundung einstellen lässt. Dies bestätigt sich durch die Auswertung der Verkippung der Kante, $\kappa = 0,92$, bestätigen. Bei zu geringeren Verrundungen des Übergangs ergeben sich bereits aus der Vermessung von Schneidkanten bekannten Problematik, die insbesondere durch die Ablösekriterien bei automatischen Messungen begründet werden können [81]. Aus diesem Grund lässt sich die Beeinflussung des Stirnfasenübergangs bei diesen Werkzeugen durch die Beschreibung mittels des Radius r_{FI} durchführen.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Variiert	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	CTS18D, HW	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = \text{variiert}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 6 \text{ bzw. } 10 \text{ mm}$	Durchmesser:	$d_s = 100 \text{ mm}$

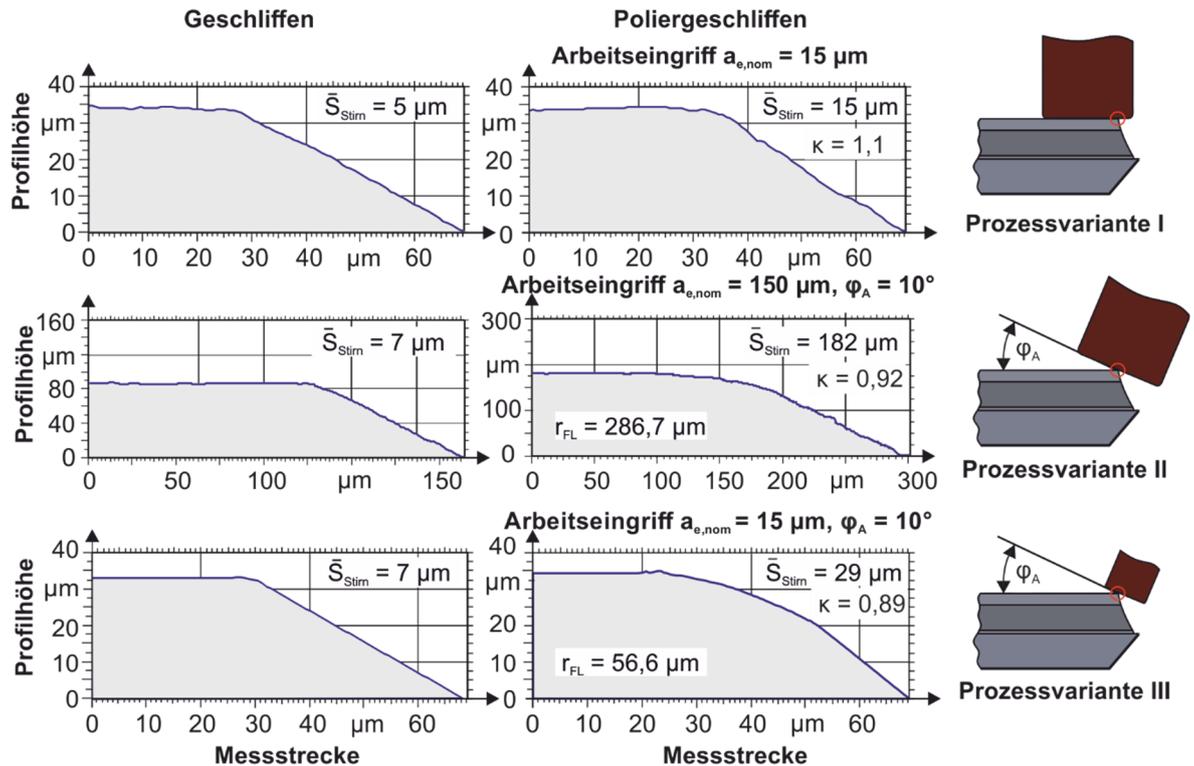


Abbildung 6.1.13: Gegenüberstellung unterschiedlicher Prozesskinematiken zur Verrundung des Stirnfasenübergangs

Bei Betrachtung der gewonnenen Ergebnisse aus der Gegenüberstellung in Abbildung 6.1.13 ist ersichtlich, dass die Präparation der Führungsleisten der Werkzeuge mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$ unter Einsatz der Kinematik orthogonal zur Werkzeugachse lediglich zu einer geringen Verrundung des Stirnfasenübergangs führt. Somit unterscheiden sich die gewonnenen Erkenntnisse von den Ergebnissen der Werkzeuge mit $d_{ELB} = 10 \text{ mm}$, da bei diesen Werkzeugen eine größere Verrundung ermöglicht wurde. Als Begründung für die verminderte Verrundung des Stirnfasenübergangs lässt sich die elastische Verformung des Werkzeuges und der Werkzeugführung nennen, da durch das höhere l/d -Verhältnis die Steifigkeit abnimmt und eine elastische Verformung begünstigt wird. Bei Verwendung eines starr ausgeführten Systems stellt sich insbesondere die Führung des langauskragenden Werkzeuges und die axiale Überdeckung zwischen Abstützung und Werkstückachse als besondere Herausforderung dar, da nur geringe Fluchtungs- und Winkelstellungsfehler zu einer Beschädigung des zu präparierenden Werkzeuges in Form von Abplatzungen an der Schneidkante oder der Nebenschneide führen. Daher ist die Verwendung eines elastischen Systems unumgänglich. Jedoch ist insbesondere diese elastische Nachgiebigkeit die Ursache dafür, dass sich keine bzw. nur geringe Unterschiede der sich ausbildenden Oberflächengüte auf den Führungsleisten ergeben und lediglich die Profilspitzen abgetragen werden.

Um auch größere Verrundungen des Stirnfasenübergangs zu erreichen, wird daher eine Änderung der verwendeten Prozesskinematik untersucht. Die erste Variation der Prozesskinematik ist dem Schleifen des Fasenanschliffs ähnlich. Hierfür wird die vorher verwendete 1A1-Polierschleifscheibe mit einem Anstellwinkel von $\varphi_A = 10^\circ$ und einem Arbeitseingriff $a_{e,nom} = 150 \text{ µm}$ eingesetzt. Die deutlich erhöhte Zustellung resultiert durch den Ansatz zur Erzeugung eines Radius, $r_{FL} = 0,3 \text{ mm}$. Ziel dieser Verrundung ist die Untersuchung einer Randzonenbeeinflussung durch einen im Vergleich zur aktuellen Variante erhöhten Einlaufbereich,

welcher in späteren Untersuchungen, siehe Kapitel 8.2.2, gegenübergestellt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass es durch die erhöhte Zustellung möglich ist, eine große Verrundung der Stirnübergangsfase zu erreichen und den Zielwert nahezu zu erfüllen. Die hohe Zustellung führt jedoch zu einem starken Verschleiß der Polierschleifscheibe, weshalb nach jedem durchgeführten Prozess ein Konditionierzyklus der Polierschleifscheibe notwendig wird. Um die gewünschten Verrundungsgrößen wie bei den Werkzeugen mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 10$ mm zu erreichen, wird eine dritte Prozesskinematik untersucht. Hierbei wird bei der Prozessvariante III anstelle der 1A1-Scheibe eine 9A2-Scheibe, siehe Abbildung 6.1.13, eingesetzt. Aufgrund der stirnseitigen Belegung bei der 9A2-Schleifscheibe ist es hierbei möglich, eine gleichmäßige geringe Verrundung zu erzielen, die den Verrundungsgrößen der Werkzeuge mit $d_{ELB} = 10$ mm ähnlich ist. Somit ist diese Präparationsvariante für den Einsatz bei kleinen Werkzeugdurchmessern zu bevorzugen.

Als Zwischenfazit und Ausblick auf folgende Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die durchgeführten Untersuchungen das Potential bieten, eine detaillierte Beeinflussung und Optimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch lokales Polierschleifen zu ermöglichen. Hinsichtlich der Verbesserung der Oberflächentopographie sind dem Verfahren unter den hier erforderlichen Randbedingungen jedoch Grenzen gesetzt. Insbesondere die Erzeugung von hohen Oberflächengüten ist durch die Ausgangstopographie nach dem Schleifen eingeschränkt. Zur Erzeugung einer gleichbleibenden Qualität lassen sich durch den Einsatz von elastisch gebundenen Schleifscheibenbelägen Chargeneinflüsse nivellieren. Somit ist es möglich eine gleichbleibende Fertigungsqualität zu erreichen und aus der industriellen Praxis bekannte Schwankungen beim Einsatz verschiedener Werkzeugchargen zu vermeiden. Die verwendete Korngröße der elastischen Schleifscheibenbeläge, $d_k = 10 \dots 15 \mu\text{m}$, resultiert auch aufgrund der ungünstigen Prozesskinematik bei Werkzeugen mit hohen Oberflächengüten nach dem Werkzeugschleifen in einer geringfügigen Verschlechterung der Oberflächengüte. Die Topographie zeichnet sich dabei durch eine feine Riefenstruktur aus, die durch einzelne aus der Bindung herausragende Abrasivkörner erzeugt werden und somit zu Materialfurchung und -aufwürfen führen. Eine Veränderung der Umfangsgestalt ist unter Berücksichtigung des elastischen Verformungsverhalten von Polierschleifscheibe, Werkzeug und der verwendeten Werkzeugabstützung möglich, wird aber durch eben diese hinsichtlich der Variantenvielfalt eingeschränkt. Scharfkantige Übergänge zwischen den Führungsleisten und den Öltaschen lassen sich verrunden und begünstigen somit die Versorgung der tribologischen Kontaktsituation zwischen Werkzeug und Bohrungswand im Anwendungsfall. Hierbei ist jedoch in weiteren Einsatzversuchen zu evaluieren, ob vergleichbare, günstige Auswirkungen bezüglich des Verschleißverhaltens und der Bohrungsgüte ähnlich wie beim BTA-Tiefbohren möglich sind. Die elastische Verformung stellt besonders bei Werkzeugen mit hohem l/d -Verhältnis den begrenzenden Faktor zur gezielten Beeinflussung des Stirnfasenübergangs dar. Aus diesem Grund ist eine Anpassung der Prozesskinematik zur definierten Verrundung des Stirnfasenübergangs vom gewählten Werkzeugdurchmesser abhängig und muss dementsprechend ausgewählt werden. Die Beeinflussung des Prozessverhaltens der gestaltoptimierten Werkzeuge soll zu einem späteren Zeitpunkt in Einsatzversuchen in Kapitel 0 evaluiert werden.

6.2. Beeinflussung der Oberflächentopographie durch abrasives Nassstrahlspanen auf industriellen Anlagen

Zur Oberflächenpräparation im Rahmen der Schichtvor- und -nachbehandlung von Zerspanungswerkzeugen finden im industriellen Rahmen zumeist Verfahren Anwendung, die auf dem abrasiven Nassstrahlspanen basieren. Bedingt durch die Anwendung an Zerspanungswerkzeugen eingesetzten Präparationsmethoden resultieren meist in einer Beeinflussung der peripheren Werkzeugfunktionsflächen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher zwei Varianten

des abrasiven Nassstrahlspanens analysiert, um eine Beschreibung der Beeinflussung der peripheren Werkzeugfunktionsoberflächen zu ermöglichen. Die Notwendigkeit dieses Untersuchungsansatzes besteht darin, dass die Schneidkantenpräparation aufgrund aktueller Konzepte erst nach dem Werkzeugschleifen erfolgen kann und wodurch zusätzliche Arbeitsschritte notwendig werden. Somit kann sich eine Beeinflussung der vorher durch das lokale Polierschleifen erzeugten Oberflächentopographien ergeben. Zur Gegenüberstellung der unterschiedlichen Präparationsmethoden und der Wirkmechanismen sei an dieser Stelle auf die Beschreibungen und Darstellungen der Prozesskinematiken in Kapitel 0 & 4.1.1 verwiesen. Bedingt durch die unterschiedlichen Prozesskinematiken lassen sich die hauptsächlich beeinflussten peripheren Werkzeugfunktionsflächen in zwei Teilbereiche aufteilen. Beim Einsatz in industriellen Nassstrahlanlagen werden die Werkzeuge auf einem Werkstückteller montiert bzw. platziert und unter Rotation im Strahl des Wasser-Abrasiv-Gemischs präpariert. Eine ähnliche Kinematik ergibt sich beim Gleitschleppscheifen, bei dem das Werkzeug durch eine Überlagerung der Kinematik unterschiedlicher Achsen durch ein stehendes Abrasivmedium bewegt wird. In beiden dieser Fälle erfolgt neben einer Schneidkantenpräparation auch eine Beeinflussung der Oberflächentopographie sowohl auf der Führungsleiste als auch auf der Spannut, welche sich von der nach dem Schleifen erzeugten Topographie deutlich unterscheiden kann. Demgegenüber wird bei der Verwendung des robotergestützten Schneidkantenpräparationsprozesses eine Beeinflussung der Führungsleistentopographie vermieden, jedoch eine deutlich ausgeprägte, lokale Beeinflussung der Spannut erzeugt.

Im Rahmen der Gegenüberstellung werden zuerst die Ergebnisse des abrasiven Nassstrahlspanens auf einer industriellen Nassstrahlanlage, Graf Compact Plus II, im Bereich der Führungsleisten dargestellt (Abbildung 6.2.1). Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Oberfläche durch den Präparationsprozess verändert und sich die für das abrasive Nassstrahlspanen typische Grübchenstruktur ausbildet. Im geschliffenen Zustand sind keine Oberflächendefekte oder Riefen auf der Führungsleiste zu erkennen. Bedingt durch das Auswaschen der Kobaltbindephase kommt mit steigendem Strahldruck eine höhere Anzahl von Karbiden an die Oberfläche. Dies wird durch den steigenden Anteil von dunkleren Farbanteilen verdeutlicht. Dieser Effekt spiegelt sich auch in der gemessenen Oberflächengüte der Führungsleisten wieder, da die Oberfläche mit steigendem Druck rauer wird. Der Einfluss des Strahldrucks beim Nassstrahlspanen auf die Span- und die Freifläche am Einlippentiefbohrwerkzeug ist in Abbildung 6.2.2 dargestellt. Die Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop sowie die Rauheitsmessungen zeigen eine hohe Oberflächengüte der Spanfläche nach dem Schleifen. Im Ausgangszustand der Werkzeuge ist jedoch, mit Bezug auf die Messungen, eine rauere Spanfläche verglichen mit der Oberflächentopographie auf den Führungsleisten festzustellen. Ähnlich zum Nassstrahlspanen der Führungsleisten erhöht sich nach einer Präparation mit $p_{st} = 3 \dots 4$ bar auch auf der Spanfläche die Rauheit. Im Bereich niedriger Strahldrücke stellt sich jedoch eine abweichende Abhängigkeit dar. Bei einem Strahldruck von $p_{st} = 2$ bar ist eine Einebnung der Oberfläche feststellbar, die sich in einer höheren Oberflächengüte widerspiegelt. Die Werte der gemittelten Rautiefe und die niedrigen Messwerte der Kernrautiefe, nach einer Präparation mit Strahldrücken von $p_{st} = 2 \dots 3$ bar, können über einen Abtrag der Profilsitzen nach dem Strahlspanprozess begründet werden. Das im Ausgangszustand geschliffene Oberflächenprofil der Spanfläche ermöglicht eine Glättung durch das Nassstrahlspanen mit niedrigem Strahldruck. Wie auf den jeweiligen Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop ersichtlich, findet beim Einsatz höherer Strahldrücke eine zunehmende Überlagerung der Schleifriefen durch die entstehende Grübchenstruktur statt. Hier wurden durch die aufprallenden Körner nicht nur Profilsitzen abgetragen, sondern gleichzeitig größere Profiltiefen erzeugt. Die Erzeugung von größeren Profiltiefen und Verringerung der Profilsitzen wird in den REM-Aufnahmen die Oberflächentopographie erkennbar, siehe Abbildung 6.2.1.

82 6.2 Beeinflussung der Oberflächentopographie durch abrasives Nassstrahlspanen auf industriellen Anlagen

Prozess:	Nassstrahlspanen	Korngröße:	$d_k = 5...25 \mu\text{m}$	Strahldüsen:	$n_d = 2$
Werkstoff:	CTS18D, HW	Kornform:	Blockig, ZWSK	Überläufe:	$o_{st} = 4$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Strahlrdruck:	$p_{st} = 2...4 \text{ bar}$	Strahlabstand:	$h_d = 100 \text{ mm}$
Abrasivmedium:	Al_2O_3 , weiß	Oszillationsgeschw.:	$v_{osz} = 112,5 \text{ mm/min}$	Rotationsgeschw.:	$v_{r, ELB} = 35 \text{ mm}^{-1}$

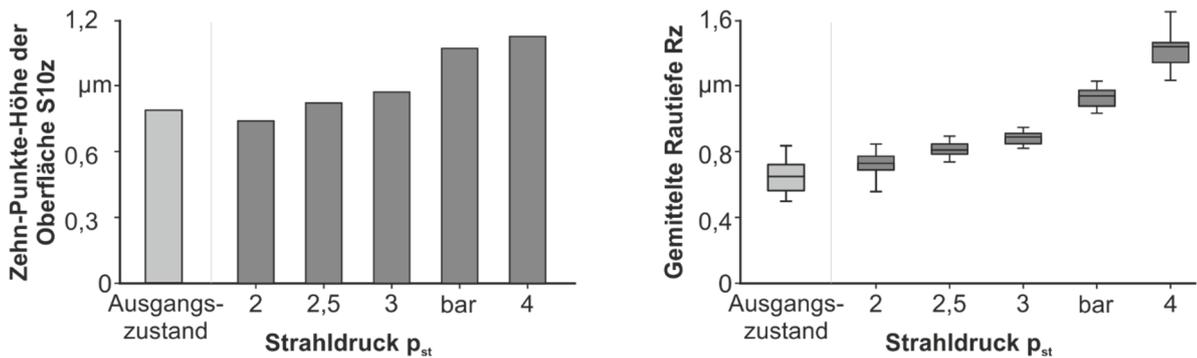
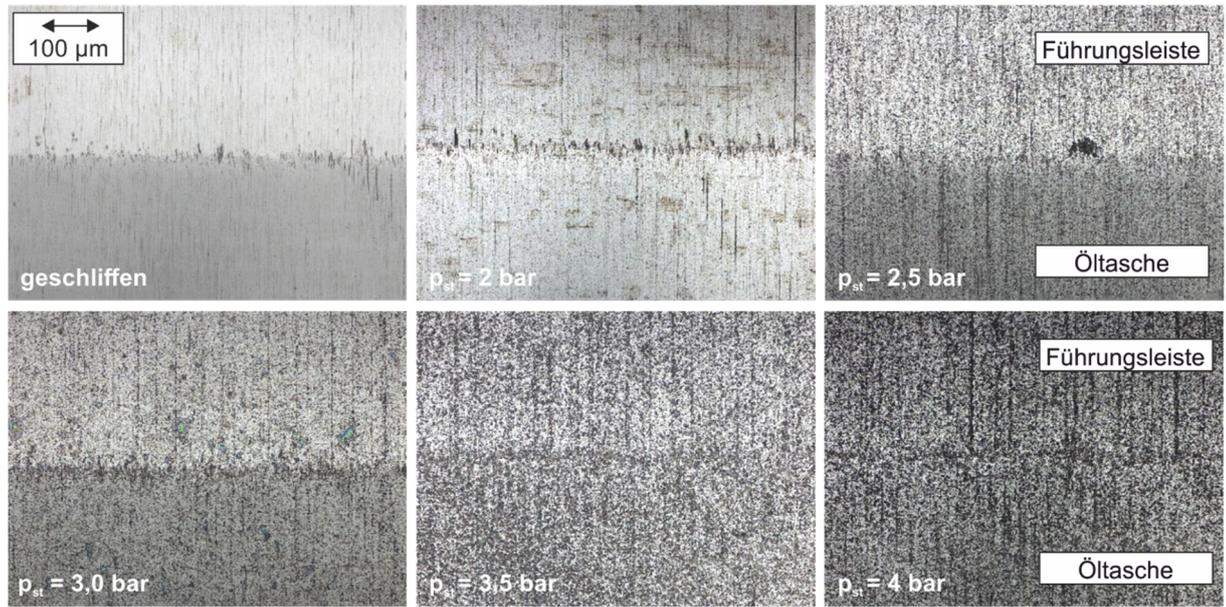


Abbildung 6.2.1: Beeinflussung der Oberflächentopographie durch das abrasive Nassstrahlspanen auf einer industriellen Anlage

Die Oberflächen im schneidkantennahen Bereich weisen je nach Präparationszustand unterschiedliche Topographien auf. Während die Spanfläche eine hohe Oberflächengüte aufweist, ist die Freifläche von deutlicheren Schleifriefen geprägt, siehe Abbildung 6.2.2. Die Schleifriefen auf der Freifläche sind im geschliffenen Ausgangszustand des Einlippentiefbohrwerkzeuges deutlich erkennbar. Die Ursache hierfür ist durch die Prozesskinematik beim Schleifen der Werkzeuge begründet. Hierfür ergeben sich beim Schleifen der Spannut mehrfache Überlagerungen verschiedener Einzelkornbahnen, die aufgrund es anderen Schleifscheibentyps beim Schleifen der Freifläche nicht auftreten. Dadurch ergeben sich bessere Oberflächengüten und eine homogenere Topographieausbildung.

Nach einer Präparation mit einem Strahlrdruck von $p_{st} = 2 \text{ bar}$, bildet sich auf den Oberflächen des Werkzeugs die charakteristische Grübchenstruktur ab. Die Schleifriefen bleiben jedoch sowohl auf der Freifläche als auch auf der Spanfläche erkennbar. Obwohl die Grübchenstruktur bei höheren Strahlrdrücken zunehmend in den Vordergrund tritt, sind die Schleifriefen auch nach einer Werkzeugpräparation mit einem Strahlrdruck von $p_{st} = 4 \text{ bar}$ identifizierbar. Neben dem Unterschied der verschiedenartig ausgeprägten Schleifriefen ist zusätzlich der unterschiedliche Aufprallwinkel auf diese Funktionsoberfläche zu nennen, da der Strahl nahezu orthogonal auf die Spanfläche trifft und somit ein Großteil der kinetischen Energie absorbiert

werden muss. Aufgrund der winkelig angestellten Freifläche fließt dagegen das Wasser-Abra-
siv-Gemisch auf dieser Funktionsfläche lediglich ab. Dies führt zu einer geringfügigeren Be-
einflussung der peripheren Oberfläche. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen in Abbildung
6.2.2 zeigen jedoch auch, dass es insbesondere bei Strahldrücken $p_{st} > 3$ bar zu einer ver-
stärkten Verrundung der exponierten Schneidenecke kommt. Eine ausgeprägte Verrundung
der Schneidenecke kann zu negativen Ergebnissen beim nachfolgenden Einsatz der Werk-
zeuge führen.

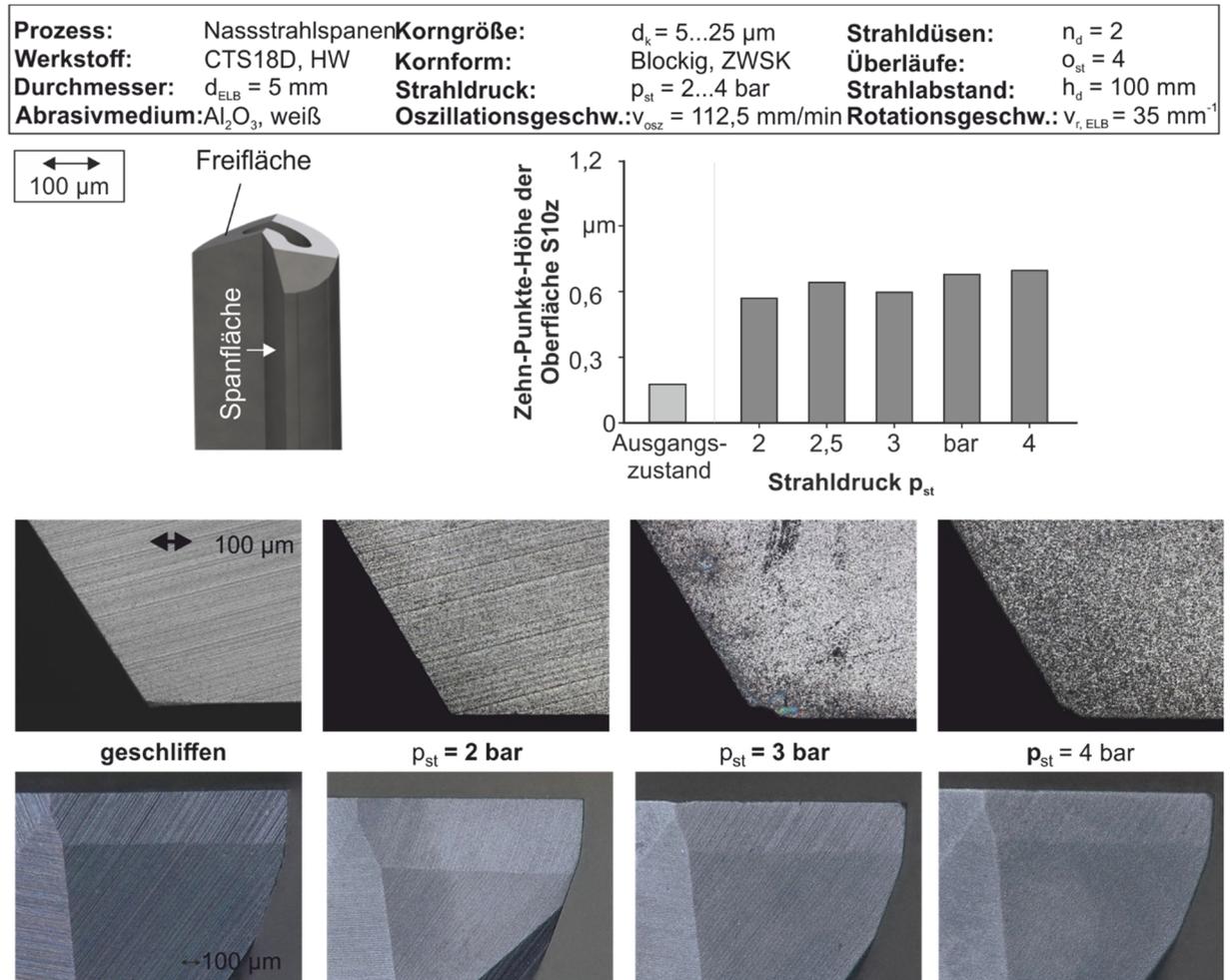


Abbildung 6.2.2: Beeinflussung der Frei- und Spanfläche beim Strahlen auf industriellen Nassstrahlanlagen

Im Gegensatz dazu, ergibt sich unter Verwendung eines Vertikalknickarmroboters zur Werk-
zeugführung bei der Schneidkantenpräparation, dass eine Beeinflussung der Führungslei-
stentopographie vermeidbar ist. Durch diese Prozesskinematik wird jedoch insbesondere die
Spanfläche stärker beeinflusst, da das im Strahlmedium vermischte Abrasivmittel im Winkel
von $\gamma_d = 45^\circ$ auftrifft und über die Spanfläche abläuft [6, 203]. Somit ergibt sich sowohl eine
Beeinflussung der Oberfläche aufgrund der mit hoher kinetischer Energie auftreffenden Hart-
stoffpartikel als auch durch den erosiven Abtrag der Kobaltmatrix. Eine Gegenüberstellung der
Veränderung der Oberflächentopographie durch den Strahlprozess ist in Abbildung 6.2.2 dar-
gestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spannuttopographie durch den Strahlprozess
beeinflusst wird. Diese Erkenntnisse decken sich mit den bereits in Kapitel 5.1. Auch bei Ver-
wendung der industriellen Nassstrahlspananlage erfolgt eine Beeinflussung der Oberflächen-
topographie. Die ermittelten Oberflächenkennwerte beschreiben sowohl bei der Auswertung
der 2D als auch der 3D Rauheitsparameter eine deutliche Reduzierung der Oberflächengüte.
Primär wird durch das abrasive Nassstrahlspanen bei den verwendeten Parametern eine Auf-
rauhung der Oberfläche erreicht. In verschiedenen Untersuchungen zur Verbesserung der

Schichthaftung [54, 55, 125] haben sich solche Ergebnisse als zielführend erwiesen. Im Umkehrschluss können die sich entwickelnden Mulden und Grübchen an belasteten Kontaktflächen jedoch die Neigung zur Ablagerung von zerspantem Material und der Aufbauschneidbildung beeinflussen [9, 105, 106, 120, 133]. Aus diesem Grund sehen einige aktuelle wissenschaftliche und industrielle Ansätze eine Politur, insbesondere der Spannuten von Zerspanungswerkzeugen als zielführend für die Verbesserung der Evakuierung von Spänen aus der Bohrung [10, 28, 81, 114]. Bedingt durch die Einflüsse des meist nachgeschalteten Präparationsprozesses ergeben sich jedoch Veränderungen der vorher erzeugten Oberfläche, welche die Spanbildung und die Spankrümmung aufgrund geänderter Reibkoeffizienten beeinflussen können [121, 165]. Des Weiteren gilt es zu untersuchen, welchen Einfluss die erzeugte Topographie auf die Schichthaftung hat. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der eingebrachten Eigenspannungen und der Schichttopographie notwendig, was im folgenden Kapitel 7 erfolgen wird.

7. Untersuchung der Beeinflussung der Oberflächentopographie durch Werkzeugbeschichtungen sowie Analyse einer Schichtnachbehandlung

Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Verschleißbeständigkeit von Zerspanungswerkzeugen erfolgt in den meisten Fällen innerhalb der allgemeinen Herstellungskette eine Beschichtung mit einer verschleißhemmenden Dünnschicht nach dem Werkzeugschleifen. Wie bereits dargestellt, lässt sich die Ausgangstopographie nach dem Schleifen durch eine Präparation mittels verschiedener Verfahren verändern. In Kapitel 0 konnte bereits gezeigt werden, dass sich die Aussagen und Untersuchungen hinsichtlich einer günstigen Topographie vor dem Beschichten unterscheiden [105, 106, 165]. Die Schichtnachbehandlung durch abrasives Nassstrahlspanen wurde bereits durch verschiedene Wissenschaftler untersucht [6, 42, 45, 46, 123, 203]. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher der Einfluss einer Schichtvorbehandlung durch lokales Polierschleifen analysiert werden. Zur Einordnung in gängige Präparationsketten dient eine Gegenüberstellung der poliergeschliffenen Probe mit einer durch das abrasive Nassstrahlspanen präparierten Probe. Ziel der Vorbehandlung ist es, bereits eine für den späteren Anwendungsfall angepasste Oberflächentopographie zu erreichen, die durch die Verwendung einer sich durch wenig Schichtdefekte auszeichnende Beschichtung ergänzt wird und somit direkt nach der Beschichtung ein für den Einsatz bereitest Werkzeug vorliegt. Zur Sicherstellung der Maßnahmen werden ergänzend Untersuchungen zur Schichtnachbehandlung bei Werkzeugen mit unterschiedlichen Schichtvorbehandlungszuständen durchgeführt und eine Methode entwickelt, die eine quantitative Bewertung von beschichteten und schichtnachbehandelten Oberflächen ermöglicht. Diese Methode wird auch zur Beurteilung der Nachbehandlungsprozesse verwendet.

7.1. Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

Wie bereits in Kapitel 0 & 0 beschrieben, lassen sich Beschichtungen, die dem PVD-Verfahren zuzuordnen sind, durch ihre physikalischen Besonderheiten zur Aufbringung der Verschleißschutzschicht unterscheiden. Bedingt durch die hohe Oberflächengüte nach dem Polierschleifen lässt sich aus Abbildung 3.1 ableiten, dass im Rahmen dieser Arbeit eine Beschichtungsmethode Verwendung findet, die sich durch eine hohe Schichtgüte in Form von wenigen bis keinen Schichtdefekten auszeichnet. Unter Berücksichtigung der ablaufenden physikalischen Vorgänge, siehe Kapitel 0, ist es bei der hier untersuchten Beschichtung aus physikalischer Sicht nicht möglich, dass die im allgemeinen aus dem PVD-Arc-Prozess bekannten Droplets auf der zu beschichtenden Oberfläche abgeschieden werden [12, 180]. Bei Auswertung der Versuchswerkzeuge lassen sich jedoch unterschiedliche Schichtdefekte auf der beschichteten Oberfläche feststellen. Im Folgenden wird hierzu der Einsatz der elastisch gebundenen Polierschleifscheiben als neue Präparationsmethode untersucht, um eine Nachbehandlung der Werkzeuge ohne eine Veränderung der Verschleißbeständigkeit durch eine Schichtdickenreduzierung und der Werkzeugkontur zu ermöglichen. Des Weiteren erfolgen Erklärungsansätze, wodurch diese Defekte entstehen und wie sich diese vermeiden lassen können.

Die folgenden Erkenntnisse basieren auf den Erfahrungen und Ergebnissen der Schichtvorbehandlung, siehe Kapitel 1. Die dort durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich bereits bei geringen Zustellungen eine Beeinflussung der Oberflächentopographie ergibt. Zur Einschätzung der erzeugten Beschichtungsqualität, dienen Untersuchungen an Versuchsproben aus einem vergleichbaren Hartmetall, siehe Abbildung 7.1.1. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die verbesserte Analysemöglichkeit an Beispielwerkzeugen, die eine Übertragbarkeit aufgrund der vergleichbaren Zusammensetzung des Hartmetalls auf die relevanten Versuchswerkzeuge gewährleisten ohne die Versuchswerkzeuge zerstören zu müssen.

86 7.1 Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

Prozess:	Schleifen	Schleifscheibe:	Q-Flute ² , D64	Schnittgeschw.:	$v_c = 18 \text{ m/s}$
Präparation:	[Tool]Prep	Bindung:	Hybrid	Vorschubgeschw.:	$v_f = \text{variiert}$
Werkstoff:	K44 UF	KSS-Konzept:	SintoGrind, IG 540	Arbeitseingriff:	$a_e = \text{variiert}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$			Beschichtung:	AICRONOS®

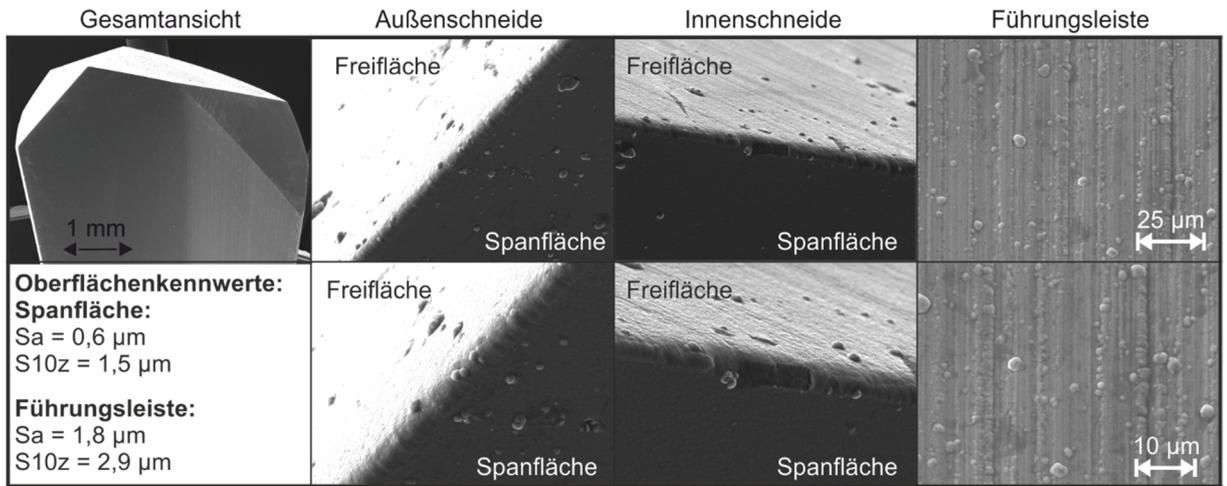


Abbildung 7.1.1: Oberflächentopographie und Ausprägung von Schichtdefekten nach der Beschichtung

Die REM-Aufnahmen in Abbildung 7.1.1 zeigen, dass beim Verzicht auf eine Schichtnachbehandlung auch bei diesem Beschichtungsverfahren einige Schichtinhomogenitäten auf der Oberfläche zu finden sind. Im Vergleich zu aus dem PVD-Arc-Prozess bekannten Droplets ist zu erkennen, dass eine Vielzahl der auftretenden Schichtinhomogenitäten auf der Beschichtung aufliegen und sich daher erst zu einem späten Zeitpunkt auf der Oberfläche abscheiden. Somit lässt sich die Anforderung ableiten, dass eine Entfernung dieser Schichtinhomogenitäten notwendig ist, die zu einer geringfügigen Beschädigung der Beschichtung durch herausgerissene Defekte führt. Neben den bestehenden Schichtdefekten lässt sich anhand dieser Aufnahmen ableiten, dass die Schichthaftung an den durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Schneidkanten gegeben ist und eine homogene Schichtanbindung an der Schneide resultiert. Die Rundschleifbearbeitung dieser Analogieproben erfolgte auf einer Werkzeugschleifmaschine, weshalb die Oberflächengüte und -topographie nicht repräsentativ für die industriell gefertigten Einlippentiefbohrwerkzeuge ist. Diese Erkenntnis wird durch die ermittelten Oberflächenkennwerte auf der Führungsleiste bestätigt. Die REM-Aufnahme der Führungsleiste zeigen, dass die verwendete Beschichtungstechnologie einen sehr hohen Ionisierungsgrad aufweist. Ersichtlich wird dies durch die nähere Betrachtung von einzelnen durch den Schleifprozess bedingten Schleifriefen. An diesen exponierten Stellen, die scharfkantig ausgeprägt sind, bildet sich eine dem Antenneneffekt zuzuschreibende Schichtagglomeration aus, die in ähnlicher Ausprägung an unpräparierten Schneidkanten auftritt [12]. Ursächlich hierfür ist bei unpräparierten Schneidkanten die hohe Inhomogenität, die durch die Schartigkeit der Schneide verursacht wird [113]. Bei einer inhomogenen Schneidkantenmikrogestalt ergeben sich an diesen Stellen Schichtwachstumsdefekte, die sich in Form einer Schichtagglomeration ausbilden [64, 66]. Solche Schichtwachstumsdefekte weisen in der Regel nur eine geringe Beständigkeit gegenüber mechanischen Belastungen auf und platzen daher in der Regel schnell ab [151]. Diese Feststellung lässt sich auch für die auf der Span- und Freifläche abgeschiedenen Schichtinhomogenitäten treffen, da diese nur eine geringe Verankerung in der Beschichtung aufweisen und in der Regel nicht bis zum Substrat reichen. Ein unkontrolliertes Ausreißen bzw. Abtragen dieser Fehlstellen aufgrund der im Bearbeitungsprozess resultierenden mechanischen Belastungen führen zu Nachteilen hinsichtlich der Prozesssicherheit und -qualität, die es aus industrieller Sicht zu vermeiden gilt. Daher scheint eine Schichtnachbehandlung zwingend erforderlich zu sein. Im Folgenden werden daher unterschiedliche Ansätze durch die Präparation mit elastisch gebundenen Polierschleifscheiben durchgeführt, um eine Aussage über die Effektivität des Verfahrens geben zu können.

Allgemein lässt sich feststellen, dass es hinsichtlich der Schichtnachbehandlung durch abtragende Verfahren zu einem Zielkonflikt kommt. Dieser Zielkonflikt ergibt sich aus einer möglichst geringen Beeinflussung der applizierten Schichtdicke bei gleichzeitiger Entfernung von Schichtdefekten durch die Nachbehandlungsprozesse. Um hierzu eine fundierte Aussage treffen zu können sind sowohl Untersuchungen der Effektivität des Präparationsverfahren als auch der möglichen Schichtdickenreduzierung notwendig. Zur Beurteilung der Effektivität des Präparationsverfahrens wird im Rahmen dieser Arbeit eine neue Methode entwickelt, die es neben der bereits qualitativen Beurteilung von beschichteten Oberflächen ermöglicht, eine quantitative Beurteilung durchzuführen. Hierzu besteht sowohl die Möglichkeit erzeugte konfokale Weißlichtmikroskopaufnahmen zu verwenden als auch Aufnahmen, die durch ein REM aufgenommen wurden. Im Folgenden dient zur Darstellung der verwendeten Auswertemethodik die Bewertung einer REM-Aufnahme in Abbildung 7.1.2. Die dort dargestellte Führungsleiste wurde vor dem Beschichtungsprozess poliergeschliffen und weist daher eine im Vergleich zum in Abbildung 7.1.1 dargestellten Werkzeug eine verbesserte Oberflächengüte auf. Die verbesserte Oberflächengüte im vorbehandelten Zustand erleichtert die quantitative Auswertung, da Schichtinhomogenitäten besser erkannt werden.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	K44 UF	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = \text{variiert}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung:	ALCRONOS®

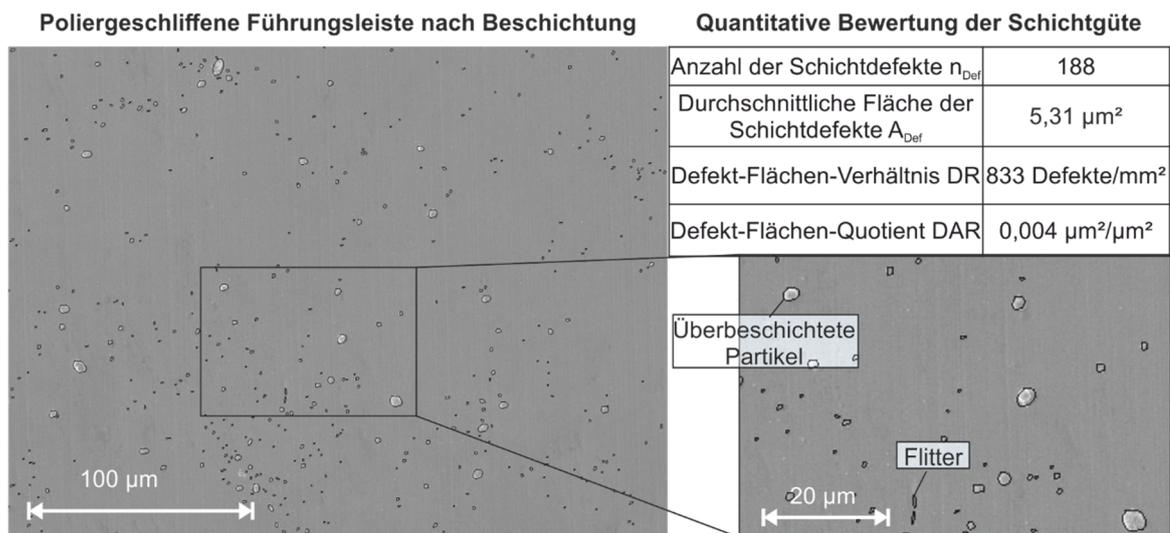


Abbildung 7.1.2: Darstellung der Schichtqualität nach dem Beschichten

Die Markierungen der durch das Analysetool ermittelten Schichtinhomogenitäten auf der REM-Aufnahme lässt erkennen, dass eine Beschreibung der Oberflächentopographie und der Schichtqualität nach dem Beschichten mittels zweidimensionaler Rauheitskennwerte aufgrund der lokal auftretenden Inhomogenitäten zu keinen validen Ergebnissen führen würde. In diesem Fall sind auch 3D-Oberflächenparameter zur Beschreibung der Schichtgüte unzureichend, da diese zum Teil nur lokal auftretenden Defekte durch die klassischen Kennwerte nicht genau genug abgebildet werden können. Bedingt durch die unterschiedliche Farbgebung von exponierten Fragmenten auf der Oberfläche, hier den Schichtinhomogenitäten, ergibt sich durch die Verwendung von Bildverarbeitungsprogrammen eine erweiterte Möglichkeit, diese Schichtinhomogenitäten zu identifizieren und auszuwerten. Das sich durch eine Anpassung der Bildbearbeitungsparameter eine hohe Abbildungsgenauigkeit ergibt, lässt sich in Abbildung 7.1.2 erkennen. Jeder der vorhandenen Schichtdefekte wird erkannt und hinsichtlich Form und Größe identifiziert. Durch die Kenntnisse über die genauen Abmessungen und Formen der Schichtinhomogenitäten lassen sich die auftretenden Defekte durch die REM-Auf-

88 7.1 Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

nahmen auswerten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen besteht die Möglichkeit, neue Kennwerte einzuführen, die zur qualitativen Bewertung von beschichteten Oberflächen verwendet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit sind hierfür die in der folgenden Tabelle 4 dargestellten Kennwerte erarbeitet worden

Tabelle 4: Einführung und Beschreibung der Schichtbewertungsparameter

Kennwerte	Beschreibung	Abkürzung/ Formelzeichen	Einheit
Anzahl der Oberflächeninhomogenitäten	Numerische Anzahl der ermittelten Inhomogenitäten im Messbereich	n_{Def}	-
Defekt-Flächen-Quotient	Quotient der die Anzahl an Inhomogenitäten auf einen mm^2 extrapoliert	DR	mm^{-2}
Defekt-Flächen-Verhältnis	Verhältnis aus der betroffenen Fläche und der gesamten beschichteten Fläche	DAR	$\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^2$

Neben der Angabe der unterschiedlichen Kennwerte lassen sich durch die Analyse mithilfe des Bildbearbeitungsprogramm ergänzende Aussagen über die möglichen Ursprünge der Beschichtungsdefekte nennen. Wie bereits erwähnt, ist es bei dem verwendeten Beschichtungsprozess aus physikalischen Gründen unmöglich, dass es sich hierbei um Droplets handelt. Daher sollen durch die nähere Betrachtung der Form und Größe der Defekte Erklärungsansätze erarbeitet werden, die die auftretenden Beschichtungsinhomogenitäten begründen. Kreisförmig bis ovale Inhomogenitäten lassen darauf schließen, dass einzelne Partikel, die sich während des Beschichtungsprozesses abgeschieden haben überbeschichtet werden [80]. Da diese Partikel in der Regel oberflächennah sind, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Defekte handelt, die durch Effekte während der Beschichtung hervorgerufen wurden [80, 94, 119]. Dies können beispielsweise Überschläge an anderen Bauteilen in der Beschichtungskammer sein, bei denen die so resultierenden Sparks zu lokalen Abplatzungen und Aufschmelzungen führen, die danach auf andere in der Beschichtungskammer befindliche Werkzeuge und Bauteile übertragen werden. Neben diesen Defekten lassen sich auch eher nadelförmige Schichtinhomogenitäten feststellen. Diese finden ihren Ursprung vermutlich in Resten von vorhergehenden Beschichtungsfragmenten, die sich beim Öffnen und Schließen der Beschichtungskammer lösen und durch die eine elektrostatische Aufladung auf den Werkzeugen absetzen. Der sogenannte Flitter lässt sich nicht durch eventuell noch folgende Reinigungsprozesse, wie beispielsweise dem Plasma- oder Ionenätzen entfernen und verbleibt daher auf der zu beschichtenden Oberfläche. Diese Vermutungen lassen sich durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Auswertungen der REM-Aufnahmen unterstützen, da die nadelförmigen Defekte tiefer in der Beschichtung liegen und somit bis auf das Grundsubstrat reichen können. Die in Abbildung 7.1.2 dargestellte Oberfläche lässt sich weder auf das gesamte Werkzeug noch die gesamte Charge verallgemeinern. Das Auftreten von Schichtinhomogenitäten tritt lokal sehr beschränkt auf. Dadurch wird die Hypothese eines spontanen Abplatzens und Aufschmelzens von Beschichtungsbestandteilen an anderen Stellen innerhalb der Beschichtungskammer unterstützt.

Mithilfe der eingeführten Kennwerte besteht die Möglichkeit eine Bewertung der Effektivität des Schichtnachbehandlungsprozesses durchzuführen. Die lokal begrenzt auftretenden Defekte beeinflussen die Validität der Beschreibung der Oberflächentopographie im beschichteten und nicht nachbehandelten Zustand immens. Diese Erkenntnis lässt sich durch eine exemplarische Gegenüberstellung von präparierten Tiefbohrwerkzeugen in Abbildung 7.1.3 verdeutlichen.

7.1. Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	Diamant, 9A2	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Topfscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	CTS18D, HC	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = \text{var.}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 3 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 4 \text{ mm}$	Anstellwinkel:	$\phi_A = \text{var.}$

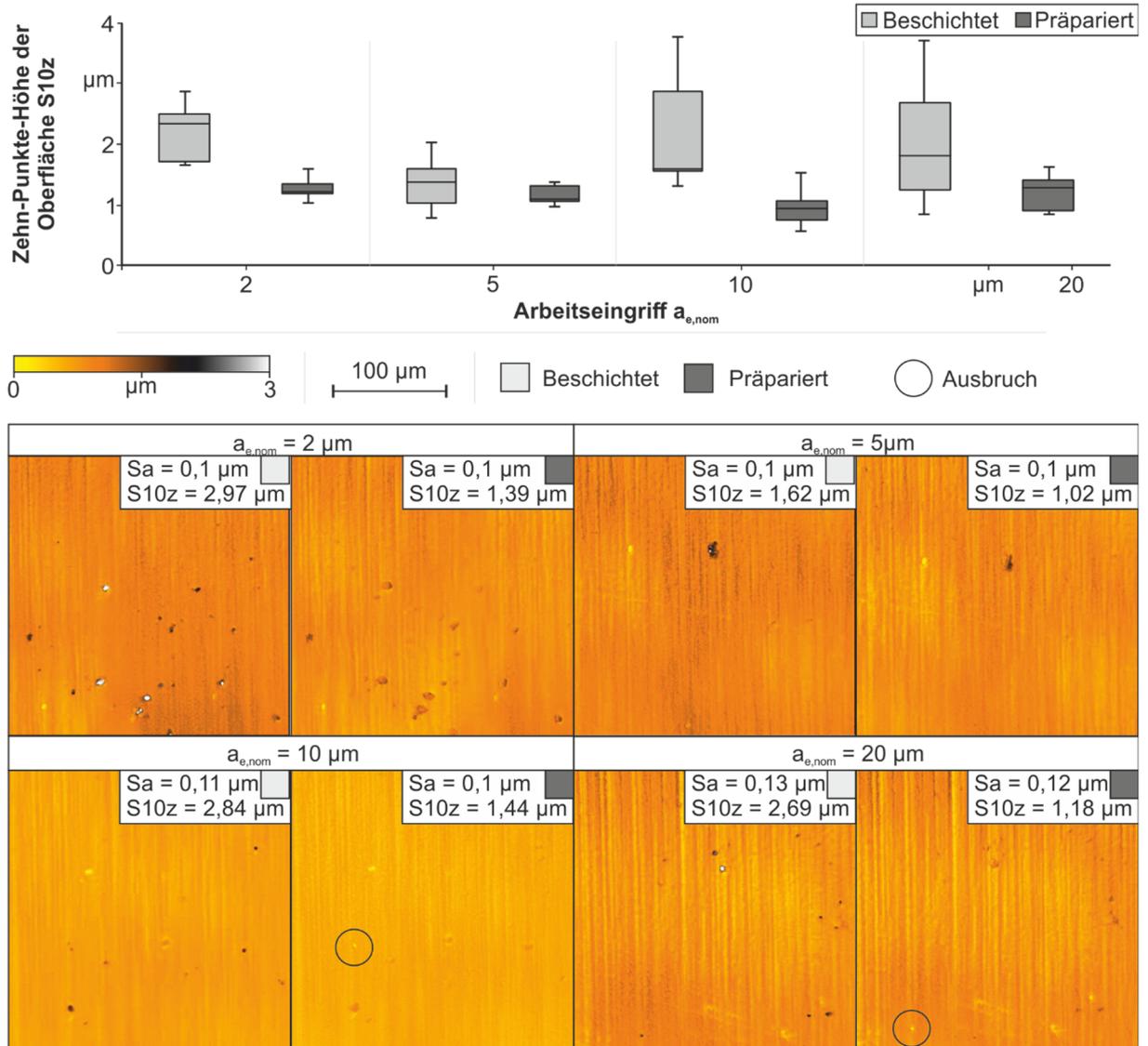


Abbildung 7.1.3: Gegenüberstellung von verschiedenen präparierten Werkzeugen

Bedingt durch die Gegenüberstellung von identischen Oberflächenbereichen nach dem Beschichten und der anschließenden Präparation bei unterschiedlichem nominellem Arbeitseingriff $a_{e,nom}$ ist zuerkennen, dass sich durch die Auswertung der 3D-Kennwerte Sa und S10z kaum ein Unterschied bei der Betrachtung der arithmetischen Flächenrauheit Sa bzw. ein deutlicher Unterschiede bei der Betrachtung der Zehn-Punkte-Höhe der Oberfläche S10z ergibt. Für die Validierung der Effektivität des Schichtnachbehandlungsverfahrens lassen sich unter Verwendung der vorgestellten Methode je nach Ausprägung der Schichtinhomogenitäten deutliche Reduzierungen der Schichtdefekte feststellen. Die Auswertung der Aufnahmen des konfokalen Weißlichtmikroskops zeigen zudem, dass es zu unterschiedlichen Abtragsmechanismen kommt. So werden die tieferliegenden und festsitzenden Inhomogenitäten durch den Einsatz der elastischen Polierschleifscheibe in ihrer Ausprägung und Höhe reduziert und abgetragen. Stellenweise sind auch Ausbrüche von bestehenden Schichtinhomogenitäten, die dementsprechende Beschädigungen der Hartstoffbeschichtung verursachen, festzustellen. Trotz des Auftretens der Ausbrüche beim nominellen Arbeitseingriff $a_{e,nom} = 10 \dots 20 \text{ µm}$, lässt sich hier keine fundierte Aussage treffen, ob dies mit der erhöhten Zustellung in Zusammenhang steht. Aufgrund der ermittelten Oberflächenkennwerten wird die Vermutung unterstützt,

90 7.1 Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen dem nominellen Arbeitseingriff $a_{e,nom}$ und dem Auftreten von herausgerissen Beschichtungsinhomogenitäten gibt.

Unter Berücksichtigung des zu präparierenden Werkzeuges in Abbildung 7.1.2 zeigt die REM-Aufnahme des nachbehandelten Werkzeuges, dass eine Verbesserung der Schichtgüte möglich ist. Hierbei erfolgt zum aktuellen Zeitpunkt eine manuelle Auswertung, bei der die Inhomogenitäten in Ausbrüche oder abgetragene Defekte unterschieden werden müssen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 7.1.4 dargestellt. Anhand der ermittelten Kennwerte lässt sich feststellen, dass eine deutliche Reduzierung der Anzahl an bestehenden Defekten möglich ist. Bedingt durch die geringere Anzahl, wobei es sich hier um die von Ausbrüchen bereinigte Anzahl von Defekten handelt, resultieren ebenfalls eine geringere Fehlerquote DR als auch das Defekt-Flächenverhältnis DAR. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass es aufgrund des geringen Kontrastes bei bereits teilweise abgetragenen Defekten in diesem Fall dazu kommt, dass diese Fehlstellen nicht erkannt bzw. vernachlässigt werden. Auffällig ist hingegen, dass sich die durchschnittliche Fläche der Defekte sogar minimal erhöht. Dieser Effekt lässt sich dadurch begründen, dass die exponierten Inhomogenitäten teilweise abgetragen werden und somit eine leicht vergrößerte durchschnittliche Fläche festzustellen ist. Aufgrund des sehr kleinen Unterschieds kann diese jedoch vernachlässigt werden.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	Diamant, 1A1	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessstrategie:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	K44UF, HC	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrind IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 6 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung	ALCRONOS®

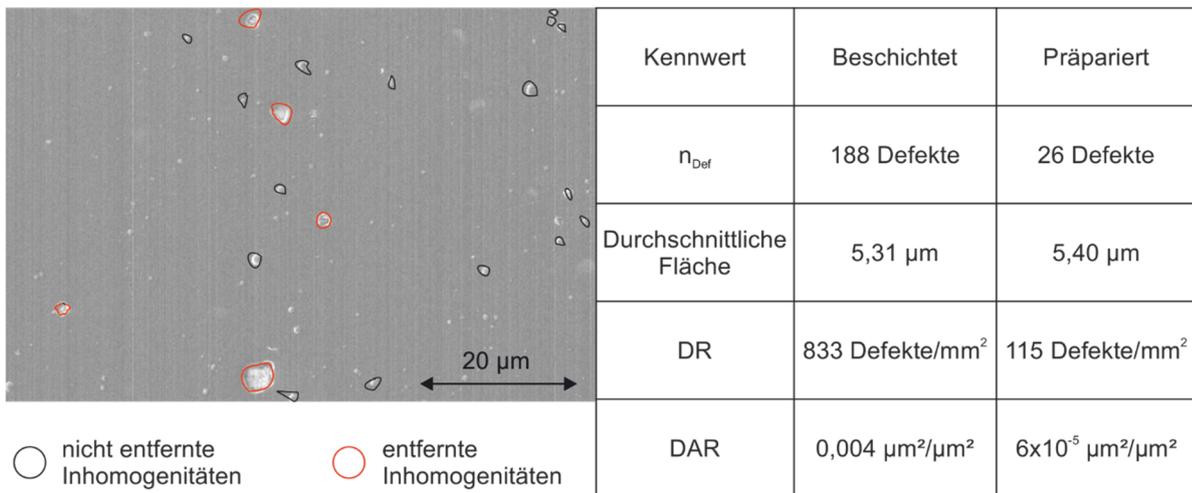


Abbildung 7.1.4: Bewertung des Schichtnachbehandlungsverfahrens

Neben der Auswertung und Analyse hinsichtlich der Entfernung und Reduzierung der Anzahl von Schichtinhomogenitäten wurde zu Beginn dieses Kapitels der bestehende Zielkonflikt von Schichtnachbehandlungsprozessen erwähnt. Bei konventionell eingesetzten Schichtnachbehandlungsverfahren kommt loses, ungebundenes Abrasivmaterial zum Einsatz [203]. Aufgrund der dadurch resultierenden Wirkmechanismen erfolgt durch diese Verfahren an nicht exponiert liegenden Stellen kein messbarer Materialabtrag, da die eingebrachte Energie nur unter hohem Druck und gezielter Prozessführung zu einem Materialabtrag verwendet werden kann [6, 203]. Da es sich bei dem hier untersuchten Verfahren jedoch um einen Prozess mit gebundenem Korn handelt und hierzu keine Untersuchungen hinsichtlich der resultierenden Abtragsmechanismen bei der Schichtnachbehandlung bekannt sind, erfolgten metallographische Querschliffe der vor- und nachbehandelten Werkzeuge, um eine Beurteilung der Schichtdickenreduzierung zu ermöglichen.

7.1. Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

91

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	EDG1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Werkstoff:	K44UF, HC	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 6 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung	ALCRONOS®

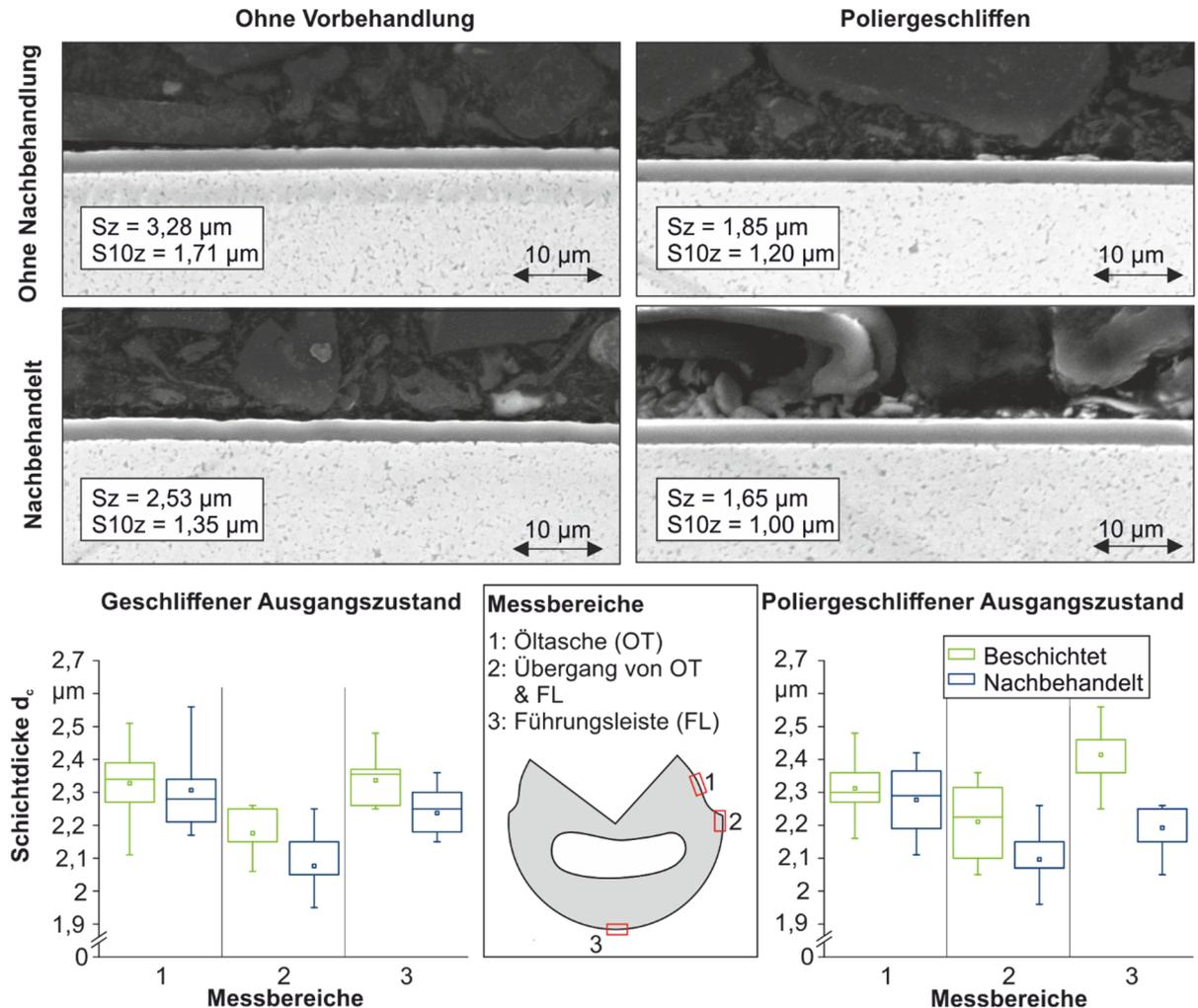


Abbildung 7.1.5: Beeinflussung der Schichtdicke nach dem Schichtnachbehandlungsprozess

Die Auswertung der Werkzeuge in unterschiedlichen Präparationszuständen zeigt, dass sehr geringe Schichtdickenreduzierung durch das nach dem Beschichten erfolgende Präparationsverfahren resultiert. Die feststellbare Reduzierung um $\Delta d_c = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ohne eine Vorbehandlung und $\Delta d_c = 0,25 \text{ }\mu\text{m}$ mit einer Vorbehandlung liegen noch innerhalb der Messunsicherheit. Insbesondere aufgrund der vorhandenen Schwankungen im Messbereich 1, der Öltasche des Einlippentiefbohrwerkzeuges, wo keine Bearbeitung mit der Polierschleifscheibe erfolgt, unterstützt die getroffene Annahme. Bedingt durch die durchgeführte Prozesskinematik und die exponierte Lage des Übergangs zwischen der Öltasche und der Führungsleiste war davon auszugehen, dass es, ähnlich wie bei der Verrundung des Übergangs zwischen Öltasche und Führungsleiste im unbeschichteten Zustand, auch hier zu einer Beeinflussung und somit einer Schichtdickenreduzierung kommt. Anhand der durchgeführten Analysen und Auswertungen ließ sich diese Erkenntnis jedoch nicht bestätigen. Auffällig ist, dass sich trotz der geringen Zustellungen erkennbare Beeinflussungen der Führungsleistentopographie ergeben. Anhand der dargestellten Untersuchungen in Kombination zu den Ergebnissen der Schichtnachbehandlung lässt sich belegen, dass es durch den Einsatz der elastisch gebundenen Schleifscheibenbeläge zu einer Reduzierung von Schichtdefekten kommt, die sich positiv auf die Oberflächengüte der präparierten Funktionsflächen auswirkt. Die REM-Aufnahmen der Querschliffe zeigen, dass die geschliffene Oberflächentopographie für die Beschichtung maßge-

92 7.1 Nachbehandlung der Funktionsflächen von Einlippentiefbohrwerkzeugen durch den Einsatz elastisch gebundener Polierschleifscheiben

gend ist und die Profilspitzen teilweise verstärkt werden. Bei den poliergeschliffenen Werkzeugen ergeben sich hingegen unterschiedliche Ergebnisse, die den allgemeinen Angaben der Literatur widersprechen [3, 165, 169]. Als Erklärungsansatz für die entgegen der Literatur entstehenden Phänomene, dass eine Oberfläche durch die nachfolgende Beschichtung nicht glatter werden kann, gilt es in weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Daher soll die folgende Abbildung 7.1.6 dazu dienen, um die festgestellten Einebnungen der nach dem Polierschleifen beschichteten Oberflächen weiter zu untersuchen.

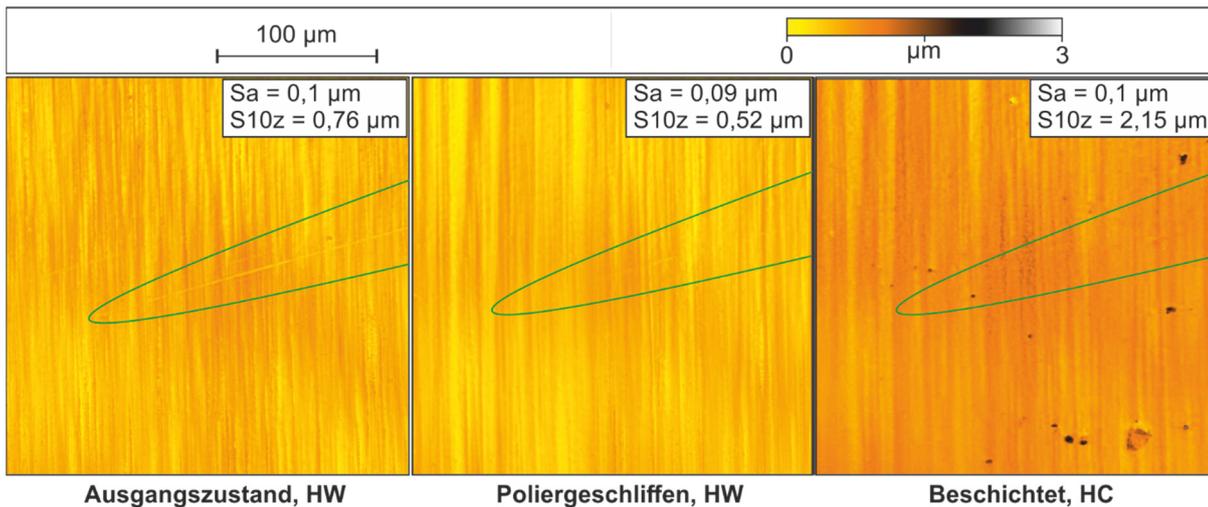
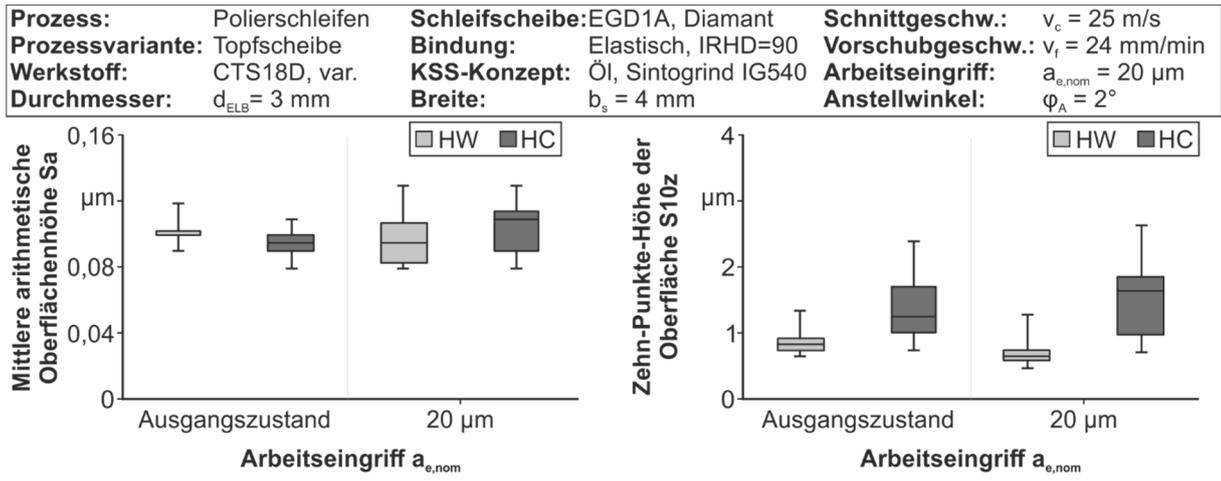


Abbildung 7.1.6: Einebnung von Topographiefehlern durch die nachträgliche Beschichtung

Im geschliffenen Ausgangszustand ist eine Riefe auf der Oberfläche zu erkennen, die durch eine unsachgemäße Handhabung resultiert. Die nachfolgende Präparation mittels lokalem Polierschleifen reduziert die Ausprägung der Riefe, da es zu einem Abtrag der vorher bestehende Profilspitzen kommt. Nach dem Beschichten der Werkzeuge ist die Riefe nicht mehr sichtbar, so dass davon ausgegangen werden kann, dass diese einzelne Riefe durch Beschichtungsmaterial aufgefüllt wird und somit eine Einebnung stattfindet. In diesem Fall ist dies nur möglich, da es sich um eine sehr geringe Ausprägung der Riefe handelt, was auch anhand der dargestellten Farbskalenlegende ersichtlich ist. Unterstützt wird diese Erkenntnis auch durch die Auswertung von anderen Werkzeugen. Zur Bewertung und Analyse dieses Prozessverhaltens wird das Dale-Void-Volumen (V_{vv}) herangezogen. Das V_{vv} ist das Raumvolumen, das durch die Oberflächentextur aus einer definierten Ebene in ihrer Höhe begrenzt wird, die dem jeweiligen Materialverhältnis gleichzusetzen ist und das V_{vv} dementsprechend dem untersten Tal entspricht. Es zeigt sich, dass in diesem betrachteten Bereich durch die anschließende

7.2. Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung 93

Beschichtung keine Veränderung der Oberflächengüte ergibt, jedoch das V_{vv} geringfügig reduziert wird. Somit wird die Vermutung unterstützt, dass es durch die Beschichtung von Oberflächen mit hoher Oberflächengüte zu Fülleffekten bei gering ausgeprägten Riefen kommt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	Diamant, EGD1A	Schnittgeschw.:	$v_c = 25$ m/s
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24$ mm/min
Werkstoff:	CTS18D, HC	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 6$ μ m
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10$ mm	Breite:	$b_s = 10$ mm	Beschichtung:	ALCRONOS®

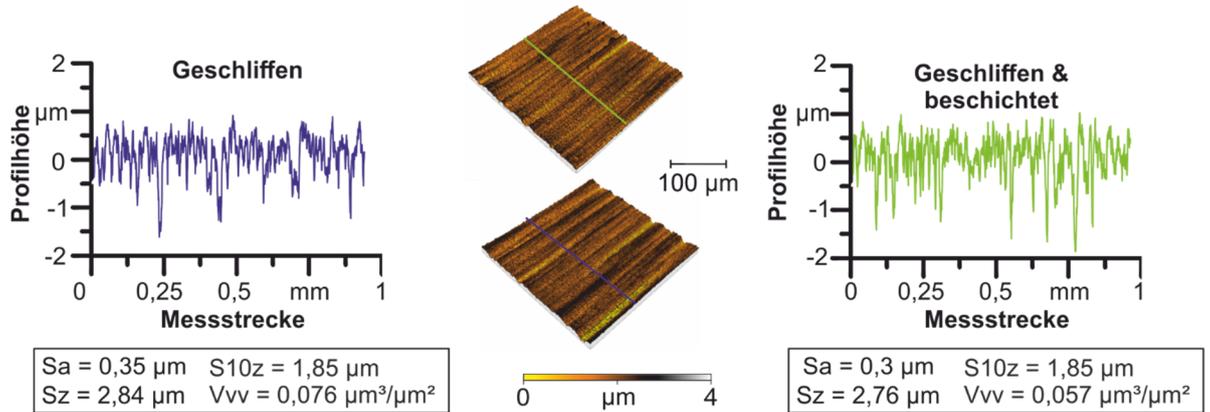


Abbildung 7.1.7: Gegenüberstellung von unterschiedlichen Beschichtungszuständen

7.2. Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, ist durch die Vor- und Nachbehandlung mit elastisch gebundenen Polierschleifscheiben eine Beeinflussung der Oberflächentopographie an Funktionsflächen möglich. Die Analyse der Schichtdickenbeeinflussung hat gezeigt, dass sich durch das Polierschleifen mit dieser elastischen Bindung keine messbare Veränderung der Schichtdicke ergibt. Lediglich die auftretenden herausgelösten Schichtinhomogenitäten stellen eine mögliche Beeinflussung der Schichthaftungseigenschaften und des Schichtinterfaces zwischen Werkzeug und Beschichtung dar. Dass die Beschichtung durch den nachfolgenden Präparationsvorgang mit geringem Arbeitseingriff eine Beeinflussung der Oberflächentopographie in Abhängigkeit des Vorbehandlungszustandes verursacht, ist in Abbildung 7.2.1 dargestellt.

Prozess:	Polierschleifen	Schleifscheibe:	Diamant, EGD1A	Schnittgeschw.:	$v_c = 25$ m/s
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD=90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24$ mm/min
Werkstoff:	CTS18D, HC	KSS-Konzept:	Öl, Sintogrid IG540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 6$ μ m
Durchmesser:	$d_{ELB} = 10$ mm	Breite:	$b_s = 10$ mm	Beschichtung:	ALCRONOS®

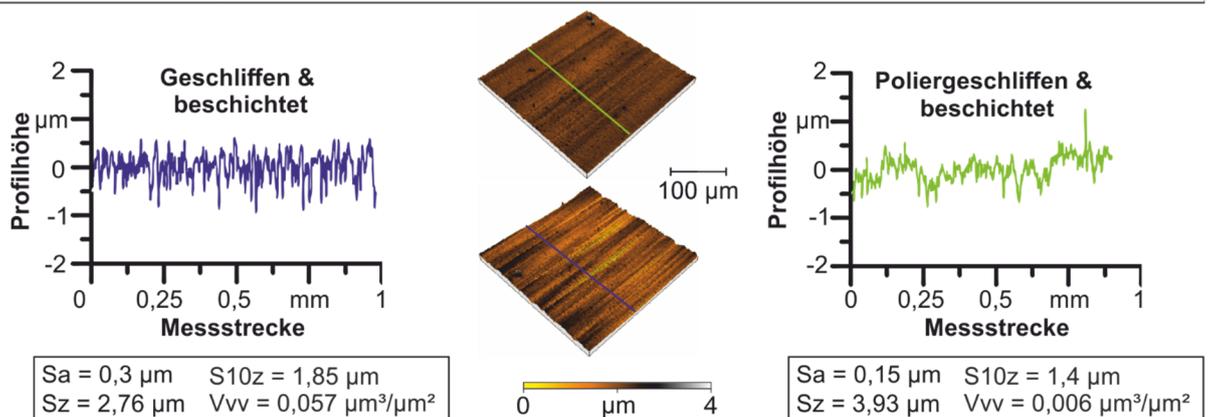


Abbildung 7.2.1: Beeinflussung der Schichttopographie in Abhängigkeit des Vorbehandlungszustandes

94 7.2 Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Profilschriebe der ausgewerteten Führungsleisten von unterschiedlich vorbehandelten Tiefbohrwerkzeuge unterscheiden. Die lediglich geschliffene Oberfläche weist nach dem Beschichten aufgrund von Riefen und durch den Beschichtungsprozess bedingten Inhomogenitäten eine höhere Rauheit auf als die im Gegensatz dazu vorher poliergeschliffene Probe. Demgegenüber weist das vorher poliergeschliffene Werkzeug ein geringes Dale-Void-Volumen (V_{vv}) auf, wodurch eine Reduzierung des Ölrückhaltevolumens resultiert. Die ermittelten Profilschriebe zeigen zusätzlich, dass die Profilspitzen beim geschliffenen Werkzeug auch nach dem Beschichtungsprozess vorhanden sind. Bei den durch das Polierschleifen vorbehandelten Proben zeigt sich hingegen, dass viele Profilspitzen abgetragen sind, sich aber eine Welligkeit auf der Oberfläche ergibt, die durch die elastische Verformbarkeit des Schleifscheibenbelages und die dadurch bestehende Problematik beim Abrichten begründbar ist. Wie bereits in Kapitel 0 beschrieben, lässt sich die Beeinflussung der Schichthaftung bei PVD-Dünnschichten auf Basis des aktuellen Stands der Technik als kontrovers bezeichnen. Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten kommen hinsichtlich der Schichthaftung zu unterschiedlichen Erkenntnissen [40, 166, 169, 197]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen unterschiedlich präparierte Werkzeuge hinsichtlich des Schichthaftungsvermögens und der Schichteigenschaften analysiert werden, um eine für diesen Anwendungsfall gleiche Ausgangsbasis zu liefern und die Unterschiede gegenüberstellen zu können. Hierzu erfolgen Scratchtests, die extern bei einem Industriepartner durchgeführt wurden. Ziel dieser Untersuchungen ist der Aufbau von Wissen über die Schichthaftung sowie die Schichteigenschaften in Bezug auf unterschiedliche Vor- und Nachbehandlungszustände zu erhalten. Um eine größere Bandbreite zu erhalten und auch andere Präparationsmethoden abzudecken, werden drei unterschiedlich vorbehandelte Proben untersucht. Für jede dieser Proben erfolgt nach der Beschichtung eine Betrachtung des Einflusses einer bzw. keiner Nachbehandlung durch lokales Polierschleifen. Die unterschiedlichen Präparationszustände sind zur Verdeutlichung in Abbildung 7.2.2 dargestellt. Anhand der REM-Aufnahmen ist zu erkennen, dass es bedingt durch die Ausgangstopographie Unterschiede bei der Oberflächentopographie nach dem Beschichten gibt. Alle Proben im nicht nachbehandelten Zustand haben gemein, dass die bereits beschriebenen Schichtinhomogenitäten vorhanden sind. Es ist weiterhin auffällig, dass sich entlang der durch das Rundschleifen bedingten Riefen Beschichtungsmaterial ansammelt und zu einzelnen Schichtagglomerationen ausbildet. Bei den poliergeschliffenen Proben zeigen sich hingegen keine solche Agglomerate von Beschichtungsmaterial. Unter mechanischer Belastung besteht die Möglichkeit, dass durch die bei den geschliffenen Proben vorhandenen Profilspitzen eine Kerbwirkung resultiert und es somit zu einem vorzeitigen Versagen durch Rissbildungen und daraus resultierende Schichtdelaminationen kommt. Durch den Abtrag dieser Profilspitzen kann ein solcher Effekt vermieden und ein verbessertes Schichthaftungsvermögen erreicht werden.

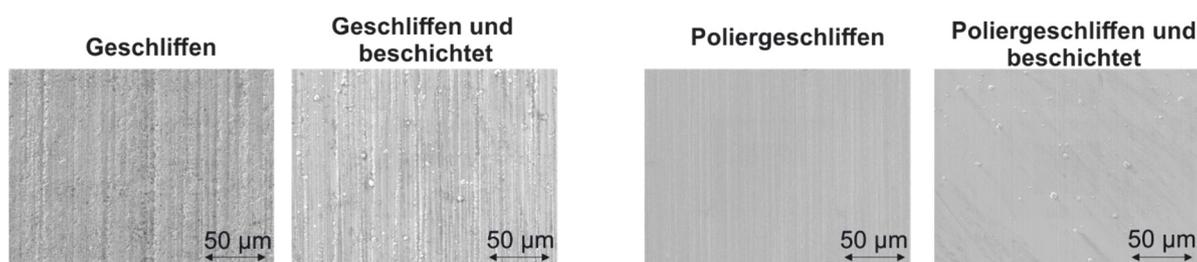


Abbildung 7.2.2: Auswahl verschiedener Proben in unterschiedlichen Präparationszuständen

Im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgt lediglich eine Betrachtung der präparierten Führungsleisten. Dies hat den Hintergrund, dass es insbesondere durch die tribologische Kontakt-situation in bestimmten Fällen zu hohen, lokalen Flächenpressungen kommt und daher eine

ausreichende Schichthaftung positive Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges hat. Als Referenz dient der in Abbildung 7.2.3 dargestellte Scratchtest einer beschichteten Probe. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Bestimmung des Referenzwertes für die Bewertung nachfolgender Untersuchungen und bieten somit die Möglichkeit, den Vor- und Nachbehandlungsprozess zu bewerten.

Prozess:	Schleifen	Schleifscheibe:	Diamant,EGD1A	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{\text{Dummy}} = 7,8 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{s,\text{nom}} = 6 \mu\text{m}$
Werkstoff:	WC-Co, HC	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung:	ALCRONOS®

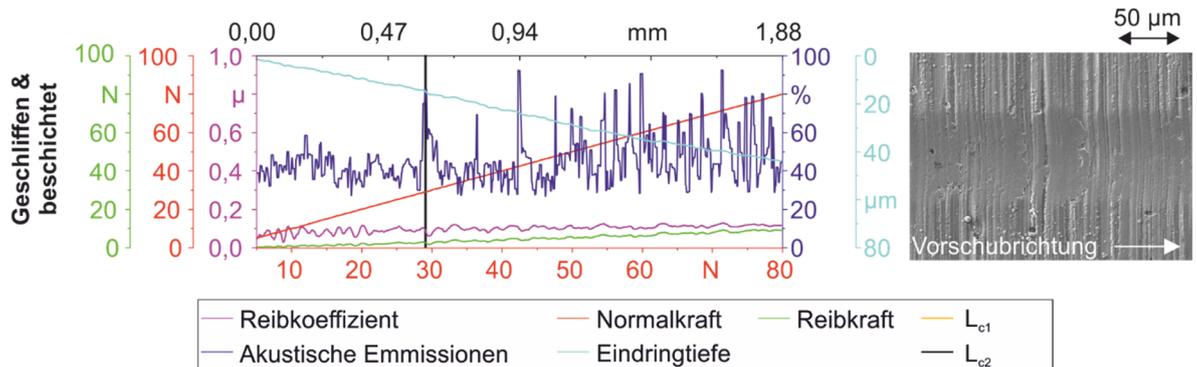


Abbildung 7.2.3: Beschreibung des Scratchtests an einer Referenzprobe

Bei der Auswertung von Scratchtests besteht die Möglichkeit umfangreiche Daten durch die gewonnenen Messergebnisse zu erhalten [44, 167, 177, 208]. Der wichtigste Aspekt stellt die Messung der akustischen Emissionen dar. Durch diesen Kennwert lässt sich eine Aussage darüber treffen, ab wann die kritischen Lasten erreicht bzw. überschritten werden. Die kritischen Lasten beim Scratchtest sind so definiert, dass es bei der kritischen Last L_{c1} zu ersten Rissinitierungen und bei der kritischen Last L_{c2} zu ersten Abplatzungen kommt. Ermittelt werden die kritischen Lasten durch die akustischen Emissionen, da die Ausschläge der akustischen Emissionen Rückschlüsse auf sich ausbildende Risse oder Abplatzungen geben. Ersichtlich wird dies am obenstehenden Beispiel bei einer kritischen Last $L_{c2} = 29,09 \text{ N}$. Durch den Ausschlag der akustischen Emissionen wird deutlich, dass ab diesem Wert erste Abplatzungen auftreten. Ab diesem Zeitpunkt ändert sich das Verhalten des Graphen deutlich. Dies bedeutet, dass es auch nach dem Überschreiten der kritischen Last L_{c2} zu weiteren Rissen und Abplatzungen innerhalb der Beschichtung kommt. Ursächlich hierfür sind die ausgeprägten Profilsitzen, die zu den bereits beschriebenen Überhöhungen von Beschichtungsmaterial führen. Diese weisen nur eine geringe Schichthaftung auf [64, 66]. Zusätzlich üben die Profilsitzen eine Kerbwirkung auf die applizierte Beschichtung aus, wodurch die Schichthaftung negativ beeinflusst wird. Neben der Bewertung der Schichthaftung durch die kritischen Lasten lassen sich noch weitere Informationen gewinnen. So kann durch den Reibkoeffizienten μ das Einlaufverhalten der Beschichtung beschrieben werden. Bei einem zu Beginn durch hohe Ausschläge geprägten Verlauf, lässt sich die Aussage treffen, dass die jeweilige Probe ein ungünstiges Einlaufverhalten aufweist. Dies lässt sich dadurch begründen, dass es beim Beispiel des geschliffenen und beschichteten Werkzeuges aufgrund der Profilsitzen der Oberflächentopographie zu veränderten Reibkontaktsituationen kommt und somit der Reibbeiwert beeinflusst wird. Erst ab dem Überschreiten einer gewissen mechanischen Belastung resultieren ausreichende plastische Verformungen, die auch anhand der dargestellten Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops ersichtlich sind. Im Bereich der Ritzspur lassen sich eine plastisch deformierte Beschichtung und umgeformte Profilsitzen erkennen, die durch den Diamanten eingebnet werden. Als letzte wichtige Information aus der obenstehenden Abbildung

7.2.3 lässt die gemessene Eindringtiefe einen Rückschluss zu, welchen Eigenspannungszustand die Beschichtung aufweist [177]. Eine geringere Eindringtiefe bei gleicher Normalkraft spricht für eine höhere Druckeigenspannung in der Beschichtung, da die Beschichtung bzw. das darunterliegende Substrat beständiger gegenüber eindringenden Körpern sind. Diese Bewertung ist qualitativ zu werten [177]. Bei dem hier dargestellten Werkzeug zeigt sich, dass sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Normalkraft und der Eindringtiefe ergibt. Eine Bewertung der Eindringtiefe lässt sich jedoch nur qualitativ durch eine Gegenüberstellung mit andersartig präparierten Proben durchführen. Daher werden im Folgenden unterschiedlich präparierte Werkzeuge anhand der durchgeführten Scratchtests bewertet und gegenübergestellt. Die durchgeführten Scratchtests erfolgten auf jeweils einem vorher geschliffenen und poliergeschliffenen Werkzeug. Der vordere, der Werkzeugspitze näherer Bereich, wurde im Anschluss an die Beschichtung durch lokales Polierschleifen nachbehandelt.

Die Auswertung des Scratchtests der geschliffenen und beschichteten Probe wurde bereits umfangreich diskutiert und dient in der folgenden Abbildung 7.2.4 als Referenz, die den aktuellen Stand von geschliffenen Proben darstellt. Bei Betrachtung der Aufnahmen aus dem Rasterelektronenmikroskop zeigt sich bei den geschliffenen Proben, dass es durch die Schichtnachbehandlung zu einer Verbesserung der Oberflächentopographie in Form von abgetragenen Profilsitzen und entfernten Schichtinhomogenitäten kommt. Die in der Ritzspur ersichtlichen plastischen Verformungen lassen sich hingegen bei beiden Varianten erkennen. Beide Messbereiche weisen Schichtabplatzungen auf, die durch die kritische Last L_{c2} im Diagramm symbolisiert wird. Auffällig ist jedoch, dass es bei dem nachbehandelten Werkzeug erst deutlich später, bei einer kritischen Last $L_{c2} = 44,47 \text{ N}$, zu Abplatzungen kommt. Analog zum geschliffenen und beschichteten Messbereich lässt sich dieser Wert durch den ersten höheren Ausschlag bei der Messung der akustischen Emissionen feststellen. Hinsichtlich einer Veränderung des Einlaufverhaltens bei geringen Belastungen lässt sich durch die nachfolgende Schichtnachbehandlung keine eindeutige Aussage treffen, da sowohl beim nicht vorbehandelten als auch beim vorbehandelten Zustand bei geringen mechanischen Belastungen Ausschläge im Messsignal festzustellen sind. Auffällig ist hingegen, dass es beim Vergleich der gemessenen Eindringtiefe deutliche Unterschiede gibt. So liegt die Eindringtiefe h ohne eine Schichtnachbehandlung bei $h = 45 \text{ }\mu\text{m}$. Durch die Schichtnachbehandlung resultiert eine Reduzierung der Eindringtiefe h auf $h = 28 \text{ }\mu\text{m}$. Somit lässt sich durch die Schichtnachbehandlung eine Reduzierung der Eindringtiefe um circa 33 % feststellen.

7.2. Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung 97

Prozess:	Schleifen	Schleifscheibe:	Diamant,EGD1A	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Umfangsscheibe	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{\text{Dummy}} = 7,8 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{e,\text{nom}} = 6 \mu\text{m}$
Werkstoff:	WC-Co, HC	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung:	ALCRONOS®

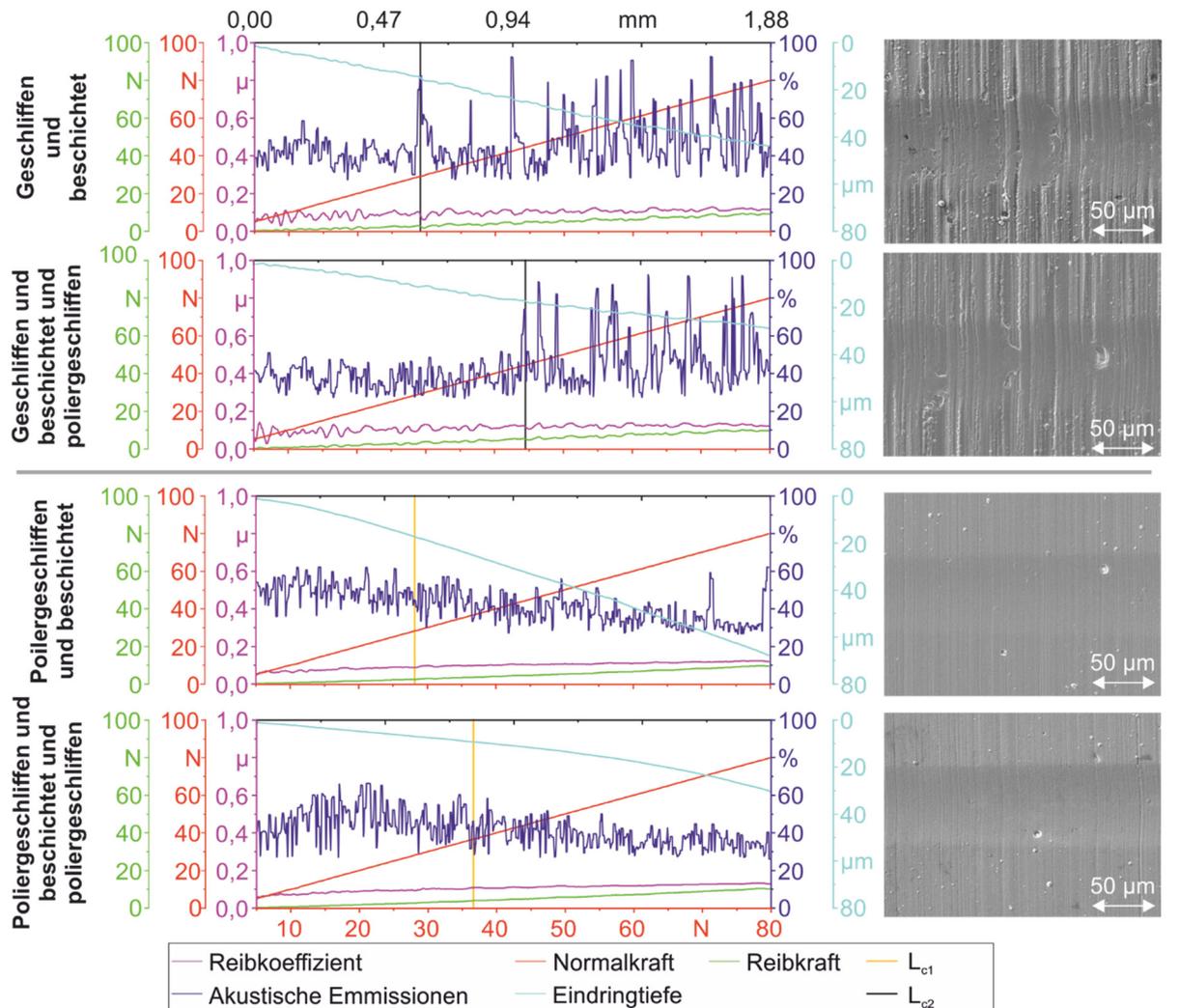


Abbildung 7.2.4: Schichtcharakterisierung durch Scratchtests bei unterschiedlich vor- und nachbehandelten Werkzeugen

Die Ergebnisse der vor dem Beschichten poliergeschliffenen Proben weisen im Vergleich zu den lediglich geschliffenen Bereichen andere Ergebnisse auf. Auf den REM-Aufnahmen ist zu erkennen, dass die Oberfläche deutlich homogener und nahezu frei von Profilsitzen und Riefen ist. Es sind lediglich die bekannten Schichtinhomogenitäten sowie einzelne tiefere Riefen festzustellen, die bereits in Kapitel 6.1 beschrieben sind. Somit ist davon auszugehen, dass die sichtbaren Riefen bei der vor- und nachbehandelten Probe bereits vor dem Beschichten durch den Polierschleifprozess erzeugt wurden. Neben der veränderten Oberflächentopographie lassen sich im Vergleich zu den nicht poliergeschliffenen Proben auch Unterschiede bei der plastischen Verformung der Beschichtung und des Substrats feststellen. Bedingt durch die fehlenden Agglomerate von Beschichtungsmaterial an den exponierten Profilsitzen ist kein verformtes Schichtmaterial feststellbar. Die mechanische Belastung durch die Diamanttastspitze führt lediglich zu einem Abtragen der Schichtinhomogenitäten, was durch ausgerissene Partikel innerhalb der Ritzspur ersichtlich ist. Bei einer kritischen Last $L_{c1} = 28,17 \text{ N}$ finden erste Rissinitiierungen bei der nicht nachbehandelten Probe statt. Ab diesem Punkt reduzieren sich die gemessenen akustischen Emissionen und verfügen über eine geringere Streubreite.

98 7.2 Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung

Im durch Polierschleifen nachbehandelten Messbereich lassen sich keine Abplatzungen feststellen. Die Schichtnachbehandlung führt auch in diesem Fall zu einer Erhöhung der kritischen Last $L_{c1} = 36,06 \text{ N}$, die durch die Auswertung der akustischen Emissionen bestimmt wird. Bei beiden als Vorbehandlungsprozess poliergeschliffenen Proben lässt sich in Bezug auf das Einlaufverhalten feststellen, dass es aufgrund der hohen Oberflächengüte und den wenigen und geringen Profilsitzen zu einer kaum messbaren Varianz des Reibkoeffizienten μ kommt. Der Reibkoeffizient stellt sich direkt zu Beginn des Scratchtests auf einen Wert von $\mu = 0,07$ ein und verändert sich bis zum Ende nur geringfügig. Besonders auffällig stellt sich die Auswertung der Eindringtiefe h dar. Im nichtnachbehandelten Zustand resultiert beim poliergeschliffenen Werkzeug eine Eindringtiefe von $h = 73 \text{ }\mu\text{m}$. Somit ist diese beinahe doppelt so tief, wie beim geschliffenen und nicht nachbehandelten Bereich. Es ist somit davon auszugehen, dass es durch den Polierschleifprozess zu einer Veränderung des Eigenspannungszustandes des Hartmetalls kommt. Für diesen Aspekt spricht, dass durch die Schichtnachbehandlung eine Reduzierung der Eindringtiefe auf $h = 29 \text{ }\mu\text{m}$ möglich ist. Somit liegt dieser Wert auf dem gleichen Niveau wie das ebenfalls durch Polierschleifen nachbehandelte Werkzeug. Die gewonnenen Erkenntnisse sind qualitativer Natur und weisen Indizien auf, dass die beschriebenen Effekte durch den Präparationsprozess resultieren. Zur Bestätigung der genauen Zusammenhänge zwischen der Beeinflussungen der Werkzeugrandzone und der Sichteigenschaften durch das lokale Polierschleifen sind weiterführende Untersuchungen notwendig, die in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen sind.

Als Fazit der Auswertungen der Schichtcharakterisierung im geschliffenen und poliergeschliffenen Vorbehandlungszustand lässt sich somit festhalten, dass durch die Vorbehandlung durch lokales Polierschleifen im direkten Vergleich eine Verbesserung der Schichthaftung resultiert. Dies wird insbesondere durch die nicht auftretenden Schichtdelaminationen bei den vorher poliergeschliffenen Auswertebereichen ersichtlich. Ursächlich für die bessere Schichthaftung sind vermutlich die abgetragenen Profilsitzen der Ausgangstopographie, da diese zu erhöhten Eigenspannungen innerhalb der Beschichtung führen und eine zusätzliche Kerbwirkung resultiert. Die Kerbwirkung scheint hierbei den maßgeblichen Einfluss zu haben, da ein nahezu vollständiger Abtrag der Profilsitzen den Eigenspannungszustand in der Schicht negativ beeinflusst. Unterstützt wird diese Aussage durch die qualitative Messung der resultierenden Eindringtiefe h . Diese ist bei den Messbereichen ohne Schichtnachbehandlung bei den vorher poliergeschliffenen Proben deutlich größer als im geschliffenen Zustand. Durch die nachträgliche Präparation mittels elastisch gebundener Polierschleifscheiben ergibt sich hingegen eine Beeinflussung der Eindringtiefe h . Somit liegt nahe, dass es durch die Nachbearbeitung der Oberfläche trotz der geringen Zustellungen zu einer Einleitung von Druckeigenspannungen kommt und somit eine erhöhte Verschleißbeständigkeit vorliegt. In Bezug auf den Reibkoeffizienten μ und die Reibkraft F_r lassen sich hingegen keinerlei Unterschiede feststellen.

Zur genaueren Einordnung der gewonnenen Erkenntnis in den Stand der Technik erfolgten aufbauend auf den bereits dargestellten Ergebnissen erweiterte Untersuchungen an durch das abrasive Nassstrahlspanen präparierten Proben. Auch bei diesem Werkzeug geschah analog zu den vorherigen Untersuchungen eine Analyse des vorbehandelt und beschichteten Bereiches sowie des zusätzliche durch lokales Polierschleifen nachbehandelten Bereiches. Die aus diesen Untersuchungen erarbeiteten Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 7.2.5 dargestellt.

7.2. Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung 99

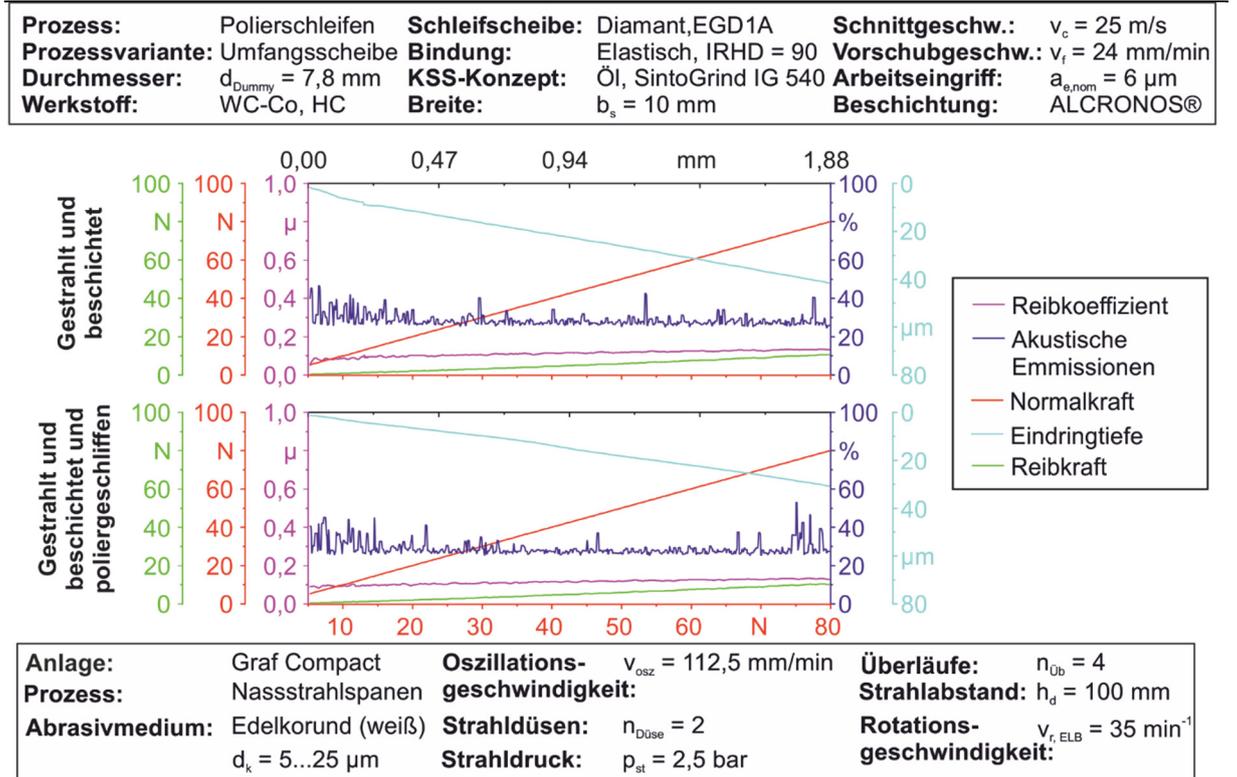


Abbildung 7.2.5: Schichtcharakterisierung durch Scratchtests bei einem nassstrahlgespannten Werkzeug

Zur Präparation der hier untersuchten Proben, wurden identische Prozessparameter wie bei den Untersuchungen in Kapitel 6.1 verwendet, um eine möglichst gute Übereinstimmung geben zu können. Beim Vergleich der beiden Auswertungen zeigt sich kaum ein Unterschied. Sowohl die akustischen Emissionen als auch der Reibkoeffizient μ sind nahezu identisch und zeigen keinerlei Auffälligkeiten. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass es bei den durch das abrasive Nassstrahlspanen vorbehandelten Werkzeugen zu keinerlei Feststellung der kritischen Lasten L_c kommt. Die ermittelten akustischen Emissionen lassen keinen Rückschluss auf sich entwickelnde Rissbildungen oder gar Abplatzungen zu. Der Messbereich, welcher durch den Einsatz der elastisch gebundenen Polierschleifscheiben nachbehandelt wurde, weißt jedoch erneut eine geringere Eindringtiefe h auf. Auch bei diesen Proben ergibt sich bei diesen Proben eine Eindringtiefe h von $h = 30 \mu\text{m}$. Somit sind die Ergebnisse der durch das Polierschleifen nachbehandelten Proben hinsichtlich der resultierenden Eindringtiefe nahezu identisch. Dies unterstützt die Vermutung, dass es durch das nachträgliche Finish mit den elastischen Schleifscheibenbelägen zu einer Einleitung von Druckeigenstressungen kommt und dementsprechend die Verschleißbeständigkeit erhöht wird. Als Erklärungsansatz für die verbesserte Schichthaftung lässt sich die vorher beschriebene Kerbwirkung der Profilspitzen heranziehen. Aus den Untersuchungen in Kapitel 6.1 ist bekannt, dass die gestrahlten Werkzeuge eine hohe Isotropie aufweisen und somit keine Vorzugsrichtung durch bestehende Profilspitzen und Riefen vorhanden ist. Da die Eindringtiefe h für diese Proben im Bereich der geschliffen und beschichteten Proben liegt, ist davon auszugehen, dass die isotrope Oberflächenstruktur eine ausreichende Beeinflussung der Schichteigenstressung bewirkt und daher die Eindringtiefe auf dem Niveau des geschliffenen Ausgangszustandes liegt. Als Ursache hierfür lässt sich die Grübchenstruktur benennen, da somit eine ausreichend raue Oberflächenstruktur vorliegt und der Aufbau von ausreichenden Eigenstressungen innerhalb der Beschichtung möglich ist.

1007.2 Untersuchung der Schichteigenschaften in verschiedenen Präparationszuständen zur Bestimmung des Einflusses der Ausgangstopographie nach dem Polierschleifen sowie nach einer eventuellen Schichtnachbehandlung

Zusammenfassend lässt sich anhand der in diesem Kapitel gesammelten Erkenntnisse ableiten, dass eine Aussage über eine Bevorzugung der unterschiedlichen Vor- und Nachbehandlungsverfahren in Bezug auf die Änderung der Schichteigenschaften möglich ist. Die Analyse der bei der Vorbehandlung gestrahlten Proben zeigt, dass sich keinerlei Rissinitiierungen oder Schichtabplatzungen durch die durchgeführten Scratchtest ermitteln lassen. Somit ist die Schichthaftung als sehr gut zu beschreiben. Die durch das Polierschleifen vorbehandelten Werkzeuge zeigen demgegenüber ein geringfügig schlechteres Ergebnis. Bei diesen Werkzeugen kommt es zu einzelnen Rissbildungen, die sich auch durch einzelne tiefere Riefen begründen lassen. Das schlechteste Ergebnis weist die regulär geschliffene Probe auf. Hierbei kommt es bereits frühzeitig zu einem Schichtversagen, welche im späteren Anwendungsfall zu einer verringerten Verschleißbeständigkeit und somit zu einer geringeren Standzeit führen kann. Die verwendeten Analogieproben weisen jedoch im Vergleich zu den realen Werkzeugen deutlich erhöhte Oberflächenkennwerte, $R_z = 3,2 \mu\text{m}$, auf. Die bestehenden Profilspitzen resultieren in einer Kerbwirkung innerhalb der Hartstoffschicht, die als Begründung für das frühe Schichtversagen zu sehen ist. In Bezug auf die Schichtnachbehandlung lassen sich auf Basis der durchgeführten Untersuchungen neue Erkenntnisse ausmachen. Bei jeder der untersuchten Varianten konnte die Eindringtiefe h als auch die Schichthaftungsfähigkeit, sofern ein Defekt aufgetreten ist, durch den Einsatz der elastischen Polierschleifscheiben verringert bzw. verbessert werden. Jede der nachbehandelten Proben wies eine maximale Eindringtiefe von $h = 28 \dots 30 \mu\text{m}$ auf. Dadurch kann von einer hohen Reproduzierbarkeit gesprochen und die Hypothese zur Einleitung von Druckeigenspannungen unterstützt werden. Zusätzlich zeigt sich, dass es bei einer fehlenden Schichtvorbehandlung durch lokales Polierschleifen zu einer geringeren Eindringtiefe h des Diamanttesters kommt. Hierdurch lässt sich schlussfolgern, dass die Oberflächenfeinstbearbeitung zu einer Änderung des Eigenspannungszustandes in der Randzone des Hartmetalls führt und die durch den Schleifprozess induzierten Druckeigenspannungen reduziert. Diese Erkenntnis muss in weitergehenden Untersuchungen geprüft werden und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Bei den gestrahlten und geschliffenen Ausgangszuständen lassen sich vergleichbare Eindringtiefen h feststellen. Somit erfolgt durch das Schleifen und abrasive Nassstrahlspanen eine Beeinflussung der Schichteigenheiten, die ein vermehrtes Eindringen des Diamanttasters vermeiden. Bei den poliergeschliffenen Proben liegt dagegen eine glatte Oberflächenstruktur mit hohen Oberflächengüten vor. Somit lässt sich in Bezug auf die möglichst hohe Oberflächengüte der Funktionsflächen und der Schichtvorbehandlung ein Zielkonflikt ausmachen. Des Weiteren erscheint basierend auf diesen Erkenntnissen eine reine Schichtvorbehandlung durch Polierschleifen hinsichtlich der erreichbaren Verschleißbeständigkeit der präparierten Werkzeuge ohne eine nachfolgende Schichtnachbehandlung als nicht zielführend. Der positive Effekt der Schichtnachbehandlung durch lokales Polierschleifen konnte gezeigt werden, weshalb dieser Prozessschritt als günstig für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Verschleißbeständigkeit festgestellt werden kann.

8. Einsatzverhalten von schneidkanten- und umfangsgestaltoptimierten Einlip-pentiefbohrwerkzeugen in verschiedenen Beschichtungszuständen

In den vorherigen Kapiteln erfolgten Untersuchungen zur gezielten Optimierung von Tiefbohrwerkzeugen durch das Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen. Die durch dieses Verfahren resultierenden Veränderungen und Anpassungen wurden separat untersucht und analysiert. Es konnten unterschiedliche Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden, die sich positiv auf das Einsatzverhalten der Werkzeuge auswirken können. Aufgrund der separat und teilweise isolierten Betrachtung der unterschiedlichen Untersuchungsaspekte soll im folgenden Kapitel eine Bewertung des Zusammenspiels der erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen durch Einsatzversuche bei der Bearbeitung von verschiedenen Vergütungsstählen erfolgen. Hierbei finden die vorher vorgestellten Prozesse Verwendung und werden teilweise in Kombination miteinander verwendet, um das Potential dieser Maßnahmen durch Einsatzversuche und die resultierenden Prozessergebnisse zu bewerten. Ergänzend erfolgt der Einsatz von nachgeschliffenen und somit teilbeschichteten Werkzeugen. Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass es aus wirtschaftlichen Gründen die Regel ist, dass Zerspanungswerkzeuge mehrfach eingesetzt werden. Um dies zu ermöglichen sind die Werkzeuge nach dem erstmaligen Einsatz nachzuschleifen und liegen bei nicht erfolgreichem Nachbeschichtungsprozess im teilbeschichteten Zustand vor.

8.1. Beeinflussung der Werkzeugstandzeit und der Bohrungsgüte durch hinsichtlich der Schneidkantenmikrogestalt präparierten Werkzeuge

Zu Beginn der Auswertung der Einsatzversuche zur Zerspanung von Vergütungsstählen mit Tiefbohrwerkzeugen findet eine Analyse der Werkzeugstandzeiten und der erreichbaren Bohrungsgüte in unterschiedlichen Präparationszuständen und Durchmessern statt. Ausgangspunkt der folgenden Untersuchungen ist die Analyse von vollbeschichteten Werkzeugen, die durch unterschiedliche Präparationsverfahren an der Schneidkante verrundet werden. Nach der Analyse und Auswertung dieser Werkzeuge erfolgt ergänzend eine Betrachtung der teilbeschichteten Werkzeuge. Auf eine gezielte Beeinflussung der Umfangsgestalt wird in diesem Kapitel verzichtet und zu späterer Zeit näher eingegangen.

8.1.1. Untersuchung von vollbeschichteten Werkzeugen in verschiedenen Präparationsstufen

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, ergibt sich durch die Verwendung der abrasiven Nassstrahlspanens eine unvermeidbare Beeinflussung von peripheren Schneidkanten. Um die Beeinflussung dieser Schneidkanten näher zu untersuchen erfolgten Einsatzversuche mit Werkzeugen, die gezielt an der Nebenschneide verrundet sind. Ziel dieser Untersuchung ist es, eine Aussage über die Auswirkungen von gezielten oder auch ungewünschten Beeinflussungen des Leistungsvermögens durch den Einsatz des abrasiven Nassstrahlspanens zu treffen. Diese Präparation der Schneidkanten mit Verrundungsgrößen von $\bar{S} \approx 35 \mu\text{m}$ bewirkt zwangsläufig eine Verrundung der exponierten Schneidenecke als auch der Nebenschneide. Aufgrund des fehlenden Wissens über die gezielte Beeinflussung des Standzeitvermögens und der erreichbaren Bohrungsgüte sind Untersuchungen notwendig, um eine Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen zu haben. Für die Schneidkantenpräparation der zu untersuchenden Werkzeuge mit dem Durchmesser $d_{\text{ELB}} = 10 \text{ mm}$ kommen zwei häufig im industriellen Umfeld eingesetzte Verfahren zum Einsatz. Diese sind das bereits beschriebene abrasive Nassstrahlspanen sowie das Gleitschleppsleifen.

Prozess:	Variiert	Abrasivmedium:	Al ₂ O ₃ , ZWSK 220	Strahlvorschubgeschw.:	v _{f, st} = 2 mm/s
Prozessstrategie:	Variiert	Korngröße:	d _k = 45...53 µm	Strahldruck:	p _{st} = 10 bar
Werkstoff:	CTS18D, HW	Kornform:	Blockig		
Durchmesser:	d _{Elb} = 10 mm	Düsenabstand:	h _d = 10 mm	Gleitschleppscheifen	Nassstrahlspanen

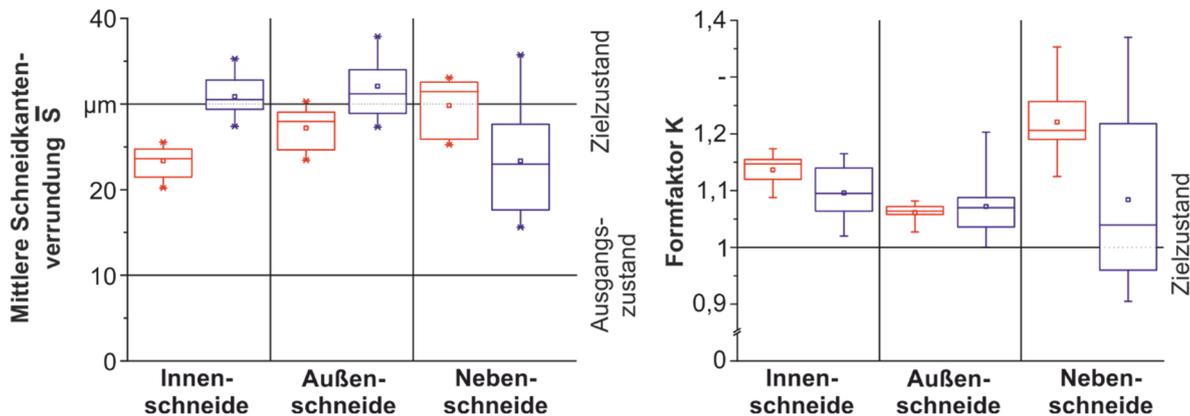


Abbildung 8.1.1.1: Beeinflussung der peripheren Schneidkanten durch unterschiedliche Präparationsmethoden

Die Auswertung der erzeugten Schneidkantenverrundungen zeigt, dass eine zielgerichtete Verrundung der Innen- und Außenschneide zwangsläufig zu einer Beeinflussung der Schneidenecke und Nebenschneide führt. Besonders auffällig ist hierbei, dass es beim Gleitschleppscheifen zu einer im Verhältnis größeren Verrundung der Schneidenecke und Nebenschneide kommt. Bei Verwendung des abrasiven Nassstrahlspanens zeigt sich hingegen, dass sich die Nebenschneide willkürlich verändert und keine kausalen Zusammenhänge in Bezug auf die Verrundung der Schneide festzustellen sind. Gleiche Erkenntnisse lassen sich durch die Betrachtung des Formfaktors ableiten und unterstützen somit die bestehende Problemstellung.

Bedingt durch die dargestellte Problematik erfolgten daher Versuche zur Analyse des Prozessverhaltens unterschiedlich präparierter Werkzeuge. An den Schneidenecken entwickeln sich über den Bohrweg Verschleißerscheinungen, welche sich durch vor der Schneide zyklisch aufbauende Materialrückstände begründen lassen. Hierbei wird das Material aufgrund der stark verrundeten Schneidenecke nicht zerspannt, sondern verformt, bis die Streckgrenze überschritten und das Material abbricht und abgeführt wird [4]. Dieser beschriebene Effekt ist dem einer Aufbauschneidenbildung im Bereich der Innen- und Außenschneide ähnlich, jedoch aufgrund der stetigen Kontaktsituation zwischen Bohrungswand und Schneidenecke hinsichtlich der Platzverhältnisse stark eingeschränkt. Dadurch lassen sich auch die resultierenden Verschleißerscheinungen an der Schneidkante erklären, welche einen abrasiven Abtrag in Vorschubrichtung erklären. Materialpartikel sammeln sich im Verlauf des Standweges vermehrt in dieser Mulde an und tragen beim erneuten Ausbrechen Schneidstoffpartikel ab, wodurch sich dieser Effekt zusätzlich verstärkt. Die sich in diesem Bereich ausbildende Sekundärschneidenbildung hat einen signifikanten Einfluss auf die erzeugte Bohrungsgüte, da das kaltverfestigte Material in direktem Kontakt mit der Bohrungswand steht und somit eine Riefenbildung begünstigt. Diese Erkenntnis wird durch die Darstellung der Verschleißentwicklung, der erzeugten Bohrungsrandzone und den ermittelten Rauheitskenngrößen in Abbildung 8.1.1.2 verdeutlicht. Durch eine übermäßige Verrundung und gleichzeitig vermehrtem Materialabtrag auf der Spanfläche wird dieser beschriebene Effekt gefördert. Aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen kleineren Verrundungsgrößen bei den hauptsächlich betrachteten Werkzeugdurchmessern d = 3 & 5 mm tritt dieser Effekt bei diesen Werkzeugen in einem deutlich geringeren Maße auf. Basierend auf diesen Erkenntnissen sind jedoch die verstärkte Verrundung der exponierten Schneidenecke zu vermeiden.

Prozess: Tiefbohren	Werkzeug: ELB, gelötet	Schnittgeschw.: $v_c = 80$ m/min
Prozessstrategie: Pilotbohrung	Beschichtung: TiALN	Vorschub: $f_z = 35$ μ m
Werkstoff: 42CrMo4 + QT	KSS-Konzept: Tiefbohröl, Petrofer	KSS-Druck: $p_{KSS} = 80$ bar
Durchmesser: $d_{ELB} = 10$ mm	Bohrtiefe: $l_d = 120$ mm	Bohrweg: $l_f = 15$ m

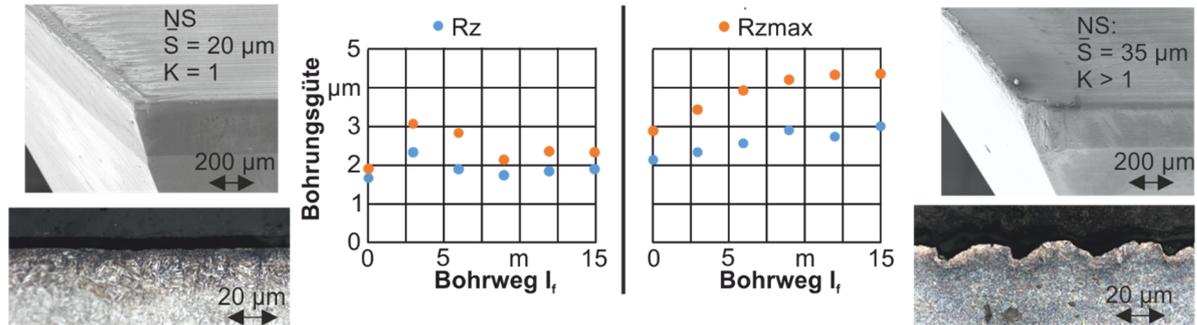


Abbildung 8.1.1.2: Einfluss der Schneideneckenverrundung und des Nebenschneidenverschleißes

Neben den beschriebenen Untersuchungen des Einflusses der Schneideneckenverrundung bei Tiefbohrwerkzeugen auf die Bohrungsgüte und das Verschleißverhalten der Außenschneiden fanden bei diesen Werkzeugen zusätzliche Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Stirnfase auf die mechanischen Werkzeugbelastungen statt. Ziel dieser Untersuchung ist die Analyse des Prozessverhaltens solcher Werkzeuge hinsichtlich des Führungsleistenverschleißes sowie der resultierenden mechanischen Belastungen. Aufgrund der fehlenden Stirnfase erfolgt beim Einfädeln des Werkzeuges ein früherer Kraftschluss zwischen Pilotbohrung und Werkzeug, wodurch zwar eine verbesserte Führung des Werkzeuges resultiert, jedoch eine, wie bereits in Kapitel 6.1 skizziert, höhere thermomechanische Belastung aufgrund der geringen Kontaktfläche resultiert.

Prozess: Tiefbohren	Werkzeug: ELB, gelötet	Schnittgeschw.: $v_c = 80$ m/min
Prozessstrategie: Pilotbohrung	Beschichtung: TiALN	Vorschub: $f_z = 35$ μ m
Werkstoff: 42CrMo4 + QT	KSS-Konzept: Tiefbohröl, Petrofer	KSS-Druck: $p_{KSS} = 80$ bar
Durchmesser: $d_{ELB} = 10$ mm	Bohrtiefe: $l_d = 120$ mm	Bohrweg: $l_f =$ variiert

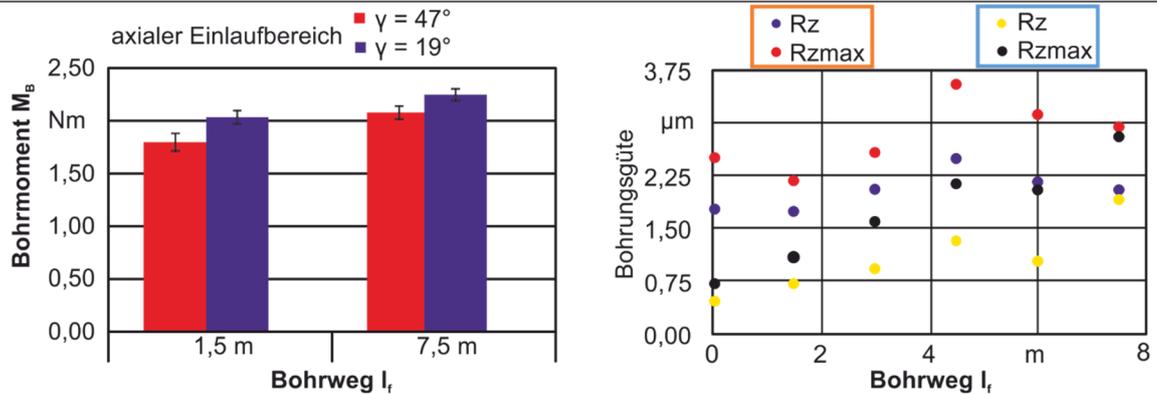


Abbildung 8.1.1.3 Einfluss der Stirnfasengestalt auf die mechanischen Belastungen und Bohrungsgüte

Die dargestellte Abbildung 8.1.1.3 zeigt, dass es durch den Verzicht auf die Stirnfase zu Beginn des Prozesses zu erhöhten Bohrmomenten kommt, die gleichzeitig zu einem erhöhten Energieeintrag führen. Der zu Beginn bestehende Unterschied bei den Bohrmomenten setzt sich über den Bohrweg fort. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Bearbeitung des 42CrMo4+QT sollen aufgrund der verbesserten Vergleichbarkeit und Relevanz für anspruchsvolle Zerspanungsprozesse auf Werkzeuge mit den Durchmessern $d_{ELB} = 3$ und 5 mm übertragen und bei der Bearbeitung eines hauptsächlich in der Automobilindustrie eingesetzten Vergütungsstahl 50CrMo4 analysiert werden. Im Rahmen der Vor- und Nachbehandlung dieser Werkzeuge wird auf die Ergebnisse aus dem Kapitel 0 zurückgegriffen. Aufgrund der tendenziell verbesserten Bohrungsgüte durch den Verzicht auf die Stirnfase wird bei den folgenden Untersuchungen ebenfalls auf diese verzichtet. Zur Darstellung der Beeinflussung von

unterschiedlich an der Schneidkante präparierten Werkzeugen erfolgt eine Auswertung anhand der mechanischen Belastungen, der erzeugten Bohrungsgütern sowie des Verschleißverhaltens im vollbeschichteten Zustand.

Prozess: Tiefbohren	Beschichtung: BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.: $v_c = 65 \text{ m/min}$
Prozessstrategie: Pilotbohrung	Anschliff: 40/30 (Standard)	Vorschub: $f = 29 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser: $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Öltschentiefe: 100 μm (Standard)	Kühlschmierstoff: Motorex Ortho NF-X 10
Werkstoff: 50CrMo4	Schneidstoff: CTS18D, HC	KSS-Druck: $p_{KSS} = 80 \text{ bar}$

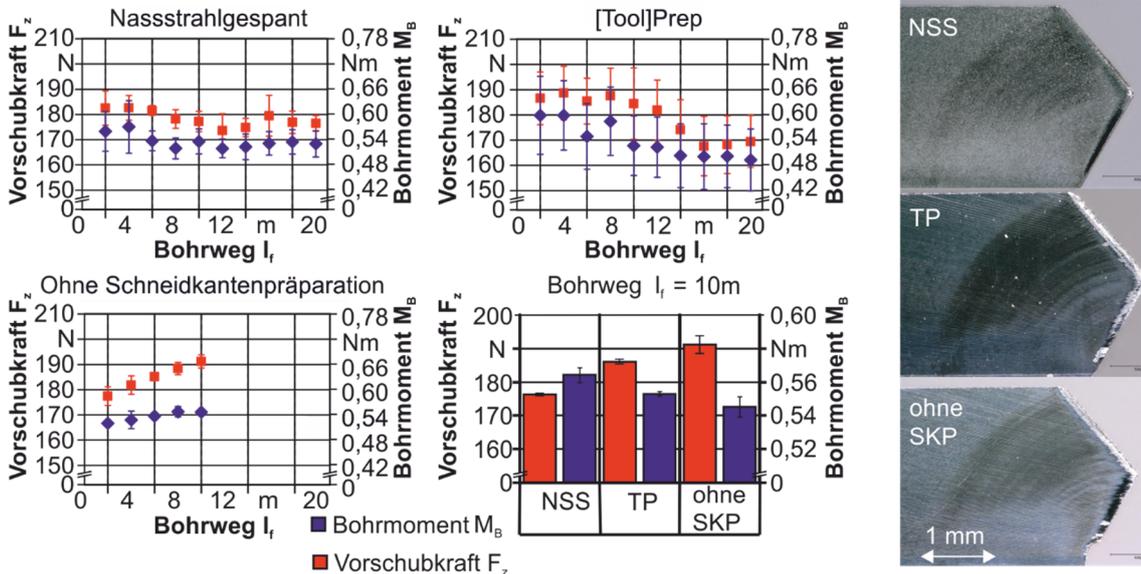


Abbildung 8.1.1.4: Einfluss der Schneidkantenpräparation auf die mechanischen Werkzeugbelastungen

Die Gegenüberstellung der unterschiedlich schneidkantenpräparierten Werkzeuge zeigt, dass sich hinsichtlich der ermittelten mechanischen Belastungen geringfügige Unterschiede ergeben. Sowohl das Bohrmoment M_B als auch die Vorschubkraft F_z weisen bei den schlichscharfen Werkzeugen zu Beginn der Untersuchungen die geringsten mechanischen Belastungen auf. Bis zu einem Bohrweg $l_f = 10 \text{ m}$ ändern sich die Kraftverhältnisse der präparierten Werkzeuge. Insbesondere die Vorschubkräfte F_z steigen bei den schlichscharfen und durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeugen an. Bei den durch [Tool]Prep präparierten Werkzeugen ist ein moderater Anstieg der Belastungen bis zu einem Bohrweg $l_f = 10 \text{ m}$ festzustellen. Ab diesem Zeitpunkt fallen die Kräfte ab und bleiben ab einem Bohrweg $l_f = 14 \text{ m}$ auf einem konstanten Niveau. Demgegenüber stellt sich für die schlichscharfen Werkzeuge ein linearer Kraftanstieg dar. Erklären lässt sich die erhöhte Vorschubkraft durch die Ausbrüche im Bereich der Innenschneide. Diese Ausbrüche resultieren durch sich verklemmende Späne die sich aufgrund der veränderten Spanbildung zur Innenseite der Sicke falten und somit zu einem Kerbverschleiß führen. Die Analyse der möglichen Ursachen ist in Kapitel 8.4. beschrieben. Die dargestellten Ergebnisse in Abbildung 8.1.1.4 lassen bei den durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeugen eine erhöhte Streuung der Messergebnisse erkennen. Dies lässt sich durch mögliche Varianzen bei der Schneidkantenpräparation, insbesondere der Innenschneide erklären. Eine detaillierte Betrachtung dieses Verschleißmechanismus erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt. Hinsichtlich der ermittelten Bohrmomente M_B bleiben alle Werkzeuge auf einem vergleichbaren Niveau, weshalb hier keine Aussage in Bezug auf die Schneideneckenverrundung getroffen werden kann. Zur Beschreibung und Analyse des Verschleißverhaltens ist daher eine separate Betrachtung der Verschleißerscheinungen an der Schneidenecke erforderlich, bei der gleichzeitig die erzeugten Bohrungsgütern berücksichtigt werden. Die Schneidenecke ist zusammen mit der Führungsleiste maßgeblich für die erzeugbare Bohrungsgüte von Relevanz. Daher erfolgt im Folgenden, siehe Abbildung 8.1.1.5, eine Gegenüberstellung der unterschiedlich präparierten Tiefbohrwerkzeuge in Bezug auf die erzeugbaren Bohrungsgütern.

Prozess:	Tiefbohren	Beschichtung:	BALIQU® Alcronos	Schnittgeschw.:	$v_c = 65 \text{ m/min}$
Prozessstrategie:	Pilotbohrung	Anschliff:	40/30 (Standard)	Vorschub:	$f = 29 \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{\text{ELB}} = 5 \text{ mm}$	Öltaشتentiefe:	100 μm (Standard)	Kühlschmierstoff:	Motorex Ortho NF-X 10
Werkstoff:	50CrMo4	Schneidstoff:	CTS18D, HC	KSS-Druck:	$p_{\text{KSS}} = 80 \text{ bar}$

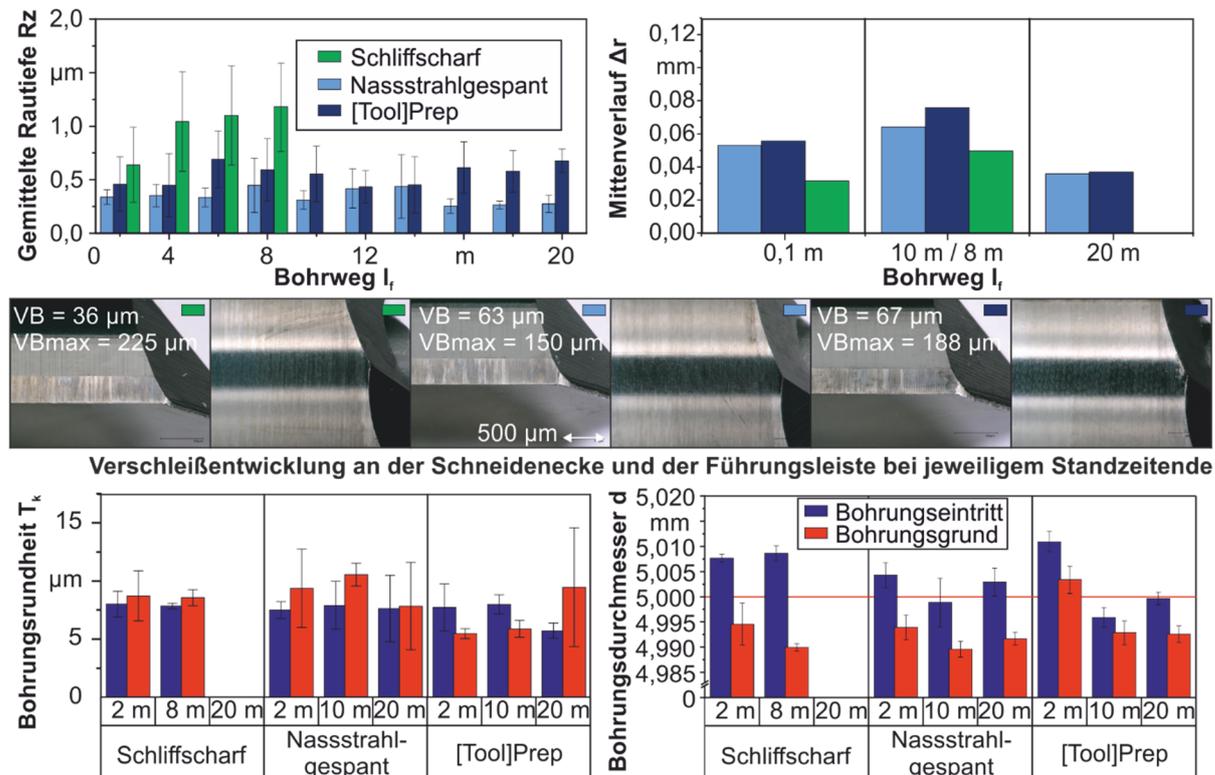


Abbildung 8.1.1.5: Beeinflussung der Bohrungsgüte in Bezug auf die Schneidkantenpräparation

Die Auswertung der Einsatzversuche ergibt nur geringfügige Unterschiede bei der erzeugbaren Bohrungsgüte. Lediglich die Oberflächenrauheit bei den schlichscharfen Werkzeugen weist eine erhöhte gemittelte Rautiefe R_z auf. Bei den übrigen Kennwerten verhalten sich die Werkzeuge nahezu identisch, weshalb sich keine eindeutige Tendenz oder Empfehlung ableiten lässt. Die Versuche der unpräparierten, schlichscharfen Werkzeuge müssen bereits vor der Hälfte der Standzeituntersuchungen abgebrochen werden. Ursächlich hierfür ist das bereits zu vor beschriebene Verschleißverhalten durch einen Kerbverschleiß an der Innenschneide des Tiefbohrwerkzeuges. Als Abbruchkriterium diente hierbei, dass die Ausbrüche an der Innenschneide die Spanbildung nicht beeinflussen und der intakte Schneidbereich der Innen- und Außenschneide $\geq d_{\text{ELB}}/2$ ist. Dieser Wert wird bei einem Bohrweg $l_f = 6 \dots 8 \text{ m}$ unterschritten, weshalb ein Abbruch der Versuche erfolgt. Bedingt durch diesen Ausbruch an der Innenschneide lässt sich auch die hohe maximale Verschleißmarkenbreite erklären. Die Auswertung des Verschleißverhaltens an der Schneidenecke zeigt bei den Tiefbohrwerkzeugen mit kleineren Durchmessern von $d_{\text{ELB}} = 5 \text{ mm}$ einen geringeren Einfluss der Schneideneckenverrundung auf die Bohrungsgüte. Ersichtlich ist dies durch den Schneideneckenverschleiß. Dieser ist bei den an der Schneidkante präparierten Werkzeugen deutlich größer, erzeugt aber dennoch bessere Oberflächengüten. Dadurch lässt sich schlussfolgern, dass die erzeugten Bohrungen hauptsächlich durch die Führungsleiste und wohlmöglich der fehlenden Stirnflanke beeinflusst wird. Der Einfluss der Führungsleiste deckt sich mit den Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen [2, 91, 107, 121]. Aufgrund der VHM-Ausführung der Werkzeuge lassen sich durch alle verwendeten Varianten sehr geringen Mittenverläufe messen. Die Bohrungsrundheit T_k und die Durchmesserabweichung Δd liegen in sehr guten Bereichen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich diese nach dem ISO-Toleranzsystem den Klassen IT 6...8 zuordnen. Bei der Auswertung dieser Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass zum einen die durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeuge mit Abrasivkörpern

des Durchmessers $d_{Abr} = 5,4$ mm präpariert wurden und die Stirnübergänge scharfkantig sind. Hierdurch besteht die Möglichkeit von spontanen Schichtabplatzungen und dadurch bedingter Verringerung der Bohrungsgüte. Diese Effekte lassen sich bei Betrachtung des Führungsleistenverschleißes an den oben dargestellten Werkzeugen erkennen. Eine Vermeidung dieser Verschleißzustände sind durch eine gezielte Gestaltoptimierung durch die bereits in Kapitel 6.1 beschriebenen Verfahren und Maßnahmen möglich.

Neben der Analyse der Bohrungsgüte erfolgte zur Bewertung der Beeinflussung des Prozessverhaltens zusätzliche Untersuchungen der Spanbildung sowie des Span- und Freiflächenverschleißes sowie der Aufbauschneidenbildung. Die Auswertungen in Abbildung 8.1.1.6 zeigen, dass sich insbesondere bei den durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeugen eine Änderung der Spanbildung ergibt. Insgesamt lassen sich die erzeugten Späne als unkritisch bewerten, da es in den meisten Fällen um kurze Bruchspäne handelt. Lediglich bei einem Bohrweg $l_f = 20$ m treten bei dem durch [Tool]Prep präparierten Werkzeug vereinzelt längere Späne auf. Bei Betrachtung der über die Spanfläche abgleitenden Späne durch die dargestellten REM-Aufnahmen der Spanunterseite lassen sich keine Rückschlüsse auf Unterschiede aufgrund der bestehenden Spannuttographie finden. Lediglich die Verschleißauswertung zeigt, dass es bis auf eine leicht erhöhte Aufbauschneidenbildung bei diesen Werkzeugen keine signifikanten Unterschiede gibt. Nach *Kirschner* [121] verändert sich der effektive Spanwinkel durch die Aufbauschneide, wodurch eine Veränderung der Spanbildung resultiert. Daher ist in diesem Fall davon auszugehen, dass es sich in diesem Fall um einen Einfluss der sich zyklisch entwickelnden und abbrechenden Aufbauschneide handelt.

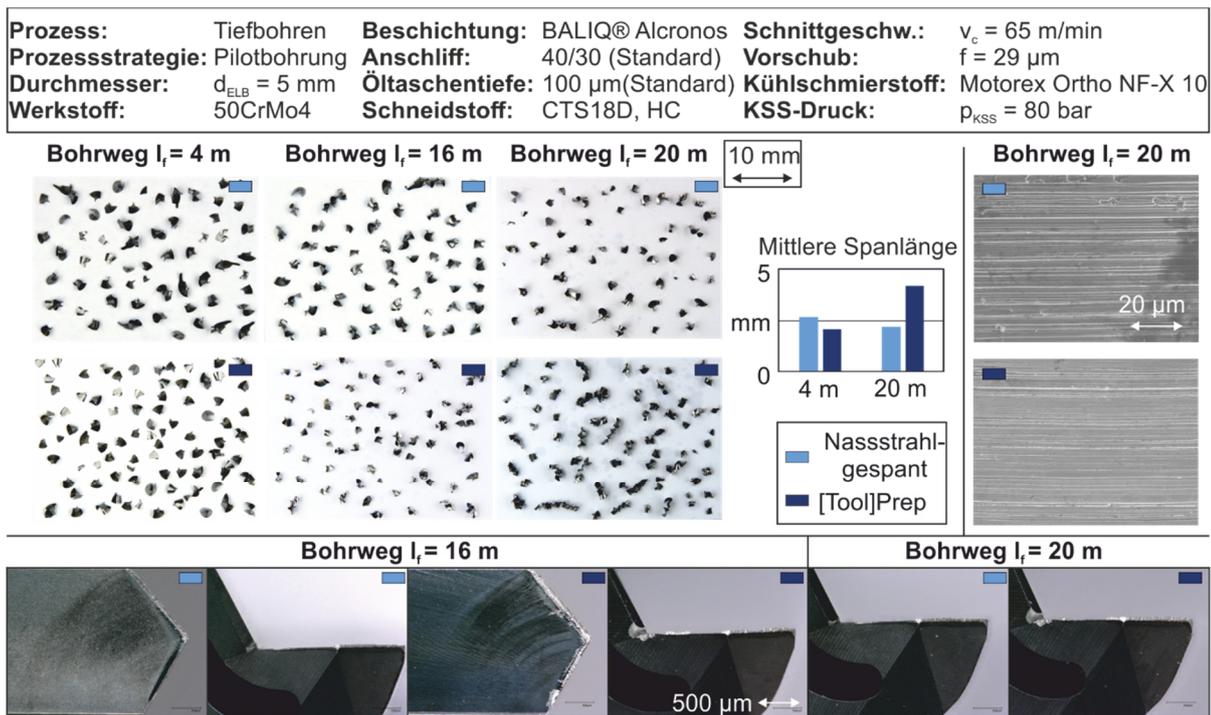


Abbildung 8.1.1.6: Beeinflussung der Spanbildung und des Verschleißverhaltens durch die Schneidkantenpräparation

Zur Sicherstellung dieser Hypothese sollen weitergehende Auswertungen von verschlissenen Werkzeugen betrachtet und die Spanbildung in unterschiedlichen Präparations- und Verschleißzuständen in Kapitel 8.4 untersucht werden. Bei der Analyse der Verschleißmechanismen wird sich auf die durch [Tool]Prep und das abrasive Nassstrahlspanen präparierten Werkzeuge beschränkt. Wie bereits vorher erwähnt, erfüllen die schlichscharfen Werkzeuge aufgrund des sich entwickelnden Kerbverschleißes an der Innenschneide nicht die erforderlichen Bedingungen.

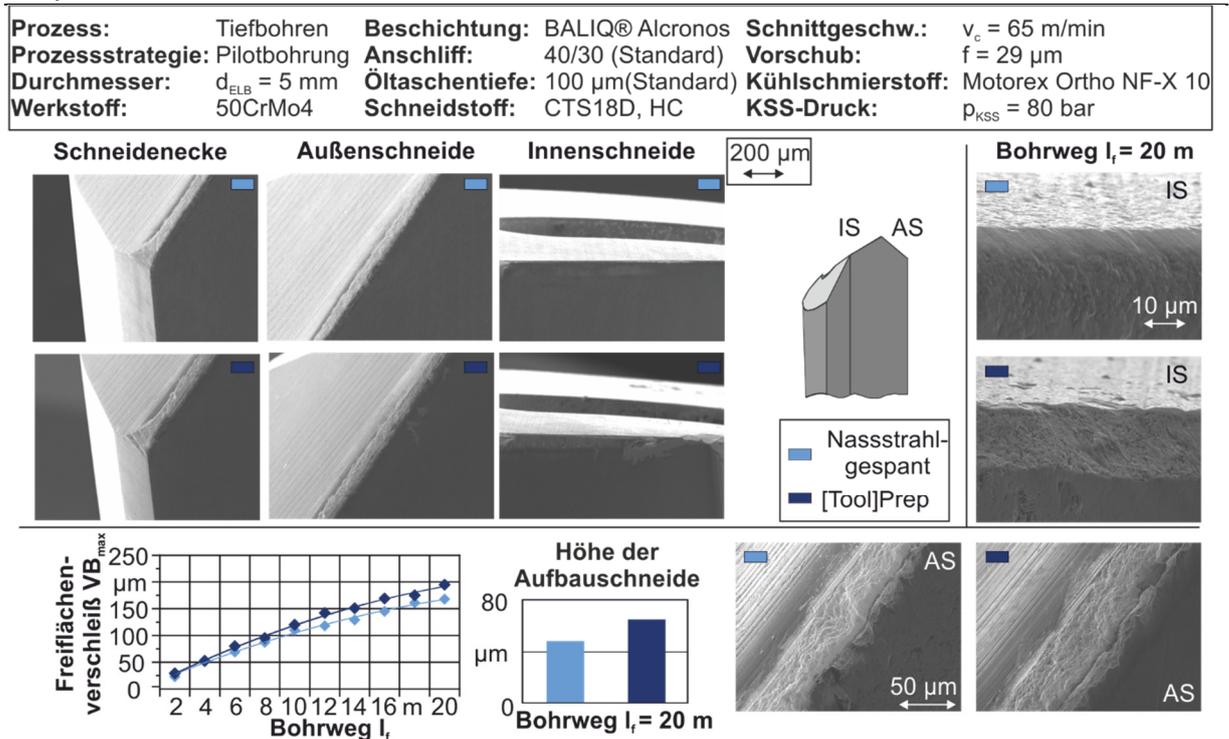


Abbildung 8.1.1.7: Detaillierte Verschleißanalyse anhand von REM-Aufnahmen

Die detaillierte Betrachtung der Verschleißentwicklung der eingesetzten Werkzeuge zeigt, dass die erzeugte Schneidkantenverrundung an der Außenschneide durch beide Verfahren zu einem nahezu identischen Verschleißverhalten führt. Bei beiden Varianten entsteht eine Aufbauschneide an der Außenschneide des Werkzeuges, die die Spanbildung negativ beeinflussen kann [121]. Die Auswertung der Höhe der sich ausbildenden Aufbauschneide weist nur einen geringfügigen Unterschied auf. Hierdurch lassen sich die auftretenden Unterschiede der in Abbildung 8.1.1.6 dargestellten Späne nicht eindeutig erklären. Eine weitere Möglichkeit stellt die unterschiedliche Spannutttopographie dar, die eine geringfügig geänderte Spanbildung, die den Span, ähnlich wie bei den unpräparierten Werkzeugen, in den Ölraum hinter den Schneiden führt und somit den Kerbverschleiß verursacht. Unterstützt wird diese Annahme durch die Ausbrüche an der Innenschneide, die eine Ähnlichkeit mit den Verschleißbildern der unpräparierten Werkzeuge aufweist. Für diese Hypothese spricht, dass es bei den nassstrahlgespannten Werkzeugen zu Beginn des Bohrweges zu tendenziell längeren Spänen kommt. Diese können durch einen geänderten Spanablauf auf der Spanfläche aufgrund der vorliegenden Grübchenstruktur begründet werden. Diese Grübchenstruktur wird jedoch mit fortlaufendem Bohrweg durch den Kontakt zwischen Span und Spanfläche eingeebnet, weshalb eine Beeinflussung zu einem späteren Prozesszeitpunkt im Bereich der Spanbildungszone ausgeschlossen werden kann. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Analyse der Spanlängen, da sich die gemessenen Spanlängen bei erhöhten Standwegen angleichen. Bei den durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeugen liegt nachweislich keine Beeinflussung der Spannutttopographie vor, weshalb von Beginn an kürzere Späne entstehen. Durch die Spanbildung verändert sich die Kontaktzone aufgrund der Einebnung, weshalb sich beim nassstrahlgespannten Werkzeug bei dem dargestellten Intervall nach einem Bohrweg $l_r = 16 \text{ m}$ kürzere Späne als zu Beginn ausbilden. Dies lässt sich anhand der dargestellten REM-Aufnahmen der Außenschneide erläutern. Zum Standzeitende hat sich bei beiden Werkzeugen ein vergleichbares Verschleißbild ausgebildet. Bei den durch das abrasive Nassstrahlspanen präparierten Werkzeugen wurde die Grübchenstruktur im Bereich der Schneidkanten eingeebnet. Die ursprüngliche Topographie lässt sich noch im Bereich nach der Kontaktfläche

zwischen Span und Spanfläche erkennen, wobei es auch in diesem Bereich zu einer geringfügigen Einebnung der Spannut gekommen ist. Unter Berücksichtigung der Prozesssicherheit und der meist geforderten Gleichmäßigkeit ab Beginn des Bohrweges, sind beim Tiefbohren die beim [Tool]Prep präparierten Spanformen zu bevorzugen. Aufgrund des nahezu identischen Verschleißverhaltens lässt sich jedoch nicht abschließend bestimmen, welcher Einfluss für die Änderung der Spanform beim Standwegende verantwortlich ist. Aufgrund der geringen Unterschiede lassen sich vorliegende Prozessschwankungen als wahrscheinlichste Begründung nennen. Als Begründung hierfür lassen sich die tendenziell hohe Gleichmäßigkeit der Spanformen ab dem Überschreiten des Einlaufbereichs der Werkzeuge nennen.

8.1.2. Untersuchung von teilbeschichteten/nachgeschliffenen Werkzeugen

Neben der bereits etablierten Schneidkantenverrundung an neuen Werkzeugen, steht auch die Schneidkantenpräparation an teilbeschichteten/nachgeschliffenen Werkzeugen im Fokus. Da es zum aktuellen Zeitpunkt kein etabliertes Verfahren gibt, mit dem eine Schneidkantenverrundung an nachgeschliffenen Zerspanungswerkzeugen möglich ist, besteht hier vertieftes Forschungspotential. Ursächlich hierfür sind die bereits in Kapitel 0 beschriebenen Anforderungen zur Präparation dieser Werkzeuge. Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte [Tool]Prep-Verfahren wurden daher ergänzende Untersuchungen durchgeführt, um eine Schneidkantenpräparation an nachgeschliffenen Werkzeugen zu ermöglichen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Kapitel 5.2.2 dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Einsatzversuche dieser nachgeschliffenen Werkzeuge vorgestellt und analysiert.

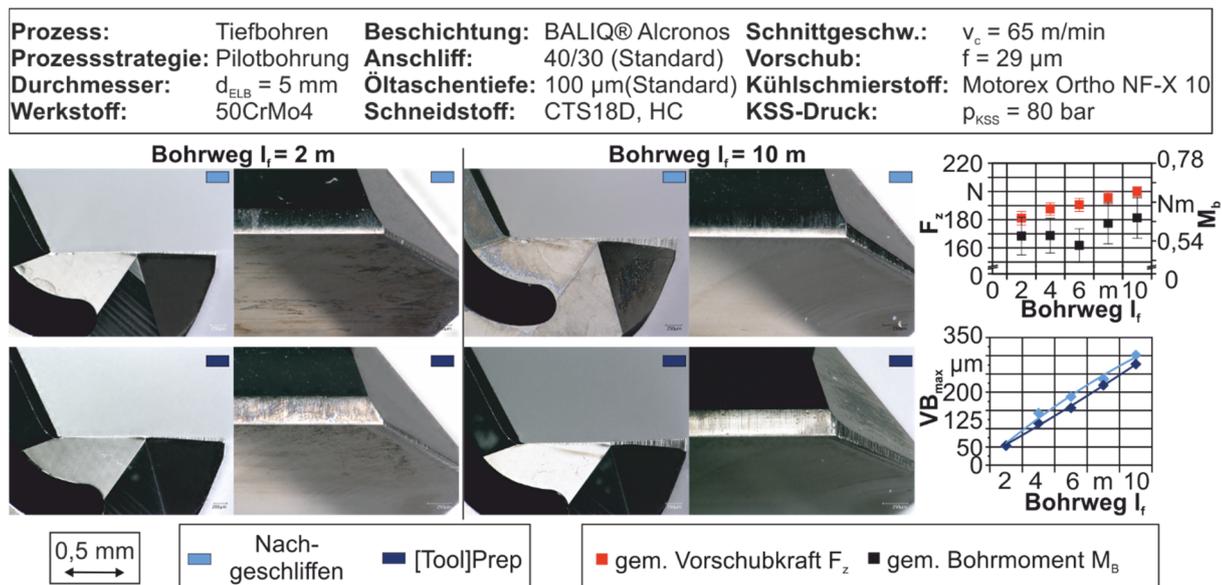


Abbildung 8.1.2.1: Verschleißverhalten nachgeschliffener Tiefbohrwerkzeuge

Die in Abbildung 8.1.2.1 dargestellte Verschleißentwicklung der nachgeschliffenen Werkzeuge zeigt den Einfluss der fehlenden Werkzeugbeschichtung an der nachgeschliffenen Stirnfläche. Bereits zu Standzeitbeginn lässt sich eine zur Schneidenecke hin vergrößernde Verschleißmarke feststellen. Ursächlich für diese im Vergleich zu den vollbeschichteten Werkzeugen deutlich erhöhte Verschleißentwicklung ist die fehlende Beständigkeit gegenüber den thermo-mechanischen Belastungen an der Schneidkante. Das verwendete Hartmetall verfügt in diesem Bereich über keine ausreichende Warmfestigkeit, die einen Verschleiß vermeiden würde. Hinzu kommt, dass es beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen zu einer verminderten Kühlmittelzufuhr an der Schneidenecke kommt. Dies wurde bereits von Schnabel et al. [163, 164] durch simulative Untersuchungen aufgezeigt. Aufgrund der geometrischen Gestalt des Werkzeuges konnte hierbei durch die Strömungssimulation des Kühlmittelvolumenstroms gezeigt werden, dass es im Bereich der Schneidenecke zu einer Unterversorgung kommt. Diese

Erkenntnis lässt sich bei den nachgeschliffenen Werkzeugen auch anhand der thermischen Belastungen nachvollziehen, da es am Auslauf der Verschleißmarkenbreite zu einer Verfärbung bzw. einem Anlaufen des Hartmetalls kommt, die Rückschlüsse auf eine thermische Überbelastung zulässt. Neben der Betrachtung des Verschleißverhaltens erfolgt auch eine Betrachtung der resultierenden mechanischen Belastungen. Hierbei zeigt sich ein zu den vollbeschichteten Werkzeugen vergleichbares Ergebnis, da sich auch bei den Kräften keine signifikanten Unterschiede feststellen lassen. Aufgrund der geringen Abweichung bei den mechanischen Werkzeugbelastungen sind in Abbildung 8.1.2.1 die gemittelten mechanischen Belastungen beider Varianten dargestellt. Die gewonnenen Messwerte zeigen, dass es aufgrund des Verschleißfortschritts und einem Abflachen der Schneidkante zu einem Anstieg der Vorschubkraft F_z sowie des Bohrmoments kommt. Der Abbruch der Versuche ist erforderlich, da der Verschleiß an der Schneidenecke die vorher festgelegte Verschleißmarkenbreite $VB_{max} = 200 \mu\text{m}$ überschreitet.

Zusätzlich zu den mechanischen Werkzeugbelastungen und dem Verschleißverhalten erfolgt eine Auswertung der Bohrungsgüten. Hierzu werden analog zu den Auswertungen der vollbeschichteten Werkzeuge der Mittenverlauf Δr , die Bohrungsrundheit T_k , der Bohrungsdurchmesser d sowie die erzeugte Oberflächengüte analysiert. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

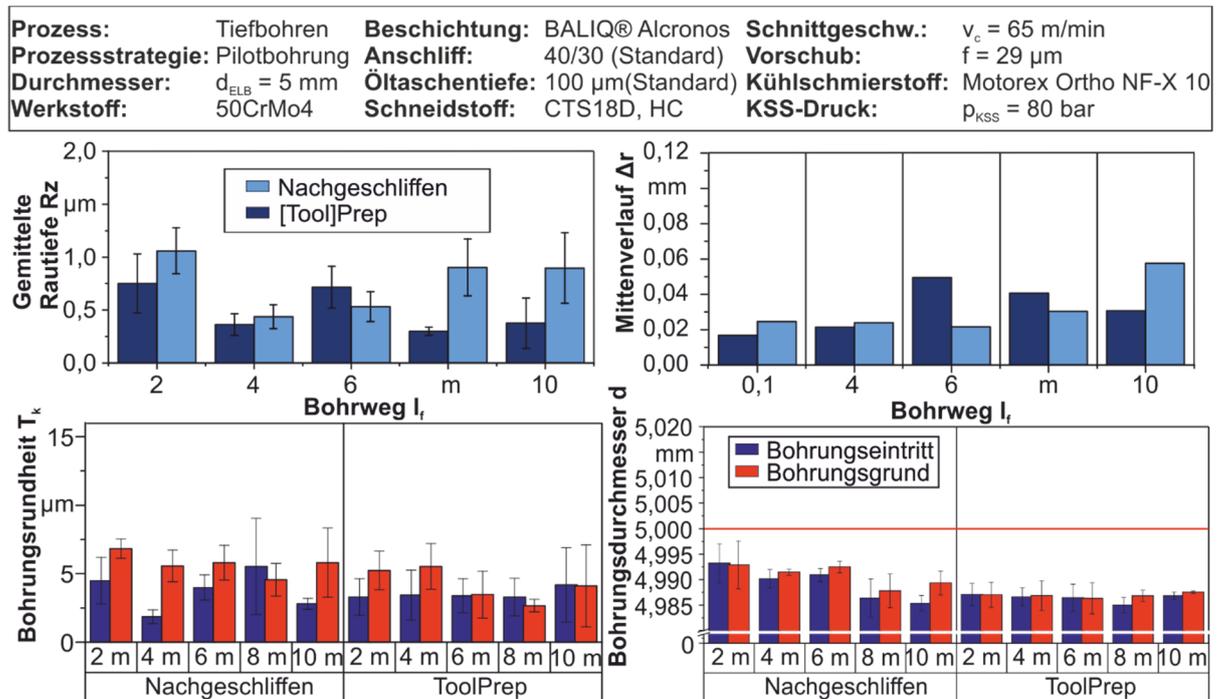


Abbildung 8.1.2.2: Beeinflussung der Bohrungsgüte nachgeschliffener, unterschiedlich präparierter Werkzeuge

Die Auswertung der Messergebnisse in Abbildung 8.1.2.2 zeigt, dass auch die nachgeschliffenen Werkzeuge eine hohe Bohrungsgüte erzeugen. Die Bohnungsrauigkeit liegt trotz des deutlich erhöhten Verschleißes an der Schneidenecke auf einem vergleichbaren Niveau der vollbeschichteten Werkzeuge. Lediglich bei dem nachgeschliffenen Werkzeug zeigt sich ein Trend zu einer Verschlechterung der Bohnungsrauigkeit über den absolvierten Bohrweg, die jedoch nicht durch Verschleiß der Führungsleisten oder der Schneidkante und Schneidenecke begründet werden kann. Auch beim Mittenverlauf weisen die nachgeschliffenen Werkzeuge vergleichbare Ergebnisse auf. Die Ergebnisse der Bohrungsrundheit T_k und des Bohrungsdurchmessers d zeigen eine hohe Qualität. Das geringe Maß der Abweichungen dieser Kennwerte führt dazu, dass die erzeugten Bohrungen in die ISO-Toleranzklasse IT 4 einzuordnen sind. Aufgrund des Nachschliffs ergeben sich kleinere Durchmesser, da die Werkzeuge durch

die Konizität nach dem Nachschleifen einen kleineren Durchmesser aufweisen. Bei den nachgeschliffenen Werkzeugen zeigt sich auch hier eine leicht abfallende Tendenz des Durchmessers. Auffällig ist, dass sich bei den durch das [Tool]Prep-Verfahren präparierten Werkzeugen nur eine sehr geringe Varianz einstellt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Werkzeuge beim [Tool]Prep mit einem Abrasivkörperdurchmesser $d_{Abr} = 5,4 \text{ mm}$ behandelt wurden. Dadurch resultiert, wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben, eine geringfügige Verrundung der Schneidenecke, bei der außerdem durch den Nachschliff resultierende Schichtdefekte abgetragen werden. Hierdurch ergibt sich ein deutlich verbessertes Einsatzverhalten und eine geringe Abweichung. Demgegenüber stellt sich bei den lediglich nachgeschliffenen Werkzeugen der Effekt der fehlenden Entfernung von Fehlstellen dar, die erst über den Bohrweg aufgrund des mechanischen und tribologischen Kontaktes abgetragen werden.

Zum Abschluss der Untersuchungen der nachgeschliffenen Werkzeuge erfolgt eine Auswertung der Spanbildung. Hierzu dient ein Vergleich der bereits oben beschriebenen Werkzeugvarianten in Abbildung 8.1.2.3.

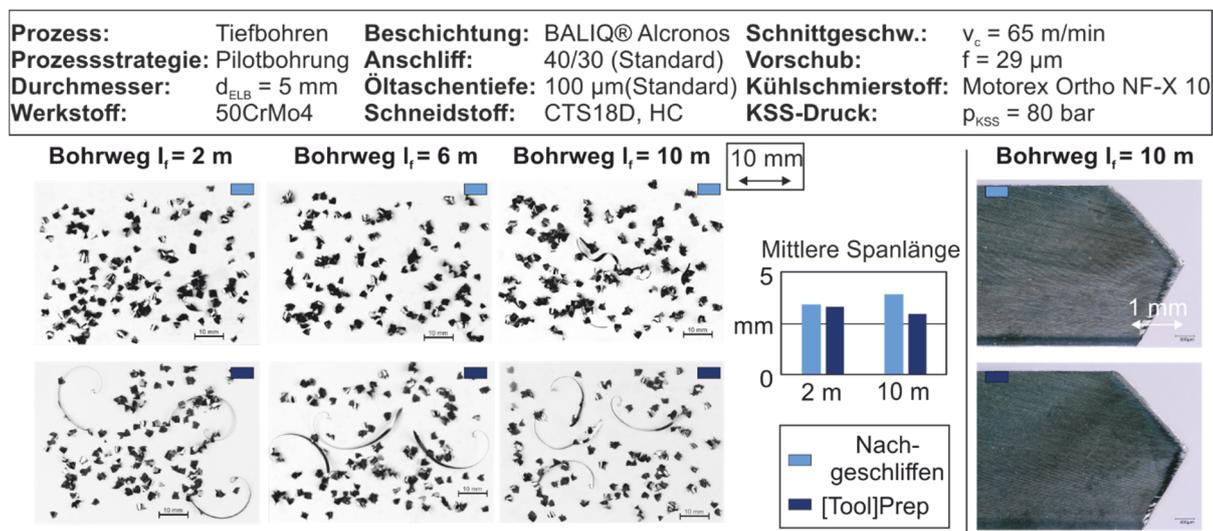


Abbildung 8.1.2.3: Spanbildungs- und Verschleißverhalten bei nachgeschliffenen Werkzeugen in unterschiedlichen Präparationszuständen

Die Untersuchung der Spanbildung über den Bohrweg in Abbildung 8.1.2.3 zeigt, dass sich kein negativer Einfluss durch den erhöhten Freiflächen- und Schneideneckenverschleiß feststellen lässt. Zu jedem Zeitpunkt können günstige Späne erzeugt und aus der Bohrung ausgespült werden. Dies wird zum einen durch die dargestellten Späne als auch die ausgewertete mittlere Spanlänge verdeutlicht. Die Verschleißentwicklung auf der Spanfläche ist als unkritisch zu bewerten. Ähnlich wie bei den Versuchen im vollbeschichteten Zustand lässt sich ein geringfügiger Abtrag auf der Spanfläche erkennen. Auffällig ist, dass es bei den nachgeschliffenen Werkzeugen zu keiner Aufbauschneidenbildung kommt. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Werkzeuge lediglich bis zu einem Standweg $l_f = 10 \text{ m}$ eingesetzt wurden.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die bei den nachgeschliffenen Einlippentiefbohrwerkzeugen festgestellte Verschleißentwicklung an der Außenschneide und Schneidenecke keinen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Bohrungsgüte hat. Bis auf das unterschiedliche Verschleißverhalten an der Freifläche erreichen die nachgeschliffenen Werkzeuge vergleichbare Ergebnisse wie die vollbeschichteten Werkzeuge. Lediglich hinsichtlich des Bohrungsdurchmessers als auch den mechanischen Belastungen lassen sich bei einer Steigerung des Bohrweges durch den Verschleiß und die thermomechanischen Belastungen bedingte Verschlechterung der Bohrungsgüte vermuten. Bei Gegenüberstellung der Verschleißmechanismen zeigt sich, dass die nachgeschliffenen Werkzeuge nicht das von den schlichscharfen Werkzeugen bekannte Ausbrechen der Innenschneide aufweisen. Dies lässt

sich durch die Beeinflussung der Schneidkantenmikrogestalt durch den Nachschleifprozess erklären. Liegen die Werkzeuge im schlichscharfen Zustand mit einer sehr geringen Schneidkantenverrundung vor, so ergeben sich durch den Nachschleifprozess Beeinflussungen der Schneidkante in Form von Ausbrüchen und erhöhten Schartigkeiten [113], die dadurch eine erhöhte, wenn auch ungleichmäßige, Schneidkantenverrundung hervorrufen, siehe 4.1.2, die zur Stabilisierung der Schneidkante beiträgt.

Aufbauend auf den dargestellten Ergebnissen ist festzuhalten, dass die Analyse der mechanischen Belastungen hinsichtlich des Einsatzverhalten nur geringe Unterschiede aufweist. Aus diesem Grund wird nach der umfangreichen Gegenüberstellung der dargestellten Versuche im Folgenden auf die Pilotbohrung verzichtet und die hauptsächlich im industriellen Umfeld zu findende Anbohrstrategie mit einer Bohrbuchse verwendet. Hintergrund dieser Maßnahme sind neben den geringen Unterschieden bei den mechanischen Belastungen sowie des Verschleißverhaltens an den Schneidkanten auch die verkürzten Prozesszeiten und die Steigerung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

8.2. Beeinflussung der erreichbaren Bohrungsgüte und des Führungsleistenverschleißes durch Variation der Umfangstopographie und -kontur sowie des Stirnfasenübergangs

Im Anschluss an die Betrachtung der Beeinflussung des Einsatzverhaltens durch die Gegenüberstellung von unterschiedlich schneidkantenpräparierten Werkzeugen erfolgt im folgenden Kapitel eine Analyse des Einflusses der Stirnfasen- und der Umfangsgestalt sowie eine Veränderung der Oberflächentopographie in unterschiedlichen Präparationszuständen. Wie bereits in Kapitel 8.1.1 dargestellt, hat sich bereits bei Werkzeugen mit einem Werkzeugdurchmesser von $d_{ELB} = 10$ mm gezeigt, dass es durch einen Verzicht auf die standardmäßig eingebrachte Stirnfase zu einer Beeinflussung der mechanischen Belastungen sowie der Bohrungsgüte kommt. Auf Basis dieser gewonnenen Ergebnisse und den bereits bekannten Untersuchungen aus dem BTA-Tiefbohren [2, 33, 57] erfolgen im Folgenden nur noch Betrachtungen von Werkzeugen, bei denen auf die standardmäßige Fase am Übergang zwischen Werkzeugstirn und Umfangsfläche verzichtet wird. Zuerst erfolgt eine Bewertung des Einflusses der Umfangskontur sowie der durch diesen Präparationsschritt erzeugten Oberflächentopographien in Bezug auf die erreichbaren Bohrungsgüten. Im Anschluss folgt eine Analyse der gezielten Beeinflussung des Stirnfasenübergangs. Hierbei geschieht eine Klassifizierung in geringfügig, mittelgroß und stark verrundete Stirnfasenübergänge, wie diese bereits in Kapitel 6.1 beschrieben sind.

8.2.1. Einsatzverhalten von topographie- und umfanggestaltoptimierten Einlippentiefbohrwerkzeugen bei der Bearbeitung von Vergütungsstählen

Die Möglichkeiten der gezielten Beeinflussung der Umfangsgestalt von Einlippentiefbohrwerkzeugen ist bereits in Kapitel 6.1 beschrieben und dargestellt. Das Ziel dieser Optimierungsmaßnahme ist die Verbesserung der erzeugbaren Bohrungsgüte und des Verschleißverhaltens der Führungsleisten. Erreicht werden soll dies durch eine verbesserte Kühlschmierstoffzuführung auf die mit der Bohrungswand in Kontakt stehende Führungsleiste. Mittels einer Veränderung des scharfkantigen Übergangs zwischen der Öltasche und der Führungsleiste, die sich prozessbedingt durch den Ablauf der Werkzeugherstellung bei Vollhartmetallwerkzeugen ergibt. Durch den scharfkantigen Übergang fungiert dieser Übergang als eine Art Abziehlippe, die den durch die Öltasche auf die Führungsleiste strömenden Fluidstrom reduziert und somit eine Unterversorgung der Kontaktzone zwischen Führungsleiste und Bohrungswand hervorrufen kann. Die Erläuterung dieses Phänomens ist exemplarisch in der folgenden

Abbildung 8.2.1.1 skizziert. Die schematische Abbildung zeigt, dass es durch den scharfkantigen Übergang zu einer Verringerung des Volumenstroms in die Kontaktzone kommt und somit das Einsatzverhalten negativ beeinflusst werden kann. Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, ergibt sich aufgrund des unterschiedlichen Belastungszustandes des Schleifscheibenbelages eine geänderte Beeinflussung des Ein- und Auslaufs der Führungsleiste.

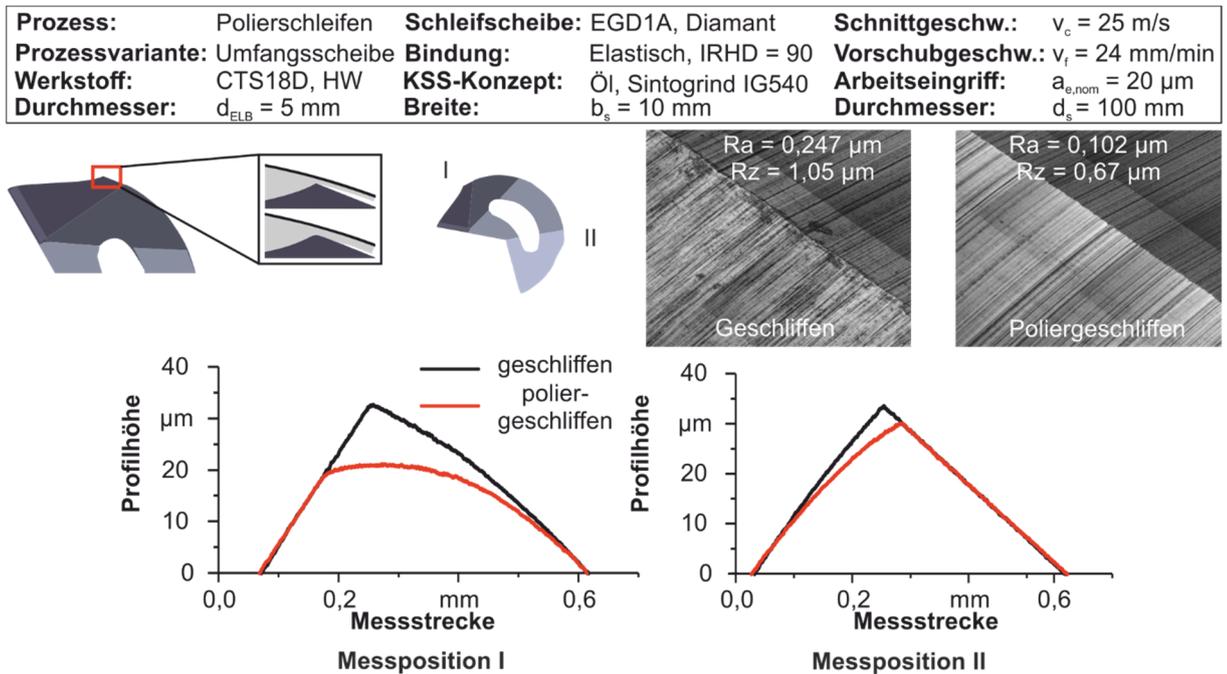
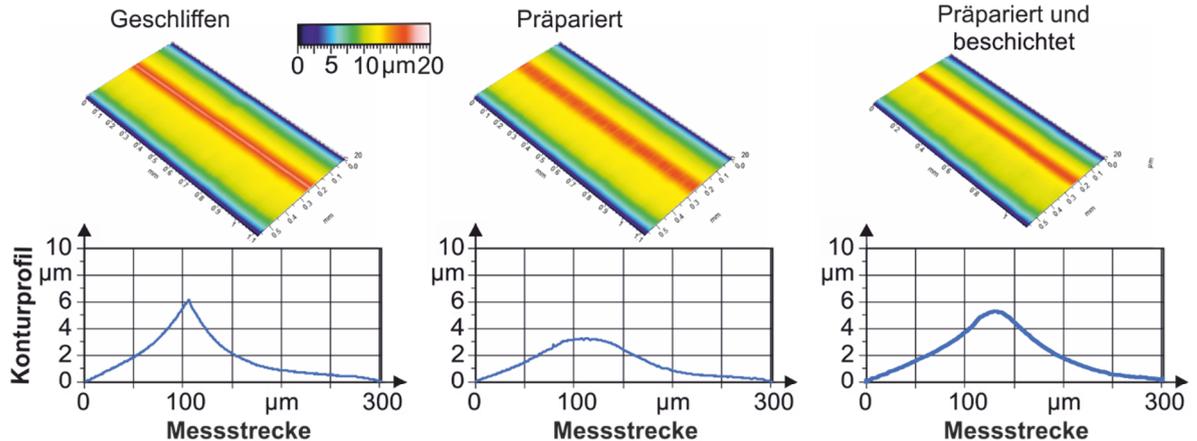


Abbildung 8.2.1.1: Beeinflussung der Umfangskontur und Oberflächentopographie durch lokales Polierschleifen

Im Folgenden sollen die so präparierten Werkzeuge bei Einsatzversuchen gegenübergestellt werden und die Auswirkungen auf die erzeugbaren Bohrungsgüten und das Verschleißverhalten analysiert werden. Bedingt durch das tendenziell vermehrt auftretende Verschleißaufkommen bei erhöhten Bohrwegen, kommen in den folgenden Untersuchungen schneidkantenpräparierte Werkzeuge zum Einsatz. Da die Untersuchungen in Kapitel 8.1.1 gezeigt haben, dass sowohl das Nassstrahlspanen als auch [Tool]Prep zur Einstellung der Schneidengestalt geeignet sind und keine signifikanten Unterschiede dieser Verfahren festzustellen sind, erfolgt im folgenden Kapitel keine Unterscheidung dieser beiden Verfahren. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Veränderung der Umfangskontur durch das abrasive Nassstrahlspanen, erfolgen für diese Werkzeuge keine Einsatzversuche.

In Abbildung 8.2.1.2 sind unterschiedlichen Präparationszustände der Werkzeuge dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es durch den Einsatz der elastisch gebundenen Polierschleifscheibe zu einer Beeinflussung der Topographie und des Übergangs zwischen Führungsleiste und Öltasche kommt. Bei der Betrachtung der dargestellten Konturprofile ist zu beachten, dass die Darstellung stark überhöht ist. Die aufgebrauchte Schichtdicke lässt sich durch eine Überhöhung des Profilschriebs erkennen. Bei unpräparierten Konturen kann es in diesen Bereichen bei ungünstigen Beschichtungsbedingungen und Beschichtungsauswahl zu Schichtabplatzungen kommen, die die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges herabsetzen.

Prozess:	Variert	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Variert	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	$a_{e,nom} = 15 \mu\text{m}$
Werkstoff:	CTS18D	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung:	Variert



Kennwerte	Geschliffen	Präpariert	Präpariert und beschichtet	Beschreibung
Sz	0,671 μm	0,670 μm	0,764 μm	maximale Höhe
Sa	0,0628 μm	0,0665 μm	0,0685 μm	Arithmetische Durchschnittshöhe
S10z	0,365 μm	0,447 μm	0,519 μm	Zehn-Punkt-Höhe

Abbildung 8.2.1.2: Beeinflussung der Umfangsgestalt in unterschiedlichen Präparationszuständen

Bedingt durch die genutzte Prozessvariante unter Einsatz der Umfangsscheibe ist eine Konturänderung der Umfangsgestalt und sowie Präparation der Oberflächentopographie bei gleichzeitiger Verrundung der Stirnfase nicht zu vermeiden. Aus diesem Grund lassen sich die folgenden Untersuchungen nicht eindeutig der Beeinflussung durch die geänderte Umfangsgestalt zu ordnen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich ähnlich wie bei den Werkzeugen mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 10 \text{ mm}$ eine geringe Beeinflussung der mechanischen Belastungen ergibt. So hat sich bei den Werkzeugen mit $d_{ELB} = 10 \text{ mm}$ gezeigt, dass die Vorschubkräfte F_z tendenziell sinken, wenn eine Stirnfasenverrundung anstelle der Fase verwendet wird. Demgegenüber konnte eine Erhöhung des Bohrmoments M_B festgestellt werden.

Prozess:	Tiefbohren	Beschichtung:	BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.:	$v_c = 65 \text{ m/min}$
Prozessstrategie:	Pilotbohrung	Anschliff:	40/30 (Standard)	Vorschub:	$f = 29 \mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Öltaشتentiefe:	100 μm (Standard)	Kühlschmierstoff:	Motorex Ortho NF-X 10
Werkstoff:	50CrMo4	Schneidstoff:	CTS18D, HC	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 80 \text{ bar}$

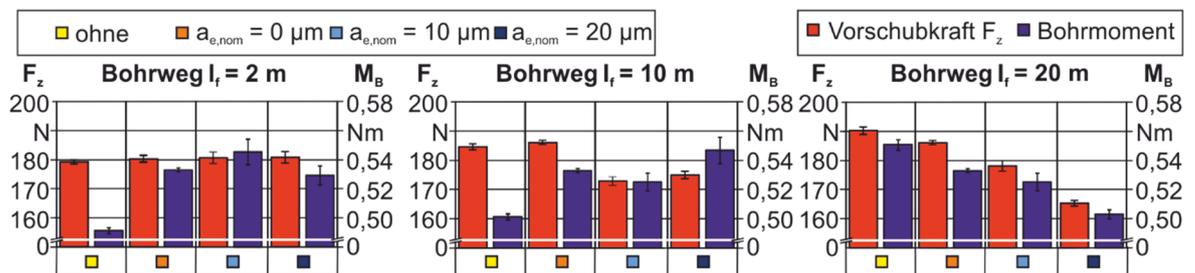


Abbildung 8.2.1.3: Einfluss der Umfangsgestalt auf die mechanischen Belastungen

Bei den Werkzeugen mit dem Durchmesser $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$ zeigt sich hingegen, dass das nicht hinsichtlich der Umfangsgestalt präparierte Werkzeuge nahezu identische Vorschubkräfte verursacht, wie die unterschiedlich präparierten Werkzeuge. Lediglich beim Bohrmoment zeigt sich, dass es durch die fehlende Umfangsbearbeitung zu geringeren mechanischen Belastungen bei Standzeit beginn kommt. Über den Bohrweg ändert sich bis zur Hälfte des vorher definierten Bohrweges das bestehende Verhältnis nicht. Lediglich zum Standzeitende zeigt sich, dass eine Präparation der Umfangsgestalt zu geringeren mechanischen Belastungen

führt. Wie bereits bei den Ergebnissen der Schneidkantenpräparation gezeigt wurde, sind die mechanischen Belastungen zu jedem Zeitpunkt als unkritisch zu bezeichnen. Daher erfolgt im Weiteren die Betrachtung der Beeinflussung der Bohrungsgüte in Bezug auf die Umfangskonturveränderung und die Beeinflussung der Oberflächentopographie und der damit verbundenen Einflüsse durch Verschleißerscheinungen.

Prozess:	Tiefbohren	Beschichtung:	BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.:	$v_c = 65 \text{ m/min}$
Prozessstrategie:	Bohrbuchse	Anschliff:	40/30 (Standard)	Vorschub:	$f = 29 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Öltaschentiefe:	Standard	Kühlschmierstoff:	Motorex Ortho NF-X
Werkstoff:	50CrMo4	Schneidstoff:	CTS18D, HC	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 80 \text{ bar}$

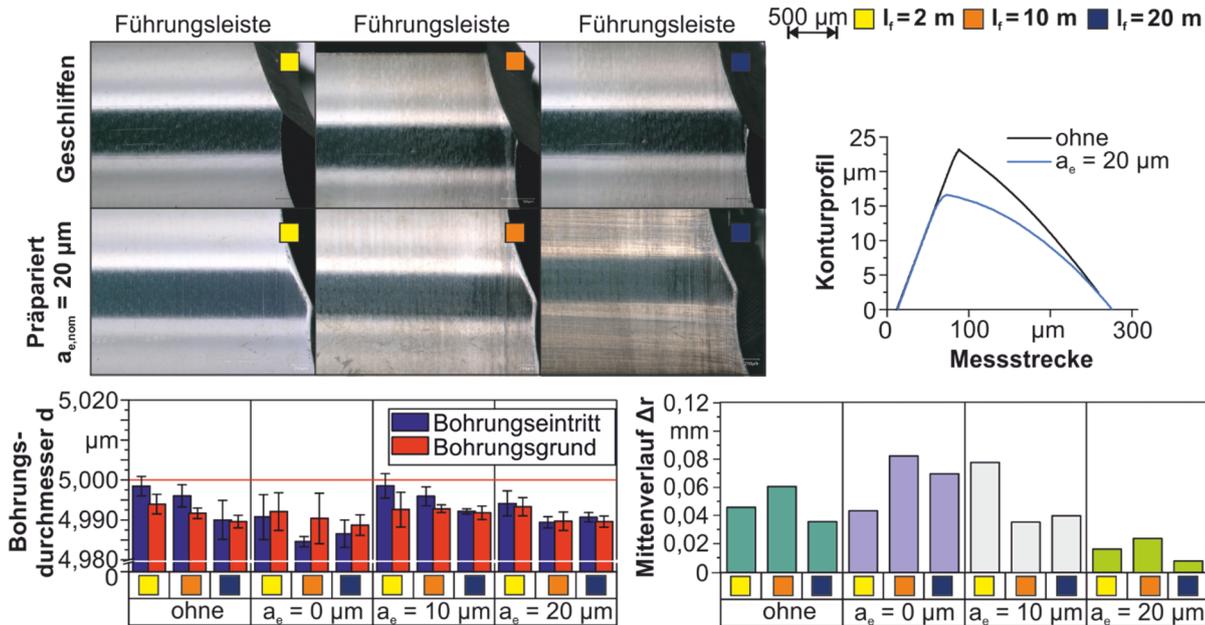


Abbildung 8.2.1.4: Einfluss der Umfangsgestalt auf die Bohrungsgüte und das Verschleißverhalten

Wie bereits erwähnt, geht die Beeinflussung der Umfangsgestalt zwangsläufig mit einer Beeinflussung der Stirnfasenverrundung einher. Daher sind die genauen Beeinflussungen unter Betrachtung der Umfangsgestalt nicht eindeutig zu unterscheiden. Bei der Analyse des Verschleißverhaltens lässt sich an den Führungsleisten kein ausgeprägtes Verschleißverhalten feststellen. Es sind lediglich durch den tribologischen Kontakt verursachte, optische Beeinflussungen der Führungsleistenoberfläche zu erkennen. Auch bei der Auswertung der erzeugbaren Bohrungsdurchmesser d zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Für alle eingesetzten Werkzeuge ergibt sich über den Standweg eine geringfügige Verringerung des Durchmessers, der auf den bereits in Kapitel 8.1.1 beschriebenen Schneideneckenverschleiß zurückzuführen ist. Die Qualität der Bohrungsgüte lässt sich wie bei den Ergebnissen der übrigen Werkzeuge beim Einsatz der Bohrbuchse in die ISO-Toleranzklasse IT4 einordnen. Die Auswertung des Mittenverlaufs Δr zeigt, dass auch dieser keiner Beeinflussung durch die Präparationsmaßnahmen unterliegt und die Messergebnisse in einem vergleichbaren Bereich liegen. Nur das mit dem größten Arbeitseingriff a_e präparierte Werkzeug weist bereits ab der ersten Bohrung einen sehr geringen Mittenverlauf Δr auf.

Zur Komplettierung der Untersuchungen des Einflusses der Oberflächentopographie und Umfangsgestalt, soll im Folgenden untersucht werden, welchen Einfluss die Oberflächentopographie der Führungsleiste auf die Bohrungsrauigkeit hat. Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung einer möglichen Korrelation zwischen der Führungsleistentopographie und der erreichbaren Bohrungsgüte. Hierzu werden die bereits vorgestellten Werkzeugvarianten hinsichtlich der Oberflächentopographie nach dem Beschichten dargestellt und der Zusammenhang zur erzeugten Bohrungsgüte ausgewertet.

Prozess:	Variiert	Schleifscheibe:	EGD1A, Diamant	Schnittgeschw.:	$v_c = 25 \text{ m/s}$
Prozessvariante:	Variiert	Bindung:	Elastisch, IRHD = 90	Vorschubgeschw.:	$v_f = 24 \text{ mm/min}$
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	KSS-Konzept:	Öl, SintoGrind IG 540	Arbeitseingriff:	Variiert
Werkstoff:	CTS18D	Breite:	$b_s = 10 \text{ mm}$	Beschichtung:	ALCRONOS®

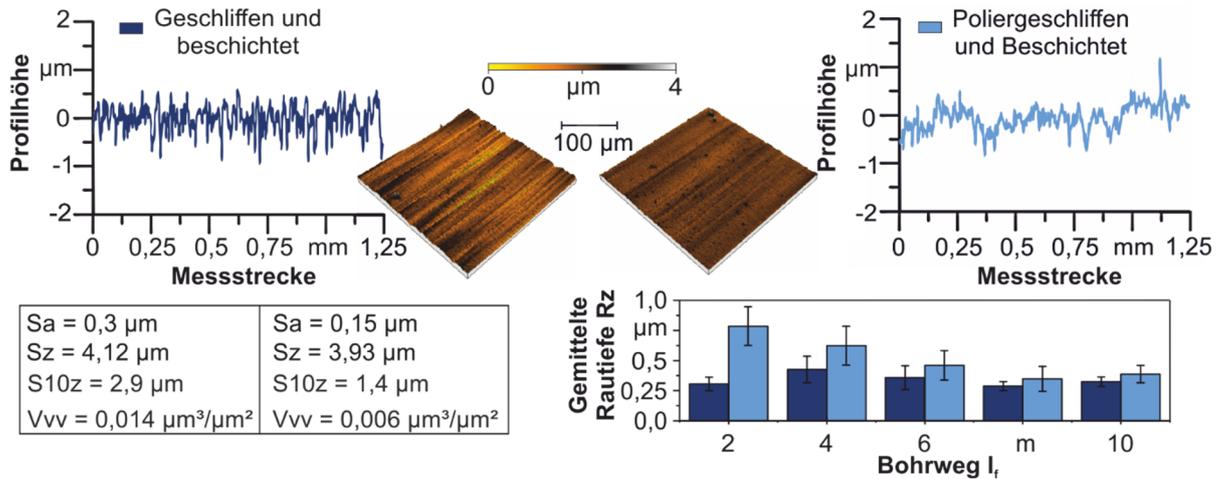


Abbildung 8.2.1.5: Einfluss der Führungsleistentopographie auf die Bohrungsrauigkeit

Die in Abbildung 8.2.1.5 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Schichtvorbehandlung keinen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Oberflächenrauigkeit der Bohrungen hat. Ursächlich hierfür ist das geringe Maß der Verbesserung der Oberflächentopographie und der dominierende Einfluss der Schichtinhomogenitäten durch die Werkzeugbeschichtung. Zusätzlich lassen sich wie bereits erwähnt die Einflüsse der Stirnfasenverrundung und der Änderung der Oberflächentopographie aufgrund der verwendeten Prozesskinematik nicht eindeutig voneinander trennen.

Die Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung der Umfangsgestalt und der Oberflächentopographie zeigen, dass die Einflüsse der Konturveränderung der Umfangsgestalt nicht eindeutig von den Einflüssen der Stirnübergangsverrundung getrennt werden können. Des Weiteren weisen die eingesetzten Werkzeuge bereits nach dem Werkzeugschleifen hohe Oberflächengüten auf der Führungsleiste auf, die durch den Präparationsprozess nicht grundlegend beeinflusst werden. Insgesamt lassen sich durch die eingesetzten Werkzeuge sehr gute Bohrungsgüten erzeugen. Zur genaueren Analyse der Beeinflussungen durch die Stirnfasenverrundung dienen die Ergebnisse im folgenden Kapitel 8.2.2.

8.2.2. Untersuchungen zum Einfluss einer gezielt veränderten Stirnübergangsgestalt auf das Einsatzverhalten sowie die Bohrungsgüte

Aufbauend auf den Untersuchungen des vorhergehenden Kapitels, erfolgt in diesem Kapitel die Analyse der gezielten Stirnübergangsgestaltbeeinflussung durch unterschiedliche Prozesskinematiken. Die Ansätze und Verfahren zur definierten Einstellung des Stirnfasenübergangs sind bereits in Kapitel 6.1 beschrieben. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Präparationsvarianten und der Ausprägung des Stirnfasenübergangs sollen im Folgenden die jeweiligen Einflüsse auf die erreichbare Bohrungsgüte, das Verschleißverhalten und exemplarisch die Bohrungsrundzonen betrachtet werden. Zu Beginn der Analyse erfolgt daher eine Darstellung und Analyse der Ergebnisse von zwei unterschiedlich an der Stirnfase verrundeten Werkzeugen, siehe Abbildung 8.2.2.1. Wie bereits bei den vorhergehenden Untersuchungen festgestellt, verbessert sich die Bohrungsgüte durch den Einsatz der Bohrbuchse. Um jedoch eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, handelt es sich bei diesen untersuchten Werkzeugen um unpräparierte schlifffscharfe Werkzeuge. Da diese Werkzeuge den aus Kapitel 8.1.1 bekannten Verschleiß an der Innenschneide ebenfalls nach einem Bohrweg $l_f = 10 \text{ m}$ aufweisen, werden auch bei diesen Werkzeugen zu diesem Zeitpunkt die Einsatzversuche abgebrochen.

116 8.2.2 Untersuchungen zum Einfluss einer gezielt veränderten Stirnübergangsgestalt auf das Einsatzverhalten sowie die Bohrungsgüte

In Bezug auf die erreichbaren Oberflächengüten der erzeugten Bohrungen zeigt sich, dass die stark verrundeten Stirnfasenübergänge zu einer tendenziell verbesserten Oberflächengüte führen. Dies lässt sich anhand der schematischen Darstellung in Abbildung 6.1.12 erklären. Aufgrund der stärkeren Verrundung kommt es zu geringeren Umformgraden in dem Material, welches sich vor der Stirnfase anstaut und somit sanfter durch den erzeugten Radius und die nachfolgende Führungsleiste eingeebnet wird. Bei Betrachtung des Mittenverlaufs zeigt sich, dass die stärker verrundeten Werkzeuge beim Einsatz mit Bohrbuchse eine verbesserte Selbstführung aufweisen und sehr geringe Mittenverläufe resultieren. Beim Werkzeug mit der geringeren Verrundung des Stirnfasenübergangs lassen sich vergleichbare Ergebnisse feststellen, wobei die Prozesssicherheit durch den Ausreißer bei einem Bohrweg $l_f = 6$ m als ungünstige einzustufen ist. Bei Auswertung der Bohrungsrundheit T_k und des Bohrungsdurchmessers d zeigt sich das Potential dieser Optimierungsmaßnahme. Sowohl die Bohrungsrundheit T_k als auch der Bohrungsdurchmesser d am Bohrungseintritt und am Bohrungsend weisen sehr gute Ergebnisse auf. Die Bohrungsgüte lässt sich bei den gering verrundeten Werkzeugen in die Toleranzklasse IT4 und bei den stark verrundeten Werkzeugen in die IT3 einordnen. Damit unterschreiten die hinsichtlich der Stirnfase optimierten Werkzeuge die nach dem Stand der Technik beschriebenen Toleranzklassen deutlich [193].

Prozess:	Tiefbohren	Beschichtung:	BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.:	$v_c = 65$ m/min
Prozessstrategie:	Bohrbuchse	Anschliff:	40/30 (Standard)	Vorschub:	$f = 29$ μ m
Durchmesser:	$d_{ELB} = 5$ mm	Öltschentiefe:	100 μ m (Standard)	Kühlschmierstoff:	Motorex Ortho NF-X 10
Werkstoff:	50CrMo4	Schneidstoff:	CTS18D, HC	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 80$ bar

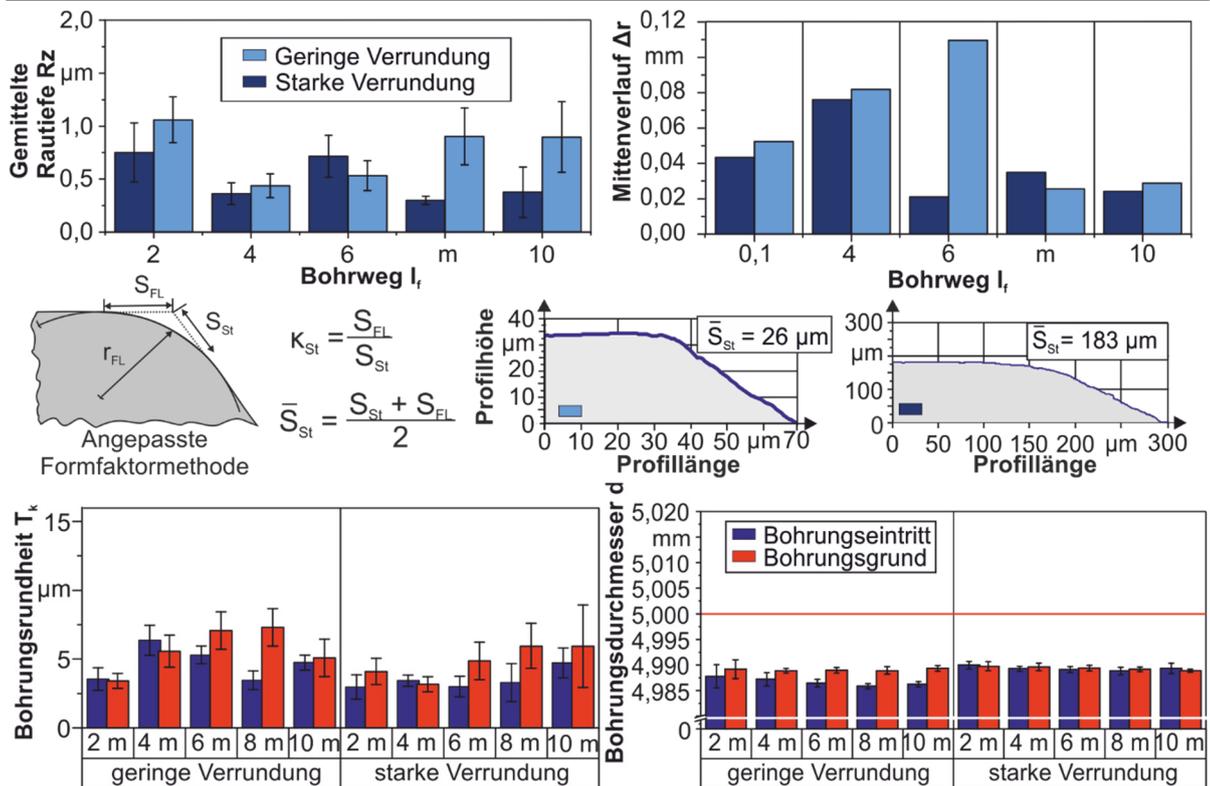


Abbildung 8.2.2.1: Beeinflussung der Bohrungsgüte in Abhängigkeit der Stirnfasenverrundung

Neben der Betrachtung der Bohrungsgüte erfolgt zusätzlich eine Gegenüberstellung des Verschleißverhaltens. Hierbei zeigt sich, dass sich die maximale Verschleißmarkenbreite an der Außenschneide nur geringfügig unterscheidet. Im Bereich der Führungsleiste lässt sich kaum Verschleiß feststellen, was die Hypothese unterstützt, dass die signifikante Beeinflussung der Bohrungsgüte durch die Verrundung der Stirnfase resultiert. Auffällig ist, dass es bei den Werkzeugen zu unterschiedlich ausgebildeten Tragbereichen auf der Führungsleiste kommt. Diese

lassen sich durch die Veränderung der Oberflächen erkennen. Beim Werkzeug mit der geringeren Verrundung lässt sich eine verstärkte optische Veränderung der Oberfläche erkennen. Dies spricht dafür, dass es in diesem Bereich zu einem erhöhten Energieeintrag aufgrund der verringerten Kontaktfläche gekommen ist und somit die optische Veränderung resultiert. Dieses Erkenntnis deckt sich mit Untersuchungen aus dem verwandten BTA-Tiefbohren [2, 57] und lässt sich auf Basis der beschriebenen Erkenntnisse auch bei Einlippentiefbohrwerkzeugen bestätigen.

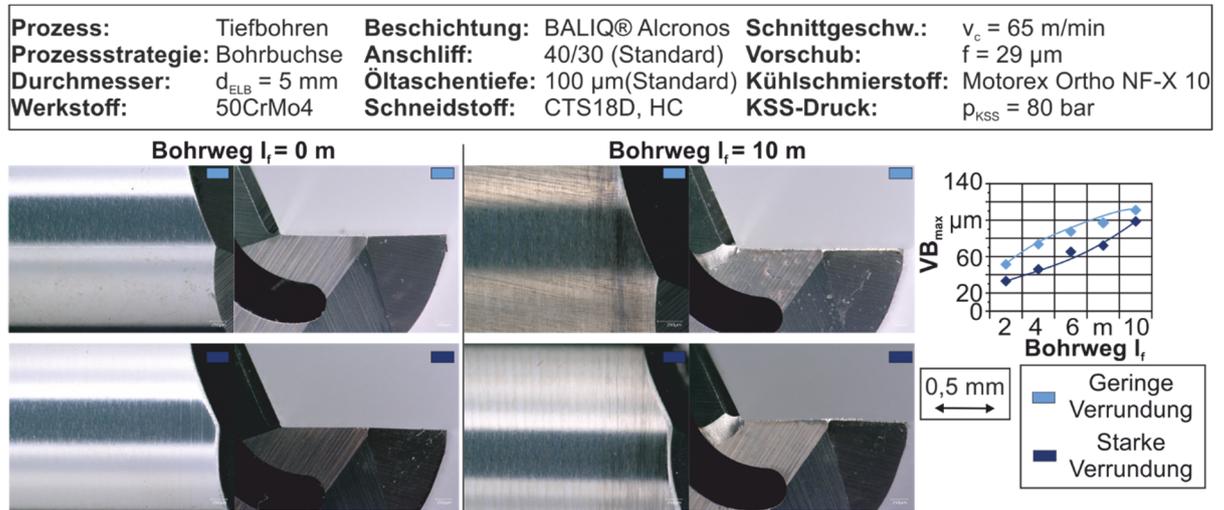


Abbildung 8.2.2.2: Gegenüberstellung unterschiedlich an der Stirnfase verrundeter Werkzeuge in Bezug auf das Verschleißverhalten

Um diese Aussage zu validieren, erfolgen Randzonenanalysen der erzeugten Bohrungen. Hierdurch soll bestimmt werden, in welcher Form eine Beeinflussung der Bohrungsrandszone durch eine Variation des Stirnübergangs resultiert. Um einen Verschleißeinfluss auf die erzeugte Bohrungsrandszone zu vermeiden, wird bei jedem der Versuche die erste Bohrung des Werkzeuges untersucht und ausgewertet. Somit wird sichergestellt, dass es zu einer vernachlässigbaren Beeinflussung durch einen Schneidkantenverschleiß kommt. Die Ergebnisse der Randzonenanalyse sind in der folgenden Abbildung 8.2.2.3 dargestellt.

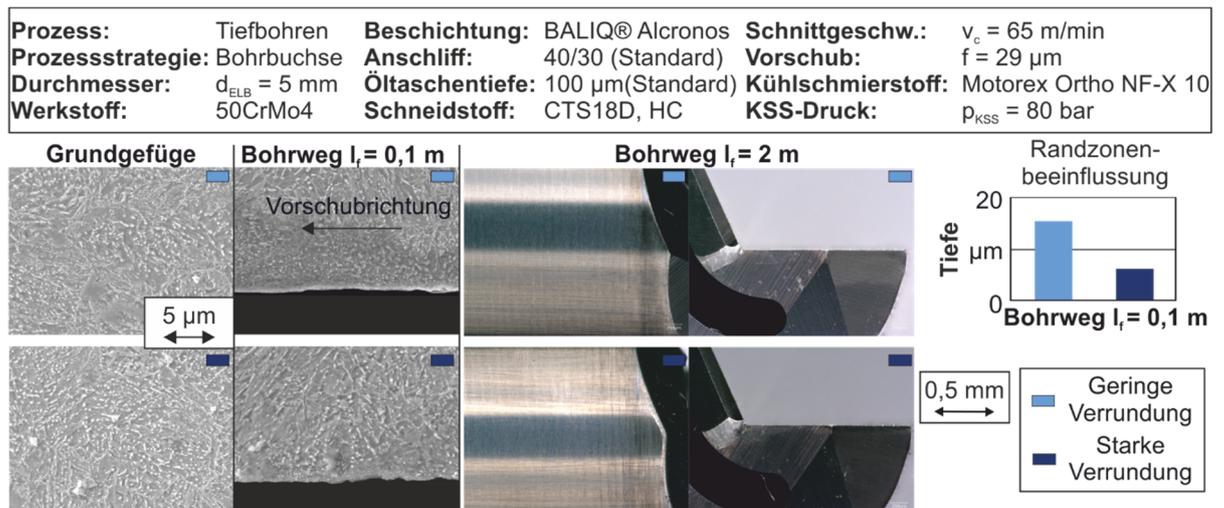


Abbildung 8.2.2.3: Darstellung der Bohrungsrandszonenbeeinflussung bei unterschiedlichen Stirnfasenverrundungen

Die dargestellten Querschnitte der Bohrungsrandszone und des Grundgefüges zeigen, dass es aufgrund der geringeren Stirnfasenverrundung zu einer erhöhten Beeinflussung der Bohrungsrandszone kommt. So lässt sich eine Beeinflussung der Bohrungsrandszone bis zu einer Tiefe von $t_{\text{BRZ}} = 14,8$ μm feststellen. Neben der vermehrten Beeinflussung der Bohrungsrandszone

sind auch Gefügeveränderungen zu erkennen. Hierbei wird das im Grundgefüge dargestellte Vergütungsgefüge mit geringen bainitischen Anteilen durch die mechanischen und thermischen Belastungen verändert. Im Bereich der Bohrungsrandzonen lässt sich eine geringe Neuhärtungszone durch die ausgebildete weiße Schicht erkennen. Unter dieser weißen Schicht ist das veränderte, feinkörnige Gefüge sichtbar, welches durch die thermomechanischen Belastungen zu einem feinkörnigen Gefüge mit Martensitanteil ausgebildet wird. Im Vergleich zum im Bild ersichtlichen helleren Grundgefüge lässt sich auch die für weiße Schichten typische Anlasszone erkennen, wobei zu erwähnen ist, dass dies im Rahmen dieser Arbeit nicht eindeutig zu belegen ist. Im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus den Ergebnissen des Werkzeugs mit geringer Stirnfasenverrundung zeigt sich bei den Werkzeugen mit starker Stirnfasenverrundung, dass es nur zu einer sehr geringen Beeinflussung der Bohrungsrandzone kommt. Das Grundgefüge wird lediglich wenige Mikrometer verändert, wodurch die These unterstützt wird, dass es durch die Verrundung des Stirnfasenübergangs zu einer weniger ausgeprägten Materialverformung kommt und weniger Energie die Bohrungsrandzone beeinflusst. Dass diese Beeinflussungen nicht durch den Verschleiß resultieren, zeigen die lichtmikroskopischen Verschleißaufnahmen der eingesetzten Werkzeuge.

Neben den Untersuchungen zur Verschleißentwicklung und der Beeinflussung der Bohrungsrandzone bei unterschiedlichen Stirnfasenverrundungen fand ergänzend die Analyse der erzeugten Bohrungsgüten durch die präparierten Werkzeuge statt. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 8.2.2.4 dargestellt. Da es sich auch bei diesen Werkzeugen um schlicfscharfe Werkzeuge handelte, erfolgte ein Einsatz bis zu einem Bohrweg $l_f = 10$ m. Die Auswertung der Oberflächengüte der erzeugten Bohrungen zeigt, dass das Werkzeug ohne Stirnfasenverrundung zu Beginn die höchste Oberflächengüte erzeugt. Als Begründung hierfür lässt sich die starke Verformung der gebohrten Oberfläche benennen, da es durch die fehlende Verrundung zu einer höheren plastischen Verformung kommt und die Einebnung der Bohrungswand verstärkt wird. Dies lässt sich durch die in der vorherigen Abbildung 8.2.2.3 dargestellten Bohrungsrandzonen vermuten, da die Beeinflussung der Bohrungsrandzone mit geringeren Stirnfasenverrundungen stärker ausgeprägt ist. Somit ist bei fehlender Stirnfase die Beeinflussung maximal.

Die hohe Belastung der Stirnfase zeigt sich auch im Verschleißverhalten, da das Werkzeug ohne Stirnfasenpräparation als einziges Werkzeug einen nennenswerten Verschleiß an der Umfangsfläche aufweist. Dieser Verschleiß lässt sich durch die erhöhten mechanischen und thermischen Belastungen begründen, die auf die kleine Kontaktfläche wirken und somit einen Verschleiß verursachen. Beim vorher definierten Standwegende von $l_f = 20$ m lässt sich in diesem Fall auch ein Rückschluss des Führungsleistenverschleißes auf die Oberflächengüte der Bohrung ziehen, da es über den gebohrten Standweg l_f zu einer Verschlechterung der Bohrungsgüte kommt, die auf den Führungsleistenverschleiß zurück zu führen ist. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich bei der Auswertung des radialen Mittenverlaufs Δr , da dieser mit steigendem Verschleißeinfluss höher ausfällt. Demgegenüber ist beim Bohrungsdurchmesser eine geringfügige Verringerung aufgrund der Verschleißentwicklung festzustellen. Hinsichtlich der Oberflächengüte zeigt sich beim gering verrundeten Werkzeug, dass die Oberflächengüten zu Standzeitbeginn geringer sind, als ohne Stirnfasenverrundung. Auch hier lässt sich als Erklärung die Randzonenanalyse der Abbildung 8.2.2.3 heranziehen. Die gemittelte Rautiefe R_z ändert sich über den gesamten Bohrweg nur geringfügig. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse der maximalen Rautiefe R_{max} , dass es bei diesem Werkzeug zu hohen Prozessschwankungen durch Ausreißer bei den Messungen der Oberflächengüte kommt. Diese sind beim Werkzeug ohne Stirnfasenverrundung bei Standzeitbeginn nicht feststellbar, was für eine homogene Einebnung der erzeugten Bohrungswand spricht. Erst zum Standzeitende erhöht sich

die Standardabweichung der ohne Stirnverrundung ausgeführten Werkzeuge, was abermals durch den Verschleiß der Führungsleiste begründet werden kann.

Der Mittenverlauf Δr des gering verrundeten Werkzeuges ist im Vergleich zu den beiden anderen Varianten am niedrigsten ausgeprägt. Auch bei der Auswertung des Bohrungsdurchmessers d ist nur eine geringfügige Abweichung festzustellen. Als vorteilhaft lässt sich das Einsatzverhalten des stark verrundeten Werkzeuges beschreiben. Zwar ist die Oberflächengüte bei Standzeitbeginn gegenüber den anderen Werkzeugen leicht erhöht, allerdings erreicht das Werkzeug mit steigendem Standweg die besten Oberflächengüten bei einer nur geringfügigen Beeinträchtigung der Bohrungsrandzone, siehe Abbildung 8.2.2.3. Als positiv lassen sich sowohl die geringe Varianz bei der Oberflächengüte als auch beim radialen Mittenverlauf Δr und des Bohrungsdurchmessers d nennen.

Prozess: Tiefbohren	Beschichtung: BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.: $v_c = 65$ m/min
Prozessstrategie: Bohrbuchse	Anschliff: 40/30 (Standard)	Vorschub: $f = 29$ μ m
Durchmesser: $d_{ELB} = 5$ mm	Öltaschentiefe: 100 μ m (Standard)	Kühlschmierstoff: Motorex Ortho NF-X 10
Werkstoff: 50CrMo4	Schneidstoff: CTS18D, HC	KSS-Druck: $p_{KSS} = 80$ bar

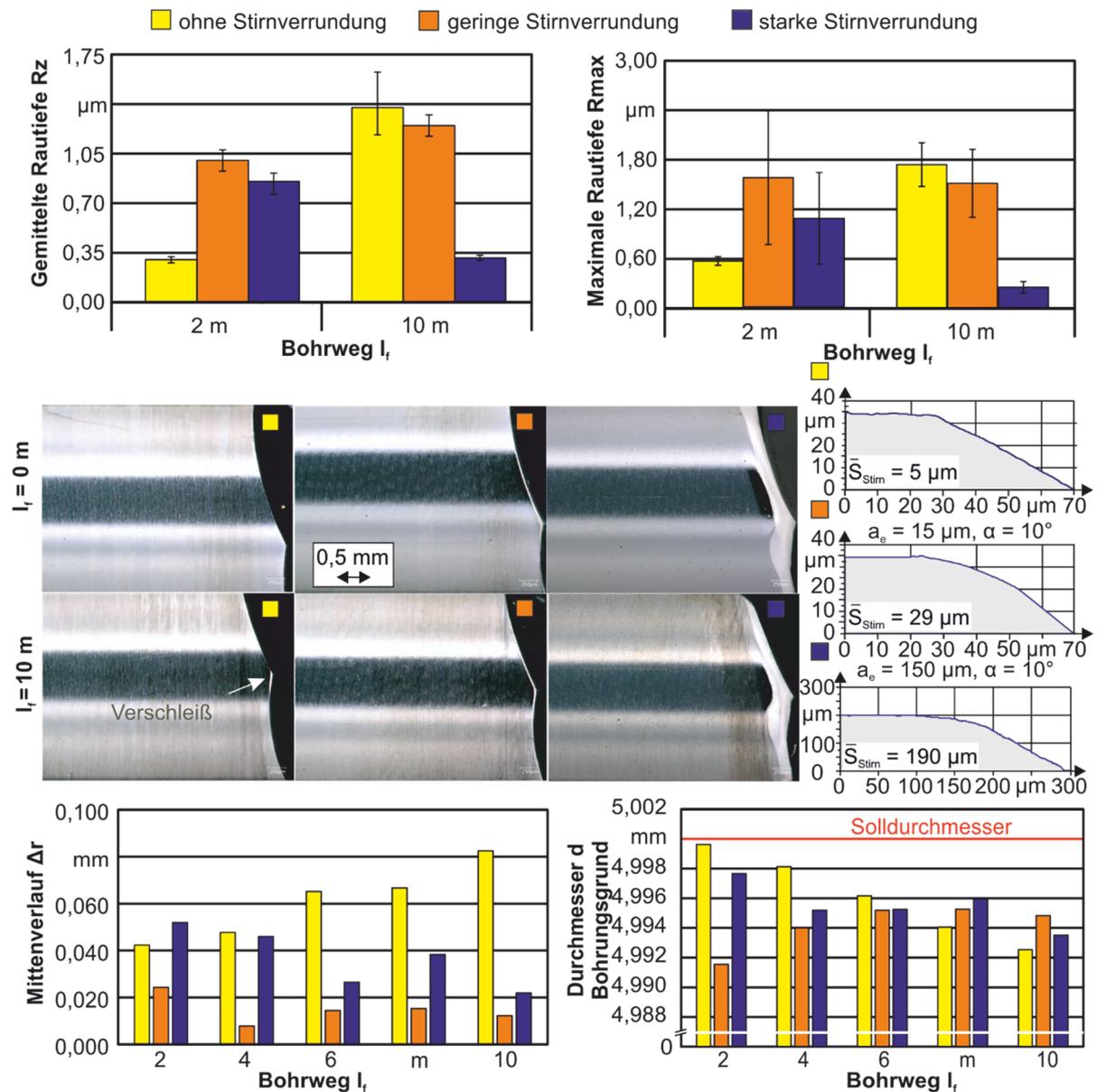


Abbildung 8.2.2.4: Beeinflussung der Bohrungsgüte in Abhängigkeit der Stirnfasenverrundung

8.2.3. Zwischenfazit zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung

Insgesamt lässt sich bei der Verwendung der optimierten Werkzeuge feststellen, dass alle Werkzeuge eine hohe Fertigungsqualität herstellen und nur geringe Unterschiede auftreten. Alle eingesetzten Werkzeuge unterliegen gewissen Schwankungen, die sich in Abweichungen der Messergebnisse wiederfinden lassen. Diese Aussage lässt sich zumindest bei reiner Betrachtung der Bohrungsgüte feststellen. Bei detaillierter Betrachtung der Bohrungsrandzone zeigen sich hingegen Unterschiede, die eine Bevorzugung von bestimmten Optimierungsmaßnahmen zulassen. Im Vergleich zu den an der Umfangsform präparierten Werkzeugen zeigt sich durch eine gezielte Beeinflussung der Stirnfasenverrundung, dass es durch die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen möglich ist, eine Erhöhung der Prozesssicherheit und der Bohrungsgüte zu erreichen. Die Untersuchungen zur Beeinflussung der Oberflächentopographie und der Umfangsgestalt weisen keine signifikanten Zusammenhänge und Wechselwirkungen in Bezug auf die erreichbare Bohrungsgüte auf. Demgegenüber sind bei den unterschiedlichen Varianten der Stirnfasenverrundung deutliche Unterschiede festzustellen, die die Leistungsfähigkeit der Einlippentiefbohrwerkzeuge erhöhen. Aufgrund des geringen Einflusses der Umfangsgestaltoptimierung lässt sich ableiten, dass es für die Optimierung von Tiefbohrwerkzeugen zielführend ist, eine Veränderung des Stirnfasenübergangs durchzuführen. Eine verstärkte Verrundung des Übergangs führt zu einer weniger ausgeprägten Materialumformung der Bohrungsrandzone, siehe Abbildung 8.2.2.3. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich durch eine primäre Beeinflussung der Umfangsgestalt nicht feststellen, weshalb die Stirnfasenverrundung in weiteren Standzeitversuchen detaillierter betrachtet werden soll.

8.3. Standzeitevaluierung topographie- und umfangsgestaltoptimierten Einlippentiefbohrwerkzeuge bei der Bearbeitung von Vergütungsstählen

Im Folgenden wird der Fokus auf Tiefbohrwerkzeuge mit einem Werkzeugdurchmesser $d_{ELB} = 3 \text{ mm}$ gelegt. Diese Werkzeuge wurden bereits zum Teil in Kapitel 7.1 vorgestellt und die Präparationsergebnisse aufgezeigt. Im Folgenden wird sich auf das Einsatzverhalten dieser Werkzeuge beschränkt, um eine Aussage der Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Standzeitvermögens geben zu können. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen werden alle Optimierungsmaßnahmen, die in den vorherigen Kapiteln beschrieben sind, auf ein Werkzeug übertragen. Diese Optimierungsmaßnahmen umfassen, dass die Schneidkantenpräparation dieser Werkzeuge mit dem [Tool]Prep-Verfahren erfolgt. Hierbei werden Abrasivkörper mit einem Durchmesser $d_{ELB} = 3 \text{ mm}$ verwendet, um die aus den vorherigen Untersuchungen bekannte vermehrte Verrundung der Schneidenecke zu vermeiden. Zur Beeinflussung der Oberflächentopographie sowohl vor als auch nach der Beschichtung kommt das Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen zum Einsatz. Hintergrund dieser Maßnahmen sind die Erkenntnisse aus der Beeinflussung der Bohrungsgüte durch die erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Stirnfasenverrundung, aber auch die Erkenntnisse zur Entfernung möglicher Schichtinhomogenitäten und der Verbesserung der Schichthaftung. Das standzeitbegrenzende Kriterium der folgenden Untersuchungen wird auf einen maximalen Bohrweg $l_f = 68 \text{ m}$ festgelegt. Aufgrund des verkleinerten Durchmessers ist es notwendig, dass der Kühlmitteldruck auf $p_{KSS} = 130 \text{ bar}$ erhöht wird. Somit wird sichergestellt, dass die Späne aus der Bohrung ausgespült werden. Der Vorschub der eingesetzten Werkzeuge bleibt unverändert, jedoch resultiert durch die Veränderung des Durchmessers dementsprechend eine Änderung der Drehzahl, die sich auf die Vorschubgeschwindigkeit auswirkt. Zu Beginn der Versuche erfolgte eine Gegenüberstellung von jeweils zwei gleichartig präparierten Werkzeugen. Hintergrund dieser Maßnahme ist die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit über einen bedeutend höheren Standweg, als dieser in den bisher dargestellten Untersuchungen eingesetzt wurde.

Die folgende Abbildung zeigt die eingesetzten Werkzeuge der Untersuchung zur Reproduzierbarkeit. Die beiden Werkzeuge wurden an den Schneidkanten und der Stirnübergangsfase präpariert, da diese Präparationen den meisten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Werkzeuge gezeigt haben. Die Präparation des Stirnfasenübergangs erfolgte bei diesen Werkzeugen auf eine mittlere Verrundung mit einem $\bar{s}_{\text{Stirn}} = 35 \mu\text{m}$. Aufgrund der Stirnfasenpräparation reduziert sich die beeinflusste Fläche der Führungsleiste. Hier konnte jedoch auch an den bisher durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass eine Präparation der Führungsleiste über wenige Millimeter ausreicht, da lediglich dieser Bereich für die Einebnung der Bohrungswand erforderlich ist. Auch eine Schichtnachbehandlung fand statt, um alle Optimierungsmaßnahmen abzudecken.

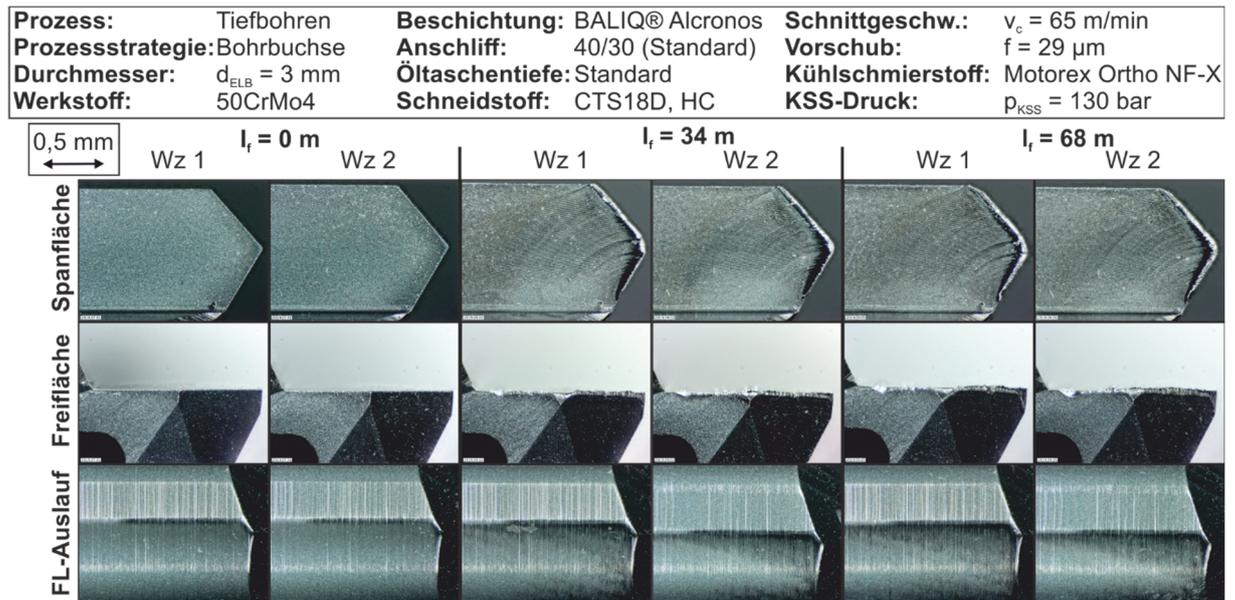


Abbildung 8.3.1: Untersuchung der Reproduzierbarkeit über den Bohrweg

Die in Abbildung 8.3.1 dargestellten Aufnahmen der eingesetzten Werkzeuge über den gesamten Bohrweg $l_f = 68 \text{ m}$ zeigen, dass eine sehr hohe Reproduzierbarkeit gegeben ist. Bereits im Neuzustand lassen sich die präparierten Bereiche gut erkennen. Nach einem Bohrweg $l_f = 34 \text{ m}$ hat sich Verschleiß an den beiden Schneiden und der Schneidenecke entwickelt, der jedoch innerhalb der gegebenen Verschleißgrenzen liegt. Auffällig ist, dass der Schneideneckenverschleiß relativ gering ausfällt. Dies lässt sich durch die Vermeidung der Schneideneckenverrundung aufgrund der Anpassung des Abrasivkörpers beim [Tool]Prep-Verfahren begründen. Wie bereits bei den Untersuchungen der Werkzeuge $d_{\text{ELB}} = 5 \text{ mm}$ dargestellt, erhöht sich der Tragbereich der Führungsleiste durch die Stirnfasenverrundung. Dieser Effekt lässt sich ebenso bei den hier dargestellten Werkzeugen feststellen. Sogar zum vorher definierten Standzeitende, weisen die Werkzeuge keinen als Ausschlusskriterium festzumachenden Verschleiß auf, sodass ein weiterer Einsatz denkbar ist. Auch kann durch diese Gegenüberstellung festgestellt werden, dass der Führungsleistenverschleiß unkritisch ist. Aufgrund der vermehrten Belastungen im Bereich des Führungsleistenauslaufs [21, 136] ist dieser in Abbildung 8.3.1 berücksichtigt worden. Über den Bohrweg lässt sich die Vergrößerung des Tragbereichs erkennen, der für die Einebnung der Bohrungswand verantwortlich ist. Sonstige Verschleißerscheinungen, wie beispielsweise Schichtabplatzungen und anderer Verschleiß sind nicht vorhanden.

Nach der erfolgreichen Überprüfung der nahezu kompletten Optimierungsmaßnahmen erfolgt eine Gegenüberstellung der einzelnen Prozessschritte. Ziel dieser Untersuchungen ist, eine Aussage darüber treffen zu können, welche Maßnahmen welchen Einfluss auf das Verschleiß-

verhalten und die erreichbare Bohrungsgüte haben. Dieser Schritt bei deutlich erhöhten Standwegen ist notwendig, da die Untersuchungen der Einlippentiefbohrwerkzeuge mit einem Werkzeugdurchmesser $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$ bei den reduzierten Standwegen noch keine eindeutigen Einflüsse feststellen ließen. Die Ergebnisse des Verschleißverhaltens dieser unterschiedlich präparierten Werkzeuge sind in der folgenden Abbildung 8.3.2 dargestellt.

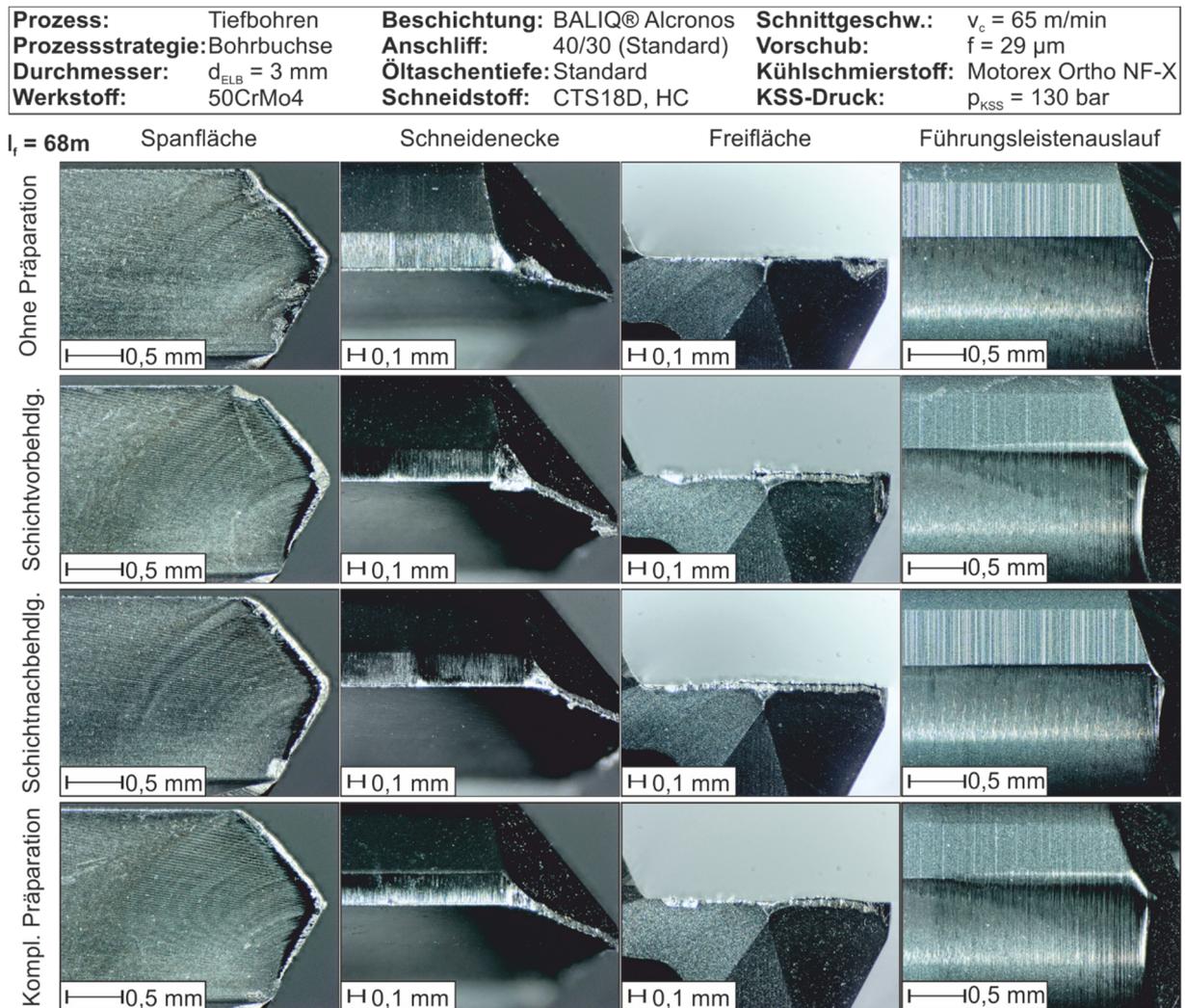


Abbildung 8.3.2: Einfluss der jeweiligen Optimierungsmaßnahmen auf das Verschleißverhalten

Bedingt durch die vorhergehenden Untersuchungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit lassen sich die in Abbildung 8.3.2 dargestellten Ergebnisse als allgemeingültig bezeichnen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der komplett präparierten Werkzeuge in Abbildung 8.3.1 zeigt sich, dass es teilweise zu deutlich größeren Verschleißerscheinungen kommt. Hierbei lässt sich eine Systematik erkennen. So zeigen insbesondere die Werkzeuge ohne eine abschließende Schichtnachbehandlung einen vermehrten Verschleiß der Schneidenecke auf. Da dieser Effekt sowohl bei Werkzeugen mit als auch ohne eine Stirnfasenverrundung auftritt, kann dieser Optimierungsschritt ausgeschlossen werden. Auch die Beeinflussung der Umfangsgestalt kann ausgeschlossen werden, da es beim schichtnachbehandelten Werkzeug nicht zu solchen Effekten kommt. Der somit zu schlussfolgernde Einfluss der Schichtnachbehandlung als Optimierungsmaßnahme ist für die Erklärung der Verschleißmechanismen an der Schneidenecke auszuschließen, da sich kein plausibler Erklärungsansatz finden für den Zusammenhang zwischen der Schichtnachbehandlung und dem Schneideneckenverschleiß bestimmen lässt. Erläutern lässt sich dies dadurch, dass die Schichtnachbehandlung nur einen geringfügigen Einfluss auf die Führungsleistentopographie hat. Da die beschriebenen Unterschiede

jedoch erst bei einem deutlich erhöhten Standweg auftreten, sind diese Einflüsse bereits nivelliert und die Oberflächentopographie der Führungsleiste hat keinen Einfluss auf die mechanischen Belastungen an der Schneide. Daher lässt sich keine abschließende Erklärung dieses Phänomens nicht ableiten, die die feststellbare Verschleißentwicklung in Form der Schneidenausbrüche erklärt.

In Bezug auf den Verschleiß der Führungsleisten lässt sich bei der Gegenüberstellung erkennen, dass durch die Stirnverrundung und die Führungsleistenpräparation der Traganteil der Führungsleiste deutlich vergrößert wird. Durch die Verteilung der notwendigen Umformarbeit auf eine größere Kontaktfläche ergeben sich hierdurch auch verringerte Belastungen der Bohrungsrandszone und es lassen sich Neuhärtungszonen vermeiden. Dies konnte bereits in Kapitel 8.2.2 gezeigt und dargestellt werden und lässt sich somit auch auf diese Werkzeuge übertragen. Bei Betrachtung der nicht vorbehandelten Werkzeuge zeigt sich, dass es beim Stirnübergang zu geringfügigen Verschleißerscheinungen kommt, die sich negativ auf die erzeugbare Bohrungsgüte auswirken können. Die Analyse der erzeugbaren Oberflächengüte sowie der Verschleißmarkenbreiten VB der unterschiedlich präparierten Werkzeugvarianten erfolgt in Abbildung 8.3.3.

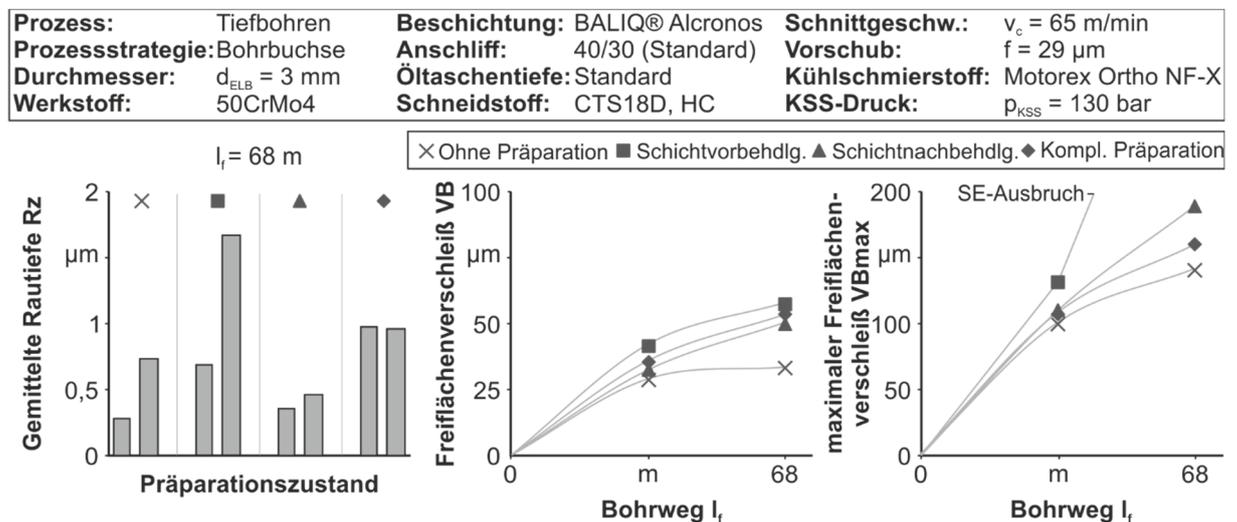


Abbildung 8.3.3: Einfluss des Präparationszustandes auf die erzeugbare Bohrungsrauigkeit sowie die Verschleißmarkenbreite

Die Auswertung der Bohrungsrauigkeit zeigt, dass durch die verschiedenen Werkzeuge hohe Oberflächengüten möglich sind. Sogar zum Standzeitende liegen die Messergebnisse in einem sehr guten Bereich. Die geringste Oberflächenrauigkeit ist durch die Verwendung der Werkzeuge mit abschließender Schichtnachbehandlung möglich. Da bei diesen Werkzeugen keine Stirnübergangsvrundung erzeugt wurde, ist abzuleiten, dass diese Ergebnisse mit denen der Werkzeuge mit dem Durchmesser $d_{\text{ELB}} = 5 \text{ mm}$ vergleichbar sind. Bei diesen Werkzeugen konnte eine vermehrte Beeinflussung der Bohrungsrandszone festgestellt werden, die sich durch die geringe Kontaktfläche und massivere Verformung des Materials am Stirnfasenübergang ergibt. Aufgrund der vergleichbaren Prozessparameter ist auch bei den hier verwendeten Werkzeugen von einer ähnlichen Beeinflussung der Bohrungsrandszone auszugehen. Wie auch bei den Werkzeugen mit einem Durchmesser $d_{\text{ELB}} = 5 \text{ mm}$ zeigen die an der Stirnseite verrundeten Werkzeuge tendenziell geringfügig schlechtere Oberflächengüten. Dies lässt sich ebenfalls durch den geringeren Umformgrad der Bohrungsrandszone begründen, da es so weiterhin möglich ist, dass prozessbedingte Riefen nicht vollständig eingeebnet werden.

Die Auswertung der erzeugten Bohrungsgüten zeigt, dass der sich durch die höheren Belastungen der kleinen Kontaktfläche entwickelnde Verschleiß am Stirnübergang keinen nennens-

werten Einfluss auf die erzeugbare Oberflächengüte hat. Hierdurch wird abermals die Hypothese gestützt, dass es aufgrund der fehlenden Verrundung zu einer starken Einebnung kommt und die Beeinflussung der Bohrungsrandzone stärker ausfällt.

Hinsichtlich des Verschleißverhaltens zeigt sich, dass die Werkzeuge ohne jegliche Stirn- und Umfangspräparation den geringsten Verschleiß aufweisen. Dies gilt sowohl für die mittlere Verschleißmarkenbreite VB als auch für die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{max} . Beim Werkzeug mit Schichtvorbehandlung ist der Schneidenausbruch dominant und stellt somit die Überschreitung des Verschleißkriteriums $VB_{max} = 200 \mu m$ dar. Alle anderen Werkzeuge bleiben unterhalb dieses weitverbreiteten Verschleißkriteriums. Abgesehen von diesem Ausbruch, der auch durch prozessbedingte Einflüsse entstanden sein kann, lassen sich insbesondere anhand der mittleren Verschleißmarkenbreite keine signifikanten Unterschiede feststellen. Wie bereits bei Werkzeugen des Durchmessers $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$ festzustellen war, entwickelt sich auch bei den hier verwendeten Werkzeugen ein Kerbverschleiß an der Innenschneide. Dieser Effekt ließ sich bei den Werkzeugen mit $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$ hauptsächlich bei den schliffscharfen Werkzeugen finden und auf die fehlende Schneidenstabilität sowie eine ungünstige Spanbildung zurückführen. Bei deutlich erhöhten Bohrwegen zeigt sich dieser Effekt in sehr abgeschwächter Form, siehe Abbildung 8.3.3. Die veränderte Spanbildung bei kleineren Durchmessern deckt sich mit den Erkenntnissen von *Heilmann* [109], der darstellen konnte, dass die von *Fink* [93] beschriebene Spanbildung bei kleineren Werkzeugdurchmessern nicht vorliegt. Zur genaueren Analyse des Verschleißverhaltens erfolgte daher eine Auswertung eines komplettpräparierten Werkzeuges durch REM-Aufnahmen. Diese sind in Abbildung 8.3.4 dargestellt.

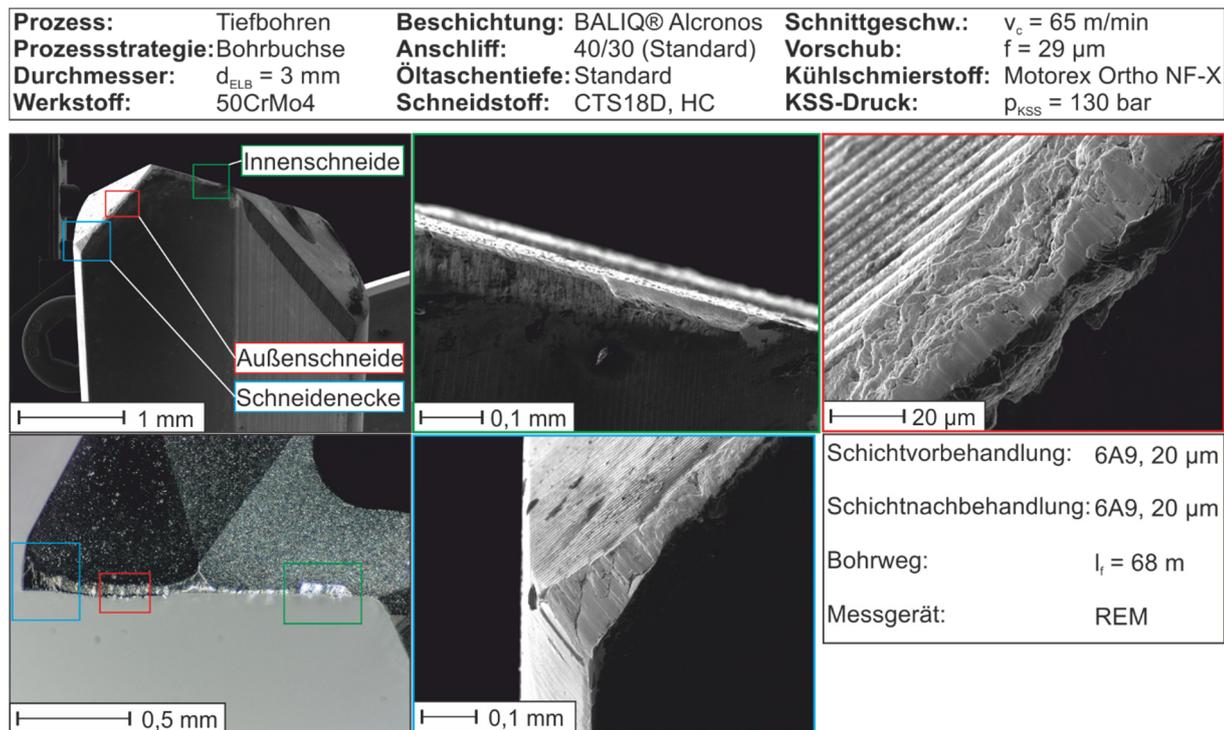


Abbildung 8.3.4: Analyse des Verschleißverhaltens durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Die Gegenüberstellung des Verschleißverhaltens zeigt, dass es im Bereich der Außenschneide zu abrasivem Verschleiß kommt, welcher zu einem Abtrag des Schneidstoffes führt. Das Verschleißverhalten ähnelt dem, der nachgeschliffenen, teilbeschichteten Werkzeuge und lässt sich auf eine thermische Überbelastung der Schneidenecke zurückführen. Der Verschleiß beschränkt sich bei diesen Werkzeugen primär auf den Bereich der Schneidenecke, da die Nebenschneide des Einlippentiefbohrwerkzeuges noch intakt und kein ausgeprägter Verschleiß festzustellen ist. Die Betrachtung der Aufnahmen der Spanfläche in Abbildung 8.3.2

zeigen, dass sich beim Einsatz der Werkzeuge eine einem Radiusanschiff ähnliche Schneidenform ausbildet, da es insbesondere im Bereich der Schneidenecke zu vermehrtem abrasiven Verschleiß kommt und dieser sich mit steigendem Bohrweg zur Schneidenspitze hin ausbildet. Zusätzlich verrundet die im Neuzustand als scharfkantig zu bezeichnende Werkzeugspitze. Daher ist davon auszugehen, dass sich bei weiter steigendem Bohrweg ein Verschleißbild einstellt, welches einem Vollradiusanschiff ähnelt. Im Bereich der Innenschneide lässt sich der bereits bekannte Kerbverschleiß feststellen. Dieser liegt bei $d/2$ und wird durch die bereits in Kapitel 5.2.1 dargestellte Problematik bei der Schneidkantenverrundung durch das [Tool]Prep-Verfahren an der Innenschneide der Werkzeuge begründet. Aufgrund des kleineren Werkzeugdurchmessers ergeben sich in diesem Fall jedoch nur geringe Beeinflussungen und der Kerbverschleiß scheint erst zu einem späteren Punkt an Einfluss zu gewinnen. Ob der sich ausbildende Kerbverschleiß durch die fehlende Schneidenstabilität oder die ungünstige Spanbildung und dadurch resultierende Spanklemmer verursacht werden, soll durch In-Situ-Hochgeschwindigkeitsanalysen im folgenden Kapitel erörtert werden.

8.4. Beurteilung der Spanbildung durch Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen bei unterschiedlichen Präparationszuständen

Im letzten Untersuchungsaspekt des Einsatzverhaltens der gestaltoptimierten Werkzeuge sollen die Beeinflussungen der Spannuttopographie auf die Spanbildung erörtert werden. Hierzu kommen In-situ-Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen (IHVA) zum Einsatz. Der Versuchsaufbau und die Auswertemethodik werden von *Kirschner* [121] übernommen. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen der vorhergehenden Untersuchungen und Analysen hat sich gezeigt, dass es zu einem Kerbverschleiß der Innenschneide bei bestimmten Werkzeugen kommt. Primär sind hierbei die schliffscharfen Werkzeuge zu nennen, wobei auch bei Werkzeugen, die durch das [Tool]Prep-Verfahren präpariert wurden ähnliche Effekte auftreten. Der resultierende Kerbverschleiß kann somit durch zwei Aspekte begründet werden. Der erste Aspekt, den diese Werkzeuge gemein haben ist die fehlende Beeinflussung der Spannuttopographie. Als weiteren Effekt lässt sich die fehlende Schneidenstabilität zur Bohrermitte nennen, da diese sowohl beim schliffscharfen als auch der teilweise unzureichenden Präparation der Innenschneide beim [Tool]Prep-Verfahren geschuldet sein kann. Um die Beeinflussung der Spanbildung in Form des Krümmungsradius zu analysieren, kommen die bereits beschriebenen Hochgeschwindigkeitsvideoanalysen zum Einsatz. Um eine ausreichende Absicherung in verschiedenen Zuständen geben zu können, erfolgt der Einsatz von unterschiedlich präparierten und verschlissenen Werkzeugen. Dies hat den Hintergrund, eine Aussage darüber zu treffen, ob es auch durch Verschleißerscheinungen zu einer möglichen Beeinflussung der Spanbildung und somit einer Begünstigung der Ausbildung eines Kerbverschleißes kommt.

Prozess: Tiefbohren	Beschichtung: BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.: $v_c = 65 \text{ m/min}$
Prozessstrategie: IHVA	Anschliff: 40/30 (Standard)	Vorschub: $f = 29 \text{ }\mu\text{m}$
Durchmesser: $d_{ELB} = 5 \text{ mm}$	Öltaschentiefe: Standard	Kühlschmierstoff: Motorex Ortho NF-X
Werkstoff: 50CrMo4	Schneidstoff: CTS18D, HC	KSS-Druck: $p_{KSS} = 30 \text{ bar}$

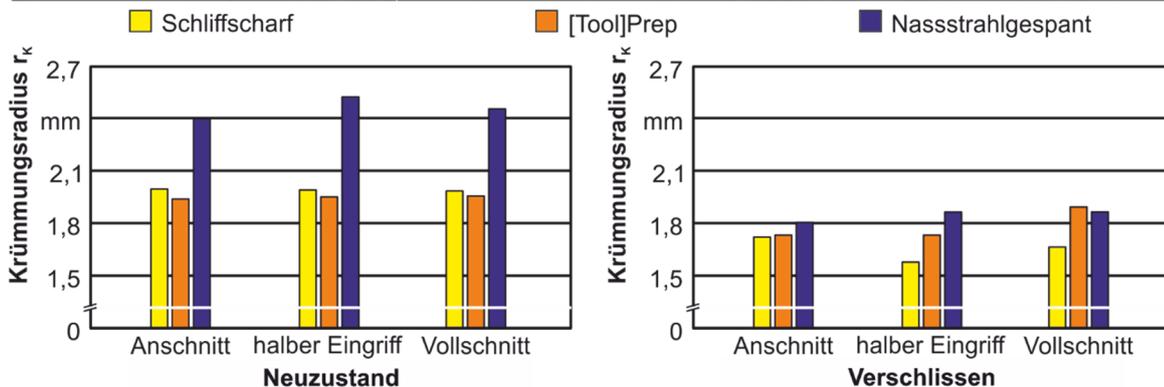
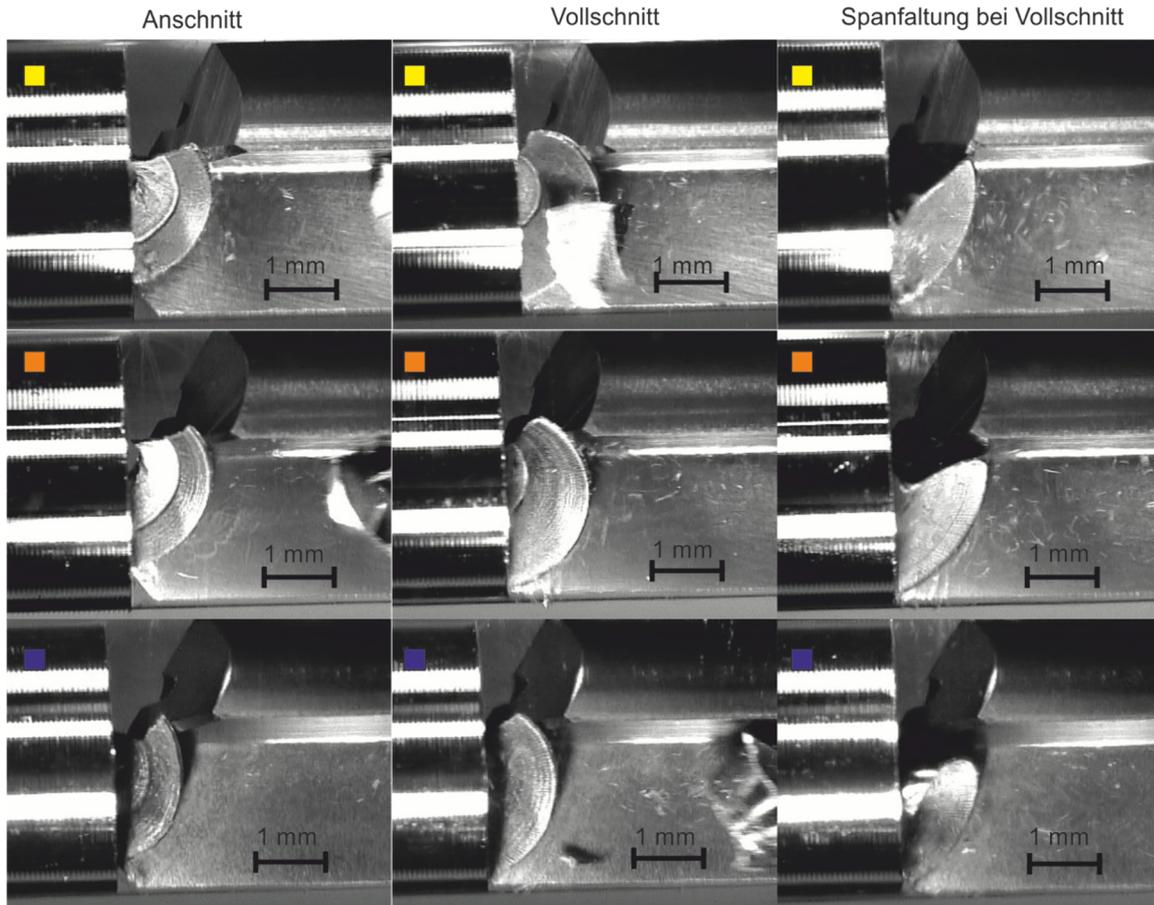


Abbildung 8.4.1: Beeinflussung des Krümmungsradius in unterschiedlichen Zuständen

Die Auswertung der Spanbildung bei unterschiedlichen Präparationszuständen ist in Abbildung 8.4.1 dargestellt. Die Momentaufnahmen der IHVA-Aufnahmen stammen von Versuchen der Werkzeuge im Neuzustand. Diese stehen exemplarisch für die Spanbildung bei den unterschiedlich präparierten Werkzeugen. Durch die Betrachtung der dargestellten Aufnahmen zeigt sich in Bezug auf den Krümmungsradius r_k ein geringer Unterschied. Die Ergebnisse zeigen bei der gestrahlten Oberflächentopographie im Vergleich zu nicht beeinflussten Spannuttopographie geringfügig erhöhte Krümmungsradien r_k . Dieser Unterschied führt bei den nicht gestrahlten Werkzeugen zu einer Umlenkung des Spans über den Spannutrücken zum Bohrungsgrund. Unter Berücksichtigung der geometrischen Gestalt der Einlippentiefbohrwerkzeuge mit dem 40/30-Standardanschliff läuft der sich so ausbildende Span in den Ölraum und verhakt sich dementsprechend zwischen dem Übergang der Kante des Spannutrücken und der Innenschneide. Dieser Effekt tritt insbesondere zu Standzeitbeginn auf und führt daher

bereits führzeitig zu größeren Schneidkantenausbrüchen. Da dieser Effekt primär bei unpräparierten Schneidkanten auftritt, kann die fehlende Schneidkantenverrundung neben der Spannuttopographie als Begründung in Betracht gezogen werden. Im verschlissenen Zustand verringert sich die Spankrümmung und es ergeben sich vergleichbare Krümmungsradien. Die Begründung für die Änderung der Spanbildung mit fortschreitendem Verschleiß lässt sich durch Topographie der Spanfläche erklären. Durch den bereits absolvierten Standweg erfolgt eine Einebnung der Spanfläche und vorher bestehende Unterschiede hinsichtlich der Spannuttopographie werden nivelliert. Somit lassen sich bei bereits vorverschlissenen Werkzeugen keine Unterschiede hinsichtlich des Krümmungsradius r_K feststellen. Der geringere Krümmungsradius r_K der Späne bei den durch [Tool]Prep schneidkantenpräparierten Werkzeugen führt im Gegensatz zu den unpräparierten Werkzeugen zu keiner Vergrößerung des Kerbverschleißes. Dadurch lässt sich ableiten, dass der gebildete Span keinen ungünstigen Spanablauf aufweist und nach der Faltung durch den Kontakt zum Bohrungsgrund umgeformt und abgebrochen wird. Dies deckt sich mit Untersuchungen von Kirschner, wo ein ähnliches Spanbildungsverhalten festgestellt wurde [121]. Bei den schliffscharfen unpräparierten Werkzeugen lässt sich auch anhand der Verschleißauswertung in Kapitel 8.1.1 belegen, dass die initiale Beschädigung so groß ist, dass sich der ausbildende Span immer wieder in der erzeugten Kerbe verfängt und zu Spanklemmern führt. Diese wiederkehrenden Spanklemmer resultieren in einem vergrößerten Verschleiß, der einen vorzeitigen Abbruch der Einsatzversuche nach sich zieht.

8.5. Fazit der Einsatzversuche der optimierten Tiefbohrwerkzeuge

Die in Kapitel 0 dargestellten Ergebnisse und Analysen zeigen, dass Optimierungsmaßnahmen die Möglichkeit bieten ein verbessertes Einsatzverhalten und verbesserte Bohrungsgüten zu erreichen. Die in diesem Kapitel betrachteten Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Schneidkantenpräparation, die Schichtvorbehandlung sowie die -nachbehandlung an Einlippentiefbohrwerkzeugen. Die unterschiedlichen Optimierungs- und Anpassungsmaßnahmen haben unterschiedliche Effekte auf das Einsatzverhalten gezeigt. Anhand dieser Effekte erfolgt zum Abschluss dieses Kapitels eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.

In Bezug auf die Schneidkantenpräparation konnte gezeigt werden, dass das neuentwickelte [Tool]Prep-Verfahren eine Alternative oder Ergänzung von bestehenden Schneidkantenpräparationsprozessen darstellt. Durch die Schneidkantenpräparation der Werkzeuge im unbeschichteten Zustand war es insbesondere bei den Einlippentiefbohrwerkzeugen mit dem Durchmesser $d_{ELB} = 3 \text{ mm}$ möglich große Bohrwege bei gleichbleibender Qualität zu erreichen und eine leistungsstarke Alternative zu bieten. Bei den teilbeschichteten Werkzeugen konnte die Standzeit aufgrund des Verschleißverhaltens der unbeschichteten Schneidenecken nicht signifikant verbessert werden, allerdings zeigen die Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops, dass durch weitere Entwicklungsmaßnahmen eine Verbesserung des Einsatzverhaltens auch bei diesen Werkzeugenvarianten möglich ist.

Hinsichtlich der Verbesserung der Führungsleistentopographie konnte über dem absolvierten Standweg kein signifikanter Einfluss auf die erzeugbaren Bohrungsgüten festgestellt bzw. ein Einfluss von hohen oder geringeren Oberflächengüten identifiziert. Die Begründung dieser Erkenntnis lässt anhand der folgenden Abbildung 8.5.1 ableiten.

Prozess: Tiefbohren	Beschichtung: BALIQ® Alcronos	Schnittgeschw.: $v_c = 65$ m/min
Prozessstrategie: Bohrbuchse	Anschliff: 40/30 (Standard)	Vorschub: $f = 29$ μm
Durchmesser: $d_{\text{ELB}} = 3$ mm	Öltaشتentiefe: Standard	Kühlschmierstoff: Motorex Ortho NF-X
Werkstoff: 50CrMo4	Schneidstoff: CTS18D, HC	KSS-Druck: $p_{\text{KSS}} = 130$ bar

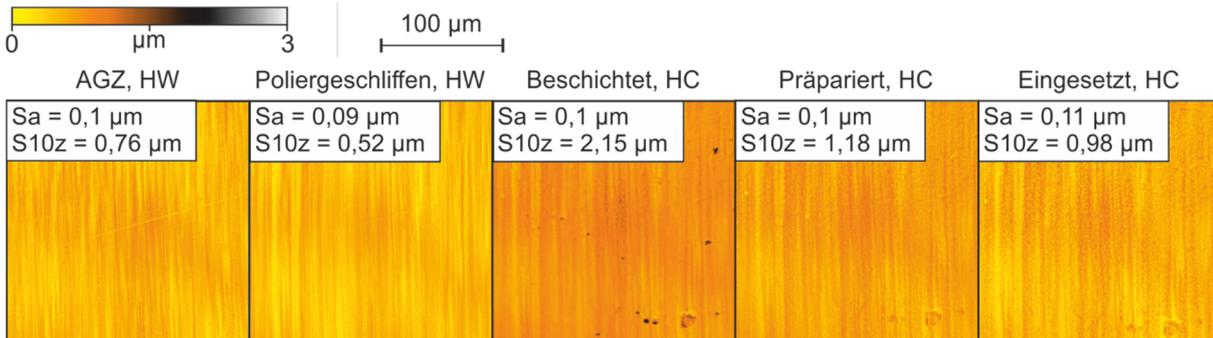


Abbildung 8.5.1: Beeinflussung der Führungsleistentopographie in unterschiedlichen Zuständen

Die untersuchten Werkzeuge weisen bereits im geschliffenen Zustand eine hohe Oberflächen-güte der Führungsleisten auf. Durch die Schichtvorbehandlung erfolgt eine geringfügige Ver-besserung aufgrund des Abtrags der Profilspitzen. Durch den Beschichtungsprozess resultie-rende Inhomogenitäten führen zu einer lokalen Beeinflussung der Führungsleistentopogra- phie, die durch das Nachbehandlungsverfahren ausgeglichen werden können. Bedingt durch die Entfernung der Schichtinhomogenitäten mittels lokalem Polierschleifen kommt es während des Einsatzes nur noch zu einer sehr geringen Beeinflussung der Oberflächentopographie. Somit lassen sich anhand dieser Darstellung zwei Aspekte ableiten. Zum einen, würden sich die durch den Beschichtungsprozess erzeugten Inhomogenitäten auch durch den tribologi- schen Kontakt und die thermomechanischen Belastungen während des Prozesses abtragen. Dies würde jedoch unkontrolliert ablaufen, wodurch sich ein hohes Risiko für spontan auftre- tende Fehler ergibt und die Prozesssicherheit reduziert wird. Dies geht damit einher, dass es durch die fehlende Nachbehandlung zu einem messbaren Einlaufverhalten kommt und die Werkzeuge bei Prozessfähigkeitsuntersuchungen schlechter abschneiden, da es insbeson- dere zu einem verringerten Einlaufverhalten der Werkzeuge durch eine nachträgliche Nach- behandlung kommt [3, 147, 165, 203]. Der zweite Effekt, der sich anhand dieser Gegenüber- stellung ableiten lässt ist, dass die Führungsleiste nur sehr lokal für die Erzeugung der Boh- rungswand genutzt wird. Dies lässt sich anhand der optischen Auswertung des Tragbereichs der Führungsleisten ableiten. Somit sind für die Erzeugung und die Qualität der Bohrungswand primär der Stirnübergang und die kleinen Bereiche der dadurch resultierenden Tragbereiche von besonderem Interesse.

Somit zeigt sich, dass der maßgebliche Einfluss auf die Bohrungsgüte durch die Anpassung des Stirnübergangs resultiert. Sowohl die Oberflächengüte der Bohrungen als auch die Beein- flussung der Bohrungsrandzone wird durch diese Optimierungsmaßnahme eindeutig beein- flusst und bietet das größte Potential zur Verbesserung der Bohrungsgüte beim Einsatz von Einlippentiefbohrwerkzeugen.

9. Beurteilung der Prozesskettenanpassung zur gezielten Gestalt- und Schneidkantenpräparation von Tiefbohrwerkzeugen

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren zur Optimierung der Gestalt- und Schneidkantenpräparation zeigen das Potential durch die Integration von neuen Prozessschritten in bestehende Herstellungsabläufe. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bieten die Möglichkeit einer Substitution von aufwendigen Präparationsverfahren durch die Implementierung angepasster Prozessabläufe und bieten somit die Möglichkeit die Herstellungskosten zu reduzieren und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge zu steigern.

Zur Entwicklung und Beschreibung der auf den Ergebnissen dieser Arbeit basierenden Prozesskettenanpassung werden im Folgenden die Maßnahmen anhand des Nutzens kurz gegenübergestellt und eine angepasste Prozesskette vorgeschlagen. Die Basis der bestehenden Prozesskette zur Herstellung von Zerspanungswerkzeugen ist bereits in Abbildung 2.1.1 dargestellt.

Die Wirksamkeit der Schneidkantenpräparation ist bereits durch die Ausführungen in Kapitel 2.1.3 beschrieben und wird durch die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 0 bestätigt. Da es in Bezug auf Leistungsfähigkeit der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Präparationsmethoden nur geringfügige Unterschiede gibt, sind zusätzlich ergänzende Faktoren zur Bewertung in Erwägung zu ziehen.

Die Auswertung der Schneidkantenpräparation zeigt bei den Einlippentiefbohrwerkzeugen, dass eine verstärkte Beeinflussung der Schneidenecke und der Nebenschneide zu vermeiden sind, da durch eine vermehrte Verrundung dieser exponierten Stellen eine negative Beeinflussung der Leistungsfähigkeit und der Bohrungsgüte resultiert. Durch die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Varianten des abrasiven Nassstrahlspanens lässt sich eine Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen sowie der Schneidenecke und der Nebenschneide nicht vermeiden. Gleiche Ergebnisse lassen sich beim Einsatz des Gleitschleppscheifens feststellen. Durch das entwickelte [Tool]Prep-Verfahren lässt sich hingegen eine Schneidkantenpräparation bei gleichzeitiger Vermeidung der Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen sowie der Schneidenecke und der Nebenschneide erreichen. Bei der Analyse des Einsatzverhaltens in Bezug auf die erreichbare Bauteilqualität lassen sich hinsichtlich der erreichbaren Bohrungsgüte keine signifikanten Unterschiede feststellen, siehe Kapitel 0.

Aus wirtschaftlicher Sicht zeigen sich in Bezug auf die Schneidkantenpräparation durch die untersuchten Verfahren gegenüber dem Einsatzverhalten deutliche Unterschiede. So sind für die Werkzeugpräparation durch das abrasive Nassstrahlspanen und das Gleitschleppscheifen zusätzliche Maschinen und Handhabungsvorgänge notwendig. Diese bedeuten für die Unternehmen eine zusätzliche Investition und damit einhergehend laufende Betriebs- und Wartungskosten. Demgegenüber kann durch die Anwendung des [Tool]Prep-Verfahrens eine Schneidkantenpräparation auf der Werkzeugschleifmaschine erfolgen. Somit ist eine zusätzliche Investition für den Betrieb nicht erforderlich. Aufgrund der kurzen Prozesszeiten von $T_{\text{präp}} \leq 5 \text{ s}$ und dem Entfall zusätzlicher Handhabungsschritte steigt die Wirtschaftlichkeit des Prozesses an.

Hinsichtlich der Einstellung einer für den Anwendungsfall günstigen Oberflächentopographie konnte auf Basis der durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit und die Bearbeitungsqualität keine abschließende Empfehlung ausgesprochen werden, siehe Kapitel 8.1. Durch die Implementierung des Polierschleifens mit elastischen Schleifscheibenbelägen in angepasste Prozessketten besteht die Möglichkeit einer reproduzierbaren Verrundung des Stirnübergangs zwischen Freifläche und Führungsleiste. Die Verrundung dieses

Übergangs resultiert in einer verbesserten Bohrungsgüte und führt zu einer Vermeidung von prozessbedingten Beeinflussungen der Bohrrandzone, siehe 8.2.

In Bezug auf die Schichteigenschaften zeigt die Schichtvorbehandlung durch den Einsatz des Polierschleifens, dass es zu einem Abbau von Eigenspannungen in der Werkzeugrandzone kommt und die Widerstandsfähigkeit gegenüber eindringenden Körpern reduziert wird. Beim Einsatz des abrasiven Nassstrahlspanens konnten diese Effekte nicht festgestellt werden. Eine Schichtnachbehandlung durch den Einsatz von Polierschleifscheiben mit elastischen Schleifscheibenbelägen liefert eine Reduzierung der beschichtungsbedingten Inhomogenitäten bei gleichzeitiger Verbesserung des Schichteigenspannungszustandes, siehe 7.2. Gleiche Effekte lassen sich jedoch auch durch andere Präparationsverfahren erreichen [203].

Mit besonderem Augenmerk auf die Wirtschaftlichkeit der Präparationsmethoden lässt sich somit ableiten, dass die Prozesskettenanpassung zu einer Verringerung Werkzeugherstellkosten führen kann. Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse sowie der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit kann eine optimierte Prozesskette abgeleitet werden. Die optimierte Prozesskette ist in der folgenden Abbildung 9.1 dargestellt.

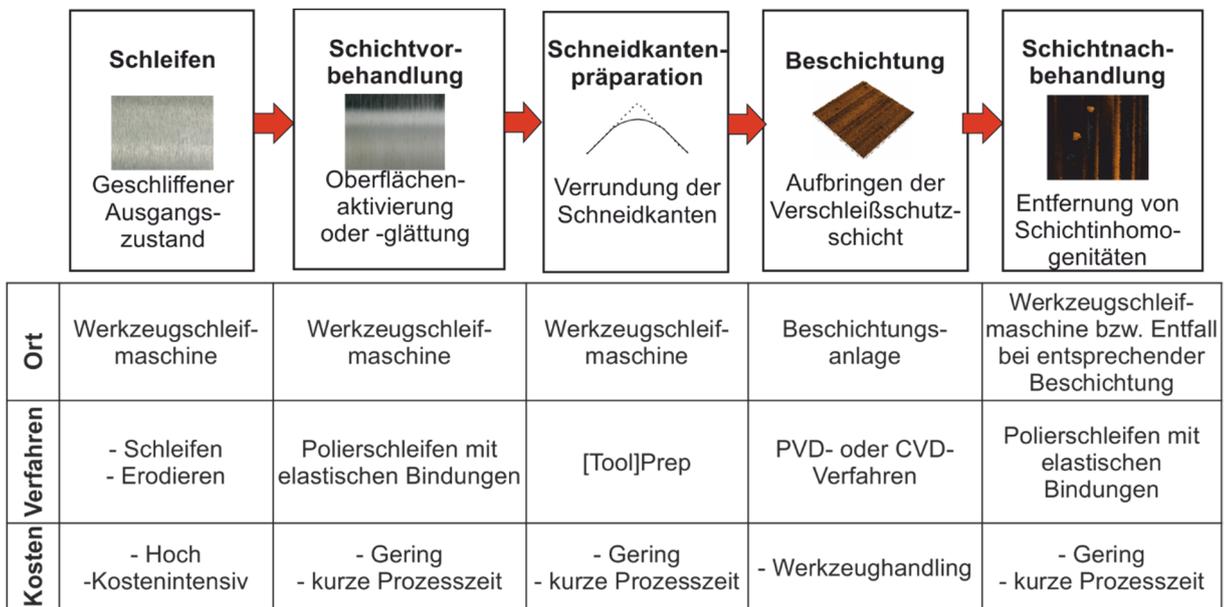


Abbildung 9.1: Prozessabfolge bei optimierter Prozesskette

Die Anpassungsmaßnahmen bewirken, dass das herzustellende Werkzeug geringfügig erhöhten Prozesszeiten auf der Werkzeugschleifmaschine gefertigt werden kann. Bedingt durch den Verzicht auf zusätzlich im Anschluss erfolgende Prozesse wird trotz dieser zusätzlichen Schritte eine Reduzierung der Herstellkosten erreicht. Besonders günstig zeichnet sich hierbei der hohe Automatisierungsgrad ab, da durch diesen eine Betreuung mehrerer Schleifmaschinen durch Mitarbeiter möglich wird und die Herstellkosten weiter verringert werden können.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Die Leistungsfähigkeit von Zerspanungswerkzeugen wird maßgeblich durch die Werkzeuggestalt, die Werkzeugfunktionsflächen, die Schneidkantenpräparation sowie die verwendete Hartstoffbeschichtung inklusive der teils erforderlichen Schichtvor- und -nachbehandlung beeinflusst. Am Beispiel des Einlippentiefbohrwerkzeuges stehen hierbei die Schneidkantenpräparation sowie die Schichtvor- und -nachbehandlung im Fokus, da das hohe l/d -Verhältnis und die asymmetrische Werkzeuggestalt besondere Anforderungen an diese Prozesse stellen. Die Optimierungsmaßnahmen verfolgen das Ziel einer Reduzierung der Werkzeugherstellkosten sowie einer Steigerung der Prozessqualität durch die Integration in bestehende Prozessketten bzw. die Substitution bestehender Prozessschritte auf zusätzlich erforderlichen Maschinen. Die vorliegende Arbeit betrachtet daher die einzelnen Bestandteile der Herstellungskette von Einlippentiefbohrwerkzeugen. Somit kann jeder einzelne Prozessschritt isoliert bewertet und eine fundierte Basis für die Anpassung von bestehenden Prozessketten zur Herstellung dieser Werkzeuge gebildet werden. Diese detaillierte Betrachtung der einzelnen Prozessschritte beschränkt sich hierbei auf die Verfahren, die nach dem zeitintensiven Werkzeugschleifen stattfinden. Ursächlich hierfür ist die Tatsache, dass nach dem Werkzeugschleifen bereits die größte Wertschöpfung erfolgt und durch die nachfolgenden Verfahren eine Steigerung der Leistungsfähigkeit im Fokus steht. Jedoch machen diese Prozessschritte ungefähr die Hälfte der Produktionskosten aus [60], wodurch sich ein großes Potential für Optimierungsmaßnahmen ergibt. Die abschließende Einsatzvalidierung optimierter Einlippentiefbohrwerkzeuge lässt darüber hinaus eine belastbare Bewertung der Effektivität der Prozessanpassungen zu.

Für eine detaillierte Analyse der Optimierungsmaßnahmen zur Topographie- und Konturanpassung bei Einlippentiefbohrwerkzeugen ist es notwendig eine gleichmäßige und reproduzierbare Schneidkantenpräparation durchzuführen. Bedingt durch das hohe l/d -Verhältnis bei Einlippentiefbohrwerkzeugen ist hierfür beim Einsatz robotergestützter Verfahren auf Basis des abrasiven Nassstrahlspanens eine aufwendige Prozessführung und Bahnprogrammierung erforderlich. Durch die Verwendung dieses Verfahrens lassen sich homogene Schneidkantenverrundungen an der inneren und äußeren Schneidkante einstellen. Bedingt durch das ablaufende Wasser-Abrasiv-Gemisch im Wirkungsbereich des Abrasivstrahls auf der für den Spanablauf relevanten Spanfläche resultierte ein erosiver Abtrag der Kobaltbindephase und damit eine ungewünschte Beeinflussung der Oberflächentopographie. Dieser Effekt steht somit im Widerspruch zu aktuellen Bestrebungen der Werkzeugindustrie, die zumeist eine hohe Oberflächengüte im Bereich der Spannut bevorzugen. Ein ähnlicher Effekt stellte sich bei der Verwendung einer industriellen Nassstrahlspananlage dar. Zwar ließen sich auch durch diese Prozessvariante reproduzierbare Schneidkantenverrundungen herstellen, jedoch ist eine Beeinflussung von peripheren Funktionsflächen und Schneidkanten, wie bspw. der Nebenschneide, unvermeidbar. Somit ist für diese beiden Varianten des abrasiven Nassstrahlspanens festzuhalten, dass eine hohe Prozesssicherheit und Qualität bei der Schneidkantenpräparation möglich sind, aber zwangsläufig eine Beeinflussung der peripheren Funktionsflächen sowie eine Verrundung der Schneidenecke und der Nebenschneide erfolgt.

Motiviert durch die beschriebenen Restriktionen und Herausforderungen der Varianten des Nassstrahlspanens erfolgte die Entwicklung eines alternativen Schneidkantenpräparationsprozesses [Tool]Prep. Die beschriebene Verfahrensentwicklung über mehrere Entwicklungsstufen resultierte in einem Schneidkantenpräparationsverfahren, welches in bestehende Prozessketten integriert werden kann. Durch die Integration in bestehende Prozessketten entfällt für den Werkzeughersteller die Beschaffung und Unterhaltung einer gesonderten, dem Schneidkantenpräparationsprozess zweckgebundenen, Maschine, wodurch eine Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit insbesondere für klein- und mittelständische Unternehmen resul-

tiert. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es aufgrund des elastischen Materialverhaltens des Abrasivkörpers zu durchmesserabhängigen Abweichungen der Verrundungsgrößen an Innen- und Außenschneide kommt, weshalb hier weitergehende Anpassungen und Entwicklungen notwendig sind.

Die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und die Reduzierung von Produktionskosten geht damit einher, dass Zerspanungswerkzeuge mehrfach eingesetzt werden können. Am Beispiel der Tiefbohrwerkzeuge erfolgt dies durch einen Nachschleifprozess, der nach jeweiligem Einsatz bis zu einem definierten Grenzwert notwendig ist. Nach aktuellem Stand der Technik hat sich noch kein Präparationsprozess etabliert, der eine reproduzierbare Schneidkantenverrundung an nachgeschliffenen Werkzeugen ermöglicht. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass dies durch [Tool]Prep möglich ist und somit die zum aktuellen Zeitpunkt bestehende Lücke in Bezug auf die Leistungsfähigkeit zwischen Neu- und Nachschliffwerkzeugen verkleinert werden könnte. Die Einsatzversuche mit den unterschiedlich präparierten vollbeschichteten Werkzeugen haben gezeigt, dass sich keine Unterschiede hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und der Bohrungsqualität beim Vergleich des neuen und der etablierten Verfahren ergeben. Im Vergleich zu schliffscharfen unpräparierten Werkzeugen zeigte sich, dass die fehlende Schneidenstabilität und der zu Standzeitbeginn geringere Krümmungsradius der erzeugten Späne zum Auftreten von Ausbrüchen an der Innenschneide durch sich verklemmende Späne führte. Bedingt durch die initiale Beschädigung an der Innenschneide resultierten Ausbrüche, in die sich bei fortschreitendem Standweg in aperiodischen Intervallen erneut Späne verklemmt und den Ausbruch vergrößert haben. Ähnliche Effekte ließen sich beim durch [Tool]Prep hergestellten Werkzeug ableiten, wobei die Ausprägung deutlich geringer ausfällt und in keinem Versuch eine Beschädigung auftrat, die die Spanbildung negativ beeinflusste. Beim Einsatz der teilbeschichteten Werkzeuge zeigte sich, dass die fehlende thermische Barrierewirkung der abgetragenen Hartstoffbeschichtung zu einem erhöhten Verschleiß und erhöhten thermischen Belastungen des Hartmetalls führen. Daher war ein Abbruch der Versuche beim Überschreiten der maximalen Verschleißmarkenbreite erforderlich. Trotz des erhöhten Verschleißaufkommens konnten keine negativen Einflüsse auf die Bohrungsgüte identifiziert werden. Die Unterversorgung der schneidenecke mit ausreichend Kühlschmierstoff stellt die größte Herausforderung dar und sollte daher bei anderen Fertigungsverfahren oder nachbeschichteten Werkzeugen in ergänzenden Untersuchungen validiert werden.

Neben der Schneidkantenpräparation langauskragender Werkzeuge erfolgte eine Betrachtung der gezielten Beeinflussung der Oberflächentopographie sowie der Werkzeugkontur zur Verbesserung des Einsatzverhaltens bei der Zerspanung von Vergütungsstählen. Der Fokus der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit lag auf der gezielten Beeinflussung der Umfangsgestalt sowie des axialen Stirnübergangs durch lokales Polierschleifen. Bereits die Untersuchung des Ausgangszustand weisen nach, dass es bei geschliffenen Werkzeugen zu prozessbedingten Schwankungen kommt. Für unterschiedliche Werkzeugdurchmesser lassen sich diese auf unterschiedliche Schleifvorgaben zurückführen. Zusätzlich treten jedoch durch unterschiedliche Konditionierzustände der verwendeten Schleifscheiben auch innerhalb derselben Charge Schwankungen der Oberflächentopographie auf. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es durch den Einsatz des Polierschleifens mit elastisch gebundenen Schleifscheiben bereits bei geringen nominellen Arbeitseingriffen zur reproduzierbaren Fertigung von gleichmäßigen Oberflächen kommt. Dabei führten jedoch einzelne aus der elastischen Bindung herausstehende Diamanten oder Kornagglomerate zu einer Riefenbildung. Dieser Effekt konnte durch das elastische Ausweichen der Diamanten beim Abrichtprozess begründet werden, da diese nach dem Überlauf der Abrichtscheibe zurückfedern und somit nach dem Abrichtvorgang einen erhöhten Kornüberstand aufweisen. Dieser wirkt sich beim

nachfolgenden Einsatz bei der Oberflächenfeinstbearbeitung bei der verwendeten Schleifbahn negativ durch die Ausbildung von Riefen aus.

Die durch den Polierschleifprozess resultierende Veränderung der erzeugten Oberflächentopographie, welche primär auf den Abtrag der Profilsitzen zurückzuführen ist, beeinflusste auch die erreichbare Schichthaftung. So zeigten die durchgeführten Schichthaftungsuntersuchungen in Form von Scratchtests, dass es bei der Analyse der poliergeschliffenen Proben zu keinen Schichtdelaminationen kommt. Dem gegenüber zeigten gleiche Auswertungen an geschliffenen Proben, dass die Schichthaftung geringer ist und Schichtdelaminationen resultieren. Der Unterschied dieser beiden Vorbehandlungszustände ist auf die Ausprägung vorhandener Profilsitzen zurück zu führen. Mit größerer Ausprägung der Profilsitzen nimmt die Kerbwirkung in der applizierten Hartstoffschicht bei Lasteinfluss zu. Ein weiterer Effekt, den diese Untersuchungen aufgezeigt haben, ist die erhöhte Eindringtiefe der Diamanttastspitze bei den poliergeschliffenen Proben. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass es durch den Polierschleifprozess zum Abbau von Druckeigenspannungen in der Werkzeugrandzone kommt und somit die Widerstandsfähigkeit gegenüber eindringenden Körpern verringert wird. Demgegenüber zeigt die Schichtnachbehandlung durch den Einsatz von elastischen Polierschleifscheiben, dass es zu einer Steigerung der Schichteigenspannungen kommt, da die Schichthaftungsfähigkeit in allen Fällen bei gleichzeitiger Reduzierung der Eindringtiefe erhöht wird. Dies lässt sich anhand der kritischen Lasten L_{c1} und L_{c2} sowie die resultierende Eindringtiefe erläutern. Das Schichthaftungsvermögen wurde lediglich von den nassstrahlgespannten Werkzeugen übertroffen, da diese keinerlei Schichtdefekte beim Scratchtest aufwiesen und somit eine im Vergleich höhere Schichthaftung festzustellen war. Die hohe Isotropie der so präparierten Proben und die aus dem Präparationsprozess resultierenden geringen Profilriefen und -spitzen reduzieren die Kerbwirkung in der aufgetragenen Schicht. Somit wird eine höhere Schichthaftung erreicht, da keinerlei Rissinitiierungen oder Delaminationen auftreten.

Für die Schichtnachbehandlung durch den Einsatz von elastisch gebundenen Polierschleifscheiben konnte gezeigt werden, dass eine Verbesserung der Oberflächentopographie möglich ist. Diese resultierte hauptsächlich durch die Entfernung von Schichtinhomogenitäten. Die Schichtinhomogenitäten wurden durch den Nachbehandlungsprozess meist partiell abgeschliffen oder weniger tiefsitzende Inhomogenitäten abgetragen. Lediglich vereinzelt waren komplett aus dem Schichtverbund herausgerissene Partikeln festzustellen. Durch die Einführung einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethode besteht nun die Möglichkeit, verschiedene Beschichtungsprozesse sowie die Effektivität des Nachbehandlungsprozesses quantitativ zu bewerten. Somit lässt sich nicht nur der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz validieren, sondern auch andere, etablierte Prozesse hinsichtlich ihrer Effektivität bewerten. Eine Beeinflussung durch eine Schichtdickenveränderung konnte nicht festgestellt werden. Gleiches Ergebnis ließ sich für den Übergang zwischen der Führungsleiste und der Öltasche feststellen.

Die Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung der Werkzeugkontur zeigten, dass durch das Polierschleifen mit elastischen Schleifscheibenbelägen Veränderungen des Übergangs zwischen der Führungsleiste und der Öltasche sowie die Veränderung des axialen Stirnübergangs möglich sind. Hinsichtlich der Einstellung des Übergangs zwischen der Führungsleiste und der Öltasche ergaben sich durch das elastische Verformungsvermögen bedingte Unterschiede zwischen dem Führungsleisteneinlauf und dem -auslauf. In den durchgeführten Einsatzversuchen konnte über den Standweg kein Einfluss der erzeugten Oberflächentopographie festgestellt werden. So zeigte die Auswertung der Bohrungsgüte, dass eine Änderung der Umfangsgestalt im unbeschichteten Zustand keinen signifikanten Einfluss auf das Prozessverhalten im beschichteten Zustand hat. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch den Polierschleifprozess zur Präparation der Umfangsgestalt gleichzeitig eine Beeinflussung des

axialen Übergangs resultiert. Daher lässt sich die Beeinflussung der Bohrungsgüte durch die gezielte Veränderung der Umfangsgestalt sowie der Schichtnachbehandlung nicht abschließend voneinander trennen. Eine Schichtnachbehandlung ist jedoch zu empfehlen, da die Schichtinhomogenitäten beim Einsatz der Werkzeuge durch den Kontakt zwischen Bohrungswand und Führungsleiste unkontrolliert abgetragen werden. Bei Betrachtung des Einlaufverhaltens und der Sicherstellung einer Prozessfähigkeit im industriellen Einsatz würde ein solches Prozessverhalten in der Regel zu einem Ausschluss dieser Werkzeuge führen.

Durch die Verwendung unterschiedlicher Prozessvarianten konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Verrundungen an den Stirnübergängen möglich sind. Diese wirken sich unterschiedlich auf die während des Bohrprozesses resultierende Materialumformung der Bohrungswand aus. Durch eine Veränderung des axialen Stirnübergangs ergibt sich eine verbesserte Führung des Werkzeuges und eine höhere Prozesssicherheit. Bei allen präparierten Werkzeugen konnten sehr gute Bohrungsgüten erreicht werden. Der wesentliche Unterschied ist durch die Analyse der erzeugten Bohrungsrandzonen abzuleiten. Bei geringerer oder fehlender Verrundung des Stirnübergangs zeigte sich eine unterschiedlich ausgeprägte Beeinflussung der Bohrungsrandzone. Diese Bohrungsrandzonenintegrität konnte über die eingeleitete Energie begründet werden, da eine fehlende bzw. geringe Verrundung des Stirnübergangs zu einer verhältnismäßig kleinen Kontaktzone führt. Hieraus resultiert in Relation zum Standardwerkzeug eine höhere Flächenpressung, wodurch es zu höheren Werkstückbelastungen aufgrund der verstärkten Materialumformung kommt. Zwar ließen sich durch die kleine Kontaktzone sehr gute Bohrungsgüten herstellen, jedoch entstanden aufgrund des hohen spezifischen Energieeintrages erhöhte Temperaturen, die zu einer thermischen Überbelastung der Randzone führten. Diese thermische Überbelastung begünstigte die Ausbildung einer Neuhärtungszone, die auch als weiße Schicht beschrieben wird. Dieser Effekt stellt insbesondere bei zyklisch hochbelasteten Bauteilen eine besondere Problemstellung dar, da die Neuhärtungszonen in der Regel von einem weicherem Grundgefüge unmittelbar unter der Neuhärtungszone begleitet wird und somit zu katastrophalem Versagen von zyklisch hochbelasteten Bauteilen führen kann. Dieser Effekt trat bei Werkzeugen mit Verrundungsgrößen von $\bar{s} = 30 \mu\text{m}$ bei gleichzeitig sehr geringer Beeinflussung der Randzone nicht auf.

Der abschließende Einsatz der optimierten Werkzeuge zeigte, dass durch das Zusammenspiel von den untersuchten Optimierungsmaßnahmen hohe Standwege bei hohen Bohrungsgüten und Prozesssicherheiten möglich sind. Hierbei konnte neben dem entwickelten [Tool]Prep-Verfahren zur Schneidkantenpräparation auch die Verrundung des Stirnübergangs als zielführend festgestellt werden. Durch den Einsatz des Polierschleifprozesses mit einer Schleifscheibe des Typs 6A9 lassen sich neben der Stirnverrundung auch die für den Kontakt zwischen Bohrungswand und Führungsleiste relevanten Bereiche bearbeiten. Hieraus resultiert die als optimal anzunehmende Prozesskette. Bei Sicherstellung einer Vermeidung von Fremdkörpern in der Beschichtungskammer und anderer Rückstände durch ergänzende Reinigungsmaßnahmen besteht die Möglichkeit, eine defektfreie Beschichtung mit hoher Schichtgüte auf dem Werkzeug abzuschneiden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass Zerspanungswerkzeuge auf einer Werkzeugschleifmaschine soweit vorbereitet werden, dass die Werkzeuge nach dem Beschichtungsprozess keinerlei Nachbehandlung benötigen und an den Endkunden versendet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten einige relevante Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt und die Einflüsse auf die Bohrungsgüten und das Verschleißverhalten erfolgreich validiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse weisen jedoch weitere neue Entwicklungsmaßnahmen auf, die in weiteren, vertiefenden Untersuchungen zu erforschen sind. Im Rahmen der Schneidkantenpräparation haben erste Versuche zum [Tool]Prep gezeigt, dass dies ein in bestehende Pro-

zessketten integrierbares Verfahren ist. Die Untersuchungen erfolgten jedoch nur an Abrasivkörpern, die keinen Härtegradienten aufweisen. Zusätzlich wurde lediglich ein Standardanschleiff betrachtet, weshalb die Präparation von anderen Anschliffen zu untersuchen ist. Daher gilt es, dieses Verfahren näher zu betrachten und das volle Potential abzuleiten. Erweiterungsmöglichkeiten sind bspw. die Verwendung von gradierten Abrasivkörpern sowie die Übertragung auf Wendelbohrwerkzeuge. Hierbei muss das Wissen über das elastische Verformungsvermögen genutzt und auf die Vermeidung einer Querschneidenverrundung erweitert werden.

Für die relevante Etablierung des Polierschleifprozesses sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Hierzu zählen die Beeinflussung der erzeugbaren Belagstopographie und der durch den Abrichtprozess resultierenden Konturabweichung des Schleifkörpers, die zu einer Welligkeit der präparierten Oberfläche führt. Zusätzlich sind herausstehende Einzelkörner und Kornagglomerate zu vermeiden, da diese einen negativen Einfluss auf die Topographie respektive die Schichthftung haben. Um eine industrielle Etablierung zu gewährleisten sollten diese Aspekte näher betrachtet bzw. Lösungen zur Umsetzung entwickelt werden.

11. Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J.; Tschannerl, M.: Tool length influence on wear behaviour of twisted carbide drills. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 1 (2007) 1, S. 51–56. doi:10.1007/s11740-007-0029-5
- [2] Abrahams, H.: Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2016
- [3] Abusuilik, S.: Pre-, intermediate, and post-treatment of hard coatings to improve their performance for forming and cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 284 (2015) , S. 384–395
- [4] Albrecht, P.: New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process: Part I. The Ploughing Process in Metal Cutting. *Journal of Engineering for Industry*, 82 (1960) 4, S. 349–358. doi:10.1115/1.3664242
- [5] Arndt, M.: Innovative PVD-Arc Schichten für den Einsatz bei schwer zerspanbaren Werkstoffen. Innovative PVD-Arc-layers for the machining (cutting) of difficult machinable materials Spanende Fertigung. In: Weinert K (Hrsg). *Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*, 4. Aufl. Vulkan Verl., Essen, S 119–124 2005
- [6] Aßmuth, R.: Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern, 1. Aufl. Schriftenreihe des ISF, Bd. 99. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2019
- [7] Aßmuth, R.; Bathe, T.; Biermann, D.: Einfluss des Nassstrahlspanens auf die Oberflächentopografie bei Einlippenbohrern Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. In: Hoffmeister H-W, Denkena B (Hrsg), 67. Aufl. Vulkan-Verlag, Essen 2016
- [8] Astakhov, V.: The mechanisms of bell mouth formation in gundrilling when the drill rotates and the workpiece is stationary. Part I: the first stage of drill entrance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (2002) 10, S. 1135–1144. doi:10.1016/S0890-6955(02)00050-0
- [9] Atlati, S.; Haddag, B.; Nouari, M.; Moufki, A.: Effect of the local friction and contact nature on the Built-Up Edge formation process in machining ductile metals. *Tribology International*, 90 (2015) , S. 217–227
- [10] Aurich, J.; Effgen, C.: Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. *Production Engineering. Research and Development*, 9 (2015) 3, S. 329–336. doi:10.1007/s11740-015-0622-y
- [11] Aurich, J.; Effgen, C.; Kirsch, B.: Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65 (2016) 1, S. 329–332. doi:10.1016/j.cirp.2016.04.093
- [12] Azar, G.T.P.; Yelkarasi, C.; Ürgen, M.: The role of droplets on the cavitation erosion damage of TiN coatings produced with cathodic arc physical vapor deposition. *Surf. Coat. Technol.*, 322 (2017) , S. 211–217. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.05.050
- [13] Bargel, H.-J., Schulze, G.: *Werkstoffkunde*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2018

- [14] Barth, S.: Einfluss der Topographie kunstharzgebundener CBN-Schleifscheiben auf das thermo-mechanische Belastungskollektiv beim Schleifen. Dissertation. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Apprimus Verlag, Aachen 2019
- [15] Bassett, E.: Belastungsspezifische Auslegung und Herstellung von Schneidkanten für Drehwerkzeuge. Dissertation. Berichte aus dem IFW. PZH-Verlag, TEWISS - Technik und Wissen GmbH, Garbsen 2014
- [16] Bassett, E.; Köhler, J.; Denkena, B.: On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5 (2012) 2, S. 108–126. doi:10.1016/j.cirpj.2012.03.004
- [17] Bathe, T.; Biermann, D.: Developments in pre- and post-treatment of thin films and their influences on surface topography and coating adhesion strength of cutting tools. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 13 (2019) 6, S. 751–759. doi:10.1007/s11740-019-00921-3
- [18] Berg, H.; Westphal, H.; Schneeweiss, M.; Dietz, M.; Köhler, S.; Glühann, J.; Gieland, U.: Wie die Eigenspannungen den Verschleiß beeinflussen. *WB Werkstatt und Betrieb*, 138 (2005) 12, S. 50–54
- [19] Bergmann, E.; Vogel, J.; Schulz, H.: Beschichtung von Hartmetallwerkzeugen durch PVD. Coating of hard metal tools by PVD Schneidstoffe, Vortraege anlaesslich des Symp. veranstaltet vom Gemeinschaftsausschuss fuer Pulvermetallurgie, Dez, S 115–133 1988
- [20] Bergmann, B.: Grundlagen zur Auslegung von Schneidkantenverrundungen. Dissertation. Berichte aus dem IFW, Bd. 2017,9. PZH-Verlag, TEWISS - Technik und Wissen GmbH, Garbsen 2017
- [21] Biermann, D.; Felderhoff, F.: Verfahrensvergleich beim Tiefbohren. Analyse unterschiedlich konzipierter Tiefbohrwerkzeuge bei der Zerspanung schwefelarmer Stähle. *wt Werkstattstechnik online*, 100 (2010) 3, S. 202–206
- [22] Biermann, D.; Felderhoff, F., Terwey, I.: Vorbereitung für tief gehende Aufgaben. Kantenpräparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen. *Werkstatt & Betrieb*, (2008) 3, S. 45–48
- [23] Biermann, D.; Meijer, A., Ott, A.: Präparation von Mikrofräswerkzeugen aus Vollhartmetall mit elastisch gebundenen Schleifkörpern *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*. In: Hoffmeister H-W, Denkena B (Hrsg). *Verfahren und Maschinen*, 68. Aufl. Vulkan, Essen, S 80–92 2019
- [24] Biermann, D.; Heymann, T.; Rautert, C.: Polieren passt Hartmetallflächen der Anwendung an. *MM Maschinenmarkt*,
- [25] Biermann, D.; Felderhoff, F.; Terwey, I.: Kantenpräparation von Einlippentiefbohrwerkzeugen. Vorbereitung für tief gehende Aufgaben. *WB*, (2008) 3/2008, S. 44–49
- [26] Biermann, D.; Heilmann, M.; Kirschner, M.: Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters. *Procedia Engineering*, 19 (2011) , S. 16–21. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.073
- [27] Biermann, D.; Wolf, M.; Aßmuth, R.: Cutting Edge Preparation to Enhance the Performance of Single Lip Deep Hole Drills. *Procedia CIRP*, 1 (2012) , S. 172–177. doi:10.1016/j.procir.2012.04.030
- [28] Biermann, D.; Wolf, M.; Aßmuth R.; Kipp M.: Der letzte Schliff formt die Mikrogestalt. Neue Potenziale in der Schneidkantenpräparation mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben. *FORUM Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik*, 26 (2013) 2, S. 76–83

- [29] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Wolf, M.: Tiefbohren mit präparierten Einlippenbohrern. *WB Werkstatt + Betrieb*, (2013) 12, S. 62–66
- [30] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Wolf, M.: Tiefbohren mit präparierten Einlippenbohrern. Vergleichende Analyse des Einflusses von Schneidstoff und Beschichtung. *Werkstatt und Betrieb*, 146 (2013) 12, S. 62–66
- [31] Biermann, D.; Kirschner, M.; Eberhardt, D.: A novel method for chip formation analyses in deep hole drilling with small diameters. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 8 (2014) 4, S. 491–497. doi:10.1007/s11740-014-0566-7
- [32] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Heymann, T.; Tiffe, M.: Durch Schneidkantenpräparation zu optimierten Zerspanprozessen - Detaillierte Betrachtung der Mikrogestalt der Schneidkante führt zu Erkenntnisgewinn und Verbesserungsansätzen. *wt - Werkstattstechnik online*, 104 (2014) 11/12, S. 728–733
- [33] Biermann, D.; Abrahams, H.; Goeke, S.: Optimization of guide pads for the BTA deep hole drilling of high alloyed steels by microfinishing. *Production Engineering*, 8 (2014) 1-2, S. 33–40. doi:10.1007/s11740-013-0505-z
- [34] Biermann, D.; Wolf, M.; Barthelmä, F.; Preiß, P.: Vor- und Nachbehandlung beschichteter Einlippenbohrer. *WB Werkstatt und Betrieb*, (2015) 1-2, S. 16–19
- [35] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Schumann, S.; Rieger, M.; Kuhlenkötter, B.: Wet Abrasive Jet Machining to Prepare and Design the Cutting Edge Micro Shape. *Procedia CIRP*, 45 (2016) , S. 195–198. doi:10.1016/j.procir.2016.02.071
- [36] Biermann, D.; Bleicher, F.; Heisel, U.; Klocke, F.; Möhring, H.-C.; Shih, A.: Deep hole drilling. *CIRP Annals*, 67 (2018) 2, S. 673–694. doi:10.1016/j.cirp.2018.05.007
- [37] Bobzin, K.: *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*, 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim 2013
- [38] Bobzin, K.: High-performance coatings for cutting tools. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 18 (2017) , S. 1–9. doi:10.1016/j.cirpj.2016.11.004
- [39] Bochmann, F.; Gabriel, S.; Hahn, J.; Hartwig, A.; Mittenzwei, V.; Rocker, M.: Hartmetallarbeitsplätze: Exposition und Bewertung. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 68 (2008) 1/2, S. 7–14
- [40] Bouzakis, K.-D.; Michailidis, N.; Hadjiyiannis, S.; Efstathiou, K.; Pavlidou, E.; Erkens, G.; Rambadt, S.; Wirth, I.: Improvement of PVD coated inserts cutting performance, through appropriate mechanical treatments of substrate and coating surface. *Proceedings of the 28th International Conference on Metallurgic Coatings and Thin Films. Surface and Coatings Technology*, 146–147 (2001) 0, S. 443–450. doi:10.1016/S0257-8972(01)01485-2
- [41] Bouzakis, K.-D.; Michailidis, N.; Skordaris, G.; Kombogiannis, S.; Hadjiyiannis, S.; Efstathiou, K.; Erkens, G.; Rambadt, S.; Wirth, I.: Effect of the Cutting Edge Radius and its Manufacturing Procedure, on the Milling Performance of PVD Coated Cemented Carbide Inserts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51 (2002) 1, S. 61–64. doi:10.1016/S0007-8506(07)61466-8
- [42] Bouzakis, K.-D.; Skordaris, G.; Mirisidis, I.; Michailidis, N.; Mesomeris, G.; Pavlidou, E.; Erkens, G.: Cutting performance improvement through micro-blasting on well-adherent PVD films on cemented carbide inserts. *ICMCTF 2005 Proceedings of the 32nd International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. Surface and Coatings Technology*, 200 (2005) 5–6, S. 1879–1884. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.08.015

- [43] Bouzakis, K.-D.; Skordaris, G.; Michailidis, N.; Asimakopoulos, A.; Erkens, G.: Effect on PVD coated cemented carbide inserts cutting performance of micro-blasting and lapping of their substrates. PSE 2004 Plasma Surface Engineering (PSE 2004). Surface and Coatings Technology, 200 (2005) 1–4, S. 128–132. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.02.119
- [44] Bouzakis, K.-D.; Michailidis, N.; Skordaris, G.: Hardness determination by means of a FEM-supported simulation of nanoindentation and applications in thin hard coatings. PSE 2004 Plasma Surface Engineering (PSE 2004). Surface and Coatings Technology, 200 (2005) 1–4, S. 867–871. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.02.122
- [45] Bouzakis, K.-D.; Skordaris, G.; Mirisidis, I.; Mesomeris, G.; Michailidis, N.; Pavlidou, E.; Erkens, G.: Micro-blasting of PVD Films, an Effective Way to Increase the Cutting Performance of Coated Cemented Carbide Tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54 (2005) 1, S. 95–98. doi:10.1016/S0007-8506(07)60058-4
- [46] Bouzakis, E.: Steigerung der Leistungsfähigkeit PVD-beschichteter Hartmetallwerkzeuge, 1. Aufl. Apprimus Verlag, Aachen 2008
- [47] Bouzakis, K.-D.; Gerardis, S.; Skordaris, G.; Katirtzoglou, G.; Makrimallakis, S.; Klocke, F.; Bouzakis, E.: Effect of dry micro-blasting on PVD-film properties, cutting edge geometry and tool life in milling. ICMCTF 2009 36th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. Surface and Coatings Technology, 204 (2009) 6–7, S. 1081–1086. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.07.018
- [48] Bouzakis, K.-D.; Bouzakis, E.; Skordaris, G.; Makrimallakis, S.; Tsouknidas, A.; Katirtzoglou, G.; Gerardis, S.: Effect of PVD films wet micro-blasting by various Al₂O₃ grain sizes on the wear behaviour of coated tools. PSE 2010 Special Issue Proceedings of the 12th International Conference on Plasma Surface Engineering. Surface and Coatings Technology, 205, Supplement 2 (2011) 0, S. S128-S132
- [49] Bouzakis, K.-D.; Bouzakis, E.; Skordaris, G.; Makrimallakis, S.; Tsouknidas, A.; Katirtzoglou, G.; Gerardis, S.: Effect of PVD films wet micro-blasting by various Al₂O₃ grain sizes on the wear behaviour of coated tools. Surface and Coatings Technology, 205 (2011) , S. S128-S132. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.03.046
- [50] Bouzakis, K.-D.; Klocke, F.; Skordaris, G.; Bouzakis, E.; Gerardis, S.; Katirtzoglou, G.; Makrimallakis, S.: Influence of dry micro-blasting grain quality on wear behaviour of TiAlN coated tools. Wear, 271 (2011) 5–6, S. 783–791
- [51] Bouzakis, K.-D.; Skordaris, G.; Bouzakis, E.; Tsouknidas, A.; Makrimallakis, S.; Gerardis, S.; Katirtzoglou, G.: Optimization of wet micro-blasting on PVD films with various grain materials for improving the coated tools' cutting performance. CIRP Annals, 60 (2011) 1, S. 587–590. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.012
- [52] 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. CIRP Annals, 61 (2012) 2, S. 703–723. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.006
- [53] Bouzakis, K.; Gerardis, S.; Skordaris, G.; Katirtzoglou, G.; Makrimallakis, S.; Klocke, F.; Bouzakis, E.: Effect of dry micro-blasting on PVD-film properties, cutting edge geometry and tool life in milling. Surface and Coatings Technology, 204; Jg. 2009 (2009) 6-7, S. 1081–1086
- [54] Bouzakis, K.; Klocke, F.; Skordaris, G.; Bouzakis, E.; Gerardis, S.; Katirtzoglou, G.; Makrimallakis, S.: Influence of dry micro-blasting grain quality on wear behaviour of TiAlN

coated tools. *Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 271 (2011) 5-6, S. 783–791. doi:10.1016/j.wear.2011.03.010

- [55] Bouzakis, K.; Michailidis, N.; Skordaris, G.; Tsouknidas, A.; Makrimalakis, S.; Bouzakis, E.: Grain size effect of pre- and post-coating treated cemented carbides on PVD films' adhesion and mechanical properties. Einfluss der Karbidkorngröße vor- und nachbehandelter Hartmetallsubstrate auf die Schichthaftung und die mechanischen Eigenschaften der PVD-Beschichtung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 44 (2013) 8, S. 697–703. doi:10.1002/mawe.201300178
- [56] Brodbeck, J.; Rothenaicher, S.; Biermann, D.; Heymann, T.; Wolf, M.: Mit elastisch gebundenen Scheiben die Kanten verrunden. Drillpolishen als neuartiges Kantenpräparationsverfahren. *WB Werkstatt + Betrieb*, 147 (2014) 1/2, S. 84–87
- [57] Bruchhaus, T.: Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen. Schriftenreihe des ISF / Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung, Bd. 13. Vulkan-Verl., Essen 2001
- [58] Buck, G.: Spanformen beim Tiefbohren. *Industrie-Anzeiger*, 91 (1971) 93, S. 2277–2278
- [59] Byelyayev, O.: Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen 2008
- [60] Byrne, G.; Dornfeld, D.; Denkena, B.: Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52 (2003) 2, S. 483–507. doi:10.1016/S0007-8506(07)60200-5
- [61] ceratizit: Premium Hartmetallsorten & Hartmetallstäbe. <https://www.ceratizit.com/de/produkte/staebe-formteile/hartmetallsorten/>. Zugegriffen: 09. Januar 2020
- [62] Chaudhari, A.; Malarvizhi, S.; Woon, K.; Senthil Kumar, A.; Rahman, M.: The effects of pilot hole geometry on tool-work engagement efficacy in deep hole drilling. *Journal of Manufacturing Processes*, 19 (2015) , S. 135–141. doi:10.1016/j.jmapro.2015.06.006
- [63] Cortés Rodríguez, C.: Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Dissertation. Kassel University Press, Kassel 2009
- [64] Cselle, T.: Einfluss von Schneidkantenpräparation und Beschichtung auf das Leistungsvermögen von Präzisionszerspanungswerkzeugen Technologievorsprung durch Werkzeuginnovationen 2008, S 1–8
- [65] Cselle, T.: Entwicklungsrichtungen rotierender Werkzeuge. Schneidstoffe, Beschichtungen, Minimalschmierung. *WB Werkstatt und Betrieb*, 132 (1999) , S. 72–76
- [66] Cselle, T.: Anwendung moderner Beschichtungs-technologien– Quo Vadis 2004? Application of Coatings for Tolling - Quo Vadis 2004? *Vakuum in Forschung und Praxis*, 16 (2004) 3, S. 142–148. doi:10.1002/vipr.200400220
- [67] Czichos, H., Habig, K.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 4. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2015
- [68] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63 (2014) 2, S. 631–653. doi:10.1016/j.cirp.2014.05.009
- [69] Denkena, B.; Friemuth, T.; Fedorenko, S.; Groppe, M.: An der Schneide wird das Geld verdient. Neue Parameter zur Charakterisierung der Schneidengeometrien an Zerspanwerkzeugen. *Fertigung*, 30 (2002) 12, S. 24–26
- [70] Denkena, B.; Friemuth, T.; Spengler, C.; Weinert, K.; Schulte, M.; Kötter, D.: Kantenpräparation an Hartmetall-Werkzeugen. *wt Werkstattstechnik online*, 93 (2003) 3, S. 202–207

- [71] Denkena, B.; Kramer, N.; Siegel, F.; Kästner, J.: Leistungsoptimierung an der Schneidkante. Methoden zur Präparation von Zerspanwerkzeugen. VDI-Z Integrierte Produktion, 149 (2007) II, S. 24–26
- [72] Denkena, B.; Leon L.; Bassett E.: Preparation of Designed Cutting Edge Microgeometries by Simultaneous 5-Axes Brushing. Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN) and EUREKA Brokerage Event, 1-3 October 2008, Kallithea of Chalkidiki, Greece, S. 117-123, 2008, (2008)
- [73] Denkena, B.; Grove, T.; Bergmann, B.: Eine Frage des Radius. WB Werkstatt und Betrieb, 149 (2016) 7/8, S. 58–63
- [74] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 8589-0:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_ - Teil_0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/9500664
- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 513:2014-05, Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden_ - Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen (ISO_513:2012). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2099559
- [76] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 1982DIN 8200:1982-10. Strahlverfahrenstechnik; Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren, (10/1982) DIN 8200:1982-10. Beuth Verlag, Berlin
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2003DIN 8589-17; Fertigungsverfahren Spanen: Teil 17: Gleitspanen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 01.040.25; 25.020; 25.100.70 (09/2003) 8589-17. Beuth Verlag, Berlin
- [78] DIN EN ISO 25178-2:2012-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_ - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft_ - Teil_2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO_25178-2:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_25178-2:2012. Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1754208
- [79] DIN EN ISO 683-2:2018-09, Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle_ - Teil_2: Legierte Vergütungsstähle (ISO_683-2:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_683-2:2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2862242
- [80] Drnovšek, A.; Panjan, P.; Panjan, M.; Čekada, M.: The influence of growth defects in sputter-deposited TiAlN hard coatings on their tribological behavior. Surf. Coat. Technol., 288 (2016) , S. 171–178. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.01.021
- [81] Effgen, C.: Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen Schleifwerkzeugen. Dissertation. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, 2018, Band 1, Kaiserslautern 2018
- [82] Effgen, C.; Kirsch, B.; Aurich, J.: Schneidkantenpräparation mithilfe elastisch gebundener Schleifscheiben. Neues Verfahren zur Präparation direkt in der Werkzeugmaschine. VDI-Z, (2013) II, S. 22–24
- [83] Eichler, R.: Prozesssicherheit beim Einlippenbohren mit kleinsten Durchmessern. Dissertation. Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen, Bd. 9, Stuttgart 1996
- [84] Ellermeier, A.: Methode zur Standwegprognose für lange Vollhartmetall-Spiralbohrer zum Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008. Schriftenreihe des PTW. Shaker, Aachen 2008
- [85] Enderle, K.-D.: Reduzierung des Mittenverlaufs beim Einlippentiefbohren durch Kühlmitelpulsation. Dissertation, Universität Stuttgart 1994

- [86] Enomoto, T.; Sugihara, T.; Yukinaga, S.; Hirose, K.; Satake, U.: Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting. *CIRP Annals*, 61 (2012) 1, S. 571–574
- [87] Erkens, G.; Cremer, R.; Hamoudi, T.; Bouzakis, K.-D.; Mirisidis, I.; Hadjiyiannis, S.; Skordaris, G.; Asimakopoulos, A.; Kombogiannis, S.; Anastopoulos, J.; Efstathiou, K.: Properties and performance of high aluminum containing (Ti,Al)N based supernitride coatings in innovative cutting applications. *Surface and Coatings Technology*, 177-178 (2004) , S. 727–734. doi:10.1016/j.surfcoat.2003.08.013
- [88] Ertürk, E.; Heuvel, H.-J.: Adhesion and structure of TiN arc coatings. *Thin Solid Films*, 153 (1987) 1-3, S. 135–147. doi:10.1016/0040-6090(87)90177-5
- [89] Ertürk, E.; Heuvel, H.-J.; Dederichs, H.-G.: Comparison of the steered arc and random arc techniques. *Surface and Coatings Technology*, 39-40 (1989) , S. 455–464. doi:10.1016/S0257-8972(89)80007-6
- [90] Esser, P.: Ein neuartiges Konzept von PVD-Beschichtungsanlagen für den industriellen Einsatz. Dissertation, RWTH Aachen 1994
- [91] Felderhoff, J.: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle. Dissertation. Schriftenreihe des ISF, Bd. 60. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2012
- [92] FEPA: FEPA Superabrasives Standards, FEPA 61-2009
- [93] Fink, P.: Spanbildung und Bohrungsqualität beim Tiefbohren: Zerspanungsuntersuchungen zur Verbesserung der Spanabführung, der Bohrungsqualität sowie der Wirtschaftlichkeit beim Tiefbohren mit Einlippen-Werkzeugen. Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Grossmann 1977
- [94] Fox-Rabinovich, G.; Gershman, I.; Yamamoto, K.; Aguirre, M.; Covelli, D.; Arif, T.; Aramesh, M.; Shalaby, M.; Veldhuis, S.: Surface/interface phenomena in nano-multilayer coating under severing tribological conditions. *Surf Interface Anal*, 49 (2017) 7, S. 584–593. doi:10.1002/sia.6196
- [95] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Habilitation. Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 615. VDI-Verlag, Düsseldorf 2002
- [96] Fritsch, A.: Schleifen von Cermets. (Nur Auszüge). IFW-Produktionstechnik, Bd. 429. VDI-Verl., Düsseldorf 1997
- [97] Fuß, H.: Aspekte zur Beeinflussung der Qualität von BTA-Tiefbohrungen. Dissertation, Universität Dortmund 1986
- [98] Gegenheimer, H.: Verbesserte Finishbearbeitung von Werkzeugen und Werkstücken. *MM - Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin*, (2012) 8, S. 78–81
- [99] Glaser, J.-D.: Einlippenbohren von hochwarmfesten, schwer zerspanbaren Nickelbasislegierungen. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2010
- [100] GRIFFITHS, B.; GRIEVE, R.: The role of the burnishing pads in the mechanics of the deep drilling process. *International Journal of Production Research*, 23 (1985) 4, S. 647–655. doi:10.1080/00207548508904735
- [101] Grigoratos, T.; Fontaras, G.; Giechaskiel, B.; Zacharof, N.: Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 201 (2019) , S. 348–359. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.042

- [102] Gudmundsson, J.: The high power impulse magnetron sputtering discharge as an ionized physical vapor deposition tool. *Vacuum*, 84 (2010) 12, S. 1360–1364. doi:10.1016/j.vacuum.2009.12.022
- [103] Guter, T.: Schneidkantenpräparation an Wendeschneidplatten Schneidkantenpräparation. In: Tikal F (Hrsg). Ziele, Verfahren und Messmethoden ; Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel Univ. Press, Kassel, S 71–86 2009
- [104] Hagemeyer, C.: Eine tribologische Studie zum Einsatz von Führungsleisten aus Keramik und Cermet beim BTA-Tiefbohren. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Bd. 293. VDI-Verl., Düsseldorf 1993
- [105] Harlin, P.; Carlsson, P.; Bexell, U.; Olsson, M.: Influence of surface roughness of PVD coatings on tribological performance in sliding contacts. Proceedings of the 33rd International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films ICMCTF 2006 The 33rd International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. Surface and Coatings Technology, 201 (2006) 7, S. 4253–4259. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.08.103
- [106] Harlin, P.; Bexell, U.; Olsson, M.: Influence of surface topography of arc-deposited TiN and sputter-deposited WC/C coatings on the initial material transfer tendency and friction characteristics under dry sliding contact conditions. *Surface and Coatings Technology*, 203 (2009) 13, S. 1748–1755
- [107] Hartmann, H.: Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2016
- [108] Hauger, R.: Untersuchung des Stabilitätsverhaltens von Einlippenbohrwerkzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart 1992
- [109] Heilmann, M.: Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren. Prozessgestaltung und Verfahrenskombination. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2012
- [110] Heisel, U.; Stortchak, M.; Eisseler, R.: Determination of Cutting Parameters in Deep Hole Drilling with Single-Fluted Gun Drills of Smallest Diameters. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 5 (2003) 1, S. 51–54
- [111] Heisel, U.; Rothmund, J.; Eisseler, R.; Kumanuvong, N.: Spanformbeeinflussung durch Schwingungseinkopplung beim Einlippenbohren. *Fertigungstechnik*, 93 (2003) 10, S. 486–489
- [112] Heisel, U.; Zhang, M.; Eisseler, R.: Einlippentiefbohren unter HSC-Bedingungen Hochgeschwindigkeitsspanen metallischer Werkstoffe. In: Tönshoff HK (Hrsg). [das Buch dokumentiert die Ergebnisse des SPP 1057 der DFG]. Wiley-VCH-Verl., Weinheim, S 255–266 2005
- [113] Heiß, A.: Schartigkeit von Werkzeugschneiden. Theorie und Messung derselben mittels Saphir-Meßschneide. *Werkstattstechnik und Maschinenbau*, 41 (1951) 6, S. 233–238
- [114] Heymann, T.: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2015. Schriftenreihe des ISF / Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung, Bd. 77. Vulkan-Verl., Essen 2015
- [115] Hinz, H.: Gleitschleifen. Kontakt & Studium, Bd. 65. Expert-Verlag, Grafenau/Württ. 1980

- [116] Holzschuh, H.: Verschleißschutzschichten in der Werkzeugindustrie. Anti-wear protective layers in tool industry 23. Hagener Tagungsband 2007. In: Kolaska H (Hrsg). Pulvermetallurgie für hochpräzise Bauteile und dichte Hochleistungswerkstoffe ; Vorträge und Ausstellerbeiträge des Hagener Symposiums am 29. und 30. November 2007 in Hagen, Bd. 23. Heimdall Verl., Rheine, S 209–227 2007
- [117] Horowitz, I.: Die Grundlagen der Strahltechnik. Band I: Die Grundlagen der Strahltechnik, 2. Aufl. Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln, Handbuch über Strahltechnik und Strahlanlagen / I. Horowitz ; Bd. 1. Vulkan-Verl., Essen 1982
- [118] Hübert, C.: Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schafffräsern. Dissertation. Fraunhofer Verlag, Stuttgart 2012
- [119] Inspektor, A.; Salvador, P.: Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. *Surface and Coatings Technology*, 257 (2014) , S. 138–153. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.08.068
- [120] Kawasegi, N.; Sugimori, H.; Morimoto, H.; Morita, N.; Hori, I.: Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. *Precision Engineering*, 33 (2009) 3, S. 248–254
- [121] Kirschner, M.: Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2016
- [122] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. VDI-Buch. Springer Berlin, Berlin, s.l., Berlin, s.l. 2017
- [123] Klocke, F.; Schroeder, T.; Bouzakis, E.; Klein, A.: Manipulation of coating and subsurface properties in reconditioning of WC–Co carbide cutting tools. ICMCTF 2007 34th International Conference and Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2007). *Surface and Coatings Technology*, 202 (2007) 4–7, S. 1194–1198. doi:10.1016/j.surfcoat.2007.06.023
- [124] Klocke, F.; Gerschwiler, K.; Abouridouane, M.: Size effects of the tool edge radius on specific cutting energy and chip formation in drilling *Proceedings of the 2nd ICNFT: 2nd International Conference on New Forming Technology*. In: Vollertsen F, Yuan S (Hrsg). Bremen, Germany, September 20 - 21, 2007. BIAS Verl., Bremen, S 499–509 2007
- [125] Klocke, F.; Gorgels, C.; Bouzakis, E.; Stuckenberg, A.: Tool life increase of coated carbide tools by micro blasting. *Production Engineering*, (2009) 3. doi:10.1007/s11740-009-0173-1
- [126] Koehler, W.: Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess. Dissertation, Dortmund 2004
- [127] Kolaska, H.: Pulvermetallurgie der Hartmetalle. FPM Fachverband Pulvermetallurgie, Hagen 1992
- [128] Kolaska, H.: Hartmetall - gestern, heute und morgen. *Metall: Fachzeitschrift für Metallurgie*, 61 (2007) 12, S. 825–832
- [129] Kolaska, H.; Dreyer, K.: Hartmetalle, Cermets und Keramiken als verschleißbeständige Werkstoffe. *Metall*, 45 (1991) 3, S. 224–235
- [130] Kötter, D.: Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen, Bd. 36. Vulkan-Verlag, Essen 2006

- [131] Krebs, E.; Wolf, M.; Biermann, D.; Tillmann, W.; Stangier, D.: High-quality cutting edge preparation of micromilling tools using wet abrasive jet machining process. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 12 (2018) 1, S. 45–51. doi:10.1007/s11740-017-0787-7
- [132] Krieg, T.; Kammermeier, D.: Auswirkung von Oberflächenbehandlungsverfahren bei beschichteten Schneidkörpern und VHM-Werkzeugen auf die Leistungsfähigkeit des Zerspanprozesses 5. Schmalkalder Werkzeugtagung 2002 2002
- [133] Kuemmel, J.: Detaillierte Analyse der Aufbauschneidenbildung bei der Trockenzer-spannung von Stahl C45E mit Berücksichtigung des Werkzeugverschleisses. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie,
- [134] Kuppinger, G.: Strahlen von Oberflächen. *Metall - Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft*, 44 (1990) 10, S. 932–935
- [135] Lemmer, O.; Cremer, R.; Leyendecker, T.; Frank, M.: Entwicklung neuartiger kerami-scher Schichten mittels plasmagestützter Verfahren: Von der Idee zur Anwendung
- [136] Löbbe, H.: Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2003, Universität Dortmund,
- [137] Löwenstein, A.: Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkan-tenpräparation mittels Tauchgleitlappen. *Berichte aus dem Produktionstechnischen Zent-rum Berlin*. Fraunhofer-Verl, Stuttgart 2014
- [138] Lugscheider, E.; Bobzin, K.: The influence on surface free energy of PVD-coatings. *Surface and Coatings Technology*, 142-144 (2001) , S. 755–760. doi:10.1016/S0257-8972(01)01315-9
- [139] Maiss, O.; Grove, T.; Denkena, B.: Influence of asymmetric cutting edge roundings on surface topography. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 11 (2017) 4-5, S. 383–388. doi:10.1007/s11740-017-0742-7
- [140] Maldaner, J.: Verbesserung des Zerspanverhaltens von Werkzeugen mit Hartmetall-Schneidelementen durch Variation der Schleifbearbeitung. Dissertation. Kassel University Press, Kassel 2008
- [141] Mathia, T.; Pawlus, P.; Wiczorowski, M.: Recent trends in surface metrology. *Wear*, 271 (2011) 3-4, S. 494–508
- [142] Mertz, K., Jehn, H.: *Praxishandbuch moderne Beschichtungen*. Advanced surface coatings. Hanser, München 2001
- [143] Mohlfeld, A.: Trockenbohren mit PVD-beschichteten Hartmetallwerkzeugen. Disserta-tion. *Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen*, Universität Hannover. IFW, Nr. 564. VDI Verlag, Düsseldorf 2000
- [144] Müller, P.: Schichtsysteme für Bohrwirkzeuge Spanende Fertigung. In: Weinert K (Hrsg), 3. Aufl. Vulkan-Verl., Essen, 277 286 2001
- [145] N., N.: Durchbruch geschafft. *Fertigung*, (2018) 3, S. 2–4
- [146] Nickel, J.; Baak, N.; Walther, F.; Biermann, D.: Influence of the Feed Rate in the Single-Lip Deep Hole Drilling Process on the Surface Integrity of Steel Components Advanced surface enhancement. In: Itoh S, Shukla S (Hrsg). *Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE 2019)-Research towards in-dustrialisation*, Bd. 5. Springer, Singapore, S 198–212 2020

- [147] Nouveau, C.; Labidi, C.; Collet, R.; Benlatreche, Y.; Djouadi, M.-A.: Effect of surface finishing such as sand-blasting and CrAlN hard coatings on the cutting edge's peeling tools' wear resistance. *Wear*, 267 (2009) 5-8, S. 1062–1067
- [148] Overholser, R.W.; Stango, R.J.; Fournelle, R.A.: Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (2003) 2, S. 193–202. doi:10.1016/S0890-6955(02)00112-8
- [149] Patz, M.: Mikrostrukturierung von Präzisionswerkzeugen. Geeignete Präparation erhöht Standzeit und Leistungsfähigkeit. *VDI-Z Integrierte Produktion Special*, 2007 (2007) I Werkzeuge, S. 62–65
- [150] Pflegar, F.: Kräfte an Schneide und Führungsleiste von Einlippen-Tiefbohrwerkzeugen. *Werkzeugmaschine international*, 1974 (1974) 6, S. 51–57
- [151] Preiß, P.; Cselle, T.: Einfluss von Schneidenmikrogeometrie und Beschichtung auf das Leistungsvermögen von Präzisionszerspanwerkzeugen. *Diamond Business*, (2009) 2, S. 6–14
- [152] Rafflenbeul, G.: Das Schleifen von Hartmetall mit Diamant-Schleifscheiben 1958
- [153] RAMAKRISHNA RAO, P.; SHUNMUGAM, M.: Accuracy and surface finish in BTA drilling. *International Journal of Production Research*, 25 (1987) 1, S. 31–44. doi:10.1080/00207548708919821
- [154] Rass I J; Feldhege M; Lugscheider E: Industrielle Anwendung der PVD-Technik. Industrial application of the PVD technique. *Moderne Beschichtungsverfahren*. In: Steffens H-D (Hrsg). [Vortragstexte eines Fortbildungsseminars der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V.], 2. Aufl. DGM Informationsges.-Verl., Oberursel 1996
- [155] Rech, J.: Cutting edge preparation and surface issues Schneiden - Gestaltung und Oberflächenbeschaffenheit. *Smart Solutions for Metal Cutting*, HSS Forum Conference - International High Speed Steel Research Forum, 2005, Fortschrittliche Lösungen für die Metallzerspanung, HSS Forum Konferenz - International High Speed Steel Research Forum, 2005; S. 0, (2005)
- [156] Rehe, M.: Herleitung prozessbezogener Kenngrößen der Schneidkantenverrundung im Fräsprozess. *Berichte aus dem IFW*, Bd. 2015,3. PZH Verl., TEWISS - Technik u. Wissen GmbH, Garbsen 2015
- [157] Risse, K.: Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl. *Dissertation*. Shaker Verlag, Aachen 2006
- [158] Rosenkranz, A.: Tribologie an Oberflächen mit maßgeschneidertem topographischem Design, Universität des Saarlandes 2014
- [159] Rothenaicher, S.: Werkzeugschleifen - Kontrollierte Schneidkantenverrundung von Rothenaicher zusammen mit Artifex - Der Trick mit der Scheibe. <http://www.fertigung.de/2012/03/der-trick-mit-der-scheibe/>
- [160] Sakuma, K.; Taguchi, K.; Katsuki, A.; Takeyama, H.: Self-Guiding Action of Deep-Hole-Drilling Tools. *CIRP Annals*, 30 (1981) 1, S. 311–315. doi:10.1016/S0007-8506(07)60948-2
- [161] Sanders, D.; Anders, A.: Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium. *Surface and Coatings Technology*, 133-134 (2000) , S. 78–90. doi:10.1016/S0257-8972(00)00879-3

- [162] Schedler, W.: Hartmetall für den Praktiker. Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe. VDI-Verl, Düsseldorf 1988
- [163] Schnabel, D.; Özkaya, E.; Biermann, D.; Eberhard, P.: Modeling the motion of the cooling lubricant in drilling processes using the finite volume and the smoothed particle hydrodynamics methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 329 (2018), S. 369–395. doi:10.1016/j.cma.2017.09.015
- [164] Schnabel, D.; Özkaya, E.; Biermann, D.; Eberhard, P.: Transient Simulation of Cooling-Lubricant Flow for Deep-Hole Drilling-Processes. *Procedia CIRP*, 77 (2018), S. 78–81
- [165] Schultheiss, F.; Fallqvist, M.; M'Saoubi, R.; Olsson, M.; Ståhl, J.-E.: Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting—Part II Theoretical calculations of contact conditions. *Wear*, 298-299 (2013), S. 23–31
- [166] Skordaris, G.; Bouzakis, K.-D.; Kotsanis, T.; Charalampous, P.; Bouzakis, E.; Lemmer, O.; Bolz, S.: Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of nano-structured multilayer PVD coated tools. *Surface and Coatings Technology*, 307 (2016), S. 452–460. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.09.026
- [167] Skordaris, G.; Bouzakis, K.; Kotsanis, T.; Charalampous, P.; Bouzakis, E.; Breidenstein, B.; Bergmann, B.; Denkena, B.: Effect of PVD film's residual stresses on their mechanical properties, brittleness, adhesion and cutting performance of coated tools. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 18 (2017), S. 145–151. doi:10.1016/j.cirpj.2016.11.003
- [168] Spielvogel, E.: Strahlmittel, heute so aktuell wie gestern. Einsatz der metallischen Strahlmittel. *Abrasives, today so modern as yesterday. Application of metallic abrasives. Draht. Fachzeitschrift für die Drahtherstellung und Drahtverarbeitung*, 41 (1990) 4, S. 513–516
- [169] Sprute, T.; Tillmann, W.; Grisales, D.; Selvadurai, U.; Fischer, G.: Influence of substrate pre-treatments on residual stresses and tribo-mechanical properties of TiAlN-based PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 260 (2014), S. 369–379
- [170] Steffens, H.-D.; Mack, M.; Moehwald, K.; Reichel, K.: Reduction of droplet emission in random arc technology. *Surface and Coatings Technology*, 46 (1991) 1, S. 65–74. doi:10.1016/0257-8972(91)90150-U
- [171] Streicher, P.: Langschäftige Werkzeuge zum Tiefbohren – Ihre Problematik und deren Bewältigung. Dissertation, Universität Stuttgart 1973
- [172] Stürenburg, B.: Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneeintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen. Dissertation. *Produktionstechnische Berichte aus dem FBK*, Bd. 2009,2, Kaiserslautern 2009
- [173] Stürenburg, H.: Zum Mittenverlauf beim Tiefbohren. Ursachen, Messung und Verringerung der Mittenabweichung von Bohrungen in der Metallbearbeitung. Dissertation. *Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart*, Bd. 31. Grossmann, Stuttgart 1983
- [174] Süess, B.; Westermann, H.; Schmidt, J.: Stand und neue Aspekte der Hartmetallentwicklung. *Präzisionswerkzeuge als Innovationsmotoren für moderne Zerspanprozesse, Schmalkalder Werkzeugtagung*, 11, (2014), S. 16/1-16/8
- [175] Sugihara, T.; Enomoto, T.: Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture. *Precision Engineering*, 36 (2012) 2, S. 229–237

- [176] Sugihara, T.; Singh, P.; Enomoto, T.: Development of novel cutting tools with dimple textured surfaces for dry machining of aluminum alloys. *Procedia Manufacturing*, 14 (2017) , S. 111–117
- [177] Suresh, S.; Giannakopoulos, A.: A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation. *Acta Materialia*, 46 (1998) 16, S. 5755–5767. doi:10.1016/S1359-6454(98)00226-2
- [178] Terwey, I.: Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen. Dissertation. Schriftenreihe des ISF, Bd. 63. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2011
- [179] Thiel, W.: Präparationsverfahren Magnetfinishing Schneidkantenpräparation. In: Tikal F (Hrsg). Ziele, Verfahren und Messmethoden ; Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel Univ. Press, Kassel, S 53–69 2009
- [180] Tkadletz, M.; Mitterer, C.; Sartory, B.; Letofsky-Papst, I.; Czettl, C.; Michotte, C.: The effect of droplets in arc evaporated TiAlTaN hard coatings on the wear behavior. *Surface and Coatings Technology*, 257 (2014) , S. 95–101
- [181] Tönshoff, H.K.; Spintig, W.: Einsatz von Feinstkornhartmetallen in der spanenden Fertigung, S 207–219
- [182] Tönshoff, H.K.; Hessel, D.; Sprengler, C.: Schleifen von Werkzeugen Jahrbuch Schleifen, Honen, Lappen und Polieren. In: Hoffmeister H-W (Hrsg). Verfahren und Maschinen, 60. Aufl. Vulkan-Verlag, Essen, S 152–160 2002
- [183] Tönshoff, H.; Mohlfeld, A.: Surface treatment of cutting tool substrates. International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (1998) 5–6, S. 469–476. doi:10.1016/S0890-6955(97)00091-6
- [184] Tönshoff, H.; Blawit, C.; Rie, K.T.; Gebauer, A.: Effects of surface properties on coating adhesion and wear behaviour of PACVD-coated cermets in interrupted cutting. *Surface and Coatings Technology*, 97 (1997) 1-3, S. 224–231. doi:10.1016/S0257-8972(97)00134-5
- [185] Tönshoff, H.; Mohlfeld, A.; Gey, C.; Winkler, J.: Surface modification of cemented carbide cutting tools for improved adhesion of diamond coatings. *Surface and Coatings Technology*, 108–109 (1998) 0, S. 543–550. doi:10.1016/S0257-8972(98)00634-3
- [186] Tönshoff, H.; Mohlfeld, A.; C; Winkler, J.: Mechanical pretreatment for improved adhesion of diamond coatings. *Surface and Coatings Technology*, 116–119 (1999) 0, S. 440–446. doi:10.1016/S0257-8972(99)00103-6
- [187] Uetz, H.; Khosrawi, M.: Strahlverschleiß. *AUFBEREITUNGSTECHNIK*, (1980) 5, S. 253–266
- [188] Uhlmann, E.; Oberschmidt, D.; Kuche, Y.; Löwenstein, A.: Cutting Edge Preparation of Micro Milling Tools. *Procedia CIRP*, 14 (2014) 0, S. 349–354. doi:10.1016/j.procir.2014.03.083
- [189] Uhlmann, E.; Stawiszynski, B.; Leyens, C.; Heinze, S.; Sammler, F.: Hard Turning of Hot Work and Cold Work Steels with HiPIMS and DCMS TiAlN Coated Carbide Inserts. *Procedia CIRP*, 46 (2016) , S. 591–594. doi:10.1016/j.procir.2016.03.231
- [190] VDI 1999Qualitätssicherung bei PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtungen: Fertigungsabläufe und -tätigkeiten, 03.120.10; 25.220.30 (10/1999) 3824. VDI-Verlag, Düsseldorf

- [191] VDI 2002 Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtung, 25.220.99 (03/2002) 3824. VDI-Verlag
- [192] VDI 2006 Tiefbohrverfahren, 25.080.40 (03/2006) 3210. VDI Verlag, Düsseldorf
- [193] VDI 2014 Tiefbohren mit Einlippenbohrern, 25.080.40 (04/2014) 3208. VDI Verlag, Düsseldorf
- [194] VDI 2015 Tiefbohren auf Bearbeitungszentren, 25.080.40 (01/2015) 3211. VDI Verlag, Düsseldorf
- [195] VDMA 2019 Konjunkturgrafiken zur Jahrespressekonferenz. https://pwz.vdma.org/documents/105957/28593300/PK%202019-01-16_Grafiken_1548163439335.pdf/a47269c8-035b-540e-b9d8-cdaa4e76785a. Zugegriffen: 14. Januar 2020
- [196] Ventura, C.E.H.; Köhler, J.; Denkena, B.: Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6 (2013) 4, S. 246–253. doi:10.1016/j.cirpj.2013.07.005
- [197] Vereschaka, A.; Grigoriev, S.: Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nano-structured coatings. *Wear*, 378-379 (2017), S. 43–57. doi:10.1016/j.wear.2017.01.101
- [198] Weinert, K.; Willsch, C.; Schneider, M.: Influence of grinding on the quality of the cutting edge. *Production Engineering*, 3 (1996) II, S. 49–52
- [199] Weinert, K.; Schneider, M.; Willsch, C.: Werkzeugschleifen - ein richtungsweisender Fertigungsprozess. *VDI-Z Integrierte Produktion*, 138; Jg. 1996 (1996) 1/2, S. 46–49
- [200] Weinert, K.; Wittkop, S.; Felderhoff, J.: Tiefbohren nichtrostender Stähle. Einsatzverhalten von teil- und vollbeschichteten Werkzeugen. *VDI-Z*, (2006) Spezial Werkzeuge August, S. 62–65
- [201] Wittkop, S.: Einlippentiefbohren korrosionsbeständiger Stähle unter Einsatz von Werkzeugen mit unterschiedlichen Umfangsformen Spanende Fertigung. In: Weinert K (Hrsg). *Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*, 4. Aufl, Bd. 4. Vulkan Verl., Essen, S 392–402 2005
- [202] Wittkop, S.: Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle. Dissertation, Universität Dortmund 2007
- [203] Wolf, M.: Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern, Technische Universität Dortmund 2019
- [204] Wyen, C.-F.: Rounded cutting edges and their influence in machining titanium. Dissertation, ETH Zürich 2011
- [205] Yen, Y.-C.; Jain, A.; Altan, T.: A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries. *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2004) 1, S. 72–81. doi:10.1016/S0924-0136(03)00846-X
- [206] Zanger, F.; Gerstenmeyer, M.; Weule, H.: Identification of an optimal cutting edge microgeometry for Complementary Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66 (2017) 1, S. 81–84. doi:10.1016/j.cirp.2017.04.026
- [207] Zeng, J.; Kim, T.: A Study of brittle erosion Mechanism applied to abrasive Waterjet Processes Jet cutting technology. In: Saunders D (Hrsg). [proceedings of the 10th international symposium (Amsterdam, The Netherlands, 31 October - 2 November 1990). Elsevier Applied Science, London, S 115–133 1991

- [208] Zhang, S.; Zhang, X.: Toughness evaluation of hard coatings and thin films. *Thin Solid Films*, 520 (2012) 7, S. 2375–2389. doi:10.1016/j.tsf.2011.09.036
- [209] Zimmer, O.; Siemroth, P.; Berthold, J.; Hilgers, H.; Hentsch, W.: Gefilterte Bogenbeschichtung - alte Probleme und neue Lösungen Filtered cathodic arc deposition - long standing problems, new solutions. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 15; Jg. 2003 (2003) 4, S. 202–208

Studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation sind folgende studentische Arbeiten ausgelegt und betreut worden. Ausgewählte Daten und Ergebnisse dieser Arbeiten finden inhaltliche Verwendung. Den Studierenden möchte ich meinen ausdrücklichen Dank für ihren Einsatz und Fleiß sowie für den wissenschaftlichen Austausch aussprechen.

Knop, J.: *Untersuchungen eines neuartigen Präparationsverfahrens für Einlippentiefbohrwerkzeuge*. Fachwissenschaftliche Projektarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 5.2., 6.1. & 7.1.

Peters, J. & Weber, F.: *Analyse des Einsatzverhaltens präparierter Einlippentiefbohrwerkzeuge*. Fachwissenschaftliche Projektarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1.

Peters, J.: *Untersuchungen zum Einsatz von schneidkantenpräparierten Einlippentiefbohrwerkzeugen im teilbeschichteten Zustand*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1.

Ratuschny, A.: *Analyse des Einflusses verschiedener Präparationsverfahren auf die Oberflächentopographie und Werkzeugkontur von Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2016. Verwendet in Kapitel 5.2. & 6.1.

Schmolke, L. & Wagner, S.: *Untersuchungen zum Einsatzverhalten unterschiedlich präparierter Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Fachwissenschaftliche Projektarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1.

Schmolke, L.: *Weiterführende Untersuchungen zum Einsatzverhalten präparierter, voll- und teilbeschichteter Einlippentiefbohrwerkzeuge*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1. & 8.2.

Spaetling, F.: *Untersuchungen verschiedener Präparationsmethoden zur Beeinflussung der Oberflächentopographie und der Umfangsgestalt am Beispiel von Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2018. Verwendet in 6.1., 7.1. & 7.2.

Spaetling, F.: *Potentialanalyse gestaltangepasster Einlippenbohrer bei der Zerspanung von Dieselkomponenten aus Vergütungsstahl*. Masterarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 6.1, 7.1, 8.1. & 8.3.

Wagner, S.: *Untersuchungen zum Einsatzverhalten unterschiedlich präparierter Einlippentiefbohrwerkzeuge an voll- und teilbeschichteten Werkzeugen mit variierender Prozessstrategie*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1.

Weber, F.: *Untersuchungen zum Einfluss einer Verrundung des Stirnfasenübergangs auf das Verschleißverhalten sowie die Bohrungsgüte beim Tiefbohren des Vergütungsstahls 50CrMo4*. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2019. Verwendet in 8.1.

Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H3 Surmann, T.: Simulation der Dynamik von Dreh- und Fräsprozessen. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8794-2
- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 978-3-8027-8760-9
- Band 102 Kansteiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimpregnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8918-2
- Band 101 Fuß, M.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: *Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: *Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: *Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3802789120
- Band 96 Tiffe, M.: *Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: *Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschälenschleifens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8914-4
- Band 94 Böhmer, J. C.: *Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzschichtstrukturen beim Honen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN: 978-3-8027-8799-7
- Band 93 Hense, R.: *Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Verdichterschaukeln*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: *Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelement und funktionaler Oberflächenstrukturen*.

- Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8797-3
- Band 91 Habermeier, J.: *Technologische Untersuchungen der Bearbeitung nickelreduzierter Stahlgusslegierungen für Turbinengehäuse*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: *Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8795-9
- Band 89 Özkaya, E.: *FEM-based software system for the efficient 3D tapping simulation and tool optimization using CFD simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5
- Band 88 Abrahams, H.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8792-8
- Band 87 Kirschner, M.: *Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Mikrofinishen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4
- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8
- Band 83 Hartmann, H.: *Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0
- Band 81 Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8784-3
- Band 79 Steiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edelstahl X5CrNi18-10*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2

- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: *Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: *Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9
- Band 73 Schlenker, J.: *Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: *Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: *Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1
- Band 70 Sacharow, A.: *Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4
- Band 69 Baschin, A.: *Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: *Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- Band 66 Heilmann, M.: *Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6
- Band 65 Scheidler, A. V.: *Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3
- Band 64 Pantke, K.: *Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0

- Band 63 Terwey, I.: *Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9
- Band 62 Würz, E.: *Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: *Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- Band 60 Felderhoff, J. F.: *Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2
- Band 59 Kessler, N.: *Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8
- Band 58 Paffrath, K.-U.: *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1
- Band 57 Faraz, A.: *Experimental Study on Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4
- Band 56 Hossam, M.: *Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1
- Band 55 Kersting, P.: *Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7
- Band 54 Marschalkowski, K.: *Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- Band 53 Weckerle, T.: *Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0
- Band 52 Kahleyß, F.: *Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünfachsigen Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8753-9
- Band 51 Mohn, T.: *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5
- Band 49 Rautenberg, J.: *Simultane fünfachsige Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbauteilen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6

- Band 48 Enk, D.: *Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräswerkzeugen zur HSC-Bearbeitung*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1
- Band 45 Kahnis, P.: *Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4
- Band 44 Noyen, M.: *Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7
- Band 43 Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0
- Band 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- Band 41 Kress, J.: *Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6
- Band 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- Band 39 Webber, O.: *Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3
- Band 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von Ni-Ti*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9
- Band 36 Kötter, D.: *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
- Band 35 Hesterberg, S.: *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
- Band 34 Damm, P.: *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

- Band 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsige Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1
- Band 32 Stautner, M.: *Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4
- Band 31 Peters, C.: *Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8731-5, ISBN 978-3-8027-8731-7
- Band 30 Hagedorn, M.: *Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen – Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8730-7, ISBN 978-3-8027-8730-0
- Band 29 Kalveram, M.: *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
- Band 28 Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5
- Band 27 Loichinger, A.: *Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 26 Du, S.: *Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 25 Schulte, M.: *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0
- Band 24 Lange, M.: *Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8724-2
- Band 23 Guntermann, G.: *Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeug- und Formenbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4
- Band 22 Johlen, G.: *Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8722-6
- Band 21 Schwietering, C.: *Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8
- Band 20 Zabel, A.: *Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräs- werkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-x
- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1

- Band 18 Löbbecke, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- Band 17 Finke, M.: *Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längschleifens von Futterteilen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X
- Band 16 Liedschulte, M.: *Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- Band 15 Buschka, M.: *Formgedächtnistechnik – Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3
- Band 14 Meng, J.: *Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 13 Bruchhaus, T.: *Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 12 Mehnen, J.: *Evolutionäre Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 11 Schulte, K.: *Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 10 Schroer, M.: *Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0
- Band 9 Schneider, M.: *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 8 Albersmann, F.: *Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9
- Band 7 Mumm, A.: *Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6
- Band 6 Gillmeister, F.: *Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4
- Band 5 Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, C.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1

- Band 2 Friedhoff, J.: *Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3
- Band 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5