



106

Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von
Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718

Bücker



tu technische universität
dortmund

Technische Universität Dortmund
44221 Dortmund

Institut für Spanende Fertigung
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann
Baroper Straße 303
44227 Dortmund

Tel.: 0231 755-2782
Fax: 0231 755-5141
E-Mail: dirk.biermann@tu-dortmund.de
Internet: www.isf.de

Milan Bücker

Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718

Schriftenreihe des ISF
Hrsg.: Dirk Biermann

ISBN 978-3-8027-8922-9

 **Vulkan Verlag**

 **ISF**

**Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung
von Hochleistungswerkzeugen für die
Bohrbearbeitung von Inconel 718**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Milan Bücker, M.Sc.
aus Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 31. August 2021
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Dortmund, 2021

Bibliografische Information 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: 978-3-8027-8922-9

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Meinem Doktorvater, dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann, danke ich für seine stetige Förderung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und vor allem für den großartigen persönlichen Einsatz, mit dem er die Leitung unseres Instituts lebt. Dem Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover, Herrn Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, gilt mein Dank für die Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund, für die Übernahme des zweiten Koreferats sowie Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Teile der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts "Untersuchungen zur Optimierung der Schneidengestalt von VHM-Wendelbohrern für die Bearbeitung von warmfesten Nickelbasislegierungen am Beispiel von Inconel 718" entstanden, für dessen Förderung ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken möchte. Weiterhin danke ich der Gühring KG, die zur praktischen Umsetzung meiner experimentellen Untersuchungen beigetragen hat.

Mein herzlicher Dank gilt meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am ISF, die ihr umfangreiches Fachwissen mit mir geteilt, mich stets tatkräftig unterstützt und mir auch sonst nie eine Bitte abgeschlagen haben. Das hervorragende Miteinander und die allzeit vorherrschende Hilfsbereitschaft an unserem Institut werde ich niemals vergessen. Hier habe ich nicht nur tolle Mitstreitende, sondern auch gute Freunde gewonnen, für die ich sehr dankbar bin. Ich möchte auch meinen studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Abschlussarbeitern für die gute Zusammenarbeit und ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit danken.

Im Privaten danke ich meinen Freunden und vor allem meiner Familie, die mir meinen Weg zur Promotion ermöglicht und mich auf diesem stets bestärkt hat. Menschen wie euch um sich zu haben, kann ich jedem nur wünschen.

Kurzfassung

Zum Fertigen von Bohrungen geringer Durchmesser in Bauteilen aus hochwarmfesten Nickelbasislegierungen kommen in der Regel Werkzeuge aus Hartmetall zum Einsatz. Da diese eine begrenzte Warmfestigkeit aufweisen, müssen die im Prozess auftretenden Temperaturen gering gehalten werden, um vorzeitigem Werkzeugverschleiß und einer Beeinträchtigung der Bohrungsqualität vorzubeugen. Durch die erschwerte Zugänglichkeit der Wirkstelle beim Bohren sind die Möglichkeiten zur effektiven Prozesskühlung zusätzlich eingeschränkt. Aus diesem Grund können bislang nur moderate Schnittwerte eingesetzt werden, wodurch die Prozessproduktivität limitiert ist. Frühere Arbeiten konnten jedoch aufzeigen, dass die Einbringung eines Absatzes in die Freifläche von Zerspanwerkzeugen den auftretenden Verschleiß reduziert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Konzept der Freiflächenmodifikation weiterentwickelt. Dazu wurden zunächst Referenzversuche durchgeführt, um die lokal auftretenden Schneidenbelastungen zu analysieren. Untersucht wurde, neben dem Verschleißverhalten der Werkzeuge, insbesondere das thermomechanische Belastungskollektiv. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen anschließend als Eingangsdaten für die simulationsgestützte Auslegung. Mit ihrer Hilfe wurde zunächst eine Werkzeugmodifikation ausgelegt, die über einen großvolumigen Absatz an der Freifläche verfügt. Die so modifizierten Werkzeuge wiesen in den nachfolgend durchgeführten Validierungsversuchen signifikante Vorteile im Verschleißverhalten auf. Die Versuchsergebnisse deuteten allerdings darauf hin, dass insbesondere die Schneidenecken weiterhin hohen thermomechanischen Belastungen unterliegen, sodass ihre effektive Kühlung als wichtige Zielgröße identifiziert wurde. Darauf basierend erfolgte eine weiterführende Modifikation des Wendelbohrers durch zusätzliche Strömungskanäle, um den Kühlschmierstofffluss, und damit die Wärmeabfuhr aus dem Prozess, weiter zu verbessern. Auf diese Weise modifizierte Werkzeuge zeigten in anschließenden Untersuchungen erhebliche Standzeitvorteile. Die durchgeführten Analysen belegen, dass die entwickelte Werkzeugmodifikation ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung bei der Bohrbearbeitung hochwarmfester Nickelbasislegierungen besitzt. So ließen sich sowohl die Werkzeuglebensdauer als auch die Bohrungsqualität signifikant steigern, was auf eine experimentell nachgewiesene Verringerung der Schneidentemperaturen durch Verbesserung der Kühlschmierstoffversorgung zurückzuführen ist.

Die erfolgreiche Entwicklung und Umsetzung der Werkzeugmodifikation zeigt, dass diese das Einsatzverhalten von Bohrwerkzeugen grundlegend verbessern kann. Künftige Arbeiten werden darauf abzielen, die auftretenden Wirkmechanismen detaillierter zu untersuchen und das Konzept der Werkzeugmodifikation auf weitere, anspruchsvolle Anwendungsfälle zu übertragen.

Abstract

Solid carbide tools are often used to machine bores in components made of high-temperature nickel-based alloys. Due to their low heat resistance, the temperatures occurring in the process must be kept low in order to prevent premature tool wear and a reduction in bore quality. Because of the difficult accessibility of the working point during drilling, the possibilities for process cooling and the applicable cutting speeds are particularly limited. However, previous work has shown that a retraction on the flank of cutting tools seems to reduce the occurring wear.

Within the scope of the presented work, this concept of a flank face modification has been further developed. First of all, reference tests were carried out to analyse the wear behaviour of the tools as well as their local thermomechanical stresses. The experimentally determined results served as input data for the specific, simulation-based design. The results indicated that the cutting edge corners in particular are subjected to high thermomechanical loads, so that their effective cutting fluid supply represented an important objective. For this purpose, first a modification was designed which has a particularly large-volume retraction on the flank face. Since this proved to be very positive for the wear behaviour of the modified tools in subsequent validation tests, it served as the basis for a further modification. This new tool design is equipped with additional flow channels to significantly improve the cutting fluid flow and thus the heat removal from the process. Subsequently, the tools modified in this way were compared with the previous reference tools in experimental field tests. The results of the conducted investigations indicate that the developed tool modification has great potential for increasing efficiency in the drilling of high-temperature nickel-based alloys. Thus, the achievable tool life and the quality of the produced bores could be significantly increased, which can be attributed to an experimentally verified reduction in cutting edge temperatures by improving the cutting fluid supply.

The successful development and implementation of the tool modification shows how a geometric modification to the tool shape can generate significant process advantages. Future work will aim to investigate the underlying mechanisms and to transfer the developed tool modification to further demanding machining applications.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Bohrbearbeitung von Nickelbasislegierungen	3
2.2 Werkzeug- und Prozessgestaltung	6
2.3 Methoden zur Prozessanalyse	25
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4 Experimentelle Randbedingungen	35
4.1 Versuchsdurchführung	35
4.2 Werkzeugmodifikation	40
4.3 Mess- und Analysetechnik	41
5 Voruntersuchungen zur Werkzeugauslegung	47
5.1 Verschleißverhalten	47
5.2 Thermomechanische Schneidenbelastung	49
5.3 Simulationsbasierte Voruntersuchungen	58
6 Modifikation durch Freiflächenabsatz	65
6.1 Konzept der Werkzeugmodifikation Generation 1	65
6.2 Simulationsbasierte Auslegung	66
6.3 Einbringung des Freiflächenabsatzes	68
6.4 Einfluss auf das Einsatzverhalten	69
7 Ganzheitliche Freiflächenmodifikation	77
7.1 Zielgrößen der Werkzeugmodifikation Generation 2	77
7.2 Simulationsgestützte Evaluierung	78
7.3 Fertigung der zusätzlichen Elemente	80
7.4 Experimentelle Validierung	81
8 Zusammenfassung und Ausblick	111
Literaturverzeichnis	XI
Studentische Arbeiten	XXV
Schriftenreihe des ISF	XXVII

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
BAZ	Bearbeitungszentrum
BSE	Backscatter Electron Detection
BTA	Boring and Trepanning Association
CAD	Computer-Aided Design
CBN	Cubic Boron Nitride
CFD	Computational Fluid Dynamics
Cr	Chrom
CVD	Chemical Vapor Deposition
ELB	Einlippenbohrer
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSI	Fluid-Structure Interaction
LiMi	Lichtmikroskop
LWL	Lichtwellenleiter
KSS	Kühlschmierstoff
MMS	Minimalmengenschmierung
Ni	Nickel
PVD	Physical Vapor Deposition
PIV	Particle Image Velocimetry
REM	Rasterelektronenmikroskop
RZH	Randzonenhärte
SF	Sicherheitsfaktor
Ti	Titan
TiC	Titancarbid
TiCN	Titancarbonitrid
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiN	Titannitrid
VHM	Vollhartmetall
WZ	Werkzeug
WZ-Mod. Gen. 1	Werkzeugmodifikation Generation 1
WZ-Mod. Gen. 2	Werkzeugmodifikation Generation 2

Symbolverzeichnis

a_e	mm	Seitliche Zustellung
a_p	mm	Schnitttiefe
c	%	Konzentration
d	mm	Durchmesser
d_{KSS}	mm	Kühlkanaldurchmesser
d_{LWL}	μm	Durchmesser des Lichtwellenleiters
$d_{Mess\text{fleck}}$	μm	Messfleckdurchmesser
$d_{Partikel}$	μm	Partikeldurchmesser
$d_{Schneide}$	mm	Abstand zur Schneide
d_{Smin}	μm	Mindestabstand zur Schneide
D	mm	Bohrungsdurchmesser
ΔD	μm	Durchmesserabweichung
f	mm	Vorschub
f_{eigen}	Hz	Eigenfrequenz
f_{grenz}	Hz	Grenzfrequenz
f_t	$\frac{mm}{s}$	Tastvorschub
f_z	mm	Zahnvorschub
F_c	N	Schnittkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_p	N	Passivkraft
h	mm	Spanungsdicke
l_f	m	Werkzeugstandweg
l_{Probe}	mm	Probenlänge
l_K	μm	Kontaktzonenlänge
L_f	m	Bohrweg
L/D		Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis
ΔL_f	m	Bohrwegintervall
k		k-Faktor
M_b	Nm	Bohrmoment
n	$\frac{1}{min}$	Drehzahl
n_{max}	$\frac{1}{min}$	Maximaldrehzahl
p_{KSS}	bar	Kühlschmierstoffdruck
P_A	W	Antriebsleistung
Q_{KSS}	$\frac{l}{min}$	KSS-Volumenstrom
Q_W	$\frac{cm^3}{min}$	Zeitspannvolumen
r_a	mm	Äußerer Radius
r_i	mm	Innerer Radius

VI

r_β	mm	Schneidkantenradius
Δr	μm	Abgetragener Schneidkantenradius
R	mm	Eckenradius
R_m	MPa	Zugfestigkeit
R_z	μm	Mittlere Rautiefe
\bar{S}	μm	Mittlere Schneidkantenverrundung
S_α	μm	Materialabtrag an der Freifläche
S_γ	μm	Materialabtrag an der Spanfläche
t	s	Zeit
t_{Absatz}	μm	Absatztiefe
t_k	μm	Rundheitsabweichung
T	$^\circ\text{C}$	Temperatur
v_c	$\frac{\text{m}}{\text{min}}$	Schnittgeschwindigkeit
v_{KSS}	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	KSS-Strömungsgeschwindigkeit
v_{Partikel}	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Partikel-Strömungsgeschwindigkeit
\dot{V}_{KSS}	$\frac{\text{l}}{\text{min}}$	KSS-Volumenstrom
VB	μm	Verschleißmarkenbreite
VB_{max}	μm	Maximale Verschleißmarkenbreite
α_1	$^\circ$	Primär-Freiwinkel
α_2	$^\circ$	Sekundär-Freiwinkel
β	$^\circ$	Keilwinkel
δ	$^\circ$	Drallwinkel
ϵ	μm	Deformation
κ		Formfaktor
Λ_1	μm	Wellenlänge 1
Λ_2	μm	Wellenlänge 2
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Wärmeleitkoeffizient
λ_c	mm	Grenzwellenlänge
σ	$^\circ$	Spitzenwinkel
$\sigma_{B,R}$	MPa	Biegefestigkeit
$\sigma_{V.M.}$	MPa	Von-Mises-Vergleichsspannung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Einfluss der Temperatur auf die Zugfestigkeit [WAL12]	3
Abb. 2.2	Verschleiß bei der Zerspanung von Inconel 718 [AKH14]	5
Abb. 2.3	Aufbau eines Wendelbohrers [DEN11]	7
Abb. 2.4	Prozessphasen des Bohrens [HOF86]	7
Abb. 2.5	Kenngößen der Schneidkantenmikrogeometrie [BEE15; DEN11]	11
Abb. 2.6	Gelasserte Freiflächenmodifikation am Wendelbohrer [BEE15]	12
Abb. 2.7	Freiflächenstrukturen am Wendelbohrer [MUL19]	14
Abb. 2.8	Al ₂ O ₃ -Schicht auf beschichtetem Werkzeug [HAO19]	17
Abb. 2.9	Wärmestrom in Abhängigkeit von der Beschichtung [REC04]	18
Abb. 2.10	Beeinflussung der Randzoneneigenschaften [BRI91]	19
Abb. 2.11	Ausbildung weißer Schichten in Inconel 718 [SHA08]	20
Abb. 2.12	Spannungsverteilung an einem Wendelbohrer [FUJ11]	22
Abb. 2.13	KSS-Strömung am Einlippenbohrer [OEZ17]	23
Abb. 2.14	Experimentelle Erfassung der Schneidenbelastungen [WOL19]	26
Abb. 2.15	Wärmeverteilung an der Wirkstelle [MUL04]	28
Abb. 2.16	Historische Entwicklung der Temperaturerfassung [DAV07] . .	28
Abb. 2.17	Hochgeschwindigkeitsanalyse an der Wirkstelle [KIR16]	31
Abb. 3.1	Vorgehensweise zur Entwicklung der Werkzeugmodifikation . .	33
Abb. 4.1	Versuchswerkzeug im Neuzustand	35
Abb. 4.2	Eingesetzte Versuchsmaschinen	38
Abb. 4.3	Experimentell eingesetzte Schnittwertkombinationen	39
Abb. 4.4	Eingesetzte Maschinen zur Werkzeugmodifikation	40
Abb. 4.5	Versuchsaufbau für pyrometrische Untersuchungen nach [IOV21]	43
Abb. 4.6	Bohrungsrandzonenuntersuchungen	46
Abb. 5.1	Verschleißentwicklung an Referenzwerkzeugen [BUC18b]	47
Abb. 5.2	REM-Aufnahmen der Schneidenecken	48
Abb. 5.3	Prozesskräfte in Abhängigkeit von den Schnittwerten	50
Abb. 5.4	Aufbau zur Ermittlung der Schneidenbelastung [BIE17b]	51
Abb. 5.5	Vergleich der mechanischen Schneidenbelastung [BIE17b] . . .	52
Abb. 5.6	Untersuchung der Kontaktzonenlänge	54
Abb. 5.7	Kontaktzonenlängen in Abhängigkeit von den Schnittwerten . .	55
Abb. 5.8	Analyse von Werkstoffpartikeln in der Kontaktzone [BIE17b]	55
Abb. 5.9	Temperaturen an Referenzwerkzeugen [OEZ19]	57
Abb. 5.10	Unterteilung der Schneide [OEZ19]	59
Abb. 5.11	Simulierte Schneidstoffbelastung [BUC18b]	60
Abb. 5.12	Simulation der Temperaturentwicklung [OEZ19]	61
Abb. 5.13	Vernetzung des Fluidmodells [OEZ20]	62
Abb. 5.14	KSS-Strömung am Standardwerkzeug [OEZ20]	63
Abb. 6.1	Werkzeugmodifikation Gen. 1 am CAD-Modell	65
Abb. 6.2	Simulativ ermittelte Spannungen im Werkzeug [OEZ20]	66

Abb. 6.3	Strömungssituation an der Mod. Gen. 1 nach [OEZ20]	67
Abb. 6.4	Fertigung der Werkzeugmod. Gen. 1 [OEZ19]	68
Abb. 6.5	Bohrmoment in Abhängigkeit von der Absatzposition [BUC20]	69
Abb. 6.6	Prozesskräfte beim Einsatz der Werkzeugmod. Gen. 1	70
Abb. 6.7	Resultierende Späne im Vergleich	72
Abb. 6.8	Standwege der WZ-Mod. Gen. 1 [BUC18b]	73
Abb. 6.9	Verschleißverlauf der WZ-Mod. Gen. 1 [BUC18b]	74
Abb. 6.10	Werkzeugzustand nach Standwegende [BUC18b]	75
Abb. 7.1	Elemente der Werkzeugmodifikation Gen. 2 [BUC20]	77
Abb. 7.2	Simulativ ermittelte Spannungen im Werkzeug [OEZ20] . . .	78
Abb. 7.3	Auswirkungen auf den KSS-Fluss (CFD-Simulation) [BUC20]	79
Abb. 7.4	Elemente der WZ-Mod. Gen. 2 [IOV21]	80
Abb. 7.5	Verschleißentwicklung bei v_c 45 m/min [BUC20]	81
Abb. 7.6	Werkstoffadhäsion an den Nebenschneiden [BUC20]	82
Abb. 7.7	Verschleißentwicklung bei v_c 60 m/min [IOV21]	83
Abb. 7.8	Experimentell ermittelte Freiflächentemperaturen [IOV21] . .	85
Abb. 7.9	Güte der erzeugten Bohrungen [IOV21]	86
Abb. 7.10	Ausbildung weißer Schichten	87
Abb. 7.11	Mikrohärteverlauf der Bohrungsrandzonen	89
Abb. 7.12	Durchschnittliche Randzonenaufhärtung	89
Abb. 7.13	Versuchsaufbau zur Strömungsanalyse	91
Abb. 7.14	Parktikelbewegungen an den Hauptfreiflächen	93
Abb. 7.15	Partikelbewegungen an den Nebenschneiden	94
Abb. 7.16	Vergleich der ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten [IOV21]	95
Abb. 7.17	KSS-Verkokungen an modifizierten Werkzeugen [BUC20] . .	96
Abb. 7.18	Verschleißentwicklung beim Einsatz in Ti6Al4V [IOV21] . . .	97
Abb. 7.19	Verschleißentwicklung beim Einsatz in 1.4462	98
Abb. 7.20	Werkzeugzustand nach Standzeitende in 1.4462	99
Abb. 7.21	Werkzeugmodifikation mit verstärkter Schneidenecke	101
Abb. 7.22	Mikrofräswerkzeug vor und nach Einsatz	101
Abb. 7.23	Durch Fräsen modifiziertes Werkzeug	102
Abb. 7.24	Verschleißentwicklung der gefrästen Werkzeugmodifikation .	103
Abb. 7.25	Gefräste Werkzeugmodifikation bei Standzeitende	103
Abb. 7.26	Beschichtung in der Werkzeugmodifikation	105
Abb. 7.27	Versuchsaufbau zur thermografischen Untersuchung	106
Abb. 7.28	Thermografieaufnahme der Werkzeugabkühlung	106
Abb. 7.29	Werkzeugabkühlung bei erzwungener Konvektion	107
Abb. 7.30	Erreichter Standweg vollständig beschichteter Werkzeuge . .	108
Abb. 7.31	Vollständig beschichtetes Werkzeug nach Standzeitende . . .	109
Abb. 8.1	Generationen der Werkzeugmodifikation	112

Tabellenverzeichnis

4.1	Ausgewählte Eigenschaften der eingesetzten Wendelbohrwerkzeuge . .	36
4.2	Ausgewählte Eigenschaften der Versuchswerkstoffe bei $T = 20\text{ °C}$. .	37
4.3	Experimentell untersuchte Schnittwertkombinationen	39
4.4	Kraftmessbereiche und Messunsicherheiten	42
5.1	Randbedingungen der durchgeführten FEM-Simulationen [OEZ19] . .	59
5.2	Randbedingungen der durchgeführten CFD-Simulationen [OEZ20] . .	62

1 Einleitung

Nickelbasislegierungen kommen in Anwendungen zum Einsatz, die eine ausgeprägte mechanische Widerstandsfähigkeit auch bei sehr hohen Einsatztemperaturen erfordern. Die Legierung Inconel 718 besitzt und hält ihre hohe Festigkeit bis zu einer Temperatur von $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, wobei sie zudem über eine gute chemische Beständigkeit und geringe Wärmeleitfähigkeit verfügt. Ihre für Hochtemperaturanwendungen hervorragenden Anwendungseigenschaften stellen jedoch eine große Herausforderung für die Zerspanung dar. Insbesondere bei der Bohrbearbeitung führt die geringe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs zu einer hohen thermischen Werkzeugbelastung. Die eingesetzten Werkzeuge bestehen häufig aus Hartmetallen, die eine geringere Warmfestigkeit als beispielsweise keramische Schneidstoffe aufweisen. Deshalb müssen moderate Schnittwerte eingesetzt werden, um eine thermische Überlastung des Hartmetalls zu vermeiden. Durch die erschwerte Zugänglichkeit der Wirkstelle beim Bohren sind die Möglichkeiten zur Prozesskühlung, und damit die einsetzbaren Schnittgeschwindigkeiten, im Vergleich zur Dreh- oder Fräsbearbeitung zusätzlich limitiert. Dies schränkt die Prozessproduktivität ein und führt zu längeren Bearbeitungszeiten.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden im Laufe der Zeit leistungsfähige Bohrwerkzeuge mit eigens angepassten Mikrogeometrien, Verschleißschutzbeschichtungen und spezifischen Oberflächenbehandlungen entwickelt. Ein weiteres Forschungsgebiet stellt das Prinzip der Freiflächenmodifikation dar, bei der Absätze oder Strukturen in die primäre Freifläche eingebracht werden. Bisherige Entwicklungen greifen dazu meist auf eine sehr aufwendige Laserbearbeitung zurück, durch die sich jedoch signifikante Verlängerungen der Standwege erzielen lassen. Dabei wird davon ausgegangen, dass den beobachteten Vorteilen eine Kombination aus der geometrischen Begrenzung des Freiflächenverschleißes [DEN17] mit der verbesserten Versorgung der Schneide mit Kühlschmierstoff (KSS) zugrunde liegt [BEE14]. Allerdings sind die Tiefe des Absatzes und seine Nähe zur Schneide limitiert, da das Abtragen von Schneidstoff an der Freifläche zu einer mechanischen Schwächung der Schneide führt.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Entwicklung und Umsetzung einer weiterführenden Modifikation, die durch eine gezielte Verbesserung des KSS-Strömungsverhaltens eine höhere Prozessproduktivität erreichen soll. Dabei stellt auch die resultierende Bearbeitungsqualität eine wichtige Zielgröße dar, um die zeit- und kostenintensive Nachbearbeitung der häufig in sicherheitskritischen Anwendungen eingesetzten Bauteile aus Inconel 718 zu minimieren. Zur Gewährleistung der Industrialisierbarkeit soll die Fertigung der entwickelten Modifikation durch den Einsatz üblicher Schleifwerkzeuge umsetzbar sein. Auf diese Weise wird ihre Übertragbarkeit auf die industrielle Fertigung von Vollhartmetall-(VHM)-Bohrwerkzeugen sichergestellt.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Bohrbearbeitung von Nickelbasislegierungen

Während Nickelbasislegierungen wie Inconel 718 ausgezeichnete Eigenschaften für die Verwendung als Werkstoff für Komponenten in Hochtemperaturbereichen aufweisen, führen diese herausragenden Anwendungseigenschaften zu großen Herausforderungen bei ihrer Zerspanung. So behält Inconel 718 seine grundsätzlich hohe mechanische Belastbarkeit bis in Temperaturbereiche von $T \approx 650 \text{ °C}$ bei, wie in Abbildung 2.1 im Vergleich mit anderen Werkstoffen deutlich wird [WAL12]. Gleichzeitig führt seine geringe Wärmeleitfähigkeit zu einer unzureichenden Wärmeabfuhr aus der Wirkstelle, woraus eine erhöhte thermische Schneidstoffbelastung resultiert [FU10]. Während bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass ein Anteil von bis zu 80 % der entstehenden Wärme durch den Span abtransportiert wird, ist dieser Anteil bei Superlegierungen auf Basis von Elementen mit geringer Wärmeleitfähigkeit deutlich niedriger anzusetzen [DUD04; KLO11; SHA08]. Um dies zu kompensieren, wird der eingesetzte Kühlschmierstoff häufig unter hohem Druck zugeführt, wodurch die Effektivität der Kühlschmierung verbessert wird. Diese ist jedoch nicht beliebig steigerbar, sodass es weiterhin zu einem hohen Wärmeeintrag in den Schneidstoff kommt, dessen mechanische Widerstandsfähigkeit infolgedessen abnimmt. Gleichzeitig weist Inconel 718 eine ausgeprägte chemische Affinität zu einigen Schneidstoffen sowie eine starke Neigung zur Kaltverfestigung und Adhäsion auf. Neben dem dadurch bedingten, starken adhäsiven Verschleiß begünstigen die im Werkstoff eingeschlossenen Karbide und festigkeitssteigernden Ausscheidungen den abrasiven Werkzeugverschleiß [MAZ89].

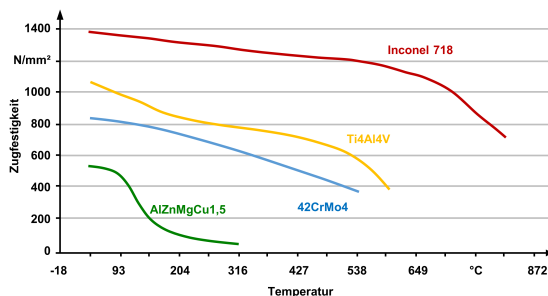


Abbildung 2.1: Einfluss der Temperatur auf die Zugfestigkeiten gängiger Werkstoffe nach [WAL12]

Während insbesondere die Drehbearbeitung von Inconel 718 Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten ist, spielt die Bohrbearbeitung in der bisherigen Forschung eine eher untergeordnete Rolle. Dies lässt sich vor allem auf die schlechtere Zugänglichkeit der Wirkstelle zurückführen, die eine detaillierte Betrachtung der ablaufenden Vorgänge erheblich erschwert [BEE15; SHA08; WES07]. Dabei handelt es sich bei der Bohrbearbeitung häufig um einen wirtschaftlich hoch bedeutsamen Prozessschritt, der zumeist erst spät in der Wertschöpfungskette und an bereits kostenintensiv vorbearbeiteten Bauteilen durchgeführt wird. Zudem erfüllen die gefertigten Bohrungen und ggf. Gewinde oftmals sicherheitskritische Funktionen in hoch relevanten Bauteilen, sodass sich die Notwendigkeit einer aufwendigen Nachbearbeitung ergibt, um die geforderte Bohrungsqualität und -integrität zu gewährleisten. In Abhängigkeit von der zu erzielenden Bohrungsgüte kann daher die gesamte Fertigung einer Bohrung die Prozessschritte des Vorbohrens, des Fertigbohrens, des Entgratens und des Reibens sowie ggf. weiterer notwendiger Prozesse zur Erhöhung der Bohrungsgüte und Randzonenintegrität umfassen. Lange Prozessketten beeinträchtigen jedoch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses und sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden [ADA98].

Zum Bohren kleinerer Durchmesser in Inconel 718 kommen in der Regel VHM-Werkzeuge zum Einsatz, deren Schneidstoffe zu den ISO-Hartmetall-Gruppen K10 bis K20 zählen. Aufgelötete Schneiden aus polykristallinem Diamant oder Schneidkeramiken sind für Bohrwerkzeuge zur Bearbeitung von Inconel 718 hingegen kaum verbreitet [KRE07]. Aufgrund der beim Bohren herrschenden, extremen Prozessbedingungen konnte ihre Anwendung, im Gegensatz zum Beispiel zur Dreh- oder Fräsbearbeitung, bislang nicht erfolgreich umgesetzt werden [BEE14; ZHA14]. Die eingesetzten Hartmetallwerkzeuge werden, zum Schutz gegen die hohe thermische und abrasive Beanspruchung, häufig mit einer Verschleißschutzbeschichtung versehen. Die Art der auf das Hartmetallsubstrat aufgetragenen Beschichtung beeinflusst dabei die Einsatzigenschaften des Werkzeugs in vielfältiger Weise. So kann durch eine Beschichtung zwar die Standzeit des Werkzeugs drastisch erhöht werden, jedoch steigen die Anschaffungskosten bei gleichzeitig eingeschränkter Möglichkeit des Nachschleifens.

Die von einer hohen Wärmeentwicklung gekennzeichnete Bohrbearbeitung von Inconel 718 macht den Einsatz von Werkzeugen aus Hartmetall grundsätzlich nur bei geringen Schnittgeschwindigkeiten prozesssicher möglich [ADA98; KLO99; KON87; TRE96]. In der Regel ist die einsetzbare Schnittgeschwindigkeit, in Abhängigkeit von der eingesetzten Kühlschmierstrategie, auf Werte von $v_c \leq 40$ m/min beschränkt [MS15]. Bei der Verwendung höherer Schnittgeschwindigkeiten tritt oft ein überproportional zunehmender Werkzeugverschleiß auf, der mit einer großen Gefahr des Werkzeugversagens durch thermische Überlastung einhergeht [OSM79; VIM15]. Beispiele für

typische Verschleißerscheinungen an zur Bearbeitung von Inconel 718 eingesetzten Hartmetallwerkzeugen sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

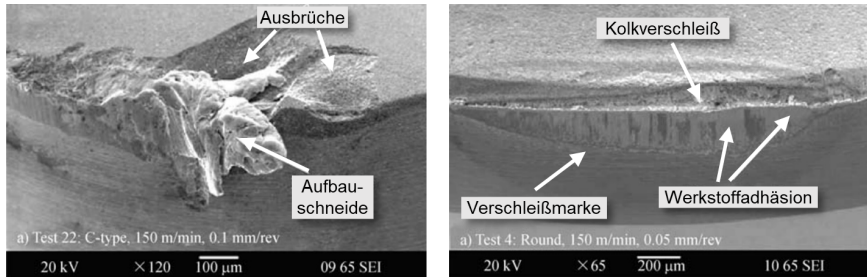


Abbildung 2.2: Werkzeugverschleiß bei der Drehbearbeitung von Inconel 718 nach [AKH14]

Aus den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wird ersichtlich, dass die Zerspaltung dieses Werkstoffs sowohl durch ausgeprägten Kolk- und Freiflächenverschleiß als auch durch das Auftreten von Werkstoffadhäsionen gekennzeichnet ist. Eine weitere Restriktion der einsetzbaren Schnittgeschwindigkeit ergibt sich darüber hinaus aus den vorgegebenen Qualitätsansprüchen. Die Eigenschaften der Bauteilrandzone stehen in direktem Zusammenhang mit den im Prozess auftretenden Temperaturen, welche durch die Schnittgeschwindigkeit signifikant beeinflusst werden [FAL14].

Aus diesem Grund hat die eingesetzte Kühlschmierstrategie einen erheblichen Einfluss nicht nur auf den Werkzeugverschleiß, sondern auch auf die erzielbare Bohrungsintegrität. Bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 werden deshalb in der Regel Emulsionen als KSS eingesetzt, die eine besonders hohe Wärmekapazität aufweisen und über im Werkzeug liegende Kühlkanäle zugeführt werden. Bisherige Arbeiten zu alternativen KSS-Konzepten für die Bearbeitung von Inconel 718 untersuchten zudem sowohl die Möglichkeit eines Verzichtes auf KSS [DUD04; UMB13] als auch die Verwendung von Minimalmengenschmierung (MMS) [ZHA12] oder kryogener Kühlung [KAL17; PUS11]. Auch Kombinationen aus kryogener Kühlung mit MMS [BIE18; PET18] bzw. mit einer emulsionsbasierten Überflutungsschmierung [BIE12c; BIE13e] wurden bereits erfolgreich erprobt. Allerdings wird, aufgrund ihrer teilweise sehr komplexen Handhabung, bislang keines dieser Verfahren flächendeckend in der industriellen Praxis zum Bohren von Nickelbasislegierungen eingesetzt [BAK16; KLO06b; SHO13].

2.2 Werkzeug- und Prozessgestaltung

2.2.1 Auslegung von Wendelbohrern

Beim im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Bearbeitungsverfahren handelt es sich um das Durchbohren mit symmetrisch angeordneten Hauptschneiden nach DIN 8589-2. Die verwendeten Bohrwerkzeuge sind zweischneidige Wendelbohrer, die aufgrund der symmetrischen Anordnung der Haupt- und Nebenschneiden eine selbstführende Funktion haben. Dadurch kann, im Gegensatz zu einschneidigen Einlippenbohrern (ELB) oder BTA-Bohrwerkzeugen, auf eine Führung während der Anbohrphase verzichtet werden. Trotz der hohen Variantenvielfalt der am Markt verfügbaren Bohrwerkzeuge stellt der Wendelbohrer das in der industriellen Praxis am häufigsten zum Fertigen von Bohrungen eingesetzte Werkzeug dar [EMR01; SCH18b]. Er wird in der Regel für Bohrungsdurchmesser im Bereich von $D = 0,25 \dots 140$ mm bei einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis bis zu $L/D = 5$ eingesetzt [BER39; RIS06; TIK93].

Das Bohren ist vor allem durch eine kreisförmige Schnittbewegung gekennzeichnet, deren Drehachse identisch mit der Mittelachse der zu erzeugenden Bohrungswand ist. Entlang dieser Achse erfolgt auch die Vorschubbewegung, sodass die resultierende Bohrungskontur durch die Form des eingesetzten Bohrwerkzeugs bestimmt ist [SEL09]. Besonders charakteristisch für die Bohrbearbeitung ist der entlang des Werkzeugradius variable Schnittgeschwindigkeitsgradient, der zur Werkzeugmitte hin auf $v_c = 0$ m/min abfällt. Um diesem Umstand gerecht zu werden, ist der Schneidteil von Wendelbohrern häufig in eine primäre und eine sekundäre Hauptschneide unterteilt, die sich vor allem in Ausrichtung und Keilwinkel unterscheiden [DEN11]. Der grundsätzliche geometrische Aufbau von Wendelbohrwerkzeugen ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Die Hauptschneiden gehen an der Schneidenecke in die Nebenschneiden über, die entlang der Werkzeugachse wendelförmig im Drallwinkel angeordnet sind. Die Fase der Nebenfleichen hat eine maßgebliche Funktion zur radialen Abstützung des Werkzeugs und bei der Ausbildung der Bohrungswand [BIE13b]. Dabei verjüngt sich der Werkzeugdurchmesser in der Regel, ausgehend von den Schneidenecken, in Richtung des Schafts. Dadurch wird die Gefahr eines Verklemmens bei steigenden Bohrtiefen reduziert. Wendelbohrer für die Bearbeitung anspruchsvoller Werkstoffe verfügen häufig über innenliegende Kanäle zur KSS-Zufuhr, deren Austritte in den sekundären Freiflächen liegen [DEN11]. Dabei haben insbesondere die Position und Ausrichtung dieser Kühlkanalaustritte einen großen Einfluss auf die resultierende KSS-Versorgung und damit die thermische Belastung der Schneide [FAL14].

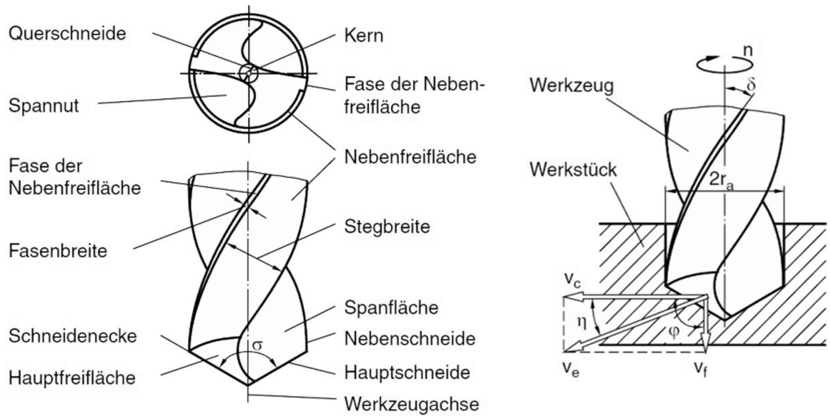


Abbildung 2.3: Aufbau und Elemente eines Wendelbohrers [DEN11] nach DIN ISO 5419

Im Rahmen dieser Arbeit werden Durchgangsbohrungen gefertigt, bei denen das Werkzeug die Phasen des Anbohrens, des Vollbohrens sowie des Ausbohrens durchläuft. Während des Ausbohrens tritt das Werkzeug zunächst mit seiner Spitze und anschließend mit den Schneidenecken aus der Werkstückunterseite aus [HOF86; KOE05]. Die unterschiedlichen Prozessphasen des Bohrens sowie die charakteristischen Verläufe des Kraftmessschriebs sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

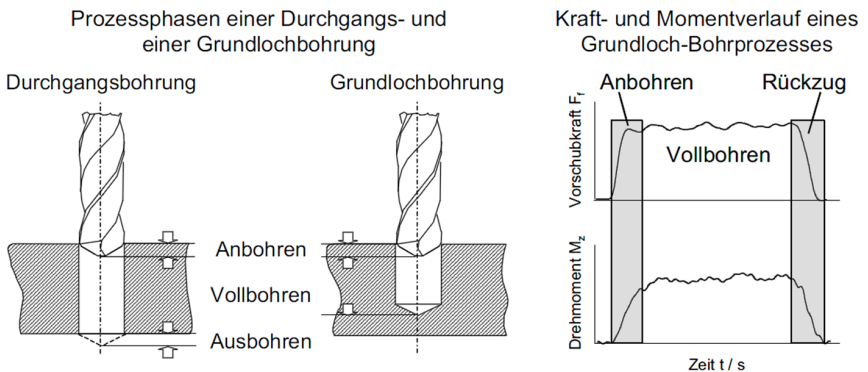


Abbildung 2.4: Prozessphasen des Bohrens [HOF86]

Beim Bohrungsaustritt kommt es zu einer sprunghaften Veränderung der auf die Schneide wirkenden Kräfte, da die zentrierende Wirkung der Bohrerspitze nicht mehr gegeben ist und die Führung des Werkzeugs ausschließlich durch die Schneidenecken

und Führungsfasen erfolgt. Im Kraftmessschrieb ist dadurch häufig eine plötzliche Erhöhung des Bohrmoments erkennbar, da eine verstärkte Interaktion der Führungsfasen mit der Bohrungswand auftritt. Darüber hinaus erfolgt ein Abriss des Kühlschmierstoffstroms in Richtung der Nebenschneiden und Spannuten, da der Kühlschmierstoff stirnseitig aus der Bohrung austritt. Dies führt zu einer besonders hohen Belastung der Schneidenecken bei der Fertigung von Durchgangsbohrungen, der es durch eine günstige Werkzeug- und Prozessauslegung zu begegnen gilt [HOF86; KOE05].

2.2.2 Einfluss der Werkzeuggestalt auf die Kühlschmierung

Insbesondere bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe wie Inconel 718 ist die effektive Kühlschmierung ein maßgeblicher Faktor für die Prozesssicherheit. Dazu kommen vor allem wassermischbare KSS zum Einsatz, weil sie eine höhere Wärmekapazität als nichtwassermischbare KSS aufweisen und eine gute Handhabbarkeit, beispielsweise im Vergleich zu kryogenen Kühlkonzepten, gegeben ist. Da jedoch KSS auf Wasserbasis eine geringere Schmierfähigkeit als nichtwassermischbare KSS aufweisen, wird ihre Schmierwirkung durch die Zugabe ölhaltiger Additive gesteigert, wobei die eingesetzte Konzentration eine tragende Rolle spielt. Zur Bohrbearbeitung von Inconel 718 werden vorwiegend erhöhte Konzentrationen von $c \geq 8\%$ eingesetzt. Eine Trockenbearbeitung unter Verzicht auf KSS sowie die Anwendung einer ölbasierten MMS ohne zusätzliche Kühlung hat sich beim Bohren hochwarmfester Werkstoffe bislang nicht als zielführend erwiesen, da die aus der mangelnden Kühlung resultierenden, hohen Prozesstemperaturen den Standweg der Werkzeuge erheblich reduzieren [BEE15; DUD96; WES07]. Auch die Art der KSS-Zufuhr wirkt sich direkt auf die Prozesssicherheit aus. Außerhalb der Bohrung zugeführter KSS erreicht insbesondere bei Bohrtiefen, die mehr als das Anderthalbfache des Bohrerdurchmessers betragen, kaum die Wirkzone [DUD96]. In bisherigen Untersuchungen konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Gestaltung der Kühlkanalaustritte einen signifikanten Einfluss auf den resultierenden Volumenstrom und den auftretenden Druckabfall hat. Ebenso wurden die Einflüsse einzelner Winkel an der Schneide auf den Volumenstrom und die Druckverteilung am Werkzeug eingehend analysiert [AST94; LOI04; OSM79].

Untersuchungen zur KSS-Verteilung an ELB haben gezeigt, dass sich durch die Verlegung der Kühlkanäle in Richtung der Führungsphase deutliche Verbesserungen der Bohrungsqualität und des Spanabtransports erzielen lassen. Allerdings führte eine separate Versorgung der Führungsphase mit KSS zu Verschlechterungen des Bohrprozesses, da sich der Volumenstrom in den Spannuten verminderte, wodurch der Spanabtransport nicht mehr prozesssicher gewährleistet war. Darüber hinaus stellte sich durch die veränderten Strömungen ein Ungleichgewicht der auf das Werkzeug einwirkenden

Kräfte ein, was einen negativen Einfluss auf die Bohrungsqualität zur Folge hatte [LOI04]. Untersuchungen zur Ausgestaltung der Kühlkanäle an Wendelbohrern zeigten, dass eine Vergrößerung des Kühlkanalquerschnitts zu einer Erhöhung des KSS-Flusses führen kann. Eine solche Vergrößerung ist allerdings, ebenso wie eine Vergrößerung der Spannuten, durch die notwendige Stabilität des Bohrerkerne beschränkt [GUH03; HAN05]. Weitere Arbeiten kamen zu dem Schluss, dass eine Erhöhung des Zuführdrucks eine weitaus größere Rolle in der Erhöhung der Standzeiten spielt [OEZ16]. Aus diesem Grund wurde in weiteren Untersuchungen der Einfluss der Positionierung der Kühlkanalaustritte an VHM-Wendelbohrern untersucht, wobei eine Verlagerung auf die primäre Freifläche eine signifikante Erhöhung des Wärmestroms vom Schneidstoff in den KSS nach sich zog. Die simulationsbasiert ermittelte Temperatur im Inneren des Werkzeugs konnte dadurch um bis zu $\Delta T = 25\%$ gesenkt werden [AUR13].

Mithilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführte Simulationen zeigten, dass sich eine Verlagerung des Kühlkanalaustritts nah an die primäre Hauptschneide grundsätzlich positiv auf die KSS-Versorgung der Schneide auswirkt. Im Gegensatz dazu hatte jedoch der radiale Abstand zur Mittelachse des Werkzeugs keinen signifikanten Einfluss [FAL14]. Diese Simulationsergebnisse konnten anschließend im Rahmen experimenteller Untersuchungen validiert werden [FAL15]. Weitere CFD-Simulationen haben nachgewiesen, dass auch der Sekundär-Freiwinkel einen deutlichen Einfluss auf den KSS-Fluss an der Schneide hat. So resultierte eine Verringerung des Sekundär-Freiwinkels von $\alpha_2 = 25^\circ$ auf $\alpha_2 = 15^\circ$ in einer signifikanten Erhöhung des KSS-Stroms. Die mittlere KSS-Strömungsgeschwindigkeit stieg dadurch bei einem konstanten KSS-Volumenstrom von $Q_{KSS} = 4$ l/min um $\Delta v_{KSS} = 36\%$ auf $v_{KSS} = 18,9$ m/s. Dabei wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Kühlkanalanzahl durch Verringerung der jeweiligen Durchmesser sich ebenfalls positiv auf die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten auswirken kann, was jedoch stark von ihrer Größe und Anzahl abhängig ist [MUL18]. Grundsätzlich dringt der KSS jedoch, insbesondere bei Verwendung von Emulsion, meist nur unzureichend in den Raum zwischen der Werkzeugfreifläche und dem Bohrungsgrund ein. Die erreichbaren Strömungsgeschwindigkeiten der Emulsion in diesen Bereichen liegen meist weit unterhalb der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit [HAN05; LEI09].

Untersuchungen zum Schlichtdrehen unter KSS-Zufuhr zeigten, dass die Zuführungsgeschwindigkeit des KSS mindestens dem Doppelten der Schnittgeschwindigkeit entsprechen sollte, um ein Eindringen bei Spaltbreiten von $b \leq 0,05$ mm zu gewährleisten [OBI13]. Des Weiteren konnte durch experimentelle Untersuchungen belegt werden, dass die gezielte Anpassung der Werkzeuggeometrie an einem ELB zu einer deutlich gleichmäßigeren KSS-Druckverteilung im Bereich der Werkzeugstirnseite

führte. Dadurch ließ sich die erzielbare Werkzeugstandzeit steigern, was auf eine verbesserte Schneidstoffkühlung zurückzuführen ist [AST94].

Aus dem bisherigen Stand der Forschung zum Einfluss der Werkzeuggestalt auf die Kühlschmierung lässt sich schließen, dass eine effektive KSS-Versorgung der Schneide einen zentralen Aspekt der Prozesssicherheit darstellt, die sich durch eine passende Werkzeugauslegung substantiell verbessern lässt.

2.2.3 Schneidkantenpräparation

Im Rahmen bisheriger Arbeiten wurde eine Vielzahl geometrischer Parameter identifiziert, durch die sich die Anwendungseigenschaften von Bohrwerkzeugen gezielt verbessern lassen. Neben klassischen Elementen, wie dem Spitzenwinkel oder der gewählten Form des Anschliffs, handelt es sich dabei vor allem um die Mikrogestalt der Werkzeugschneide, deren Verschleißbeständigkeit durch eine angepasste Schneidkantenpräparation gesteigert werden kann [BIE08].

Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten umfassen beispielsweise die Anbringung von Fasen oder die gezielte Verrundung der schliffscharfen Schneide durch Strahlen, Bürsten oder Schleppscheiben. Dadurch lassen sich aus dem Schleifprozess resultierende Mikrodefekte verringern und die mechanische Stabilität der Schneide erhöhen. Allerdings kann eine ausgeprägte Kantenverrundung, insbesondere bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe, zu einer hohen mechanischen Belastung des Schneidkeils führen, da sich im Bereich unterhalb der Verrundung ein stark negativer Spanwinkel ergibt [DEN11]. Da dieser zudem die Aufbauschneidenbildung begünstigt, wird zur Bearbeitung hochwarmfester Nickelbasislegierungen in der Regel auf Werkzeuge mit einer sehr geringen Schneidkantenverrundung zurückgegriffen [OZE14].

Über die Vergrößerung des Schneidkantenradius hinaus kann die nachträgliche Verrundung ungleichförmig erfolgen, wodurch eine gezielte Anpassung der Schneidenmikrogeometrie an die auftretenden Belastungen ermöglicht wird. Aus diesem Grund ist die mittlere Schneidkantenverrundung allein zur Beschreibung der resultierenden Geometrie häufig nicht aussagekräftig genug, sodass weitere Kenngrößen herangezogen werden [DEN11; DEN14]. Diese sind in Abbildung 2.5 veranschaulicht.

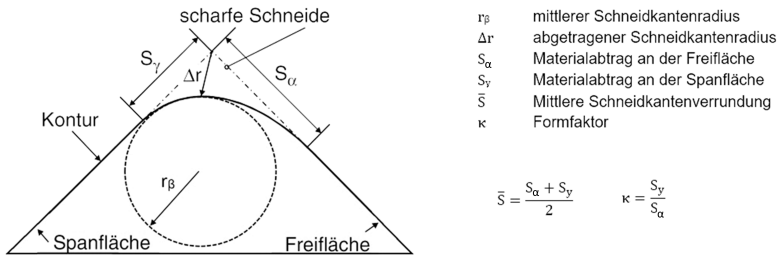


Abbildung 2.5: Kenngrößen zur Beschreibung der Schneidkantenmikrogeometrie nach [DEN11] und [BEE15]

Die häufig zur grundsätzlichen Beschreibung der Schneidkantenmikrogestalt herangezogene mittlere Schneidkantenverrundung \bar{S} wird aus dem arithmetischen Mittel des Materialabtrags an der Freifläche S_α und der Spanfläche S_γ gebildet. Ihr Verhältnis kann asymmetrisch sein, wobei die Verschiebung zur theoretischen Spitze einer ideal scharfen Schneide in Richtung der Span- oder Freifläche durch den Formfaktor κ beschrieben wird. Auch der kürzeste Abstand der idealen Spitze zur Konturlinie der resultierenden Schneidkante kann, ausgedrückt als abgetragener Schneidkantenradius Δr , zur Beschreibung der Mikrogeometrie herangezogen werden [KLO05].

2.2.4 Freiflächenmodifikation

Eine weitere Maßnahme zur gezielten Anpassung der Werkzeuggestalt stellt die Freiflächenmodifikation dar. Die Grundlage dieser Arbeit bilden die Ergebnisse vorheriger Untersuchungen, die aufzeigen konnten, dass eine durch Laserbearbeitung eingebrachte Nut an der Freifläche von VHM-Wendelbohrern wesentlich zur Verlängerung des Werkzeugstandwegs bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 beiträgt. Die Ausgestaltung einer solchen Nut ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Als ursächliche Mechanismen für die beobachteten Verbesserungen in verschiedenen Bearbeitungsverfahren wurden die geometrische Limitierung der Verschleißmarkenbreite [DEN09; DEN09b; DEN17; MEY11], die daraus resultierende Begrenzung der auftretenden Reibung zwischen der Freifläche und dem Bohrungsgrund sowie eine verbesserte Kühlschmierstoffversorgung entlang der Schneide identifiziert [BEE14]. Die bessere Kühlung der Schneide wurde dabei mit dem vergrößerten, hinter der Schneide freibleibenden Volumen begründet und konnte durch CFD-Simulationen erfolgreich nachgewiesen werden [BEE15].

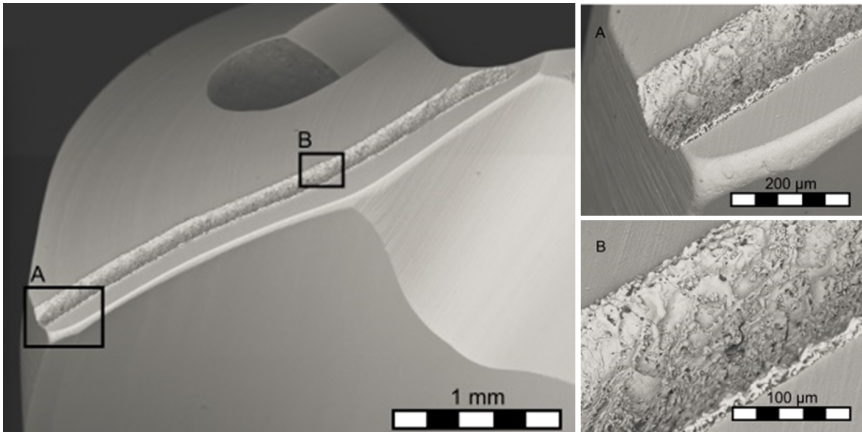


Abbildung 2.6: Durch Laserbearbeitung eingebrachter Freiflächenabsatz in Form einer Nut an einem VHM-Wendelbohrer [BEE15]

Beim Einsatz freiflächenmodifizierter Werkzeuge wurden, im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen, um etwa ein Drittel längere Werkzeugstandwege bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 realisiert. Auch die Randzonenbeeinflussung in Form von Randzonenaufhärtungen und Veränderungen des Mikrogefüges wurde signifikant vermindert, wobei die erzielten Rundheitsabweichungen und Oberflächenrauheiten vergleichbar blieben. Während die Limitierung des Freiflächenverschleißes in der geometrischen Gestalt einer abgesetzten Freifläche begründet liegt, lassen die verringerten Gefügebeeinflussungen vor allem auf geringere Prozesstemperaturen an der Werkzeugschneide schließen, was auf eine verbesserte KSS-Versorgung hindeutet [BEE15].

In frühen Untersuchungen zum Einsatz einer Freiflächenmodifikation an Werkzeugen aus kubischem Bornitrid (CBN) bei der Trocken-Drehbearbeitung des Einsatzstahls 16MnCr5 wurde eine Verringerung des auftretenden Werkzeugverschleißes festgestellt. Untersucht wurden Absätze mit einer Tiefe von $t_{\text{Absatz}} = 30 \dots 150 \mu\text{m}$ und einem Abstand zur Schneide von $d_{\text{Schneide}} = 100 \dots 297 \mu\text{m}$. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die geometrische Ausgestaltung der Freiflächenmodifikation durch die auftretenden Belastungen während des Prozesses eingeschränkt ist. So traten an untersuchten Werkzeugen, die Werte von $t_{\text{Absatz}} > 50 \mu\text{m}$ oder $d_{\text{Schneide}} < 100 \mu\text{m}$ aufwiesen, bereits nach kurzer Einsatzdauer Schneidenbrüche auf. An den mit modifizierten Werkzeugen erfolgreich bearbeiteten Werkstücken konnten vergleichbare Ausprägungen weißer Schichten an den Oberflächen festgestellt werden. Allerdings hingen Art und Ausmaß der in das Bauteil eingebrachten Eigenspannungen maßgeblich vom Verschleißzustand und der Freiflächenbreite der eingesetzten Werkzeuge ab [DEN08].

Unterschiedliche Potenziale wurden bei Untersuchungen zur Drehbearbeitung von Superlegierungen mit freiflächenmodifizierten Werkzeugen beobachtet. So konnte bei der Bearbeitung von Ti6Al4V im Vergleich zum Referenzwerkzeug die Standzeit um $\Delta t = 75 \%$ verlängert werden. Bei der Bearbeitung von γ -Titanaluminiden betrug der erzielbare Standwegvorteil sogar $\Delta t = 150 \%$ im Vergleich zu unmodifizierten Referenzwerkzeugen. In Inconel 718 hingegen konnten keine Standzeitvorteile generiert werden, da der dabei auftretende Kolkverschleiß zu frühzeitigen Werkzeugbrüchen an modifizierten Werkzeugen führte. Dies ließ sich durch den Einsatz stabiler ausgelegter Werkzeuge mit einem Abstand zwischen Absatz und Schneide von $d_{Schneide} = 200 \mu\text{m}$ unterbinden, wodurch jedoch der den Verschleiß limitierende Aspekt der Freiflächenmodifikation nicht mehr zum Tragen kam. Im Rahmen der Untersuchungen konnte die erzielbare Produktivität durch die Ermöglichung zur Erhöhung des eingesetzten Vorschubs um $\Delta f = 20 \%$ gesteigert werden. Allerdings zeigten auch diese Untersuchungen, dass insbesondere zur Bearbeitung stark abrasiver Werkstoffe eine ausreichende mechanische Widerstandsfähigkeit der Freiflächenmodifikation zwingend gegeben sein muss, wodurch die Gestaltungsfreiheit der Freiflächenmodifikation geometrisch limitiert ist [DEN17; DEN17b]. Gleichzeitig spielt eine mögliche Beeinflussung des Schneidstoffs durch den Modifikationsprozess eine große Rolle zur Auslegung prozesssicher einsetzbarer Werkzeuge mit einer Freiflächenmodifikation [BRE18].

Das Konzept der Freiflächenmodifikation wurde des Weiteren auf Trocken-Stirnplanfräs-Prozesse an gehärtetem Warmarbeitsstahl transferiert. Zur Erzeugung der Modifikation wurde die Herstellung sowohl mittels Lasertechnologie als auch durch Schleifen untersucht. Beim Einsatz lasermodifizierter Werkzeuge konnte eine Standzeitsteigerung von $\Delta t = 140 \%$ im Vergleich zum Referenzwerkzeug erzielt werden. Schleiftechnisch eingebrachte Freiflächenabsätze erforderten dabei einen Mindestabstand zur Schneide von $d_{S_{min}} = 120 \mu\text{m}$, um das frühzeitige Auftreten von Schneidenausbrüchen zu vermeiden. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer nachträglich aufgetragenen Beschichtung untersucht. Dabei ergaben sich jedoch keine deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Standzeit, woraus sich schließen lässt, dass sich eine Werkzeugbeschichtung außerhalb von Bereichen mit einer hohen Werkstoff-Werkzeug-Interaktion nicht signifikant auswirkt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden des Weiteren vier unterschiedlich ausgestaltete Freiflächenmodifikationen experimentell eingesetzt. Dabei verfügte eine Variante über einen Freiflächenabsatz mit einem konstanten Abstand zur Schneide und einer gleichbleibenden Absatztiefe. Zwei weitere Modifikationen wurden mit variierenden Abständen zur Schneide in Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Spannungsdicke ausgeführt, wobei der Übergang vom Absatz zur Schneide jeweils mit einer Verrundung und mit einer Fase ausgeführt wurde. Eine vierte Modifikationsvariante umfasste eine partielle Einbringung des Freiflächenabsatzes in jenem Bereich des

Schneidteils, der mit der bearbeiteten Fläche in direkten Kontakt kommt. Im Rahmen der experimentellen Validierung wurde ein Absatz mit einem Abstand zur Schneide von $d_{Schneide} = 100 \mu\text{m}$ und einer Absatztiefe von $t_{Absatz} = 140 \mu\text{m}$ eingesetzt. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$ konnte eine Standzeitsteigerung von bis zu $\Delta t = 100 \%$ erreicht werden. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit auf $v_c = 180 \text{ m/min}$ führte zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß, wodurch sich die erzielte Oberflächengüte verringerte und die Standzeitverlängerung auf $\Delta t = 37 \%$ zurückging. Dies lässt sich mit der steigenden thermischen Belastung des Schneidstoffs bei hohen Schnittgeschwindigkeiten begründen [DEN13; DEN15].

Im Rahmen simulationsbasierter Untersuchungen wurde der Einfluss unterschiedlich ausgestalteter Strukturen an der Freifläche von Wendelbohrern untersucht. Alle untersuchten Freiflächenstrukturen wiesen einen Abstand von $d_{Schneide} = 150 \mu\text{m}$ zur Schneide und eine Tiefe von $t_{Absatz} = 55 \mu\text{m}$ auf. Durch ihre Einbringung wurde ein freies Volumen zur Durchflutung mit KSS geschaffen, dessen Strom gleichzeitig durch die Form der Strukturen gelenkt werden sollte. Insbesondere wurde der Einfluss einer Verbindung zwischen dem Kühlkanalaustritt und dem Freiflächenabsatz untersucht, um auf Verbesserungen des KSS-Zuflusses schließen zu können. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt ist, hatte der Grad der an der Freifläche erreichten Oberflächenzunahme keinen direkten Einfluss auf die Temperaturreduktion [MUL19].

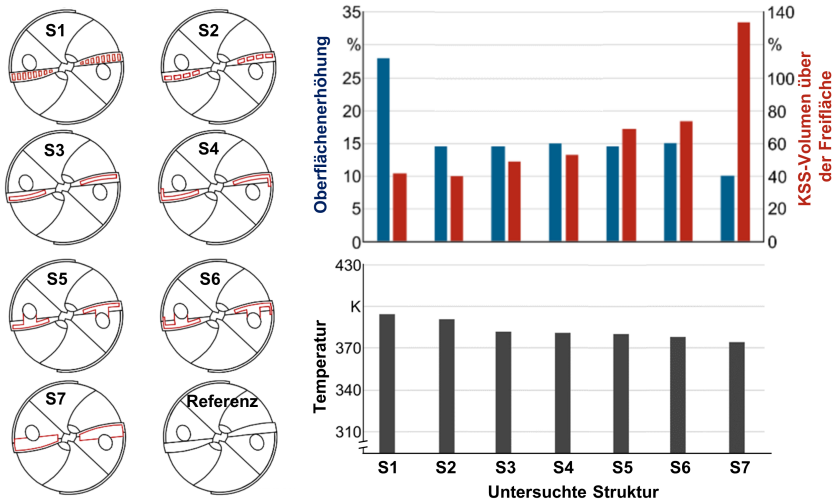


Abbildung 2.7: Einfluss der Ausgestaltung von Freiflächenstrukturen auf den KSS-Volumenstrom und die Temperatur der Freifläche nach [MUL19]

Stattdessen fiel diese vor allem dann höher aus, wenn ein großes Volumen zwischen Werkzeugstirnseite und Bohrungsgrund gegeben war. Dies wirkte sich direkt auf die berechnete Zunahme des Wärmestroms von der Werkzeugoberfläche in den KSS aus, in dessen Folge die resultierenden Freiflächentemperaturen deutlich zurückgingen. Während alle untersuchten Freiflächenstrukturen erhebliche Verbesserungen gegenüber dem als Referenz herangezogenen Standardwerkzeug auswiesen, wurde ein besonders großflächiger Absatz an der Freifläche als mit Abstand effizienteste Gestaltung zur effektiven Wärmeabfuhr identifiziert.

Die bislang durchgeführten Untersuchungen belegen, dass das Prinzip der Freiflächenmodifikation ein großes Potenzial zur Verbesserung der Schneidenkühlung besitzt. Während eine Beschichtung der modifizierten Bereiche bislang keinen grundsätzlichen Einfluss auf das Leistungsvermögen der Werkzeuge gezeigt hat, spielt vor allem die gute Zugänglichkeit der Schneide für den zugeführten KSS eine zentrale Rolle. Die Umsetzung einer effizienten Freiflächenmodifikation erfordert jedoch weiterführende Analysen der zugrunde liegenden Mechanismen. Dies gilt insbesondere für die Bohrbearbeitung, bei der sich eine Vielzahl der vorliegenden Untersuchungen bislang aufgrund der schlechten Wirkstellenzugänglichkeit auf simulationsbasierte Analysen stützt.

2.2.5 Verschleißschutzbeschichtungen

Der überwiegende Anteil der zur Hochleistungszerspanung eingesetzten Hartmetallwerkzeuge verfügt über eine Verschleißschutzbeschichtung auf Basis von Titan (Ti). Diese Beschichtungen bestehen häufig aus Titanaluminiumnitrid (TiAlN), Titanitrid (TiN), Titancarbonitrid (TiCN) oder Titancarbid (TiC) sowie Kombinationen daraus. Sie werden eingesetzt, um durch ihre hohe Härte und chemische Stabilität die Resistenz des Schneidstoffs gegen Freiflächen-, Kolk- und Kerbverschleiß zu steigern. Verschleißschutzbeschichtungen können in Form von Mehrlagen- und Gradientenschichten sowie als nanokristalline, mehrphasige Schichten oder Viellagenschicht aufgebracht werden, wodurch sich unterschiedliche Schichteigenschaften vereinen lassen. Kohlenstoffhaltige Schichten wie TiC und TiCN weisen aufgrund ihrer besonders hohen Härte eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber Abrasivverschleiß auf. Beschichtungen auf TiN- bzw. TiAlN-Basis eignen sich hingegen durch ihre geringen Reibungskoeffizienten besonders gut zur Bearbeitung von Werkstoffen, die zu starker Adhäsion neigen oder tribochemischen Verschleiß hervorrufen [AIH12].

Zur Aufbringung von Verschleißschutzbeschichtungen kommen in der Regel chemische oder physikalische Gasabscheidungsverfahren zum Einsatz, die als Chemical Vapor Deposition (CVD) bzw. Physical Vapor Deposition (PVD) bezeichnet werden. Diese umfassen jeweils eine eigene Gruppe von Verfahren und unterscheiden

sich grundsätzlich hinsichtlich der zugrunde liegenden physikalischen Phänomene. So erfolgt die chemische Gasphasenabscheidung bei hohen Temperaturen, durch die eine Diffusionsschicht auf dem zu beschichtenden Substrat erzeugt wird [DUR83]. Dadurch lassen sich sehr gleichmäßige Schichtzusammensetzungen an allen Stellen des Bauteils erzeugen, wobei durch mehrfache Wiederholung des Vorgangs Schichtdicken von bis zu $t = 100 \mu\text{m}$ realisierbar sind. Dabei ermöglicht die CVD-Technologie, bedingt durch die gasförmige Ausbringung des Beschichtungsstoffs, auch die Beschichtung hochkomplexer sowie innenliegender Geometrien [BUR15]. Eine weitere Besonderheit des Verfahrens besteht in der Einbringung von Zugeigenspannungen in die Beschichtung. Diese resultieren aus den hohen Prozesstemperaturen während des Beschichtungsvorgangs, die bis zu $T \approx 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen können. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Substrat und Beschichtung kommt es bei der anschließenden Abkühlung zu Spannungen, die zu Rissen in der aufgetragenen Beschichtung führen können [DEN11].

Beim Einsatz von PVD-Verfahren erfolgt die Aufbringung der Verschleißschutzschicht durch Kondensation des zuvor verdampften Beschichtungsstoffs an der kälteren zu beschichtenden Oberfläche. Auf diese Weise können feinkristalline Schichten mit Dicken von bis zu $t \approx 6 \mu\text{m}$ aufgebracht werden, wobei die Prozesstemperaturen maximal $T \approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Dadurch kommt es zu einer geringeren Ausprägung von Zugeigenspannungen in der Oberfläche. Diese werden häufig sogar durch verfahrensbedingt eingebrachte Druckeigenspannungen überkompensiert, wodurch sich die Widerstandsfähigkeit des Verbunds aus Substrat und Beschichtung verbessert. Mithilfe von PVD-Verfahren lassen sich zudem auch keramische Schichten auftragen, wobei eine Beschichtung innenliegender Konturen verfahrensbedingt kaum umsetzbar ist [BUR15; DEN11]. Während der Beschichtung kann es stets zu Fehlstellen in der Beschichtung kommen, beispielsweise wenn sich tropfenförmige Anhäufungen des Beschichtungsmaterials bilden, die als Droplets bezeichnet werden. Diese sind nicht ausreichend an das Substrat angebunden, sodass sie sich bei einer anschließenden Nachbehandlung oder während des Zerspanprozesses lösen können [DEN11; KLO05].

Abhängig von den an das beschichtete Werkzeug gestellten Anforderungen besitzen die eingesetzten Beschichtungssysteme einen unterschiedlichen Komplexitätsgrad. Während Monolayer-Schichtsysteme aus einer homogenen Schicht bestehen, werden bei Multilayer-Schichtsystemen unterschiedlich geartete Schichten in variierenden Dicken miteinander kombiniert. Dadurch lassen sich Beschichtungen mit einer höheren Zähigkeit, Härte und einem ausgeprägteren Verschleißwiderstand im Vergleich zu den Eigenschaften der jeweils einzelnen Schichtbestandteile erzielen. Darüber hinaus existieren Nanolayer-Systeme, bei denen die einzelnen Schichtdicken nur wenige

Nanometer betragen. Dadurch lässt sich, verglichen mit konventionellen Multilayer-Beschichtungen, eine besonders hohe Warmverschleißbeständigkeit erreichen [KLO05].

Im Rahmen mehrerer bisheriger Arbeiten wurden die isolatorischen Eigenschaften unterschiedlicher Verschleißschutzbeschichtungen untersucht. Grundsätzlich besitzen insbesondere TiC- und TiN-basierte Beschichtungen geringe Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von etwa $\lambda \approx 35 \frac{W}{m \cdot K}$ [DEN11]. In Form einer Beschichtung mit einer Dicke von $t = 3 \mu\text{m}$, aufgebracht auf einen Stahlgrundkörper, wurde jedoch eine weitere Verringerung der thermischen Leitfähigkeit auf $\lambda = 11,9 \frac{W}{m \cdot K}$ beim Einsatz von TiN-Schichten und $\lambda = 4,63 \frac{W}{m \cdot K}$ im Fall TiAlN-basierter Schichten beobachtet. Dabei wurde eine direkte Abhängigkeit der resultierenden Wärmeleitfähigkeit vom Anteil an Aluminium (Al) in der jeweiligen Beschichtung festgestellt. Dies lässt sich auf das Kornwachstum in Beschichtungsrichtung zurückführen, das bei reinen TiN-Schichten in der Ausbildung vergleichsweise großer Körner resultiert. Die Zugabe von Aluminium führt jedoch zu einer Verringerung der Korngrößen, wodurch sich die Zahl der Korngrenzen und Fehlstellen im Gefüge vergrößert. An diesen werden die Wärme tragenden Phononen abgelenkt, wodurch sich die Durchlässigkeit verringert und die Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung insgesamt abnimmt [SAM10]. Dieser Effekt wird durch die Aufbringung TiAlN/TiN-basierter Mehrlagenbeschichtungen noch weiter verstärkt. Hierbei nimmt mit steigender Schichtanzahl die Korngröße stetig ab, während die Anzahl und Dichte der Fehlstellen an den Übergängen zwischen den jeweiligen Lagen zunehmen [SAM15].

Darüber hinaus neigen TiAlN-Beschichtungen während des Zerspanprozesses zur Ausbildung einer oberflächlichen Schicht aus Al_2O_3 . In Untersuchungen zum Hartdrehen wurde beobachtet, dass diese insbesondere an den Spanflächen beschichteter Werkzeuge entsteht und eine Dicke von bis zu $t \approx 0,8 \mu\text{m}$ aufweisen kann, wie in Abbildung 2.8 anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen veranschaulicht ist.

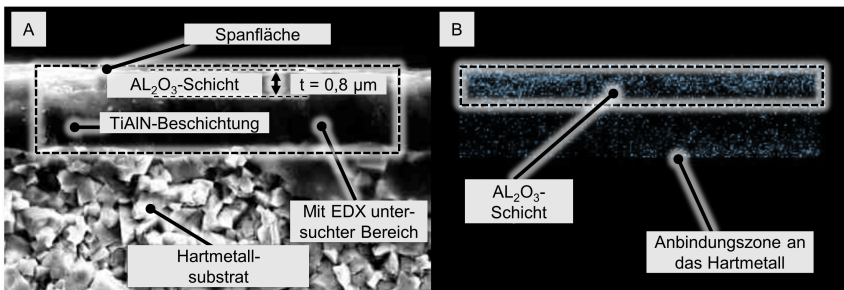


Abbildung 2.8: Al_2O_3 -Schicht auf TiAlN-Beschichtung nach dem Drehen, dargestellt durch Sekundärelektronenmikroskopie (A) und Röntgenanalyse (B) nach [HAO19]

Im Rahmen der Auswertung wurde das Auftreten von Sauerstoff-Atomen im Randbereich als Beleg für die Ausbildung der Al_2O_3 -Schicht herangezogen. Diese führt zu einer weiteren Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des gesamten Schichtsystems, wie in experimentellen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte [HAO19].

Untersuchungen zum Einsatz unterschiedlich verschleißschutzbeschichteter Hartmetallwerkzeuge in der Drehbearbeitung konnten nachweisen, dass der Wärmeeintrag in das Werkzeug durch den Einsatz Ti-basierter Beschichtungen grundsätzlich deutlich reduziert wird. Allerdings korrelierte die Verringerung des Wärmestroms in erster Linie nicht mit der Wärmeleitfähigkeit, sondern vor allem mit dem Reibungskoeffizienten der jeweils untersuchten Beschichtungsarten. Darauf deutete auch die Analyse der Prozesskräfte hin, die sich beim Einsatz von Verschleißschutzbeschichtungen signifikant verringerten. Daraus lässt sich schließen, dass die festgestellte Reduktion der thermischen Werkzeugbelastungen primär auf eine geringere Reibung zwischen Werkstück und Spanfläche zurückzuführen ist [REC04; REC05; REC06]. Der im Rahmen dieser Untersuchungen eingesetzte Versuchsaufbau sowie der ermittelte Wärmestrom in das Werkzeug sind einander in Abbildung 2.9, abhängig von der eingesetzten Beschichtung, vergleichend gegenübergestellt.

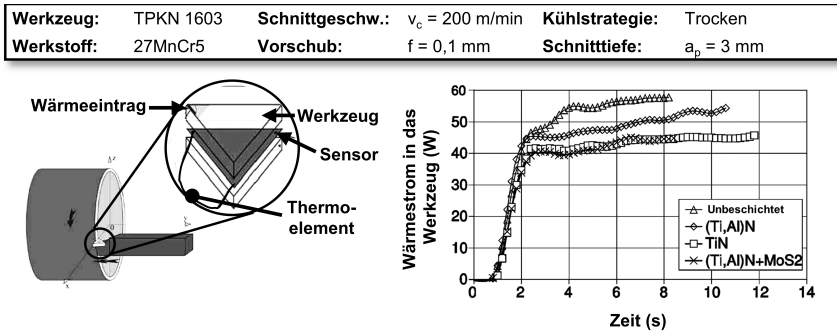


Abbildung 2.9: Wärmestrom in Abhängigkeit von der Beschichtung nach [REC04]

Die Ergebnisse simulationsbasierter Untersuchungen zum Einfluss von Verschleißschutzbeschichtungen auf die thermische Werkzeugbelastung beim Drehen zeigten, dass feststellbare Unterschiede lediglich in einem Zeitraum von $t = 0,01$ s nach Beginn des Schnitts bestehen [REC05]. Im kontinuierlichen Schnitt stellt sich nach einer Dauer von ca. $t = 5$ s eine stationäre Temperaturverteilung im Werkzeug ein, wie experimentell nachgewiesen werden konnte [THA15]. Während Verschleißschutzschichten also, bedingt durch ihre tribologischen Eigenschaften, einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturentstehung an der Wirkstelle haben, ist ihr Einfluss auf die thermi-

sche Abschirmung des Schneidstoffs bei Bearbeitungsverfahren mit kontinuierlichem Schneideneingriff aufgrund der geringen Schichtdicken begrenzt [REC06].

2.2.6 Integrität der Bohrungsrandzone

Durch spangebende Bearbeitung entsteht eine neue Oberfläche am Werkstück, in die ein Teil der bei der Zerspanung eingebrachten Energie übergegangen ist. Diese bewirkt Gefügeveränderungen, die die Eigenschaften der Bauteilrandzone beeinflussen und deren Funktionalität sowohl verbessern als auch einschränken können. Die Integrität der erzeugten Oberfläche lässt sich dabei nach Makro- und Mikrostruktur unterscheiden. Die Makrostruktur wird vor allem durch die Oberflächentopografie definiert, zu der Rauheiten, Welligkeiten und ggf. vorhandene Defekte wie Risse zählen. Die Mikrostruktur der Oberfläche bezieht sich auf das Werkstoffgefüge und ist stark vom untersuchten Werkstoff sowie den eingestellten Parametern des eingesetzten Bearbeitungsverfahrens abhängig [BRI91; VES13]. Verschiedene, durch die spanende Bearbeitung eingebrachte Formen der Randzonenbeeinflussung sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

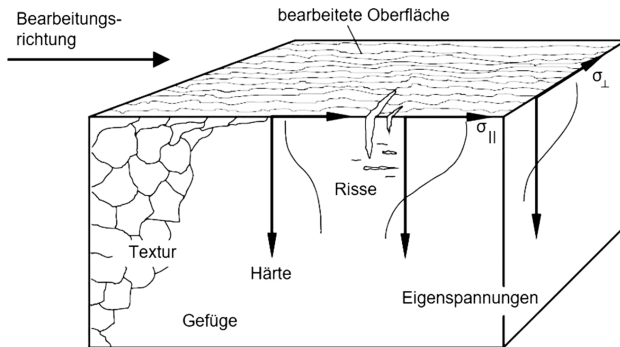


Abbildung 2.10: Beispielhafte Darstellung der Randzonenbeeinflussung durch spanende Bearbeitung [BRI91]

Eine besondere Rolle bei der Bearbeitung von Nickelbasislegierungen spielt die Beeinflussung der Bohrungsrandzone. Diese erfolgt insbesondere im Bereich der Verformungsvorlaufzone und der sekundären Scherzone, wodurch Gefügeänderungen, Eigenspannungen und Härtesteigerungen im Randbereich der bearbeiteten Oberfläche induziert werden [ADA96; VES14]. Zur Analyse der mikrostrukturellen Gefügeveränderungen im Bereich der Bearbeitungsrandzone eignen sich Korngrenzen- und Kornflächenätzungen, wodurch die Veränderungen des Korngefüges mithilfe eines

Lichtmikroskops oder eines Rasterelektronenmikroskops (REM) sichtbar gemacht werden können. Zu den Einflüssen auf das Korngefüge kommen Rekristallisations- und Diffusionsvorgänge, die durch thermomechanische Belastungen induziert werden und eine neue Kornstruktur im Randbereich der Oberfläche erzeugen. Diese weist häufig sehr kleine, nanostrukturierte Korngrößen auf, wodurch sie in lichtmikroskopischen Aufnahmen sehr hell erscheint und deshalb als "weiße Schicht" bezeichnet wird. Da diese Rekristallisation insbesondere durch hohe Temperaturen gefördert wird, begünstigen ein fortgeschrittener Werkzeugverschleiß und hohe Schnittwerte die Ausbildung weißer Schichten [UMB13].

Experimentelle Untersuchungen konnten aufzeigen, dass weiße Schichten nicht nur in der bearbeiteten Werkstückrandzone, sondern auch in den erzeugten Spänen nachweisbar sind [KLO11]. Auch hohe Prozesskräfte und die daraus resultierende starke plastische Verformung führen, insbesondere in Kombination mit hoher thermischer Wechselbeanspruchung, zum verstärkten Auftreten dieses im Allgemeinen unerwünschten Effekts [CHO99]. Darüber hinaus kann es bei der Bohrbearbeitung zur Adhäsion von Werkstoffpartikeln der durch die Spannen abtransportierten Späne an der Bohrungswand kommen, wenn die Späne mit hohem Druck an dieser ablaufen und infolgedessen Werkstoffmaterial unter plastischer Verformung in die Oberfläche der gefertigten Bohrung gepresst wird [SHA08]. Im Vergleich zum unbearbeiteten Werkstoff sind weiße Schichten durch erhöhte Härten und Sprödigkeiten gekennzeichnet, wodurch sie zu einer schnellen Rissbildung und -ausbreitung neigen und die Oberflächenintegrität einschränken. Aus diesem Grund erfordern sie häufig eine aufwendige Nachbearbeitung [SHA08; ULU11]. Ein Vergleich zwischen einer Bohrungsrandszone mit unerwünschter weißer Schicht und einer durch Bohrfräsen nachgearbeiteten Bohrungsoberfläche ist in Abbildung 2.11 gegeben.

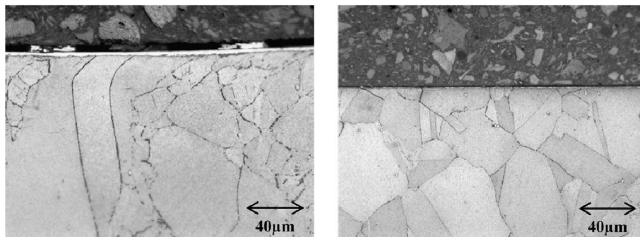


Abbildung 2.11: Ausbildung weißer Schichten bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 (links), durch Bohrfräsen nachgearbeitete Bohrungsrandszone ohne weiße Schicht (rechts) [SHA08]

Unabhängig von der Ausbildung weißer Schichten wirkt sich die spanende Bearbeitung in vielen Fällen auf die Härte der gefertigten Oberfläche aus, wobei das Ausmaß und

die Ausbreitung der Härtebeeinflussung sowohl vom eingesetzten Verfahren als auch von den Werkstoffeigenschaften abhängig sind. Durch mechanische Belastungen wird häufig eine plastische Verformung in der Bearbeitungsrandzone induziert. Diese wirkt sich, insbesondere bei Werkstoffen mit einer hohen Neigung zur Kaltverfestigung, in einer Härtesteigerung bei gleichzeitiger Abnahme der Duktilität aus. Starke thermische Einflüsse hingegen haben häufig einen gegenteiligen Effekt, da sie Rekristallisationseffekte fördern, die eine Härteabnahme bei gleichzeitiger Duktilitätssteigerung nach sich ziehen. Dieser enthärtende Einfluss tritt jedoch ausschließlich bei einer langsamen Abkühlung des Werkstoffs auf. Tritt hingegen eine schnelle Abkühlung ein, im Extremfall durch eine Kühlung des Prozesses mit kryogenen Medien, hat dies mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Härtesteigerung bei gleichzeitiger Versprödung zur Folge. Da sich während der Bearbeitung beide Arten der thermischen Be- und Entlastung hochgradig nichtlinear überlagern, ist eine präzise Aussage über den resultierenden Härteverlauf im Bereich der Oberflächenrandzone nur nach erfolgter Untersuchung des Einzelfalls möglich [DEN11; ULU11].

Die Eigenschaften der Oberflächenrandzone werden darüber hinaus durch ggf. vorhandene Eigenspannungen beeinflusst. Dabei handelt es sich um Spannungen, die innerhalb der Gefügestruktur ohne das Anliegen äußerer Kräfte auftreten. Sie werden zumeist während der Bearbeitung thermisch oder mechanisch induziert und bleiben anschließend im Werkstoff bestehen. Sie lassen sich sowohl hinsichtlich ihrer Größe als auch Art einteilen, wobei in der Regel nach Zug- und Druckeigenspannungen unterschieden wird. Während Makroeigenspannungen sich homogen über mehrere Körner des Gefüges erstrecken, können Mikrospannungen innerhalb eines einzelnen Kristallits sowohl Größe als auch Richtung ändern. Zugeigenspannungen werden zumeist als nachteilig für die Bauteilfunktionalität eingestuft, wohingegen Druckeigenspannungen die Neigung zur Rissbildung und -ausbreitung im Bereich der Randzone vermindern und die Bauteileigenschaften dadurch verbessern können [BAR12]. Aus diesem Grund existieren verschiedene Verfahren zur gezielten Einbringung von Druckeigenspannungen. Dazu zählen beispielsweise Kugelstrahl- und Glattwalzverfahren, die durch Verdichtung der bearbeiteten Oberfläche eine Erhöhung der vorhandenen Druckeigenspannungen nach sich ziehen [KLO09].

2.2.7 Simulationsgestützte Werkzeugauslegung

Da die gezielte Auslegung von Hochleistungswerkzeugen zunehmend komplexer wird, kommen vermehrt simulationsgestützte Verfahren zum Einsatz. Dadurch lassen sich die auftretenden Belastungen und Randbedingungen des Prozesses bereits während der Auslegung untersuchen und berücksichtigen. Besonders vorteilhaft ist dies bei der

Auslegung geometrisch komplexer Wendelbohrer, bei denen vielfältige Zielkonflikte hinsichtlich der ausreichenden mechanischen Stabilität des Werkzeugs, der effektiven Kühlung und einer effizienten Spanabfuhr bestehen. Oftmals wird in diesem Kontext auf die Finite-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen, um die Auswirkungen der Prozessbelastungen auf den Schneidstoff zu analysieren und angepasste Werkzeuge zu gestalten, wie in Abbildung 2.12 beispielhaft dargestellt ist. Bisherige Arbeiten behandeln darüber hinaus die Erarbeitung ganzheitlicher, heuristischer Algorithmen zur Auslegung von Wendelbohrern unter Berücksichtigung sowohl der resultierenden Anwendungseigenschaften als auch ihrer Herstellbarkeit [ABE10; FUJ11; HIN00].

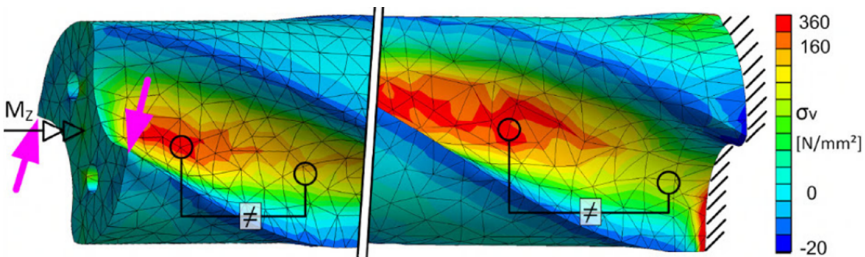


Abbildung 2.12: Durch FEM ermittelte Spannungsverteilung in der Spannut eines Wendelbohrers [FUJ11]

Über die mechanische Stabilität des Werkzeugs hinaus stellt der KSS-Fluss an den Schneiden eine maßgebliche Einflussgröße zur Steigerung der Leistungsfähigkeit insbesondere von Bohrwerkzeugen dar, wie in bisherigen Arbeiten gezeigt werden konnte [FAL14; MUL19]. Um eine effiziente Kühlschmierung zu erreichen, ist neben einem guten Verständnis der KSS-Eigenschaften auch die Abstimmung der Zuführung auf den jeweiligen Bearbeitungsprozess ein maßgeblicher Faktor [SHA09]. Im Vergleich zum Drehen und Fräsen stellt das Bohren dabei besondere Herausforderungen an den effizienten Einsatz von KSS, da die Wirkstelle im Werkstück liegt und nicht von außen für eine Kühlschmierung zugänglich ist.

Damit ein ausreichender Volumenstrom an der Schneide realisiert und die entstehende Wärme und Späne abtransportiert werden können, sind Bohrwerkzeuge in der Regel mit innen liegenden Kühlkanälen ausgestattet. Da jedoch experimentelle Analysen des tatsächlichen Kühlungsverhaltens an den Schneiden im Bohrprozess schwierig umzusetzen und häufig mit Ungenauigkeiten behaftet sind, ermöglicht der Einsatz der CFD zielführende Ansätze, um die KSS-Strömungen und Wärmeaustauschbedingungen detailliert abzubilden und thermische Effekte zu simulieren [IOV16]. Darüber hinaus ist es möglich, durch zusätzliche Kombination mit der FEM gleichzeitig auch Spanbildungsvorgänge zu berücksichtigen und in die Bewertung des KSS-Strömungsverhaltens mit

einzu beziehen [OEZ18]. Auch zur Entwicklung für den Einsatz mit MMS ausgelegter Werkzeuge wurden im Rahmen bisheriger Arbeiten kombinierte Simulationsansätze bereits erfolgreich eingesetzt [HAN03; HAN05].

Simulationsgestützte Untersuchungen zur Auslegung der Kühlkanäle und des Spitzenanschliffs von Werkzeugen konnten nachweisen, dass diese einen signifikanten Einfluss auf die KSS-Strömungssituation und die Druckverteilung innerhalb des Mediums haben [AST94; BEE15; OSM79]. Auf diese Weise wurde mithilfe der CFD eine optimierte Position des KSS-Austritts an Wendelbohrern ermittelt, wodurch sich die Druckverteilung im Medium erheblich verbesserte. Dies wurde anhand wirkstellennah erfasster Temperaturen experimentell validiert [FAL14]. Bisherige simulationsbasierte Untersuchungen haben gezeigt, dass es vor allem in der Bohrbearbeitung zu einer schlechten Erreichbarkeit der Wirkzone durch den KSS kommt, da wegen der auftretenden Flächenpressung der KSS kaum in die Bereiche zwischen Span, Werkzeug und Bohrungsgrund gelangt. Dies hat zur Folge, dass die entstandene Prozesswärme erst nach der Wärmeeinleitung in den Schneidstoff über den KSS abgeführt werden kann, was zu einer erhöhten Schneidstoffbelastung führt [AST14].

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der KSS-Strömung und den von ihr durchströmten Strukturen kommen darüber hinaus Analysemethoden wie die Fluid-Structure Interaction (FSI) zum Einsatz, bei der die Strömungs- und Strukturbeurteilung miteinander gekoppelt werden. Mit ihrer Hilfe konnte nachgewiesen werden, dass eine Vergrößerung des Kühlkanaldurchmessers an ELB über einen kritischen Wert hinaus zu einer signifikanten Erhöhung der Vorschubkraft während des Prozesses durch den erhöhten KSS-Volumenstrom führen kann [OEZ17]. Eine beispielhafte Darstellung simulationsbasiert ermittelter Strömungsverhältnisse an einem ELB ist Abbildung 2.13 zu entnehmen.

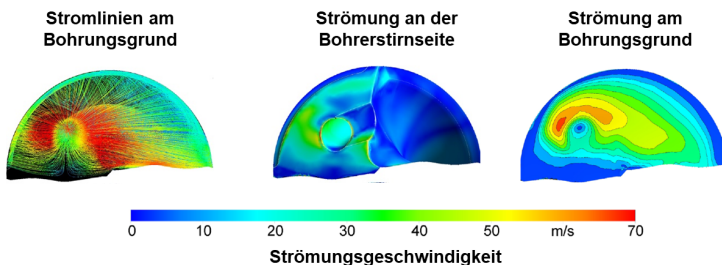


Abbildung 2.13: Simulation der KSS-Verteilung am Einlippenbohrwerkzeug [OEZ17]

Die für eine CFD-Simulation notwendige Vernetzung des Fluidmodells muss in den Grenzbereichen zwischen Fluid und Festkörper besonders detailliert erfolgen, um eine ausreichend präzise Aussage zu ermöglichen. Aufgrund der komplexen Gestalt moderner Bohrwerkzeuge werden daher hohe Rechenkapazitäten benötigt. Darüber hinaus ist die CFD, im Gegensatz zur FEM, zusätzlich vom physikalischen Phänomen der Druck-Geschwindigkeits-Kopplung betroffen. Damit die Kontinuität der Fluidmasse über die gesamte Lösungsdomäne korrekt abgebildet werden kann, ist daher eine hohe Auflösung in den betroffenen Bereichen notwendig [BRO10]. Auch die korrekte Definition der zugrunde gelegten Randbedingungen, die Unterscheidung zwischen Fest- und Flüssigkeitsbereichen an den Berührungsschnittstellen von Werkzeug, Werkstück und Fluid sowie die Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells sind von zentraler Bedeutung. Die Ergebnisgenauigkeit der Strömungssimulationen ist daher sehr stark von den gewählten Randbedingungen abhängig [VER07].

Eine unmittelbare Validierung der simulationsbasiert ermittelten Ergebnisse stellt im Kontext der Zerspanung häufig eine große Herausforderung dar, da sich die an der Wirkstelle auftretende Strömungssituation in der Regel nicht beobachten lässt. Zur Validierung werden deshalb experimentelle Untersuchungen mit Fokus auf mit der Kühlschmierung zusammenhängende Effekte, wie beispielsweise den Prozesskräften oder dem Werkzeugverschleiß [BIE17], oder Analogieversuche zur Beobachtung der KSS-Strömung durchgeführt [OZK17; IOV21]. Im Laufe der Zeit wurde die Anwendung der CFD weiterentwickelt, um zuverlässige und experimentell validierbare Aussagen über die Strömungsverteilung im Prozess zu ermöglichen. Die validierten Modelle lassen sich auch auf experimentell nicht untersuchbare Bereiche übertragen, sodass auf ihrer Basis Modifikationen der Werkzeuggestalt vorgenommen werden können, die zu einer effizienteren KSS-Verteilung führen. Darüber hinaus ermöglichen CFD-Analysen und damit gekoppelte Simulationsansätze die Erlangung eines grundsätzlichen Verständnisses der im Prozess auftretenden, aber einer experimentellen Analyse bislang unzugänglichen Phänomene [BIE17; OEZ16; SAT13].

2.3 Methoden zur Prozessanalyse

2.3.1 Erfassung mechanischer Belastungen

Da sowohl die Schneidengeometrie als auch die Schnittgeschwindigkeit über den Radius des Wendelbohrers variieren, ergibt sich eine ungleichmäßige Verteilung der anliegenden Kräfte entlang der Schneiden. An symmetrisch ausgestalteten Wendelbohrern heben sich dabei die an den jeweiligen Schneiden anliegenden Passivkräfte gegenseitig weitgehend auf, sodass sie während des Prozesses nicht durch äußere Kraftmesstechnik erfasst werden können. Deshalb lassen sich, wenn beide Schneiden im Eingriff sind, lediglich das Bohrmoment M_b und die Vorschubkraft F_f erfassen. Obwohl auch die Schnittkraft F_c auf diese Weise nicht direkt bestimmbar ist, lässt sich aus dem auftretenden Bohrmoment auf sie schließen [CHR05; MIC14].

Um die an den jeweiligen Schneidensegmenten anliegenden Kräfte zu analysieren, existieren unterschiedliche Ansätze. Dabei handelt es sich jedoch stets um Analogieveruche, die den realen Prozess mit unterschiedlicher Genauigkeit angenähert abbilden. Die größte Herausforderung bei der realitätsgetreuen Abbildung der Zerspankraftkomponenten besteht darin, Abstützungs- und Reibungseffekte an der Bohrungswand und den Einfluss der Führung durch die Werkzeugspitze einzubeziehen. Bislang eingesetzte Versuchsaufbauten basieren meist auf der schrittweisen Ineingriffbringung unterschiedlicher Schneidenabschnitte, die sowohl zeitabhängig als auch durch eine Aneinanderreihung von Einzelversuchen erfolgen kann [BAC04; EIS99; OPA03]. Existierende Versuchsanordnungen beziehen sich zumeist auf die Analyse einzelner Aspekte des realen Bohrprozesses. Durch die Verwendung von Versuchsproben, deren Durchmesser identisch mit dem des Bohrwerkzeugs ist, lässt sich eine ausschließliche Belastung der Haupt- und Querschneide realisieren, sodass Einflüsse durch die Reibung der Nebenschneide an der Bohrungswand minimiert werden. Beim Einsatz von Hohlproben, welche die Querschneide aussparen, lässt sich die an der Hauptschneide anliegende Belastung ohne Betrachtung in der Werkzeugmitte auftretender Quetsch- und Reibvorgänge bestimmen. Der Einsatz mehrerer Hohlproben mit unterschiedlichen Innendurchmessern erlaubt die abschnittsweise Untersuchung der auftretenden Kräfte entlang der Schneide. Gleichzeitig kann durch einen daran anschließenden Vollbohrversuch auf die zuvor ausgesparte Belastung der Querschneide geschlossen werden. Durch Anwendung des Hebelgesetzes wird anschließend aus dem ermittelten Bohrmoment die wirkende Schnittkraft berechnet, wodurch sich die Kräfteverteilungen entlang der Werkzeugschneide in Schnitt- und Vorschubrichtung ermitteln lassen [PAU08; SPU60].

Eine abgewandelte Variante der Versuchsdurchführung mit einer Hohlprobe stellt der in Abbildung 2.14 dargestellte Ringspanversuch dar. Hierbei werden einzelne Abschnitte, sog. Zerspanssegmente, einer einzigen Werkzeugschneide durch eine ringförmige

Versuchsprobe belastet. Dazu wird das Werkzeug auf einer Kraftmesseinrichtung befestigt und relativ zur Probe bewegt, sodass die Kraftkomponenten am stehenden Werkzeug erfasst werden können. Auf diese Weise lassen sich die auf die Schneide wirkenden Belastungen in allen Raumrichtungen erfassen, wobei jedoch das Werkstück nicht vollständig analog zum realen Prozess auf die Bohrerschneide trifft. Da die Schnittgeschwindigkeitsrichtung im Modellversuch nicht mit der Realität übereinstimmt, verändert sich die Richtung der gemessenen Belastung am Versuchswerkzeug gegenüber dem Vollbohrprozess. Allerdings lassen sich durch solche und vergleichbare Versuchsaufbauten die Relationen der entlang der Werkzeugschneide wirkenden, mechanischen Belastungen zueinander bestimmen, was für die gezielte Auslegung der Schneidengeometrie genutzt werden kann [ADA96; BEE15; KOT06; WOL19].

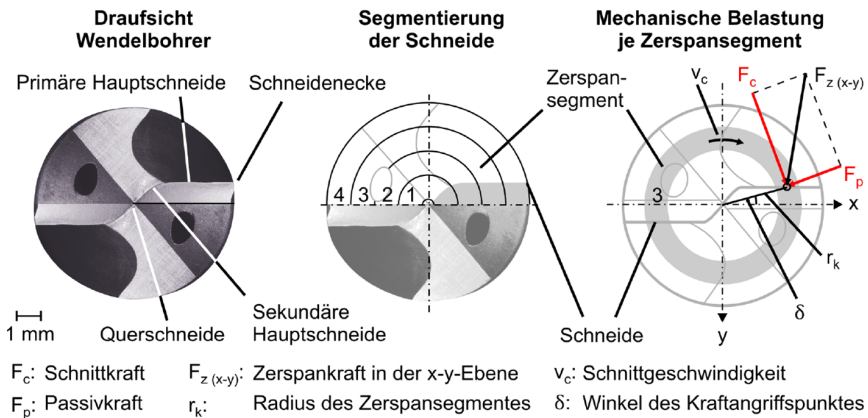


Abbildung 2.14: Erfassung der Schneidenbelastung durch Ringspanversuch [WOL19]

Ringspanversuche lassen sich darüber hinaus durch Aufbohrversuche ergänzen. Dabei werden nacheinander Proben mit unterschiedlichen Innendurchmessern bearbeitet, die entsprechend der zu analysierenden Schneidensegmente gewählt werden. Auf diese Weise lassen sich die jeweils wirkenden Schnitt- und Vorschubkräfte auf den Schneidensegmenten ermitteln, wobei die Passivkraft aufgrund der Abstützung an der Bohrungswand nicht aufgenommen werden kann. Diese Kombination ermöglicht eine angenäherte Nachbildung des realen Bohrprozesses [BEE15].

2.3.2 Entstehung und Analyse der Prozesstemperaturen

Zur Erklärung der innerhalb der Trennzone ablaufenden Mechanismen existiert eine Vielzahl von Modellen, durch die sich die makroskopischen Auswirkungen der Materialtrennung auf unterschiedliche Weise beschreiben lassen. Sie alle basieren auf der Einbringung von Kräften in das Werkstück durch seine Relativbewegung zum Werkzeug. Dadurch werden Spannungszustände im Material induziert, die bei Überschreitung der Fließgrenze des zu bearbeitenden Werkstoffs in einer plastischen Deformation resultieren. Durch diese kontinuierliche Deformation kommt es zur Scherung und daraus folgend zur Spanantstehung [ANA02; MUL04; WAR74].

Ausgehend vom klassischen Scherebenenmodell entwickelte Warnecke das nach ihm benannte Wirkzonenmodell. Es basiert auf einer zweidimensionalen Darstellung des orthogonalen Schnitts und der Unterteilung der Wirkstelle in fünf unterschiedliche Zonen. Insbesondere an den beiden sekundären Scherzonen wird ein großer Anteil der eingebrachten Arbeit durch Reibung in thermische Energie umgewandelt, während die in der primären Scherzone, der Trennzone und in der Verformungsvorlaufzone erzeugte Wärme aus der Scherbeanspruchung des Werkstoffs resultiert. Dieser Anteil wird insbesondere durch den Spanwinkel der Schneide beeinflusst, der einen direkten Einfluss auf den resultierenden Scherwinkel sowie auf die Reibung an der sekundären Scherzone der Spanfläche hat [WAR74].

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Zerspanung von Stahlwerkstoffen der Großteil der eingebrachten thermischen Energie mit dem ablaufenden Span abtransportiert wird. Dieser Anteil kann bei hohen Schnittgeschwindigkeiten bis zu 90 % betragen und hängt unter anderem vom Wärmeleitkoeffizienten des bearbeiteten Werkstoffs ab. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 40...75 % der in der Zerspanung zugeführten Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird [KLO05]. Ein experimentell ermitteltes, thermisches Modell der Wärmequellen und Wärmeübertragungsmechanismen an der Wirkstelle ist in Abbildung 2.15 veranschaulicht. Die experimentelle Ermittlung der bei Zerspanprozessen auftretenden Temperaturen ist insbesondere durch die begrenzten Möglichkeiten zur Applikation der benötigten Sensoren eingeschränkt. Eine präzise Ermittlung der Temperaturen erfordert eine wirkstellennahe Platzierung, sodass die eingesetzten Sensoren hohen thermischen und mechanischen Belastungen standhalten müssen [BEN12; HOP03]. Vor allem bei der Bohrbearbeitung ist die zuverlässige Erfassung der an der Wirkstelle herrschenden Temperaturen durch besondere Herausforderungen geprägt. Die verfahrensspezifische Eigenheit einer kaum zugänglichen Wirkstelle, verbunden mit der üblicherweise rotatorischen Bewegung des Werkzeugs, stellen erhebliche Hindernisse für die korrekte Ermittlung der Prozesstemperaturen dar [EIS99; IOV16].

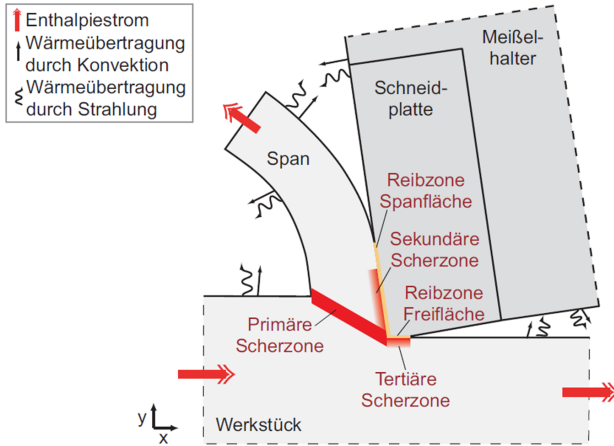


Abbildung 2.15: Wärmequellen und Wärmeübertragungsmechanismen an der Wirkstelle [MUL04]

Am weitesten zur Erfassung der Prozesstemperaturen in der Zerspanung verbreitet sind thermoelektrische, thermografische, metallografische, pyrometrische und kalorimetrische Untersuchungsmethoden [DAV07; EIS99; OPA03]. Diese wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten entwickelt und weisen jeweils verfahrensspezifische Möglichkeiten und Einschränkungen auf. Eine grobe zeitliche Einordnung der Entwicklung gängiger Verfahren zur Temperaturerfassung ist in Abbildung 2.16 gegeben.

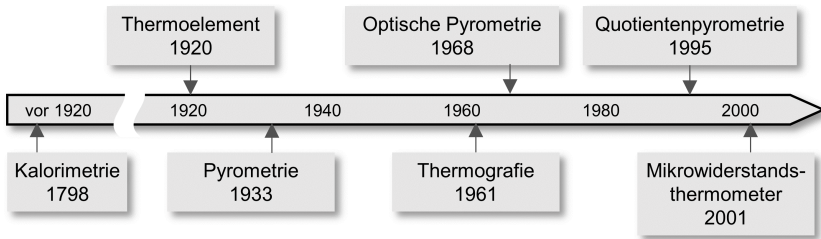


Abbildung 2.16: Historische Entwicklung der Temperaturerfassung nach [DAV07]

In der aktuellen Forschung erfolgt die Temperaturermittlung zumeist entweder durch die Verwendung thermoelektrischer Sensoren oder durch die Erfassung der im Prozess emittierten Wärmestrahlung mittels thermografischer und pyrometrischer Verfahren. Bei der thermoelektrischen Messung werden häufig Mantelthermoelemente eingesetzt, deren Funktionsweise auf dem Seebeck-Effekt beruht. Sie können sowohl werkstück-

seitig als auch werkzeugseitig platziert werden. Bei der werkzeugseitigen Verwendung werden sie beispielsweise in der Nähe der Haupt- oder Querschneide in vorher eingebrachten Grundbohrungen platziert. Nach demselben Prinzip können die Thermoelemente auch werkstückseitig in der Nähe der Bohrungsrandzone eingebracht werden, wobei bislang eine minimale Ansprechzeit von $t = 10^{-3}$ s bei einer Einsatztemperatur bis zu $T = 500$ °C realisiert werden konnte [BAG06; EIS99].

Mit thermografischen Messverfahren ist eine werkzeugseitige Messung im Bohrprozess aufgrund der Wirkstellenlage nicht möglich, sodass nur indirekt auf die an der Wirkstelle auftretenden Temperaturen geschlossen werden kann. Stattdessen bietet dieses Verfahren bei der werkstückseitigen Anwendung die Möglichkeit, die sich einstellenden Temperaturfelder im Werkstück zu ermitteln [BIE15c; MIC14]. Insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie Aluminiumlegierungen lassen sich auf die Weise aussagekräftige Ergebnisse generieren [BAG06; IOV16; SAM17]. Dagegen ist bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, zu denen auch Inconel 718 zählt, eine gute Zugänglichkeit für die thermografische Messung nur durch aufwendige Versuchsaufbauten zu realisieren, mit deren Hilfe beispielsweise eine Erfassung der Werkzeugtemperatur zum Zeitpunkt des Bohrungsaustritts erfolgen kann [MIC14; TER11].

Bisherige Untersuchungen, in denen häufig simulationsbasierte Ansätze mit einer experimentellen Validierung verknüpft wurden, kamen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Temperaturverteilung an der Boherschneide. Während in einigen Arbeiten die höchsten Temperaturen an der Querschneide ermittelt wurden [BON06], konnte neben einer gleichmäßigen Temperaturverteilung entlang der Schneide [DEV68] auch die primäre Hauptschneide [WU09] bzw. die Schneidenecke [LAZ17] als thermisch am höchsten belastete Stelle der Schneide ausgemacht werden. Dies deutet darauf hin, dass die thermische Schneidenbelastung stark von den gewählten experimentellen Randbedingungen abhängig und ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Prozessgestaltungen nur begrenzt sinnvoll durchführbar ist.

Eine jüngere, insbesondere zur Erfassung der Prozesstemperaturen bei der Bohrbearbeitung eingesetzte, Form der Temperaturmessung stellt die Pyrometrie dar. Dabei finden sich in der Literatur variierende Ansätze zur Positionierung der als Infrarot-Lichtwellenleiter (LWL) eingesetzten Quarzglasfaser. Diese kann axial oder radial zur Werkzeugachse sowie orthogonal zur Hauptschneide des Werkzeugs positioniert werden [BEN12; MIC14; RIS06; UED07]. Ein entscheidender Vorteil beim Einsatz eines LWL ist, dass dieser zusammen mit dem Werkstück zerspannt werden kann. Dadurch ist die Verwendung auch bei Prozessen mit Hochdruckkühlschmierung möglich, in denen es zwingend erforderlich ist, dass sich zwischen dem Messobjekt und dem

Lichtwellenleiter kein KSS befindet, der die einfallende Strahlung bis zum Ausbleiben der Detektierbarkeit dämpfen kann [BEN12].

Aufgrund der verfahrensspezifischen Lage der Wirkstelle beim Bohren sind stets zunächst Grundbohrungen in das zu bearbeitende Werkstück einzubringen. Diese dienen der Aufnahme des LWL, der die von der zu erfassenden Oberfläche emittierte Wärmestrahlung an das Pyrometer leitet. Wird der LWL parallel zur Werkzeugachse im Bohrweg platziert, so lassen sich die Temperaturen am entsprechenden Radius der Hauptschneide erfassen. Die radiale Positionierung ermöglicht hingegen die Untersuchung der Temperaturen an den Schneidenecken und Nebenschneiden des Werkzeugs. Eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Pyrometrie stellt die Quotientenpyrometrie dar. Diese wird in jüngerer Zeit vorwiegend eingesetzt und birgt den Vorteil einer nahezu emissionsgradunabhängigen Temperaturmessung durch die Erfassung von zwei ähnlichen Lichtwellenlängen [IOV16; MUE01; UED08].

2.3.3 Prozessanalyse durch Hochgeschwindigkeitsmikroskopie

Versuchsanordnungen zur Analyse der KSS-Strömung unter Einsatz von Particle Image Velocimetry (PIV), bei der eine Nachverfolgung der Strömung durch Hochgeschwindigkeitsmikroskopie erfolgt, sind vor allem von einer guten visuellen Zugänglichkeit und leistungsstarken technischen Einrichtungen abhängig. Dazu ist die Kombination einer sehr starken Lichtquelle mit einem Kamerasystem erforderlich, das über eine ausreichend kurze Belichtungszeit und eine hohe Aufnahmezeit verfügt. Im Rahmen bisheriger Arbeiten konnte auf diese Weise beispielsweise der Freistrahler beim Einsatz von MMS erfolgreich analysiert werden [RAH15].

Die Analyse der an der Wirkstelle ablaufenden Prozesse ist bei der Bohrbearbeitung besonders anspruchsvoll, da das Werkzeug mit einer axialen Vorschubbewegung in das zumeist intransparente Werkstück eindringt. Aus diesem Grund existieren Ansätze zur Substitution der die Wirkstelle umgebenden, blickundurchlässigen Bohrungswand durch transparente Werkstoffe, die bislang vor allem zur Analyse der Spanbildung eingesetzt worden sind [BUC71; BUC71b; KIR16]. Dabei werden die zu zerspanenden Versuchswerkstoffe in durchsichtige Acrylglaträger mit einer riefenfreien Oberfläche eingebracht und der anschließende Zerspanprozess durch die transparente Probe hindurch aufgezeichnet. Ein entsprechender Versuchsaufbau und ein Ausschnitt einer auf diese Weise durchgeführten Prozessanalyse mit Fokus auf die Spanentstehung sind in Abbildung 2.17 dargestellt.

Im Rahmen solcher Versuchsanordnungen ist zwischen Untersuchungen mit stehendem und rotierendem Werkzeug zu unterscheiden. Während bei stehendem Werkzeug die Wirkvorgänge kontinuierlich beobachtet werden können, wird der Einfluss der

Werkzeugrotation auf den Prozess vernachlässigt. Dieser fließt bei Versuchen mit rotierendem Werkzeug ein, wobei jedoch die Analyse des Prozesses nur zu gegebenen Umdrehungswinkeln des Werkzeugs ermöglicht wird. Da das eingesetzte Acrylglas die Bohrungswand substituiert, eignet sich dieses Verfahren auch zur Analyse der Spanabfuhr sowie der KSS-Strömung entlang des Werkzeugs. Einschränkungen ergeben sich jedoch aus der Wahl des KSS, da insbesondere wassermischbare KSS häufig nicht ausreichend transparent sind [KIR16; KIR17; OZK17].

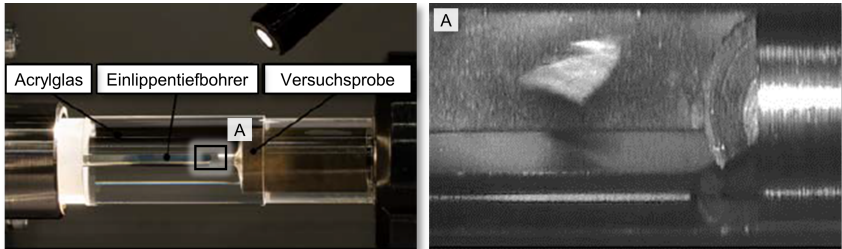


Abbildung 2.17: Versuchsaufbau zur Hochgeschwindigkeitsanalyse (links), resultierende Prozessansicht (rechts) nach [KIR16]

Bisherige Arbeiten konnten nachweisen, dass vergleichbare Versuchsaufbauten mit stationärem Werkzeug die Validierung zuvor durchgeführter CFD-Simulationen ermöglichen. Dazu wurden Wendeltiefbohrwerkzeuge mit einem Durchmesser von $d = 5$ mm eingesetzt, um in Acrylglas gelagerte Proben aus dem Edelstahl 1.4404 zu zerspanen. Dabei wurde der Probendurchmesser minimal geringer als der Werkzeugdurchmesser gewählt, um eine Hülsenbildung zu vermeiden, wodurch die Einsehbarkeit der Wirkzone nicht mehr gegeben gewesen wäre. Während der Versuche wurden Kavitäten und Verwirbelungen durch im Tiefbohröl transportierte Partikel und Luftblasen in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet. Vor allem in der Nähe der Kühlkanalaustritte konnten Kavitäten nachgewiesen werden, wobei besonders in den Spannuten starke Verwirbelungen festgestellt wurden. Während das eingesetzte Öl mit hoher Geschwindigkeit aus den Kühlkanälen an der Freifläche austrat, wurden die Schneiden selbst nur teilweise von ihm umgeben, da sich die Strömungsgeschwindigkeit hier bis zum Stillstand reduzierte. Auch in den Spannuten wurde eine stark verringerte Strömungsgeschwindigkeit festgestellt, woraus geschlossen wurde, dass sich die im realen Prozess vorhandene Fluidbewegung und damit der Spanabtransport in der Spannutt hauptsächlich auf die Werkzeugrotation zurückführen lassen. Insbesondere an der Freifläche wurde eine ausbleibende Strömung festgestellt, woraus geschlossen wurde, dass eine günstige Anpassung der Werkzeuggestalt zu einer signifikant verbesserten KSS-Versorgung der Schneiden führen kann [OZK17].

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die hervorragenden Anwendungseigenschaften hochwarmfester Nickelbasislegierungen wie Inconel 718 stellen für die spanende Bearbeitung eine besondere Herausforderung dar. Dies trifft vor allem auf die Bohrbearbeitung zu, bei der die Wirkstelle im Inneren des zu bearbeitenden Werkstücks liegt. Dies erschwert die Abfuhr der während des Prozesses eingebrachten thermischen Energie und resultiert in einer hohen Schneidstoffbeanspruchung. Hinzu kommen hochharte, im Gefüge verteilte Karbide und die ausgeprägte Adhäsionsneigung des Werkstoffs, die den mechanischen Verschleiß der eingesetzten Werkzeuge fördern. Daraus resultiert in der Regel die Notwendigkeit zur Anwendung moderater Schnittwerte, sodass die erzielbare Produktivität limitiert ist.

Der Stand der Forschung zur Leistungssteigerung von Bohrwerkzeugen umfasst, neben der gezielten Anpassung ihrer Geometrien und Oberflächeneigenschaften, auch die Einbringung eines freiflächenseitigen Absatzes hinter der Schneide. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dieses Prinzip angewendet und weiterentwickelt werden, um die erzielbare Prozessproduktivität zu erhöhen. Zu diesem Zweck werden die zugrunde liegenden Effekte mithilfe neuer Analysemethoden systematisch untersucht, zunächst in Form einer angepassten Modifikation der Hauptfreifläche umgesetzt und die dabei gewonnenen Erkenntnisse schließlich zur Entwicklung einer ganzheitlichen Freiflächenmodifikation genutzt. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.1 veranschaulicht.

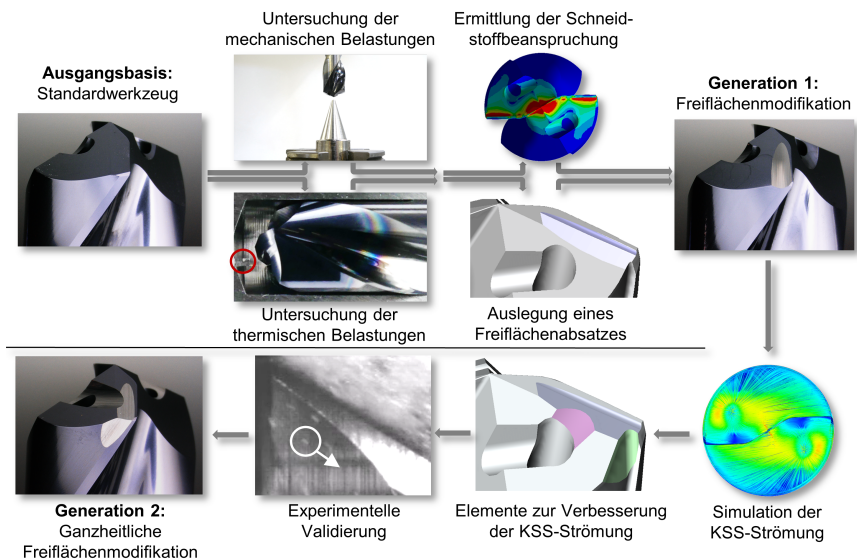


Abbildung 3.1: Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit: Auslegung des Freiflächenabsatzes, Entwicklung zusätzlicher Elemente zur Strömungsverbesserung

Die Untersuchungsergebnisse früherer Arbeiten haben gezeigt, dass die durch eine Freiflächenmodifikation erzielbaren Vorteile zu einem großen Teil auf der geometrischen Limitierung des Freiflächenverschleißes basieren. Darüber hinaus existieren simulationsbasierte Analysen, die auf eine zugleich eintretende Verbesserung des Kühlschmierstoffflusses entlang der Schneide schließen lassen. Die bislang verfügbaren Erkenntnisse beziehen sich jedoch vorwiegend auf Modifikationen, die nur durch zeit- und kostenintensive Laserbearbeitung umsetzbar sind. Obwohl sie eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung der Freiflächenmodifikation ermöglicht, weist sie eine schlechte Übertragbarkeit auf die industrielle Fertigung von Bohrwerkzeugen auf. Zudem kann sie, bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen, in Schädigungen des bearbeiteten Hartmetallsubstrats resultieren. Insbesondere zur Sicherstellung einer einfachen Industrialisierbarkeit wird deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Modifikation durch Schleifbearbeitung fokussiert.

Da die Modifikation der Freifläche stets mit einer Abnahme des hinter der Schneide verbleibenden Schneidstoffs verbunden ist, werden zur gezielten Auslegung der Werkzeugmodifikation zunächst grundlegende Untersuchungen der thermomechanischen Schneidenbelastung durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen anschließend als Eingangsdaten für FEM-Simulationen, in denen potenzielle Ausgestaltungen der Freiflächenmodifikation auf ihre mechanische Stabilität gegenüber den wirkenden Prozesskräften untersucht werden. Ein auf diese Weise ausgelegter Freiflächenabsatz wird durch Schleifbearbeitung an herkömmlichen VHM-Wendelbohrern umgesetzt und die sich daraus ergebenden Einflüsse auf den Prozess experimentell untersucht. Auf Grundlage der entwickelten Freiflächenmodifikation erfolgt anschließend die simulationsgestützte Auslegung zusätzlicher Modifikationselemente zur gezielten Verbesserung der KSS-Versorgung der Schneiden. Die resultierende, ganzheitliche Freiflächenmodifikation wird schließlich an realen Werkzeugen umgesetzt und experimentell validiert.

Das Ziel dieser Arbeit stellt die Erhöhung der erzielbaren Prozessproduktivität bei der Bohrbearbeitung hochwarmfester Nickelbasislegierungen dar. Die entwickelte Werkzeugmodifikation soll den prozesssicheren Einsatz von Schnittwertkombinationen mit erhöhten Zeitspanvolumina ermöglichen. Notwendige Bedingungen stellen ein reproduzierbar erzielbarer Standweg und die Erzeugung hoher Oberflächengüten bei geringer Beeinflussung der Bohrungsrandzonen dar. Gleichzeitig soll das entwickelte Werkzeugdesign gut in bereits bestehende Prozessketten zur Herstellung von VHM-Werkzeugen integrierbar sein, um die industrielle Umsetzung zu ermöglichen und die erzielten Verbesserungen in der Praxis nutzbar zu machen.

4 Experimentelle Randbedingungen

4.1 Versuchsdurchführung

4.1.1 Versuchswerkzeuge

Bei den im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen eingesetzten Werkzeugen handelt es sich um Wendelbohrer vom Typ RT100S der Firma Gühring KG mit einem Durchmesser von $d = 14$ mm. Diese VHM-Werkzeuge bestehen vollständig aus Feinstkorn-Hartmetall mit einer TiAlN/TiN-basierten "nanoFire"-Multilayer-Beschichtung. Diese ist, ausgehend von der Bohrerspitze, auf einer Länge von 14 mm ausgeführt und weist, abhängig von der Lage am Werkzeug, eine maximale Gesamtdicke von ca $t \approx 6$ μm auf.

Ihre Zusammensetzung umfasst eine TiAlN-Deckschicht, welche den größten Anteil an der Gesamtdicke einnimmt, und einen darunter liegenden Multilayer-Bereich aus abwechselnden TiAlN- und TiN-Schichten. Die Werkzeuge wurden sowohl vor als auch nach der Beschichtung einer Oberflächenpräparation unterzogen, wodurch sie eine sehr glatte und homogene Oberfläche aufweisen. Die Spannuten sind in einem Drallwinkel von $\delta = 27^\circ$ angeordnet und zur Verbesserung der Spanabfuhr poliert. Der Ausgangszustand des Werkzeugs ist in Abbildung 4.1 anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen dokumentiert.

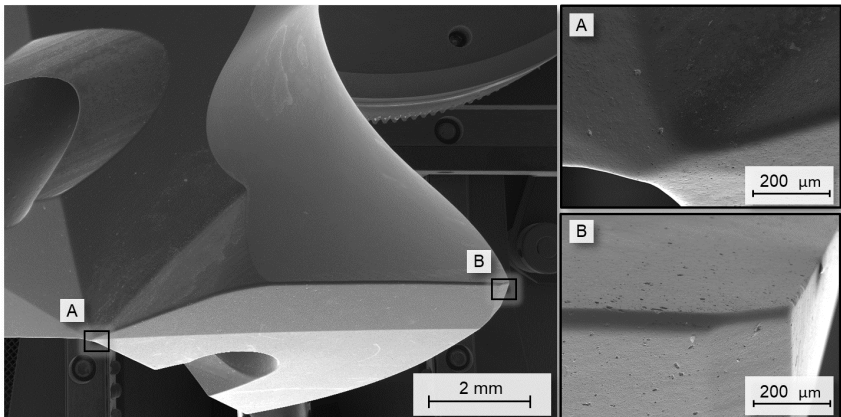


Abbildung 4.1: REM-Aufnahmen eines Versuchswerkzeugs vor dem Einsatz

Die Werkzeuge verfügen über eine Schneidkantenpräparation, wodurch sich ein durchschnittlicher Schneidkantenradius von $r_\beta = 49 \mu\text{m}$ ergibt. Die Präparation ist über die gesamte Länge der Hauptschneiden ausgeführt, die in einem Spitzenwinkel von $\sigma = 140^\circ$ angeordnet sind. An den Schneidkanten liegt ein gleichmäßiger Materialabtrag mit einem k-Faktor von $k = 0,965$ bei einem abgetragenen Schneidkantenradius von $\Delta r = 46,3 \mu\text{m}$ vor. Die Schneidenecken sind darüber hinaus mit einer Eckenschutzfase versehen, an denen die Verrundung weniger stark ausgeprägt ist. Die Austritte der internen Kühlkanäle befinden sich auf den sekundären Freiflächen und sind mit einem rückwärtigen Ausschleiß versehen, um den KSS-Fluss in Richtung der Spannuten zu verbessern. Die beschriebenen Werkzeuge dienen als Referenz und Basis für die Auslegung der entwickelten Werkzeugmodifikation. Eine Übersicht relevanter Eigenschaften ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Ausgewählte Eigenschaften der eingesetzten Wendelbohrwerkzeuge

Durchmesser	$d = 14 \text{ mm}$
Schneidteillänge	$l = 70 \text{ mm}$
Spitzenwinkel	$\sigma = 140^\circ$
Mittlerer Schneidkantenradius	$r_\beta = 49 \mu\text{m}$
Abgetragener Schneidkantenradius	$\Delta r = 46,3 \mu\text{m}$
k-Faktor	$k = 0,965$
Keilwinkel	$\beta = 59^\circ$
Drallwinkel	$\delta = 27^\circ$
Primär-Freiwinkel	$\alpha_1 = 8^\circ$
Sekundär-Freiwinkel	$\alpha_2 = 15^\circ$
Schneidstoff	Feinstkornhartmetall
Beschichtungsart	TiAlN/TiN-Multilayer
Kühlkanaldurchmesser	$d_{KSS} = 1,5 \text{ mm}$
KSS-Volumenstrom	$\dot{V}_{KSS} = 14 \text{ l/min}$ bei $p_{KSS} = 55 \text{ bar}$

4.1.2 Versuchswerkstoffe

Die Entwicklung der Werkzeugmodifikation erfolgte mit Fokus auf die Bohrbearbeitung hochwarmfester Nickelbasislegierungen. Zu diesem Zweck wurden die Referenz- und Validierungsversuche an lösungsgeglühten und warmausgelagerten Proben der Nickelbasislegierung NiCr19Fe19Nb5Mo3 (2.4668) durchgeführt, auf die nachfolgend unter dem Markennamen *Inconel 718* Bezug genommen wird. Darüber hinaus wurde das Konzept der Werkzeugmodifikation an weiteren schwer zerspanbaren Werkstoffen erprobt. Eine Auswahl für die Analyse relevanter mechanischer Kennwerte der eingesetzten Werkstoffe ist in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Ausgewählte Eigenschaften der Versuchswerkstoffe bei $T = 20\text{ °C}$

Werkstoff- bezeichnung	Härte (HRC)	Wärmeleitkoeffizient (λ) ($\frac{W}{m \cdot K}$)	Zugfestigkeit (R_m) (MPa)
NiCr19Fe19Nb5Mo3	47	11,2	1472
Ti6Al4V	33	7,1	897
X2CrNiMoN22-5-3	28	15	850

Ein weiterer untersuchter Werkstoff ist die titanbasierte α - β -Legierung Ti6Al4V (3.7165) im lösungsgeglühten Zustand, die eine hohe Festigkeit bei geringer Dichte aufweist und breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt findet. Darüber hinaus wurden Standweguntersuchungen an Proben aus dem austenitisch-ferritischen Chrom-Nickel-Molybdänstahl X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) durchgeführt. Dieser Duplexstahl kommt aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit unter anderem in der Erdöl- und Offshoreindustrie sowie im Schiffsbau und der chemischen Industrie zum Einsatz. Trotz seiner im Vergleich zu den untersuchten Superlegierungen guten Wärmeleitfähigkeit ist er, insbesondere aufgrund seiner hohen Neigung zur Adhäsion und Kaltverfestigung, sehr anspruchsvoll in der Zerspanung.

4.1.3 Versuchsmaschinen

Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bohrversuche mit rotierenden Werkzeugen wurden mit dem in Abbildung 4.2 dargestellten 5-Achs-Bearbeitungszentrum (BAZ) Heller FT 4000 durchgeführt. Die Maximaldrehzahl der eingesetzten Spindel beträgt $n_{max} = 10.000\text{ min}^{-1}$ in Verbindung mit einer Antriebsleistung von maximal $P_A = 44\text{ kW}$, wodurch sich die Maschine für die Bearbeitung anspruchsvoller Werkstoffe auch mit größeren Werkzeugdurchmessern eignet. Dazu verfügt sie über die Möglichkeit sowohl zur inneren als auch zur äußeren KSS-Zufuhr mit einem Kühlschmierstoffdruck von bis zu $p_{KSS} = 55\text{ bar}$. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde ein maximaler KSS-Volumenstrom von $\dot{V}_{KSS} = 14\text{ l/min}$ beim Einsatz der untersuchten VHM-Wendelbohrer ermittelt. Beim eingesetzten Kühlschmierstoff handelt es sich um die wassermischbare Emulsion Bechem Avantin 4409 in einer Konzentration von $c = 9\%$. Dieser vollsynthetische Kühlschmierstoff wurde für den Einsatz in der Zerspanung hochlegierter Stähle und Superlegierungen entwickelt und eignet sich, neben generellen Zerspanprozessen, aufgrund seiner hohen Schmierwirkung ebenfalls für Tiefbohr- und Umformoperationen.



Abbildung 4.2: Eingesetzte Versuchsmaschinen: 5-Achs-BAZ Heller FT 4000 (links), CNC-Drehmaschine Monforts RNC 602 (rechts)

Zur Durchführung experimenteller Strömungsanalysen mit stationärem Werkzeug wurde die CNC-gesteuerte Schrägbettdrehmaschine Monforts RNC 602 eingesetzt. Diese verfügt über eine Antriebsleistung von $P_A = 30 \text{ kW}$ und eine maximale Spindeldrehzahl von $n_{max} = 4.000 \text{ min}^{-1}$. Zur Realisierung einer Hochdruck-KSS-Zufuhr wurde sie in Kombination mit einer zweistufigen Hochdruckpumpe aus dem Hause Brinkmann Pumps in Verbindung mit einem für die interne KSS-Zufuhr ausgelegten Werkzeughalter eingesetzt. Auf diese Weise wurde im Rahmen der Strömungsanalysen ein experimentell überprüfter Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 55 \text{ bar}$ bei einem konstanten Volumenstrom von $\dot{V}_{KSS} = 14 \text{ l/min}$ ermöglicht und dadurch die Vergleichbarkeit zu den durchgeführten Standweguntersuchungen sichergestellt.

4.1.4 Versuchsplanung

In Voruntersuchungen mit unmodifizierten Standardwerkzeugen wurde zunächst die Kombination aus einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35 \text{ m/min}$ und einem Vorschub von $f = 0,14 \text{ mm}$ als prozesssicher einsetzbare Basis-Schnittwertkombination ermittelt. Diese entspricht einem Zeitspanvolumen von $Q_W = 17 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$. Darauf basierend wurden, durch iterative Steigerung der jeweiligen Parameter, Schnittwertkombinationen mit einem erhöhten Zeitspanvolumen ermittelt. Dabei wurde vorausgesetzt, dass diese erwartungsgemäß zu einer signifikanten Verringerung im Bezug auf den erreichbaren Werkzeugstandweg führten, ohne jedoch in einem sofortigen Werkzeugversagen nach wenigen Bohrungen zu resultieren.

Während der Versuche wurde der Werkzeugverschleiß in einem Bohrwegintervall von $\Delta L_f \leq 0,42 \text{ m}$ optisch erfasst und die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{max} zur Bewertung des Verschleißes herangezogen. Als Standzeitkriterien wurden das Erreichen von $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$ oder das Auftreten sichtbarer Schneidendefekte in

Form von Rissen oder Ausbrüchen definiert. Eine Übersicht der getesteten Schnittwertkombinationen ist Tabelle 4.3 zu entnehmen. Die Schnittwertkombinationen, die als prozesssicher identifiziert und für die nachfolgenden Voruntersuchungen ausgewählt wurden, sind darin fett markiert.

Tabelle 4.3: Experimentell untersuchte Schnittwertkombinationen

Vorschub f (mm)	Schnittgeschwindigkeit v_c (m/min)	Standweg L_f (m)	Zeitspanvolumen Q_W ($\frac{cm^3}{min}$)
0,14	35	4,31	17,15
0,14	45	0,65	22,05
0,16	35	0,50	19,60
0,16	40	1,39	22,05
0,18	35	3,05	22,05
0,18	40	0,38	25,20
0,20	35	0,50	24,50

Die mit einer Erhöhung des Zeitspanvolumens verbundene Produktivitätssteigerung des Bohrprozesses ging in allen untersuchten Fällen mit einer signifikanten Zunahme des Werkzeugverschleißes einher, sodass sich die erzielbaren Werkzeugstandwege verringerten. Eine Steigerung der Prozessproduktivität unter der Bedingung eines erreichbaren Standwegs von $L_f > 0,5$ m war dabei bis zu einer Steigerung des Zeitspanvolumens von $\Delta Q_W \approx 29$ % möglich. Auf diese Weise wurden die drei in Abbildung 4.3 entlang der dunkelgrauen Linie dargestellten Schnittwertkombinationen identifiziert, welche den Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen bildeten.

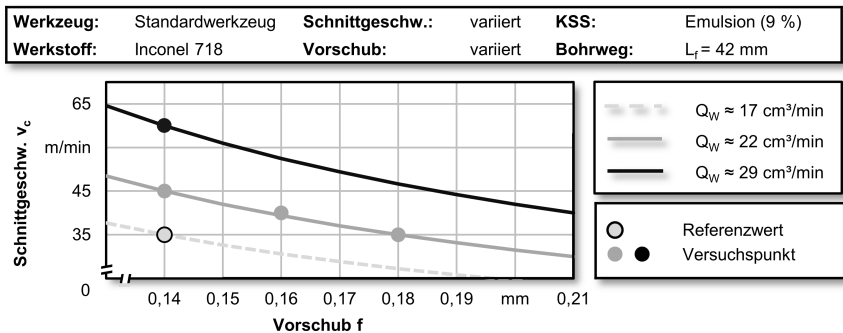


Abbildung 4.3: Eingesetzte Schnittwertkombinationen und resultierende Zeitspanvolumina

Die im Rahmen dieser Arbeit zunächst entwickelte Freiflächenmodifikation, auf die im Folgenden als Werkzeugmodifikation Generation 1 eingegangen wird, wurde sowohl anhand der Referenzschnittwertkombination mit $Q_W = 17 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ als auch der gesteigerten Kombinationen mit $Q_W = 22 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ mit dem Referenzwerkzeug verglichen. Die darauf basierend weiterentwickelte, mit zusätzlichen Modifikationselementen versehene Werkzeugmodifikation Generation 2 resultierte in einer zusätzlichen Steigerung der erreichbaren Standwege, die sich insbesondere bei stark erhöhten Schnittgeschwindigkeiten zeigte. Aus diesem Grund wurde sie in einer zusätzlichen Versuchsreihe mit einer weiter erhöhten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60 \text{ m/min}$ eingesetzt, um ihre Produktivitätsgrenzen zu identifizieren. Dies entspricht einer Erhöhung des Zeitspanvolumens von insgesamt $\Delta Q_W = 70 \%$ auf $Q_W = 29 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ gegenüber der ursprünglich als Referenz eingesetzten Schnittwertkombination.

4.2 Werkzeugmodifikation

Die schleiftechnische Modifikation der eingesetzten Werkzeuge erfolgte mithilfe einer Werkzeugschleifmaschine des Typs Schütte 305 micro. Ihre CNC-Steuerung ermöglicht die simultane Ansteuerung der verfügbaren drei linearen und zwei rotatorischen Achsen zur Erzeugung komplexer Werkzeuggeometrien. Die Schleifspindel mit einer Antriebsleistung von $P_A = 10 \text{ kW}$ ist dazu in der Lage, maximale Drehzahlen von bis zu $n_{max} = 12.000^{-1}$ zu realisieren. Das an der Maschine eingesetzte Schleiföl des Typs Oelheld SintoGrind IG 540 wird während des Prozesses über an der Werkzeugaufnahmeinheit angebrachte Düsen werkzeugnah zugeführt. Die Werkzeugschleifmaschine sowie das zur Fräsbearbeitung der Werkzeuge eingesetzte Hochgeschwindigkeits-BAZ Kern HSPC 522 sind in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Eingesetzte Maschinen zur Werkzeugmodifikation: Schütte 305 micro (links) und Kern HSPC 522 (rechts)

Das Bearbeitungszentrum Kern HSPC 522 verfügt über drei lineare Achsen und einen besonders großen Spindeldrehzahlbereich von bis zu $n_{max} = 160.000^{-1}$. Dieser wird u. a. durch die Verwendbarkeit unterschiedlicher Spindeln realisiert und ermöglicht den Einsatz auch sehr kleiner Werkzeugdurchmesser. Die Maschine verfügt über eine realisierbare Positioniergenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ bei einer Arbeitsgenauigkeit von $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Zu deren Gewährleistung befindet sich die Maschine innerhalb einer klimatisierten Umgebung, in welcher die Lufttemperatur konstant auf $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ gehalten wird. Sie verfügt zudem sowohl über die Möglichkeit zur werkstellennahen Druckluftzufuhr als auch zur Zuführung einer MMS mit Druckluft als Trägermedium, wobei eine Absaugeinrichtung zur Reinigung des Arbeitsraums von gesundheitsschädlichen Stäuben und Aerosolen vorhanden ist.

4.3 Mess- und Analysetechnik

4.3.1 Mikroskopische Werkzeuganalyse

Zur Ermittlung von Kennwerten der Schneidkantenmikrogestalt wurde das optische 3D-Messsystem MikroCAD plus der Firma LMI Technologies eingesetzt. Seine Funktionsweise basiert auf dem Prinzip der digitalen Streifenprojektion, das die dreidimensionale Analyse von Mikroprofilen ermöglicht. Durch die erreichbare Auflösung von $0,7 \mu\text{m}$ bei einem Arbeitsabstand von $33 \mu\text{m}$ lassen sich auch sehr scharfe Schneiden an Zerspanwerkzeugen detailliert charakterisieren.

Die Analyse des Werkzeugverschleißfortschritts erfolgte durch optische Messung mithilfe eines digitalen Lichtmikroskops des Typs Keyence VHX 5000, das eine 200-fache Bildvergrößerung ermöglicht. Sowohl vor Beginn der Untersuchungen als auch während der Versuchsreihen wurden die eingesetzten Werkzeuge in regelmäßigen Abständen mikroskopiert und der Freiflächenverschleiß an beiden Schneiden der jeweiligen Werkzeuge anhand der maximalen Verschleißmarkenbreite quantifiziert. Darüber hinaus erfolgte eine mikroskopische Sichtprüfung auf das Auftreten von Ausbrüchen und Rissen an der Schneide. Die optische Erfassung des Werkzeugverschleißes wurde durch eine Überwachung des auftretenden Bohrmoments und der Vorschubkraft ergänzt, wobei die Versuchsreihe im Fall einer plötzlichen Erhöhung abgebrochen und der Werkzeugzustand lichtmikroskopisch analysiert wurde.

4.3.2 Erfassung der mechanischen Schneidenbelastung

Während der durchgeführten Standweguntersuchungen erfolgte eine kontinuierliche Aufnahme der auftretenden mechanischen Belastungen mithilfe eines Rotationsdynamometers des Typs 9170A in Verbindung mit einem 5238B-Ladungsverstärker der Firma Kistler. Da bei der werkzeugseitigen Messung das Bezugssystem der Kraftmesstechnik mit dem Werkzeug rotiert, ermöglicht sie grundsätzlich die Erfassung von Prozesskräften in allen drei Raumrichtungen sowie die Messung des Bohrmoments mit einer Abtastrate von bis zu $f = 200$ kHz. Aufgrund der hohen, bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 auftretenden Kräfte und Momente wurden die jeweiligen Messbereiche entsprechend groß gewählt, woraus sich laut Datenblatt des Dynamometers eine Messunsicherheit von bis zu 2 % ergibt. Die Wahl der Messbereiche sowie die daraus resultierenden Messunsicherheiten sind der Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Tabelle 4.4: Kraftmessbereiche und Messunsicherheiten

Messgröße	Messbereich	Kalibrierbereich	Messunsicherheit
Schnittkraft F_c	0...5 kN	0...3 kN	± 60 N
Vorschubkraft F_f	0...20 kN	0...18 kN	± 360 N
Passivkraft F_p	0...5 kN	0...3 kN	± 60 N
Bohrmoment M_b	0...150 Nm	0...100 Nm	± 2 Nm

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde eine Abtastrate von $f = 6$ kHz gewählt, was einer Anzahl von 260 Messungen pro Werkzeugumdrehung bei der höchsten eingesetzten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min entspricht. Dabei wurde die Grenzfrequenz mithilfe eines Tiefpassfilters auf $f_{grenz} = 3$ kHz eingestellt, um den Messschrieb von Signalen, die nicht dem Bohrprozess zuzuordnen waren, zu bereinigen. Die Eigenfrequenz des Messsystems beträgt $f_{eigen} = 7,6$ kHz in Vorschub- bzw. $f_{eigen} = 2$ kHz in Schnitttrichtung. Alle durchgeführten Messungen wurden bei rotierender Maschinenspindel unter eingeschalteter Kühlschmierstoffzufuhr begonnen, um sich daraus ergebende Einflüsse auf das Messergebnis auszuschließen.

4.3.3 Pyrometrische Untersuchung der Freiflächentemperaturen

Um die thermische Schneidenbelastung zu ermitteln, wurde ein Quotientenpyrometer des Typs en2AIX mit einem Pigtail WF 300-Lichtwellenleiter eingesetzt. Der gewählte Durchmesser des Lichtwellenleiters beträgt $d_{LWL} = 330 \mu\text{m}$, sodass er sich gut zur axialen Platzierung im Bohrweg innerhalb der Probe eignet. Zu diesem Zweck wurden rückseitige Grundbohrungen in die Proben eingebracht, in denen anschließend der Lichtwellenleiter platziert und mithilfe des kalt aushärtenden Zwei-Komponenten-Klebstoffs HBM X60 fixiert wurde. Auf diese Weise wurde die Temperaturmessung auf unterschiedlichen Radien entlang der Schneide ermöglicht, während jede der beiden Schneiden einmal pro Werkzeugumdrehung auf einer dem gewählten Zahnvorschub entsprechenden Länge in direkten Kontakt zur Lichtleiterfaser kam.

Durch die daraus folgende Zerspanung des Lichtwellenleiters wurde eine Durchflutung des Messkanals zwischen Faser und Schneide mit KSS vermieden. Die Positionierung der Faser erfolgte in einer Tiefe von $t = 15 \text{ mm}$ auf der Rückseite der Probe, was bei einer Probenlänge von $l_{Probe} = 34 \text{ mm}$ einen realisierbaren Bohrweg von $L_f = 19 \text{ mm}$ vor dem ersten Werkzeug-Lichtwellenleiter-Kontakt zur Erreichung eines stationären Temperaturfeldes ermöglichte. Der gesamte Bohrweg während der Versuche betrug $L_f = 32 \text{ mm}$, woraus sich eine Messstrecke von $L_f = 15 \text{ mm}$ ergibt. Der eingesetzte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

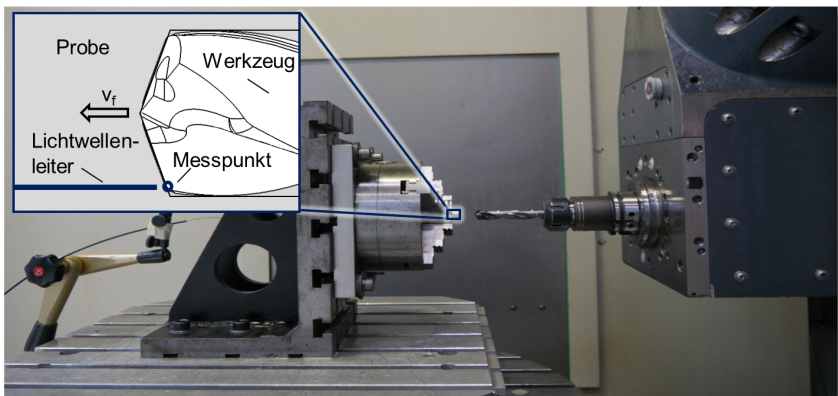


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau zur pyrometrischen Bestimmung der Freiflächentemperaturen nach [IOV21]

Detektiert wurden die beiden Wellenlängen $\Lambda_1 = 1,675 \mu\text{m}$ und $\Lambda_2 = 1,945 \mu\text{m}$ bei einer in Abhängigkeit vom eingestellten Signalverstärkungsfaktor gewählten Abtastrate von $f = 500 \text{ kHz}$. Der erfassbare Temperaturbereich betrug $T = 250 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Während der tatsächliche Messfleckdurchmesser bei der quotientenpyrometrischen Analyse grundsätzlich vom Lichteinfallswinkel und dem Abstand zum Messobjekt abhängig ist, konnte für die vorliegenden Untersuchungen der Durchmesser des tatsächlichen Messflecks als $d_{Messfleck} = d_{LWL} = 330 \mu\text{m}$ angenommen werden, da durch die Zerspanung des Lichtwellenleiters der Messabstand stets $s = 0 \text{ mm}$ betrug.

Ein großer Anwendungsvorteil des Einsatzes der Quotientenpyrometrie besteht in der angenommenen Vernachlässigbarkeit des Emissionsgrades der zu messenden Oberflächen. Diese beruht auf dem sehr geringen Unterschied zwischen den beiden erfassten Wellenlängen. Daraus folgt, dass sich die jeweiligen Emissionskoeffizienten für die nur geringfügig variierenden Wellenlängen Λ_1 und Λ_2 aus dem Kalibrierpolynom herauskürzen lassen [MUL04].

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die zuverlässigsten Messergebnisse bei einer senkrechten Positionierung des Lichtwellenleiters zur untersuchten Oberfläche resultieren. Dies ist jedoch, aufgrund des Spitzen- und Freiwinkels der eingesetzten Werkzeuge, im Bohrprozess nur mit großem technischen Aufwand umsetzbar [RIS06]. Zur Untersuchung des resultierenden Messfehlers wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit Voruntersuchungen mit Hilfe eines Kalibrierofens durchgeführt. Dabei wurde der Lichtwellenleiter in unterschiedlichen Winkeln zum Messobjekt positioniert, um den Winkleinfluss zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigten, dass eine abweichende Winkellage in einer Reduktion der resultierenden Spannungssignale resultiert, die jedoch beide erfassten Lichtwellenlängen gleichermaßen betrifft. Dadurch kommt es nicht zu einer Beeinflussung des resultierenden Quotienten und der auf dessen Basis ermittelten Temperatur.

Da der eingesetzte Lichtwellenleiter während des Prozesses kontinuierlich zerspannt wurde, trat zudem eine Längenänderung der eingesetzten Faser über die durchgeführten Versuchsreihen auf. Diese hat einen Einfluss auf die optischen Eigenschaften der Messfaser, wodurch es zu einer fehlerhaften Berechnung der erfassten Temperaturen kommen kann. Der Zusammenhang zwischen der Längenänderung und der resultierenden Temperatur wurde bereits im Rahmen früherer Arbeiten mit Hilfe experimenteller Untersuchungen analysiert. Dabei wurde untersucht, wie sich Faserlängen im Bereich von $l_{Faser} = 1 \dots 10 \text{ m}$ bei unverändertem Kalibrierpolynom auf das Messergebnis auswirken. Aus den gewonnenen Versuchsergebnissen konnte rechnerisch ermittelt werden, dass die maximale Temperaturabweichung bei einer Temperatur von $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ im ungünstigsten Fall $\Delta T_{max} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt, was einem prozentualen Fehler von 2,5 % entspricht [MUL04].

Da die eingesetzten Werkzeuge einen Schneidkantenradius von $r_\beta = 49 \mu\text{m}$ aufweisen, wurde der Messfleck während der durchgeführten Messungen nicht vollständig von der Schneide ausgefüllt. Untersuchungen zur Anwendung der Pyrometrie konnten jedoch

nachweisen, dass unter diesen Bedingungen lediglich die höchste im Messfleck erfasste Temperatur Eingang in das resultierende Signal findet. Daher stellen die erfassten Werte keine Flächenmittlung, sondern die Spitzentemperaturen lokaler "Hot Spots" im Messbereich dar, so dass bei der pyrometrischen Untersuchung die tatsächliche Temperatur der Schneide als Messergebnis erfasst wird [MUL04].

4.3.4 Analyse der Bohrungsqualität

Während die Kenntnis der auf das Werkzeug wirkenden thermischen und mechanischen Belastungen eine grundsätzliche Voraussetzung für die geometrische Auslegung der Freiflächenmodifikation darstellt, handelt es sich bei der erzielbaren Bohrungsqualität um eines der wichtigsten Kriterien zur Bewertung der erzielbaren Prozessverbesserung. Die Analyse der erzeugten Bohrungen hinsichtlich ihrer Maß- und Formabweichungen sowie der Oberflächenqualität erfolgte nach der sorgfältigen Entgratung und Reinigung der Proben. Dazu kam eine 3D-Koordinatenmessmaschine des Typs ZEISS Prismo 5 HTG Vast zum Einsatz, deren Messtaster mit einer Rubinkugel vom Durchmesser 3 mm bestückt war. In einer Bohrtiefe von 10 mm wurde jede Bohrung an 380 umlaufend platzierten Messpunkten mit einem Winkelabstand von $\Delta\gamma = 1^\circ$ taktil erfasst, sodass eine Überlappung von 20 Messpunkten am Anfang und Ende jeder Messstrecke bestand. Zur Ermittlung der Rundheitsabweichung wurde ein Gauß'scher Ausgleichskreis mit einem Spline 50-Tiefpassfilter gemäß DIN EN ISO 1281 angewendet.

Die Erfassung der Bohrungsrauheit erfolgte taktil mithilfe eines Perthometers vom Typ Mahr MarSurf GD 120. Die Tastspitze mit einem Spitzenradius von $r = 2 \mu\text{m}$ und einem Spitzenwinkel von $\omega = 90^\circ$ wurde in einer Bohrtiefe von $t = 10 \text{ mm}$ mit einer Tastvorschubgeschwindigkeit von $f_t = 0,5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ auf einer Taststrecke von insgesamt $l = 5,6 \text{ mm}$ eingesetzt. Diese unterteilte sich in fünf Einzelmessstrecken mit einer der Grenzwellenlänge entsprechenden Länge von jeweils $l_i = \lambda_c = 0,8 \text{ mm}$. Zur Untersuchung mikrostruktureller Gefügeveränderungen wurden Proben aus einer Bohrtiefe von $t = 27 \text{ mm}$ nach definierten Bohrwegen entnommen. Nach der anschließenden Einbettung und Schleifpräparation wurden sie mit einer Mischung aus Salpeter-, Essig- und Salzsäure präpariert, wodurch weiße Schichten und weitere Veränderungen im Mikrogefüge sichtbar wurden. Die Gefügeanalyse erfolgte bei 500-facher Vergrößerung mithilfe eines Lichtmikroskops vom Typ Zeiss Axio Imager 2. Das Vorgehen zur Randzonenanalyse ist in Abbildung 4.6 veranschaulicht.

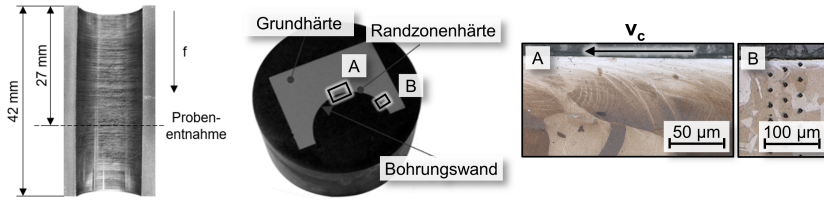


Abbildung 4.6: Probenentnahme und Untersuchung der Bohrungsrandzonen

Die Mikrohärtemessung nach Vickers wurde mit einem HMV-G Härtemessgerät der Firma Shimadzu durchgeführt. Sie erfolgte mit einer Prüfkraft von $F_{Pr} = 250 \text{ mN}$, was gemäß DIN EN ISO 6507 einer Prüfung im Mikrohärtebereich HV 0,025 entspricht. Das Prüfmuster weist einen Abstand von $\Delta s = 30 \text{ }\mu\text{m}$ zwischen den Eindrücken auf und wurde, beginnend in einer Entfernung von $s = 10 \text{ }\mu\text{m}$ zum Bohrungsrand, in drei mit einem Abstand von $\Delta h = 30 \text{ }\mu\text{m}$ übereinander angeordneten Reihen eingebracht. Diese waren um jeweils $\Delta s = 10 \text{ }\mu\text{m}$ zueinander versetzt, woraus sich die resultierende Auflösung der Härteprüfung von $\Delta s = 10 \text{ }\mu\text{m}$ ergibt. Die beiden am nächsten zur Bohrungswand platzierten Messpunkte wurden jedoch nicht normgerecht durchgeführt, woraus eine mögliche Verfälschung des ermittelten Härtevalues durch fehlende Abstützung am Probenrand und daraus resultierende Verformung während des Eindrückvorgangs folgen konnte. Aus diesem Grund wurden unplausibel erscheinende Ausreißer der Messwerte im direkten Randbereich nicht in die Auswertung einbezogen.

5 Voruntersuchungen zur Werkzeugauslegung

5.1 Verschleißverhalten

Zur Ermittlung des Einflusses der ausgewählten Schnittwertkombinationen auf den Bohrprozess wurden zunächst Referenzuntersuchungen mit unmodifizierten Standardwerkzeugen durchgeführt. Während der Untersuchungen wurde, abhängig vom auftretenden Verschleißfortschritt, die maximale Verschleißmarkenbreite in Intervallen von $\Delta L_f \geq 0,21$ m dokumentiert. Zwischen den durchgeführten Versuchsreihen wurden sowohl die Schnittgeschwindigkeit als auch der Vorschub sukzessive erhöht, was in allen Fällen mit einer signifikanten Verringerung des erzielbaren Standwegs einherging. In Abbildung 5.1 ist eine Übersicht der eingesetzten Schnittwerte und der daraus resultierenden Verschleißkurven grafisch dargestellt.

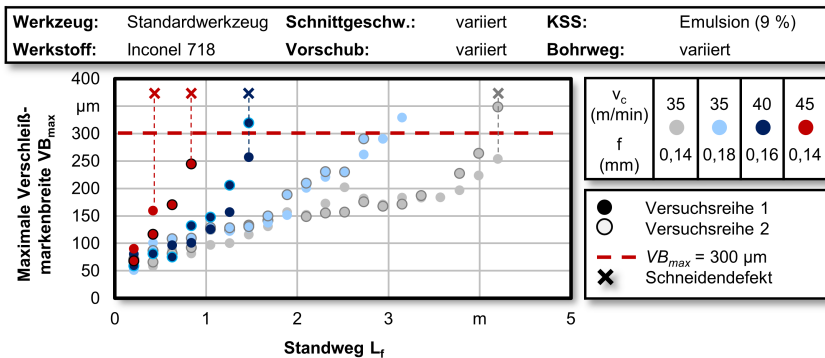


Abbildung 5.1: Verschleißentwicklung unmodifizierter Referenzwerkzeuge in Abhängigkeit von der eingesetzten Schnittwertkombination [BUC18b]

Beim Einsatz der Referenz-Schnittwertkombination aus einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35$ m/min und einem Vorschub von $f = 0,14$ mm war ein typischer Verschleißverlauf aus Einlaufphase, stationärer und progressiver Phase deutlich erkennbar. Im Gegensatz dazu zeigten die Verschleißkurven bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit einen erheblich steileren Verlauf mit einer geringeren Unterscheidbarkeit der jeweiligen Verschleißphasen. Sowohl die Erhöhung des Vorschubs als auch der Schnittgeschwindigkeit wirkten sich dabei negativ auf den erreichten Standweg der eingesetzten Werkzeuge aus, wobei insbesondere eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit in einer überproportional verringerten Werkzeuglebensdauer resultierte [BUC18b].

Darüber hinaus erreichten die mit hohen Schnittgeschwindigkeiten eingesetzten Werkzeuge in keinem der durchgeführten Versuche die zuvor als Verschleißkriterium festgelegte maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$. Stattdessen wiesen sie in vielen Fällen großflächige Ausbrüche der Schneidenecken auf, woraus auf eine lokale, thermomechanische Überlastung geschlossen werden kann. Beim Einsatz moderater Schnittgeschwindigkeiten hingegen traten sowohl Ausbrüche der Schneidenecken als auch das Erreichen von $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$ auf. In Abbildung 5.2 sind die Verschleißzustände ausgewählter Referenzwerkzeuge nach Standwegende anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen ihrer Schneidenecken veranschaulicht.

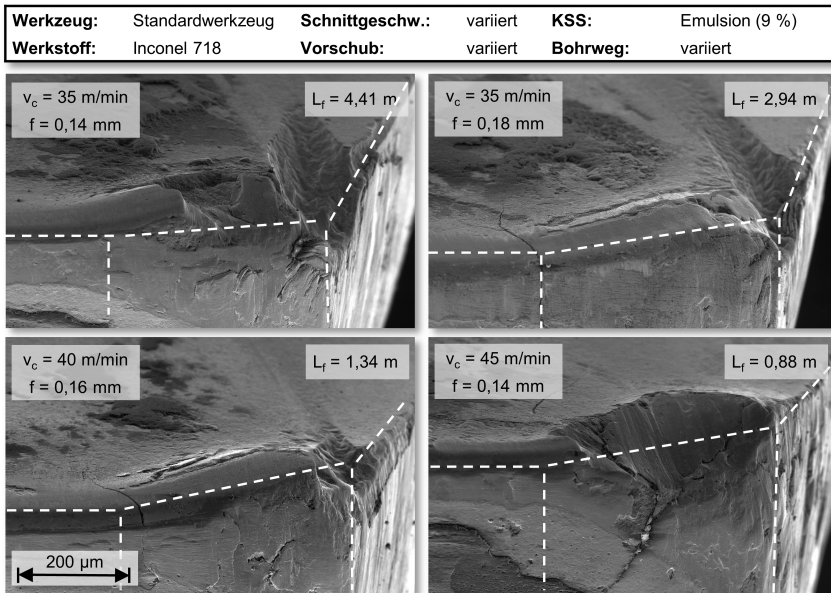


Abbildung 5.2: REM-Aufnahmen der Schneidenecken von Referenzwerkzeugen nach Erreichen des Verschleißkriteriums

Durch die REM-Analyse wurde deutlich, dass bei allen untersuchten Werkzeugen nach Erreichen der Verschleißkriterien Mikrorisse im Bereich der Hauptschneiden vorhanden waren. Diese lassen sich auf Zug-Wärmespannungen im Schneidstoff zurückführen, die aus einem stark ausgeprägten Temperaturgefälle von der Werkzeugoberfläche in das Substrat entstehen können. Die Untersuchung der eingesetzten Werkzeuge zeigte zudem, dass Schneidenausbrüche häufig von zuvor auftretenden Kammrissen ausgingen. Alle eingesetzten Werkzeuge wiesen nach ihrem Standwegende ausgeprägte Verschleißkerben im Bereich der Nebenschneiden auf, was auf eine hohe thermomecha-

nische Wechselbeanspruchung in Verbindung mit der starken Adhäsionsneigung des Werkstoffs hindeutet. Darüber hinaus ließen sich an allen Werkzeugen großflächige Ausprägungen dunkel verfärbter KSS-Rückstände nachweisen. Diese deuten auf einen eingeschränkten KSS-Fluss an der Freifläche hin, aus dem die Verkokung des dort verbleibenden KSS infolge der hohen Prozesstemperaturen resultiert.

Neben den beschriebenen Verschleißerscheinungen waren zudem an allen eingesetzten Werkzeugen deutliche Riefen auf den Frei- und Spanflächen erkennbar, die sich auf starken abrasiven Verschleiß durch die im Werkstoff eingeschlossenen Karbide zurückführen lassen. Darüber hinaus traten ausgeprägte Werkstoffadhäsionen an den Freiflächen auf, die durch die hohe Warmfestigkeit sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs und seine Neigung zur Kaltverfestigung begünstigt werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Verschleißuntersuchungen deuten darauf hin, dass beim Einsatz von Standardwerkzeugen eine Kombination aus $v_c = 35$ m/min und $f = 0,14$ mm einen günstigen Kompromiss aus Prozesssicherheit und Produktivität darstellt, während insbesondere die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit zu einem vorzeitigen und plötzlich eintretenden Werkzeugversagen führen kann.

5.2 Thermomechanische Schneidenbelastung

5.2.1 Prozessbegleitende Kräftermessung

Während der Standweguntersuchungen erfolgte eine kontinuierliche Erfassung der auftretenden Vorschubkraft und des Bohrmoments über den gesamten Bohrweg. Beim Einsatz der moderaten Schnittwertkombination aus $v_c = 35$ m/min und $f = 0,14$ mm wies die ermittelte Vorschubkraft, analog zur Verschleißentwicklung, drei voneinander abgrenzbare Phasen auf. So stieg die ermittelte Vorschubkraft zunächst über einen Bohrweg von $L_f = 1$ m auf ein Niveau von ca. $F_f = 3,9$ kN an, bevor nach einem Bohrweg von insgesamt $L_f = 3,2$ m ein signifikanter Anstieg bis auf $F_f = 4,6$ kN auftrat. Eine weniger deutlich ausgeprägte Einlaufphase wurde bei der Analyse des Bohrmoments festgestellt, das bereits zu Beginn des Bohrwegs einen Betrag von ca. $M_b \approx 17$ Nm aufwies. Im weiteren Verlauf blieb dieser weitgehend konstant, bis ab einem Bohrweg von $L_f = 3,2$ m ein stetiger Anstieg auf $M_b = 26$ Nm auftrat. Die Verläufe der Vorschubkraft und des Bohrmoments in Abhängigkeit von der eingesetzten Schnittwertkombination sind in Abbildung 5.3 grafisch zusammengefasst.

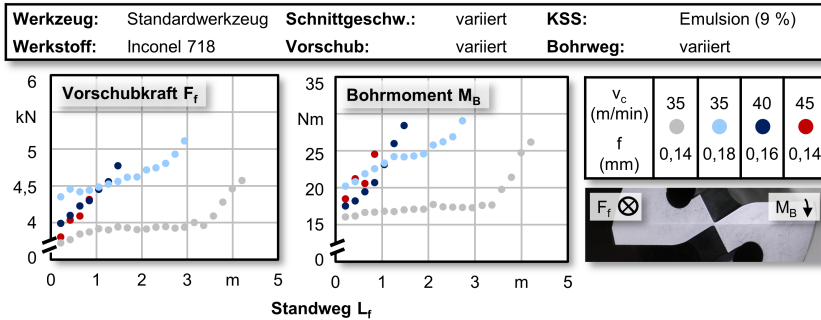


Abbildung 5.3: Vorschubkraft und Bohrmoment in Abhängigkeit vom Bohrweg und den eingesetzten Schnittwerten

Den dargestellten Diagrammen ist zu entnehmen, dass die Auswirkungen auf die Prozesskräfte unmittelbar von der Wahl der erhöhten Schnittwerte abhängig sind. Während bei einer Erhöhung ausschließlich des Vorschubs von $f = 0,14$ mm auf $f = 0,18$ mm die auftretenden Belastungen signifikant höher waren, wiesen sie über den Werkzeugstandweg weiterhin erkennbare stationäre und progressive Verschleißphasen auf. Dagegen resultierten gesteigerte Schnittgeschwindigkeiten in linear zunehmenden Kräften und Momenten über den nun stark verringerten Standweg. Dies lässt sich auf den stetig zunehmenden Werkzeugverschleiß zurückführen, der trotz der geringeren Vorschubkraft beim Einsatz der Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 40$ m/min bzw. $v_c = 45$ m/min auftrat, während eine thermische Entfestigung des Werkstoffs auszubleiben schien. Dies lässt den Schluss zu, dass die bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten auftretenden thermomechanischen Werkzeugbelastungen besonders nachteilig für die eingesetzten Werkzeuge sind, was durch den resultierenden Verschleißfortschritt und die Entwicklung der Prozesskräfte belegt werden kann.

5.2.2 Analyse der radiusabhängigen Schneidenbelastung

Da eine prozessbegleitende Krätemessung verfahrensbedingt auf die Ermittlung von Vorschubkraft und Bohrmoment beschränkt ist, wurde zur Analyse der auftretenden Schneidenbelastungen ein eigenständiger Versuchsaufbau entwickelt und eingesetzt. Um die radiusabhängige Erfassung der Prozesskräfte in allen Raumrichtungen zu realisieren, wurde im Rahmen der Belastungsversuche auf einen Wendelbohrer mit einseitig zurückgeschliffener Schneide und eine kegelförmige Probe zurückgegriffen. Auf diese Weise war es möglich, auch die Schnitt- und Passivkraft im zeitlichen Verlauf zu ermitteln. Eine mögliche Einschränkung der Übertragbarkeit der auf diesem Wege ermittelten Ergebnisse ergibt sich jedoch aus den dadurch nicht abbildbaren

Abstützungseffekten an der Bohrungswand. Der Versuchsaufbau sowie die über den Versuchsverlauf erfassten Prozesskräfte sind in Abbildung 5.4 beispielhaft dargestellt.

Während des Versuchs kam, bedingt durch die kegelförmige Probe, ein stetig zunehmender Radius der Schneide in den Eingriff, woraus sich die pro Schneidenabschnitt wirkende Belastung nach der Prozesszeit ableiten ließ. Die eingesetzten Proben hatten eine Probenlänge von $l_{Probe} = 26$ mm bei einer Kegelsteigung von 31 %. Der höchste in den Referenzversuchen eingesetzte Zahnvorschub betrug $f_z = 0,09$ mm, was einem Vorschub von $f = 0,18$ beim Einsatz eines zweiseitigen Werkzeugs entspricht. Zum Einsatz eines auf eine Schneide reduzierten Wendelbohrers wurde deshalb die andere Schneide um $\Delta l \geq f_z$ zurückgeschliffen. Aus der Kombination von eingesetztem Vorschub pro Werkzeugumdrehung und der Steigung des zerspannten Kegels ergab sich eine minimale radiale Auflösung der Krätemessung von $\Delta r = 0,028$ mm entlang der gesamten Werkzeugschneide.

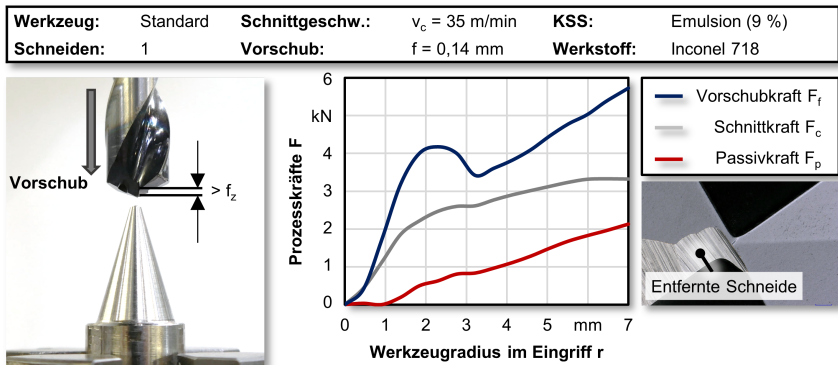


Abbildung 5.4: Versuchsaufbau zur Ermittlung der mechanischen Schneidenbelastung (links), resultierende Prozesskräfte entlang der Schneide (rechts) nach [BIE17b]

Durch die radiusabhängige Untersuchung der auftretenden Prozesskräfte konnte nachgewiesen werden, dass sich die eingesetzten Schnittwerte stark auf Richtung und Betrag der entlang der primären Hauptschneide resultierenden Kraftvektoren auswirken. Dabei wurde der eingesetzte Vorschub, analog zur prozessbegleitenden Kraftmessung während der Standweguntersuchungen, als Haupteinflussfaktor auf die mechanische Werkzeugbelastung identifiziert. Signifikante Unterschiede der Kräfteverhältnisse konnten insbesondere am Übergang von der sekundären zur primären Hauptschneide festgestellt werden. Grundsätzlich kam es durch die im Bereich der Werkzeugmitte vorhandenen, stark negativen Spanwinkel in Verbindung mit den geringen Schnittgeschwindigkeitsgradienten zu besonders hohen Vorschubkräften, was

sich auf das Auftreten von Reib- und Quetschvorgängen zurückführen lässt. Dieser Effekt nahm mit weiter in den Eingriff kommendem Schneidenradius zur primären Hauptschneide hin ab, sodass an dieser Stelle eine Verschiebung der anliegenden Kräfteverhältnisse auftrat. Die in drei Raumrichtungen erfassten Prozesskräfte wurden zur besseren Veranschaulichung grafisch aufbereitet und sind in Abbildung 5.5 entlang der Werkzeugschneide qualitativ aufgetragen [BIE17b].

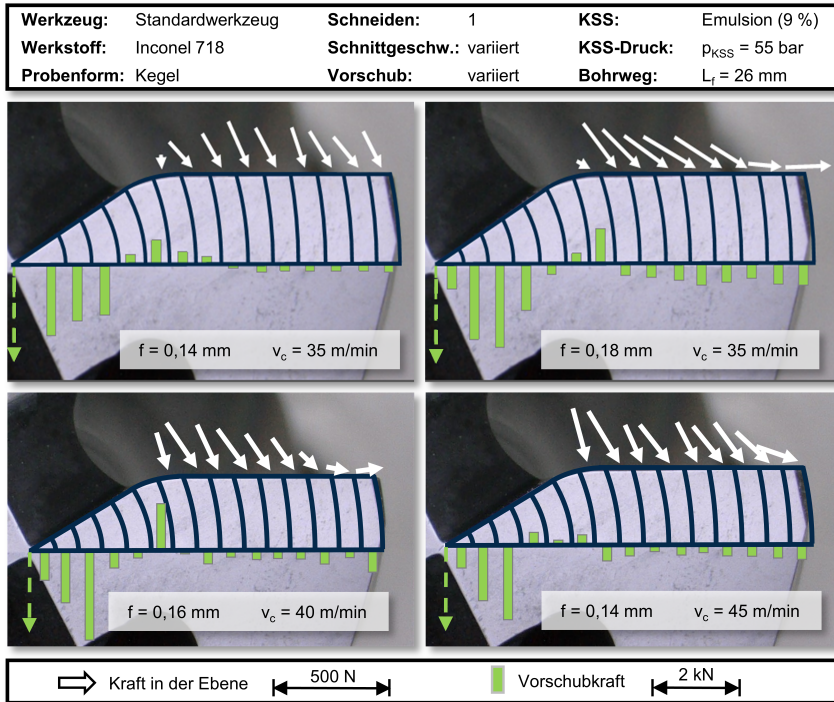


Abbildung 5.5: Auftretende mechanische Belastungen entlang der Schneide in Abhängigkeit von den eingesetzten Schnittwerten [BIE17b]

In der gewählten Darstellung repräsentieren die weißen Pfeile die Überlagerung aus Schnitt- und Passivkraft in der Schneidenebene, während die grünen Balken die Vorschubkraft repräsentieren. Zur Auswertung der jeweils anliegenden Kräfte wurde, ausgehend von der Werkzeugmitte zum äußersten Punkt der Schneide, die Differenz der Beträge jeder erfassten Kraftkomponente von Abschnitt zu Abschnitt gebildet. Aufgrund der ungünstigen Spanbildungsbedingungen in Querschnittennähe weisen die Ebenen-Vektoren in Richtung der Werkzeugmitte, während im Übergangsbereich ein

negativer Betrag der bezogenen Vorschubkraft auftritt. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine negative Summe der gemessenen Kräfte, sondern um eine Abnahme der Prozesskräfte, sobald der jeweilige Abschnitt in den Eingriff gelangt. Dabei wird deutlich, dass der weit überwiegende Anteil der im Bohrprozess auftretenden Vorschubkraft in der Nähe der Werkzeugmitte auftritt. Die Auswertung der erfassten Kräfte zeigt, dass am Übergang von der sekundären zur primären Hauptschneide besonders ungünstige Belastungen im Schneidstoff vorliegen [OEZ19]. Da die auszuliegende Werkzeugmodifikation auf den Bereich der Hauptschneiden beschränkt war, wurde die weitere Auswertung der mechanischen Schneidstoffbelastung auf die primäre Hauptschneide konzentriert.

Eine Erhöhung des Vorschubs resultierte in einer signifikanten Zunahme sowohl der Schnitt- als auch der Passivkräfte, was sich auf den erhöhten Spannungsquerschnitt zurückführen lässt. Insbesondere an den äußeren Radien zeigte sich eine starke Überlagerung der Schnittkraft durch die auftretende Passivkraft, was als Indiz für hohe Abdrängkräfte und eine starke radiale Belastung des Schneidstoffs im Bereich der Schneidenecken und Nebenschneiden zu werten ist. Eine Zunahme der auftretenden Vorschubkraft trat auch am Übergang zur sekundären Hauptschneide auf, an der eine Erhöhung des Vorschubs zu einer starken Zunahme der mechanischen Belastungen führte. Dieser Effekt wurde ebenso bei der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit beobachtet, infolge derer eine erhöhte radiale Belastung bei gleichzeitig sinkender Schnittkraft an den Schneidenecken auftrat. So stieg durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit um $\Delta v_c = 29\%$ die Summe der an der Hauptschneide auftretenden Passivkräfte von $F_p = 828\text{ N}$ auf $F_p = 1564\text{ N}$ an. Obwohl eine in Bezug auf das Zeitspanvolumen identische Erhöhung des Vorschubs von $\Delta f = 29\%$ in einer verstärkten Zunahme der Passivkraft auf $F_p = 1871\text{ N}$ resultierte, fiel die im Rahmen der Standweguntersuchungen beobachtete Abnahme der Werkzeuglebensdauer in diesem Fall geringer aus [BIE17b].

Die beobachteten Zusammenhänge zwischen einer Steigerung der eingesetzten Schnittwerte und der zunehmenden mechanischen Werkzeugbelastung lassen sich durch die damit einhergehende Erhöhung des Zeitspanvolumens und das Ausbleiben thermischer Entfestigung bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 erklären. Gleichzeitig resultierte im Rahmen der Standweguntersuchungen eine Erhöhung der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit in einer überproportionalen Verringerung der Werkzeuglebensdauer, was darauf hindeutet, dass die mechanische Schneidenbelastung bei der Auslegung einer Werkzeugmodifikation nicht isoliert betrachtet werden kann. Vielmehr handelt es sich um eine Überlagerung aus mechanischer und thermischer Belastung des Schneidstoffs, die es zu berücksichtigen und nach Möglichkeit zu kompensieren gilt.

5.2.3 Untersuchung der Span-Werkzeug-Kontaktzone

Die Ermittlung der bei der FEM-basierten Werkzeugauslegung mit den festgestellten Prozesskräften zu beaufschlagenden Schneidenbereiche erfolgte durch experimentelle Untersuchung der Kontaktzonenlänge zwischen Span und Werkzeug. Für jede Versuchsdurchführung wurden neue Referenzwerkzeuge eingesetzt, um Einflüsse durch Werkzeugverschleiß und den damit einhergehenden Schneidkantenrücksatz sowie eine Überlagerung der am Werkzeug auftretenden Bearbeitungsspuren auszuschließen. Dazu wurde jedes Werkzeug über einen Bohrweg von $L_f = d = 14$ mm eingesetzt und anschließend lichtmikroskopisch untersucht. Anschließend wurden entlang jeder Schneide 15 Messungen der sichtbaren Prozessspuren an der Spanfläche vorgenommen, wie in Abbildung 5.6 dargestellt ist.

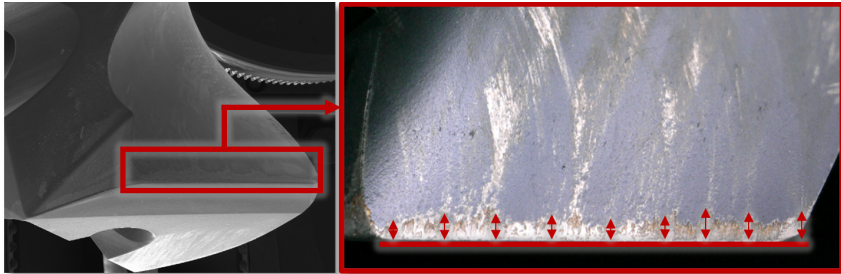


Abbildung 5.6: Untersuchung der Kontaktzonenlänge zwischen Span und Spanfläche

In Ergänzung dazu wurden die eingesetzten Werkzeuge mithilfe der Backscatter Electron Detection (BSE) und der Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) untersucht, um die lichtmikroskopisch durchgeführten Messungen zu verifizieren. Durch diese Analysen konnte belegt werden, dass es sich bei den am Werkzeug gefundenen Bearbeitungsspuren um Werkstoffrückstände aus dem Prozess handelte. Dass diese bereits nach einem Bohrweg von $L_f = 14$ mm nachweisbar waren, lässt sich auf die starke Adhäsionsneigung von Inconel 718 zurückführen. Die auf diese Weise verifizierten Kontaktzonenlängen dienten als Eingangsgrößen zur späteren Auslegung der Werkzeugmodifikation. Die ermittelten Kontaktzonenlängen in Abhängigkeit von den eingesetzten Schnittwerten sind in Abbildung 5.7 veranschaulicht.

Die mikroskopische Analyse zeigte eine gleichmäßige Ausprägung der Kontaktzonenlänge über den gesamten Radius der Hauptschneide. Diese überstieg in allen untersuchten Fällen deutlich die jeweilige Spanungsdicke von $h = 65...85$ μm . Während eine Variation der Schnittgeschwindigkeiten sich nicht signifikant auf die Ausprägung der

Kontaktzonenlänge auswirkte, konnte ein direkter Zusammenhang zum eingesetzten Vorschub aufgrund der dadurch zunehmenden Spannungsdicke festgestellt werden.

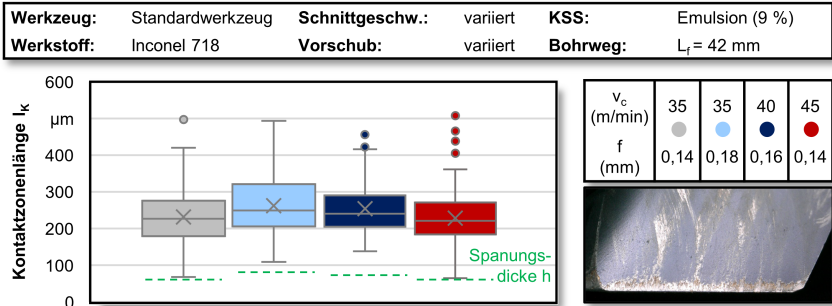


Abbildung 5.7: Länge der Kontaktzone zwischen Spanfläche und Span in Abhängigkeit von den eingesetzten Schnittwerten nach [BIE17b]

Im Rahmen der Untersuchungen wurde bei einer Kombination aus $v_c = 35 \text{ m/min}$ und $f = 0,14 \text{ mm}$ eine mittlere Kontaktzonenlänge von $l_K = 229 \text{ }\mu\text{m}$ ermittelt, die sich bei Erhöhung des eingesetzten Zahnvorschubs um $\Delta f_z = 0,02 \text{ mm}$ auf $l_K = 263 \text{ }\mu\text{m}$ erhöhte. Dagegen hatte die Variation der Schnittgeschwindigkeit keinen messbaren Einfluss, sodass der eingestellte Vorschub als wesentlicher Einflussfaktor auf die Länge der Kontaktzone zu betrachten ist [BIE17b]. In Abbildung 5.8 ist die Verifizierung der ermittelten Kontaktzonenlängen durch EDX- und BSE-Analysen dargestellt.

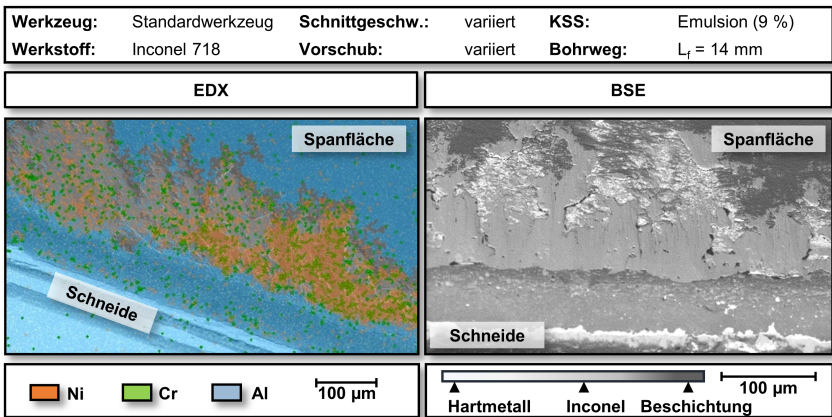


Abbildung 5.8: Detektion von Werkstoffpartikeln in der Kontaktzone durch Analyse mithilfe von EDX-Analyse (links) und BSE-Detektion (rechts) nach [BIE17b]

In der dargestellten Aufnahme sind die Elemente Nickel (Ni) und Chrom (Cr), bei denen es sich um Legierungselemente des bearbeiteten Werkstoffs handelt, in orangener (Ni) bzw. grüner (Cr) Farbe dargestellt. Der Werkzeugkörper ist blau dargestellt, wodurch das in der TiAlN-Werkzeugbeschichtung enthaltene Element Aluminium (Al) repräsentiert wird. Die Analysen untermauern die Ergebnisse der optischen Kontaktzonenuntersuchung und zeigen, dass über die sekundäre Scherzone hinaus hohe mechanische Belastungen auf die Spanfläche wirken. Durch den Druck, mit dem der erzeugte Span an der Reibzone der Spanfläche abläuft, entstehen bereits nach einem kurzen Bohrweg Werkstoffablagerungen im Bereich der Kontaktzone, die auf hohe mechanische Belastungen über die gesamte Kontaktzonenlänge hindeuten. Diese Belastungen sind im Rahmen der Auslegung einer Werkzeugmodifikation, die durch Materialabtrag hinter der Schneide erfolgt, zu berücksichtigen. Auf diese Weise lässt sich eine mechanische Überlastung der modifizierten Schneide ausschließen.

5.2.4 Thermische Werkzeugbelastung

Zur pyrometrischen Untersuchung der Temperaturen an den Freiflächen unmodifizierter Werkzeuge wurden an zwei Stellen entlang der Schneide Messungen durchgeführt, wobei es sich um die mit der höchsten Rotationsgeschwindigkeit belastete Schneidenecke ($r_a = 6,35$ mm) und den mechanisch besonders stark belasteten Übergang zwischen primärer und sekundärer Hauptschneide ($r_i = 2,2$ mm) handelte. Eine Temperaturmessung an der Querschneide bei $r = 0$ mm war nicht möglich, da der Lichtwellenleiter aufgrund der nahezu ausbleibenden Schnittbewegung in der Werkzeugmitte aus dem Kontakt gedrückt wurde. Zur Auswertung wurden jeweils 20 Kontakte zwischen Schneide und Lichtwellenleiter pro Versuch herangezogen. Es konnte nachgewiesen werden, dass über alle Versuchsreihen hinweg die am äußeren Radius ermittelten Temperaturen deutlich über denen des inneren Radius lagen. Zudem wurden starke Unterschiede der Freiflächentemperaturen in Abhängigkeit von den eingesetzten Schnittwerten festgestellt, wie Abbildung 5.9 zu entnehmen ist [OEZ19].

Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messpunkten fiel dabei, in Abhängigkeit von den eingesetzten Schnittwerten, unterschiedlich hoch aus. Während die Temperaturen am inneren Radius über alle eingesetzten Schnittwertkombinationen vergleichbar blieben, wirkte sich eine Schnittwertsteigerung am äußeren Radius wesentlich stärker aus. Beim Einsatz einer Schnittwertkombination aus $f = 0,14$ mm und $v_c = 35$ m/min betrug die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messstellen lediglich $\Delta T = 131$ °C, während eine Schnittgeschwindigkeitserhöhung auf $v_c = 45$ m/min in einem Temperaturunterschied von $\Delta T = 231$ °C resultierte. Dies lässt sich auf den unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeitsgradienten zurückführen, der bei einem

nominellen Schnittgeschwindigkeitsunterschied von $\Delta v_c = 10$ m/min zu einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit von lediglich $v_c = 3$ m/min bei $r_i = 2,2$ mm und dadurch zu einer geringeren Temperaturzunahme führt [OEZ19].

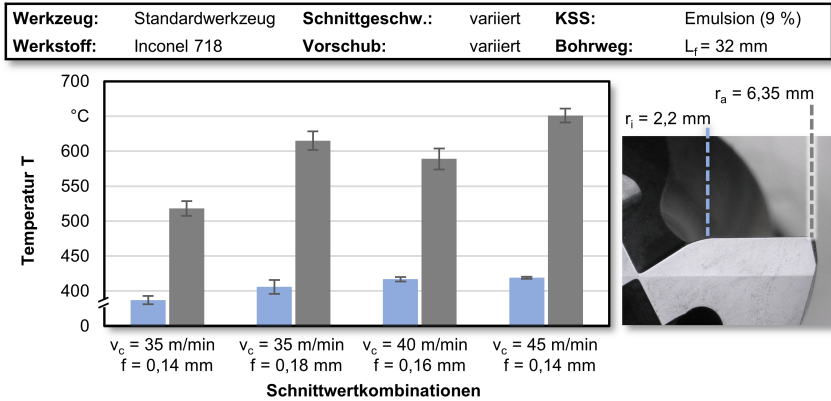


Abbildung 5.9: Temperaturen am Übergang von der primären zur sekundären Hauptschneide (r_i) und an der Schneidenecke (r_a) nach [OEZ19]

Bei der Kombination aus einem Vorschub von $f = 0,14$ mm und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35$ m/min betrug die über alle ausgewerteten Versuche gemittelte Temperatur an der Schneidenecke $T = 518$ °C, während eine Schnittgeschwindigkeitssteigerung auf $v_c = 45$ m/min in einer Erhöhung der Temperatur auf $T = 651$ °C resultierte. Dies stellt eine Temperaturerhöhung um $T = 26$ % dar, die annähernd der Steigerung des Zeitspanvolumens von $\Delta Q_W = 29$ % entspricht. Eine äquivalente Erhöhung des Zeitspanvolumens durch Steigerung des Vorschubs resultierte ebenfalls in einer Temperaturzunahme an der Schneidenecke, die jedoch mit $\Delta T = 87$ °C bzw. $\Delta T = 17$ % deutlich geringer ausfiel. Die Temperaturentwicklung beim Einsatz einer kombinierten Schnittwertsteigerung aus $f = 0,16$ mm und $v_c = 40$ m/min unterschied sich dabei deutlich in der festgestellten Temperaturentwicklung. Im Vergleich zu den sonstigen Schnittwertkombinationen kehrte sich hier das Verhältnis der Temperaturzunahme zwischen den beiden Messstellen um, sodass die Temperatur am äußeren Schneidenradius erwartungsgemäß geringer war als bei der Erhöhung des Vorschubs auf $f = 0,18$ mm, während am inneren Radius eine höhere Temperatur auftrat.

Dies lässt sich auf die zuvor ermittelte, besonders hohe Belastung der sekundären Hauptschneide durch die auftretende Vorschubkraft zurückführen. Daraus kann geschlossen werden, dass eine kombinierte Erhöhung von Vorschub und Schnittgeschwindigkeit insbesondere den Bereich des Übergangs zwischen primärer und sekundärer Hauptschneide belastet, dafür jedoch die thermische Belastung der Schneidenecke redu-

ziert. Trotz des vorhandenen Einflusses der Vorschubsteigerung auf die Temperatur der Schneidenecken war in allen durchgeführten Versuchen die größte Temperaturzunahme bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeiten zu beobachten [OEZ19].

Die gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass insbesondere die Schneidenecken während des Prozesses hohen thermischen Belastungen unterliegen. Diese nehmen bei einer Erhöhung der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit überproportional zu, sodass eine Verbesserung der KSS-Versorgung durch eine Werkzeugmodifikation maßgeblich dazu beitragen kann, die einsetzbaren Schnittgeschwindigkeiten zu steigern.

5.3 Simulationsbasierte Voruntersuchungen¹

Im Rahmen dieser Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen mit simulationsbasierten Verfahren kombiniert, um eine gezielte Auslegung der Werkzeugmodifikation zu ermöglichen. Auf diese Weise ließen sich, unter Einbeziehung der erzielten Versuchsergebnisse und der bekannten Randbedingungen, die Auswirkungen der zu entwickelnden Modifikationen auf den Bohrprozess bereits während der Entwicklung bestimmen und notwendige Anpassungen vornehmen. Neben der Sicherstellung der ausreichenden mechanischen Widerstandsfähigkeit modifizierter Werkzeuge dienten die nachfolgend vorgestellten Simulationen auch der Abschätzung des Einflusses auf das KSS-Strömungsverhalten.

5.3.1 Mechanische Schneidstoffbeanspruchung

Die Ergebnisse der durchgeführten Prozesskräfte-Messungen ermöglichten eine simulationsbasierte Ermittlung der Von-Mises-Vergleichsspannungen im Werkzeug. Dadurch konnten die mechanischen Belastungen des Schneidstoffs quantifiziert und die Auslegung der Werkzeugmodifikation daran ausgerichtet werden. Die Durchführung der Simulationen erfolgte mithilfe der Software ANSYS, wobei zunächst jede Schneide des digital modellierten Referenzwerkzeugs in 15 Einzelabschnitte mit einer Länge von jeweils $\frac{r}{15} = 0,47$ mm unterteilt wurde.

Die Höhe dieser Abschnitte entsprach der mittleren, für die jeweilige Schnittwertkombination experimentell ermittelten Kontaktzonenlänge zwischen Werkzeug und Span. Die daraus resultierenden Spanflächenabschnitte wurden, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, am virtuellen Modell des Werkzeugs unterteilt und im Rahmen der Simulationen mit den jeweils ermittelten Prozesskräften beaufschlagt [BIE17b; OEZ19].

¹Die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Simulationen wurden unter maßgeblicher Mitarbeit von Herrn Dr.-Ing. Ekrem Özkaya durchgeführt, der seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am ISF ist. Sein Forschungsschwerpunkt ist die simulationsbasierte Untersuchung der KSS-Strömung bei der Bohrbearbeitung, 2016 entwickelte er im Rahmen seiner Dissertation ein *FEM-basiertes Softwaresystem für die effiziente 3D-Gewindebohrsimulation und Werkzeugoptimierung mittels CFD-Simulation* [OZK16].

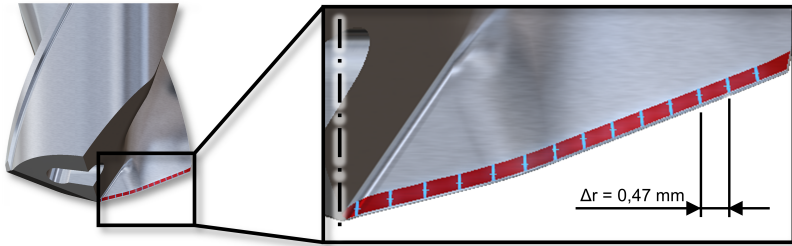


Abbildung 5.10: Unterteilung der Schneide zur abschnittswisen Aufbringung der experimentell ermittelten Kräfte nach [OEZ19]

Für die Durchführung der darauf folgenden Simulationen war die Zugrundelegung einer Vielzahl von Randbedingungen erforderlich. Eine Übersicht wichtiger herangezogener Parameter ist Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die simulationsbasierte Aufbringung der Prozesskräfte ermöglichte die FEM-gestützte Ermittlung der im Schneidstoff auftretenden Von-Mises-Vergleichsspannungen und der resultierenden torsionalen Schneidstoffdeformationen. Diese sind in Abbildung 5.11 am Beispiel eines Referenzwerkzeugs beim Einsatz des höchsten gewählten Vorschubs von $f = 0,18$ mm dargestellt.

Tabelle 5.1: Randbedingungen der durchgeführten FEM-Simulationen [OEZ19]

Umgebungsmedium	Wasser
Lagerung	fixierte Rückseite
Werkzeugrotation	$\omega = 84$ rad/s
Wärmeübertragungskoeffizient	$h = 5000 \frac{W}{m \cdot K}$
Dichte	$\rho = 14,95 \frac{g}{cm^3}$
E-Modul	$E = 600 \frac{kN}{mm^2}$
Zugfestigkeit	$R_m = 5150$ MPa
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,22$
Spezifische Wärmekapazität	$c = 434 \frac{J}{kg \cdot K}$
Isotrope thermische Leitfähigkeit	$\lambda = 60,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Bei der Verwendung der ermittelten Schneidstoffbelastung zur Auslegung der Werkzeugmodifikation war zudem zu berücksichtigen, dass sich die zugrunde gelegten Werte auf die mechanischen Eigenschaften des Schneidstoffs bei Raumtemperatur beziehen. Zur Kompensation der mechanischen Entfestigung bei erhöhten Temperaturen im Zerspanungsprozess wurden die bekannten Belastungsgrenzen des Schneidstoffs

bei der Werkzeugauslegung mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Grundsätzlich deuten die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen auf einen starken Zusammenhang zwischen den gewählten Schnittwerten und den auftretenden Spannungen hin [BUC18b].

Schneidstoff: Feinstkorn-Hartmetall	Schnittgeschw.: $v_c = 35$ m/min	Software: ANSYS
Werkzeugtyp: Referenz-Werkzeug	Vorschub: $f = 0,18$ mm	Verfahren: FEM

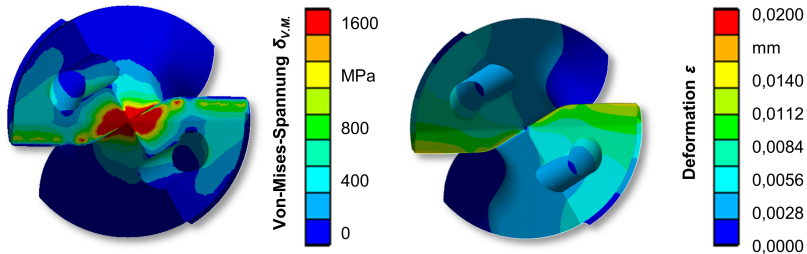


Abbildung 5.11: Aus den mechanischen Belastungen resultierende Vergleichsspannungen und Deformationen am Beispiel eines Referenzwerkzeugs [BUC18b]

Hohe Vergleichsspannungen infolge der Prozesskräfte wurden insbesondere an den stark verrundeten Querschnitten der Werkzeuge ermittelt. Sie betragen dort bis zu $\sigma_{V.M.} = 1670$ MPa und lassen sich primär auf die hohen auftretenden Vorschubkräfte zurückführen. Im Bereich der primären Hauptschneiden hingegen wurden weit geringere Vergleichsspannungen von $\sigma_{V.M.} = 600 \dots 800$ MPa ermittelt, was in entsprechend reduzierten elastischen Schneidstoffdeformationen resultierte. Diese betragen maximal $\epsilon = 0,014$ mm im Bereich der Hauptschneiden, während sie an der Querschnitte bis zu $\epsilon = 0,02$ mm erreichten [BUC18b].

5.3.2 Thermische Schneidstoffbelastung

Die aus der im Prozess umgesetzten Energie resultierende thermische Belastung des Schneidstoffs wurde vor Durchführung der experimentellen Validierung mithilfe von ANSYS anhand der umgesetzten Schnittleistung numerisch ermittelt. Den Simulationsergebnissen zufolge stellt sich bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 bereits nach einer Prozessdauer von $t = 0,075$ s, die einer Werkzeugumdrehung entspricht, ein stationäres Temperaturniveau im Bereich der Hauptschneiden ein. Die simulationsbasiert ermittelte Temperaturentwicklung an der Schneidenecke ist in Abbildung 5.12 im zeitlichen Verlauf dargestellt [OEZ19].

Schneidstoff: Feinstkorn-Hartmetall	Schnittgeschw.: $v_c = 35$ m/min	Software: ANSYS
Werkzeugtyp: Referenz-Werkzeug	Vorschub: $f = 0,18$ mm	Verfahren: FEM

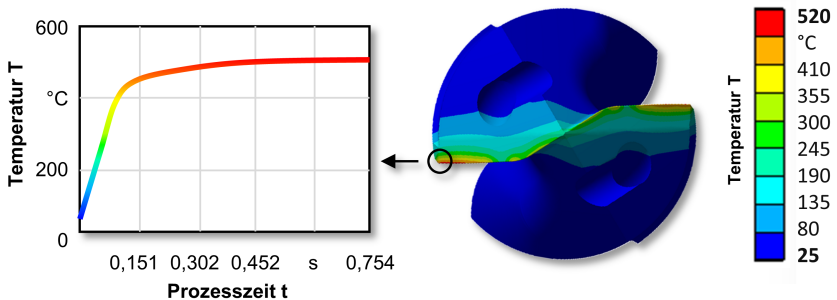


Abbildung 5.12: Temperaturentwicklung an der Werkzeugschneide in Abhängigkeit von der Prozesszeit nach [OEZ19]

Für eine gegebene Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35$ m/min bei einem Vorschub von $f = 0,14$ mm betrug die simulationsbasiert ermittelte Temperatur $T = 520$ °C im Bereich der Schneidenecke bzw. $T = 374$ °C am Übergang von der primären zur sekundären Hauptschneide, wobei sich eine Erhöhung der an den jeweiligen Schneidensegmenten umgesetzten Schnittleistung erhöhend auf die resultierende Temperatur auswirkte. Über alle untersuchten Kombinationen hinweg stimmten die simulationsbasiert quantifizierten Temperaturen mit einer Genauigkeit von $\Delta T = \pm 30$ °C mit den experimentell ermittelten Temperaturen überein [OEZ19; OEZ20].

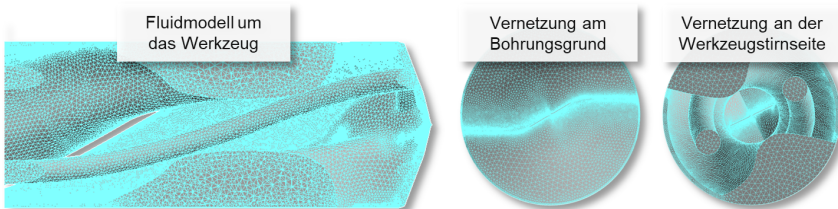
5.3.3 Strömungssituation am Werkzeug

Zur Untersuchung der am unmodifizierten Referenzwerkzeug auftretenden KSS-Strömung wurde ein CFD-Simulationsmodell in der Software ANSYS CFX erstellt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den Grenzschichten des Fluidmodells, welche den Kontaktbereich zwischen dem Kühlschmierstoff und der Werkzeugoberfläche darstellen. Insbesondere in der Umgebung komplexer geometrischer Strukturen war hierbei die ausreichend feine Vernetzung der Grenzschichten von großer Bedeutung, um eine realitätsgetreue Abbildung der entstehenden Turbulenzen im Fluid sicherzustellen. Einige wichtige, zur Durchführung der CFD-Simulationen gewählte Randbedingungen sind in Tabelle 5.2 aufgeführt [OEZ20].

Tabelle 5.2: Randbedingungen der durchgeführten CFD-Simulationen [OEZ20]

Fluidtyp	Wasser
Werkzeug/Fluid-Oberflächenrauheit	glatt
Fluidtemperatur	$T = 298,15 \text{ K}$
Fluid-Druck bei Kühlkanalaustritt	$p_{KSS} = 55 \text{ bar}$
Fluid-Massenstrom	$q_m = 0,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Rotationsgeschwindigkeit	$\omega = 84 \text{ rad/s}$
Gesamtanzahl der Gitternetzelemente	ca. $6 \cdot 10^6$
Feinheit der Grenzschichtvernetzung	$2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$
Wachstumsrate der Grenzschicht	1,2
Turbulenzmodell	k- ω -SST

In Abbildung 5.13 ist dargestellt, wie das unstrukturierte Netzgitter in den Bereichen komplexer Geometrien ausgelegt wurde. Vor allem im Bereich der Querschnitte treten im Bohrprozess hohe Fluiddrücke und Geschwindigkeitsgradienten auf, sodass eine feine Vernetzung an dieser Stelle von großer Bedeutung ist. Als maximaler Abstand zwischen zwei Vernetzungsknoten wurde daher ein Abstand von $l_{Knoten} = 0,2 \mu\text{m}$ im Bereich der Querschnitte identifiziert. Dies ermöglichte die Abbildung von Turbulenzen, die in hohen zeitlichen und räumlichen Gradienten innerhalb der Strömung resultieren. Auf Basis von CAD-Modellen ließen sich so Fluidmodelle erstellen, mit deren Hilfe die Strömungssituation am Werkzeug berechnet wurde. Während von einer hohen Genauigkeit der simulationsbasiert ermittelten Ergebnisse in Bezug auf die zugrunde gelegten Randbedingungen ausgegangen werden kann, sind diese und vergleichbare Simulationen jedoch bislang nicht dazu in der Lage, gleichzeitig die Auswirkungen des Spanbildungsprozesses und der im KSS verteilten Späne abzubilden [BUC20; OEZ20].

**Abbildung 5.13:** Vernetzung des Fluidmodells nach [OEZ20]

Die Ergebnisse der Strömungsanalyse konnten zeigen, dass es am Standardwerkzeug im Bereich der Hauptschneiden und insbesondere der Schneidenecken zu einer nahezu ausbleibenden Umspülung mit Kühlschmierstoff kommt. In Abbildung 5.14 sind die resultierenden Strömungslinien entlang des Werkzeugs dargestellt.

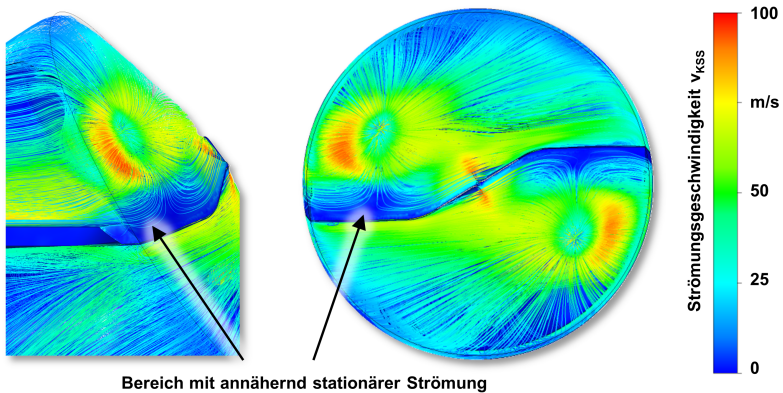


Abbildung 5.14: KSS-Strömungssituation am Referenzwerkzeug nach [OEZ20]

Wie der Visualisierung der resultierenden Strömungslinien zu entnehmen ist, tritt der Kühlschmierstoff zunächst mit einer Geschwindigkeit von bis zu $v_{KSS} = 100$ m/s aus den KSS-Kanälen aus und strömt vor allem in Richtung der Spannuten, wodurch der Spanabtransport begünstigt wird. Allerdings beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung der primären Freiflächen lediglich ca. $v_{KSS} \approx 30$ m/s, wobei die Schneide selbst kaum erreicht wird. Es bilden sich Bereiche mit annähernd stationärer Strömung sowohl an den Haupt- als auch den Nebenschneiden, sodass eine wirkstellennahe Kühlung durch die Umspülung mit KSS in diesen Bereichen nicht gegeben ist [OEZ20].

Aus der simulationsbasiert ermittelten Strömungssituation am Referenzwerkzeug geht hervor, dass die bisherige Auslegung von Wendelbohrern vor allem auf eine gute KSS-Versorgung der Spannuten ausgerichtet ist. Während sich dadurch eine verbesserte Spanabfuhr erzielen lässt, gelangt jedoch wenig KSS freiflächenseitig an die Wirkstelle, sodass eine effektive Schneidstoffkühlung ausbleibt. Daraus folgt ein großes Potenzial zur Verbesserung der KSS-Versorgung durch eine geometrische Modifikation an der Freifläche. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die Spanabfuhr durch die Veränderung der KSS-Strömung nicht beeinträchtigt wird.

6 Modifikation durch Freiflächenabsatz

6.1 Konzept der Werkzeugmodifikation Generation 1

Aus dem bisherigen Stand der Forschung lässt sich schließen, dass ein Absatz in der primären Freifläche von Bohrwerkzeugen vor allem durch die geometrische Limitierung des Freiflächenverschleißes in einem verlängerten Werkzeugstandweg resultiert. Darüber hinaus wird von positiven Effekten auf die KSS-Versorgung der Hauptschneide ausgegangen, die sich aus dem hinter der Schneide geschaffenen, freien Volumen ergeben. Um diesen Effekt zu maximieren, wurde die Auslegung eines möglichst breiten und tiefen Absatzes an den Werkzeugfreiflächen fokussiert.

Bisherige Arbeiten zur Freiflächenmodifikation von Bohrwerkzeugen beziehen sich vor allem auf eine Modifikation durch Laserbearbeitung, die jedoch zeit- und kostenintensiv ist. Aus diesem Grund wurde angestrebt, eine durch herkömmliche Schleifwerkzeuge herstellbare Freiflächenmodifikation zu gestalten. Daraus ergaben sich Restriktionen hinsichtlich der geometrischen Ausgestaltung, da die Form der eingesetzten Schleifwerkzeuge zu einem wesentlichen Teil die Gestalt des resultierenden Absatzes bedingt. Eine unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingung ausgelegte Freiflächenmodifikation stellt die Werkzeugmodifikation Generation 1 dar, die in Abbildung 6.1 im Vergleich zum Modell eines unmodifizierten Standardwerkzeugs dargestellt ist.

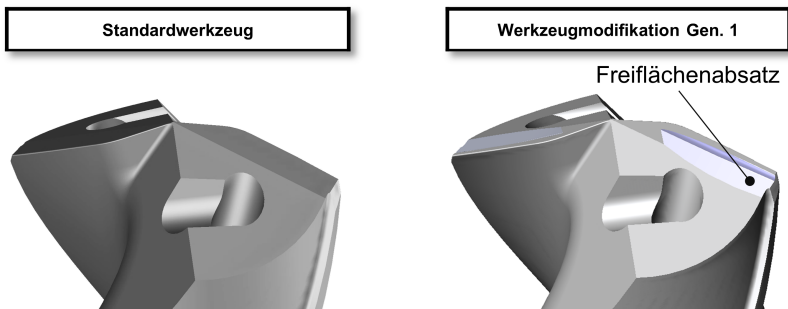


Abbildung 6.1: CAD-Modelle des Standardwerkzeugs (links) und der Werkzeugmodifikation Gen. 1 (rechts)

Die Parametrisierung von Lage und Abmessungen des Freiflächenabsatzes erfolgte mithilfe von Computer-Aided Design (CAD) auf Basis der zuvor gewonnenen Erkenntnisse zur thermomechanischen Schneidstoffbelastung im Prozess. Mit ihrer Hilfe ließ sich die ausreichende mechanische Widerstandsfähigkeit des resultierenden Werkzeugdesigns durch eine geeignete Wahl der geometrischen Größen sicherstellen.

6.2 Simulationsbasierte Auslegung

Die Freiflächenmodifikation wurde zunächst als CAD-Modell virtuell umgesetzt und im Rahmen einer FEM-Simulation mit den zuvor ermittelten Prozesskräften beaufschlagt, um die resultierenden Von-Mises-Vergleichsspannungen zu ermitteln. Als zulässige Vergleichsspannung im Schneidstoff wurde ein Wert von $\sigma_{V.M.} = 1600$ MPa angenommen, der auf den bekannten Angaben zur Biegefestigkeit des eingesetzten Feinstkornhartmetalls von $\sigma_{B,R} = 4100$ MPa basierte. In Anlehnung an gängige Richtwerte zur Vordimensionierung [GOM14] wurde dieser Wert, zur Berücksichtigung der dynamischen Beanspruchung des spröden Schneidstoffs bei der Bearbeitung eines karbidhaltigen Werkstoffs unter stetig fortschreitendem Werkzeugverschleiß, mit einem vergleichsweise hoch gewählten Sicherheitsfaktor von $SF = 2,5$ beaufschlagt. Dieser Wert stellte im Rahmen der Auslegung die zwingend einzuhaltende Grenze zur Gewährleistung der Prozesssicherheit dar.

Die Ergebnisse der durchgeführten FEM-Simulationen zeigen, dass die Einbringung eines Absatzes an der Werkzeugfreifläche in einer starken Erhöhung der lokal auftretenden Schneidstoffspannungen hinter der Schneide resultiert. Dies lässt sich auf die Kerbwirkung des eingebrachten Absatzes zurückführen, die zu erhöhten Biegemomenten im Bereich des Übergangs zwischen Absatz und Schneide führt. Die ermittelten Spannungen im Werkstoff waren stark von den zugrunde gelegten Schnittwerten abhängig und erreichten im ungünstigsten Fall annähernd den maximal zulässigen Wert von $\sigma_{V.M.} = 1600$ MPa, wie in Abbildung 6.2 dargestellt ist [OEZ20].

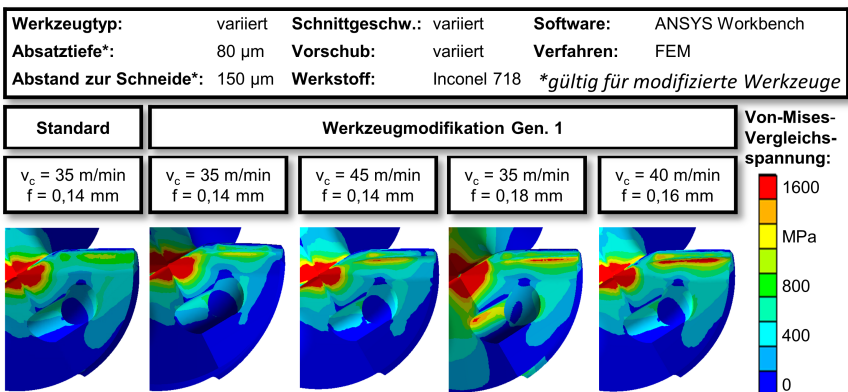


Abbildung 6.2: Einfluss der Werkzeugmodifikationen auf die Von-Mises-Vergleichsspannung im Schneidstoff während des Bohrprozesses nach [BUC18b; OEZ20]

Aus diesem Grund wurde die Auslegung der Absatztiefe und des resultierenden Abstands zu Schneide iterativ angepasst, um die zulässigen Spannungen einzuhalten. Die resultierenden Werte $d_{Schneide} = 150 \mu\text{m}$ und $t_{Absatz} = 90 \mu\text{m}$ wurden für die weitere Auslegung identifiziert. Der Übergang vom Freiflächenabsatz zur Schneide wurde mit einem Radius von $r_{\ddot{u}} = 1,4 \text{ mm}$ ausgelegt, um die Kerbwirkung gering zu halten.

Darüber hinaus wurden CFD-Simulationen zur Ermittlung des Einflusses eines Freiflächenabsatzes auf die Strömungssituation an den Hauptschnitten durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zunächst das Fluidmodell eines modifizierten Werkzeugs erstellt, um das während des Prozesses durch KSS gefüllte Volumen zwischen Werkzeug und Bohrungsgrund bzw. -wand abzubilden. Nach der anschließenden Vernetzung konnten die Verteilung und die Geschwindigkeit der KSS-Strömung ermittelt werden. Die Ergebnisse deuteten auf eine geringfügige Erhöhung der KSS-Strömungsgeschwindigkeiten an der primären Freifläche durch die Umsetzung der WZ-Mod. Gen. 1 hin. Während weiterhin der Großteil der Strömung in Richtung der Spannuten geleitet wurde, wurde jedoch durch die Einbringung des Freiflächenabsatzes vor allem eine deutliche Annäherung der Strömungslinien an die Schneide festgestellt. Diese lässt sich auf den durch die Modifikation vergrößerten Strömungskanalquerschnitt an der Freifläche zurückführen, der in einem verringerten Strömungswiderstand resultiert. Daraus folgen eine Verbesserung der KSS-Versorgung und eine effektivere Kühlung der Schneide am Werkzeug mit modifizierter Freifläche.

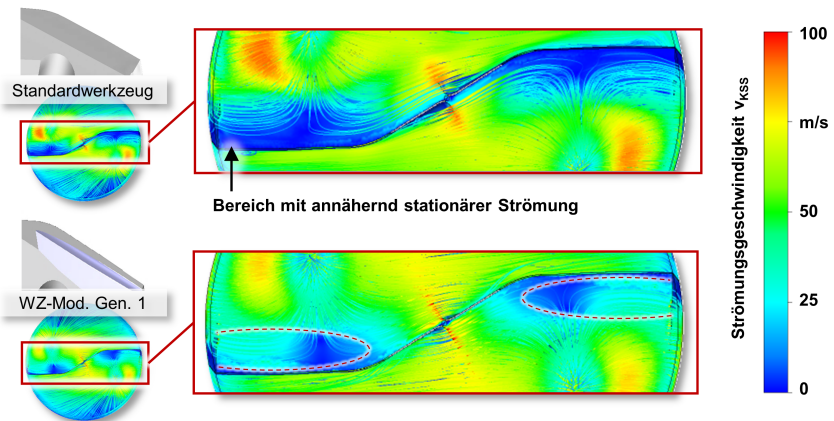


Abbildung 6.3: Strömungssituation an der WZ-Mod. Gen. 1 nach [BUC18b; OEZ20]

6.3 Einbringung des Freiflächenabsatzes

Im Anschluss an die simulationsgestützte Auslegung der WZ-Mod. Gen. 1 erfolgte die in Abbildung 6.4 dargestellte, schleiftechnische Modifikation. Da die prototypische Einbringung des Freiflächenabsatzes an seriengefertigten Standardwerkzeugen erfolgte, ergab sich aus der Kombination ihrer Fertigungstoleranz mit dem durch das erneute Einspannen und Antasten hervorgerufenen Fehler eine einzukalkulierende Unsicherheit. Aus diesem Grund wurde, auf Basis mehrerer durchgeführter Modifikationen und den daraus resultierenden Erfahrungen, eine Fertigungstoleranz von $\pm 20 \mu\text{m}$ festgelegt.

Da im Rahmen der zuvor durchgeführten Auslegung stets von Maximalwerten bezüglich der resultierenden Materialabnahme hinter der Schneide ausgegangen worden war, ergab sich daraus eine anzustrebende Tiefe des Absatzes mit einem Ziel-Wert von $t_{\text{Absatz}} = 70 \mu\text{m}$ bei einem Abstand zur Schneide von $d_{\text{Schneide}} = 180 \mu\text{m}$. Das Einbringen des Absatzes an der Freifläche erfolgte unter Einsatz von Schleiföl mithilfe einer 1A1-Schleifscheibe der Körnung D46, die einen Durchmesser von $d = 100 \text{ mm}$ und einen Eckenradius von $R = 1,4 \text{ mm}$ aufwies. Der Schleifprozess sowie die eingebrachte Modifikation am realen Werkzeug sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

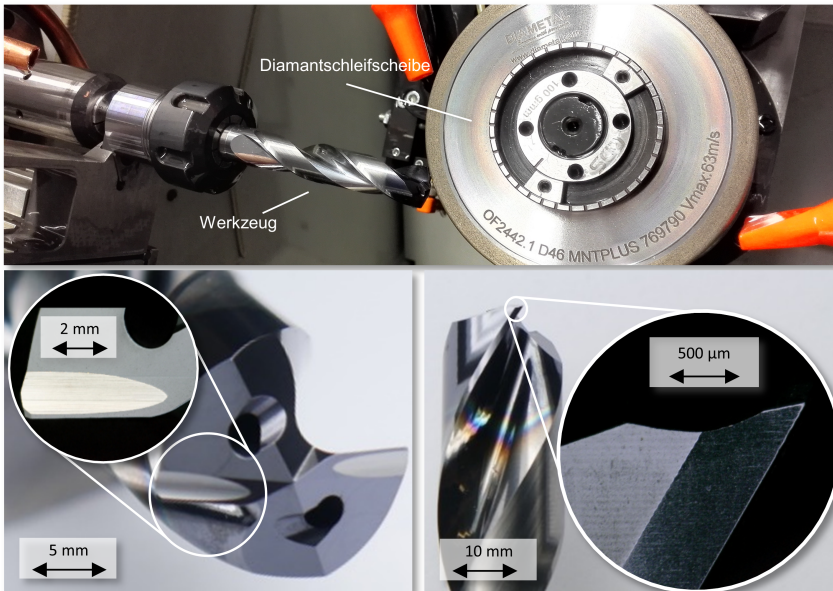


Abbildung 6.4: Fertigung der Werkzeugmodifikation Generation 1 [OEZ19]

6.4 Einfluss auf das Einsatzverhalten

6.4.1 Prozesskräfte

Um den Einfluss eines freiflächenseitigen Absatzes auf die Reibung zwischen Freifläche und Bohrungsgrund zu analysieren, wurden die aus unterschiedlichen Abständen der Werkzeugmodifikation zur Schneide resultierenden Bohrmomente untersucht. Dazu wurden gezielt Absätze mit einer Distanz zur Schneide von $d_{\text{Schneide}} = 130 \dots 200 \mu\text{m}$ gefertigt und über einen Bohrweg von $L_f = 0,21 \text{ m}$ eingesetzt, was der im Rahmen der Standweguntersuchungen beobachteten Einlaufphase entsprach. Das jeweils resultierende Bohrmoment über die fünf gefertigten Bohrungen in Abhängigkeit von der Distanz des Freiflächenabsatzes zur Schneide ist in Abbildung 6.5 grafisch veranschaulicht.

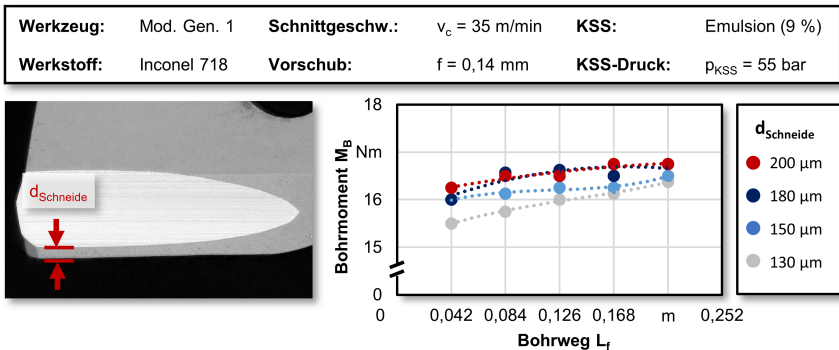


Abbildung 6.5: Resultierendes Bohrmoment in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Freiflächenabsatz und Schneide [BUC20]

Es konnte nachgewiesen werden, dass ein geringerer Abstand des Freiflächenabsatzes zur Schneide bei neuen Werkzeugen zu einer messbaren Reduktion des Bohrmoments führt. Diese Reduktion betrug bis zu $\Delta M_b = 5 \%$ beim Vergleich eines Freiflächenabsatzes mit einem Abstand von $d_{\text{Schneide}} = 130 \mu\text{m}$ gegenüber $d_{\text{Schneide}} = 200 \mu\text{m}$. Allerdings wiesen die Werkzeuge, die mit einem geringeren Abstand zwischen dem Freiflächenabsatz und der Schneide versehen waren, ein stärker ausgeprägtes Einlaufverhalten auf, wodurch sich die jeweiligen Bohrmomente über einen Bohrweg von $L_f = 0,21 \text{ m}$ stark angleichen. So wiesen alle untersuchten Werkzeuge nach diesem Bohrweg annähernd identische Bohrmomente von $M_b = 16,5 \dots 16,9 \text{ Nm}$ auf, was den Schluss zulässt, dass sich keine nachhaltige Reduktion des auftretenden Bohrmoments durch die Einbringung des Absatzes in direkter Nähe zur Schneidkante erzielen lässt. Gleichzeitig geht mit dem Entfernen des Schneidstoffs eine mechanische Schwächung der Schneide einher, wie sowohl FEM-Simulationen als auch experimentelle Unter-

suchungen belegten. Die Versuche zeigten, dass Werkzeuge, bei denen die Distanz zwischen Absatz und Schneide weniger als $d_{Schneide} = 150 \mu\text{m}$ beträgt, nicht prozesssicher einsetzbar sind, da sie bei höheren Standwegen zu spontan auftretendem Schneidenbruch neigen [BUC20].

Die im Rahmen dieser Versuchsreihe gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die mit einer Reduktion der Freiflächenbreite erzielbaren tribologischen Vorteile die mechanische Schwächung der Werkzeugschneide nicht kompensieren können. Obwohl das dadurch geschaffene, zusätzliche freie Volumen höchstwahrscheinlich in einer verbesserten KSS-Strömung resultiert, sind Werkzeuge mit einem Abstand zwischen Freiflächenabsatz und Schneide unterhalb von $d_{Schneide} = 150 \mu\text{m}$ nicht prozesssicher einsetzbar. Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich daher ableiten, dass ein geringstmöglicher Abstand bei gleichzeitig ausreichender mechanischer Stabilität anzustreben ist, wobei der Effekt des resultierenden Abstands auf das auftretende Bohrmoment über den Verlauf typischerweise erreichbarer Bohrwege vernachlässigbar ist. Vielmehr sind Vorteile durch den vergrößerten KSS-Strömungskanal zu erwarten, die in einer verbesserten Schneidenkühlung resultieren.

Während aller durchgeführten Standweguntersuchungen wurde eine kontinuierliche Erfassung der auftretenden Prozesskräfte vorgenommen, um die mechanische Werkzeugbelastung zu erfassen und Unregelmäßigkeiten im Prozess zu registrieren. Die erfassten Verläufe der Vorschubkraft und des Bohrmoments wurden anschließend zur Analyse des Einflusses einer Werkzeugmodifikation auf die resultierenden Prozesskräfte genutzt. Sie sind einander in Abbildung 6.6, exemplarisch für eine Schnittwertkombination aus $v_c = 35 \text{ m/min}$ und $f = 0,14 \text{ mm}$, gegenübergestellt.

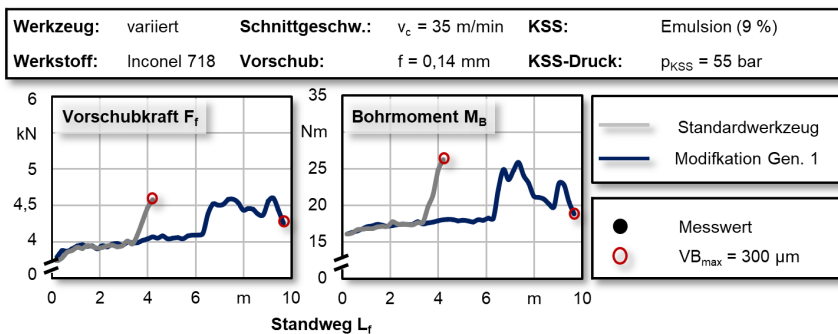


Abbildung 6.6: Einfluss einer Werkzeugmodifikation auf die Vorschubkraft (links) und das Bohrmoment (rechts)

Die ermittelten Kurvenverläufe weisen deutliche Parallelen zwischen modifizierten und unmodifizierten Werkzeugen auf. So stiegen in beiden Fällen die Prozesskräfte in der Einlaufphase von ca. $\Delta L_f = 0,25$ m zunächst an, bevor sie ein stationäres Niveau von $F_f = 3,8$ kN und $M_b = 17$ Nm erreichten. Im weiteren Verlauf des Bohrwegs nahmen sie über einen weiten Teil des Standwegs geringfügig zu, bevor ein deutlicher Anstieg durch den Eintritt in die progressive Verschleißphase auftrat. Beim untersuchten Standardwerkzeug wurde dies ab einem Bohrweg von $L_f = 3,78$ m beobachtet, bevor kurz darauf bei $L_f = 4,1$ m die als Verschleißkriterium festgelegte, maximale Verschleißmarkenbreite $VB_{max} = 300$ μm erreicht wurde. Am modifizierten Werkzeug hingegen nahmen die Kräfte erst ab einem Bohrweg von $L_f = 6,3$ m signifikant zu. Sie setzten sich im weiteren Verlauf auf einem erhöhten Niveau von $F_f = 4,5$ kN und $M_b = 24$ Nm fort, wobei jedoch starke Schwankungen auftraten. Diese lassen sich auf den zunehmenden Werkzeugverschleiß zurückführen, der in instationären Zerspanungsbedingungen resultieren kann.

Durch die Analyse der erfassten Prozesskräfte konnte nachgewiesen werden, dass sich der Einsatz der Freiflächenmodifikation weder auf die auftretende Vorschubkraft noch auf das Bohrmoment signifikant auswirkt. Dies erscheint plausibel vor dem Hintergrund, dass die Modifikation nicht wirkstellennah positioniert ist und daher keinen direkten Einfluss auf den Vorgang der Spanbildung hat. Zuvor durchgeführte Untersuchungen zum Einfluss des Freiflächenabsatzes auf die Reibung zwischen Freifläche und Bohrungsgrund konnten zudem belegen, dass nach einer kurzen Einlaufphase kein messbarer Zusammenhang zwischen der geometrischen Positionierung des Freiflächenabsatzes und dem resultierenden Bohrmoment besteht. Unter dem Gesichtspunkt einer potenziell besseren KSS-Versorgung der Schneiden an modifizierten Werkzeugen wurde dagegen mit einem Anstieg der Prozesskräfte durch verringerte thermische Entfestigung des Werkstoffs gerechnet. Dieser wurde jedoch nicht beobachtet, was sich auf die hohe Warmfestigkeit von Inconel 718 zurückführen lässt. Dem Stand der Forschung zufolge kann eine verbesserte KSS-Versorgung der Freifläche zudem in erhöhten Vorschubkräften resultieren [OEZ17], die jedoch ebenfalls nicht festgestellt wurden. Das experimentell nachgewiesene Ausbleiben eines Einflusses der WZ-Mod. Gen. 1 auf die Prozesskräfte lässt darauf schließen, dass bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 nicht von einer signifikanten Beeinflussung des Zerspanvorgangs durch den Einsatz freiflächenmodifizierter Werkzeuge auszugehen ist.

6.4.2 Spanbildung

Zur Untersuchung des Einflusses einer Freiflächenmodifikation auf die resultierende Spanform wurden die im Bohrprozess entstandenen Späne über den Verlauf des Bohrwegs in einem Intervall von $\Delta L_f = 0,42$ m gesammelt, gereinigt und fotografisch dokumentiert. Als maßgeblicher Einflussfaktor für die Spanform wurden die eingesetzten Schnittwerte identifiziert. Insbesondere beim Einsatz geringer Vorschübe konnte das vermehrte Auftreten kegelförmiger Wendelspäne festgestellt werden, die sich durch visuelle Beobachtung des Prozesses der Anbohrphase zuordnen ließen. Die geringe Steigung der Spanwendelung lässt sich darauf zurückführen, dass zu Beginn des Anbohrvorgangs sehr geringe Schnittgeschwindigkeiten insbesondere an der Querschneide, die einen stark negativen Spanwinkel aufweist, auftreten.

Beim Einsatz erhöhter Vorschübe traten kürzere, weniger stark gewendelte Späne auf, was auf einen besseren Spanbruch hindeutet. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte jedoch kein signifikanter Einfluss der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit oder des Werkzeugverschleißes auf die resultierende Spanform festgestellt werden. In allen durchgeführten Versuchen traten in der Phase des Vollbohrens kurze Übergangsspäne und trichterförmige Bruchspäne auf. Späne, die beim Einsatz eines Standardwerkzeugs sowie der WZ-Mod. Gen. 1 erzeugt wurden, sind in Abbildung 6.7 beispielhaft nach einem Bohrweg von $L_f = 2,9$ m dargestellt.

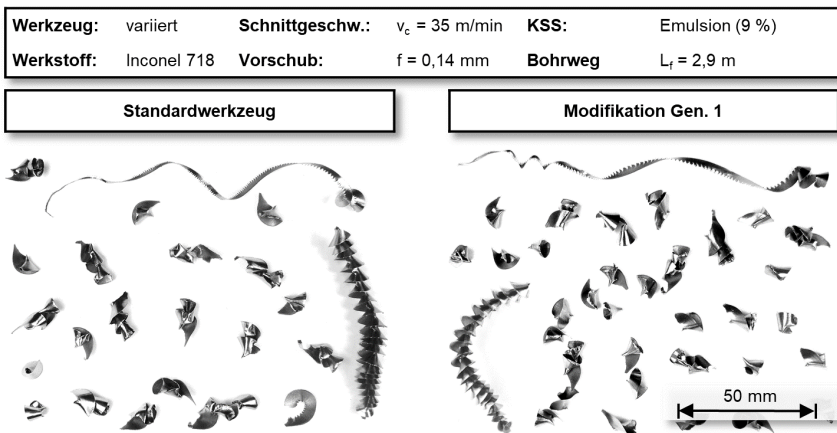


Abbildung 6.7: Aus dem Einsatz eines Standardwerkzeugs und der WZ-Mod. Gen. 1 resultierende Späne im Vergleich

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, wiesen die beim Einsatz eines Standardwerkzeugs und der WZ-Mod. Gen. 1 auftretenden Späne ein vergleichbares Erscheinungsbild

auf. So entstanden in beiden Fällen mehrheitlich trichterförmige Übergangsspäne und vereinzelte Wendelspäne. Die Länge der entstehenden Späne war dabei jeweils identisch, was sich auch mit der Beobachtung der gleichbleibenden Kräfte beim Einsatz der jeweiligen Werkzeugvarianten deckt. Die identische Spanform beim Einsatz modifizierter Werkzeuge in Verbindung mit dem Ausbleiben durch verklemmende Späne bedingter Werkzeugbrüche legt den Schluss nahe, dass die ggf. eintretende Veränderung des KSS-Stroms an der Schneide nicht ausreichend ist, um sich maßgeblich auf die resultierende Spanabfuhr auszuwirken.

6.4.3 Verschleißverhalten

Zur Analyse des Einflusses der WZ-Mod. Gen. 1 auf die Werkzeuglebensdauer wurde diese mit identischen Schnittwertkombinationen wie das Referenzwerkzeug eingesetzt und die resultierenden Standwege miteinander verglichen. Die jeweils erzielten Standwege sind einander in Abbildung 6.8 vergleichend gegenübergestellt.

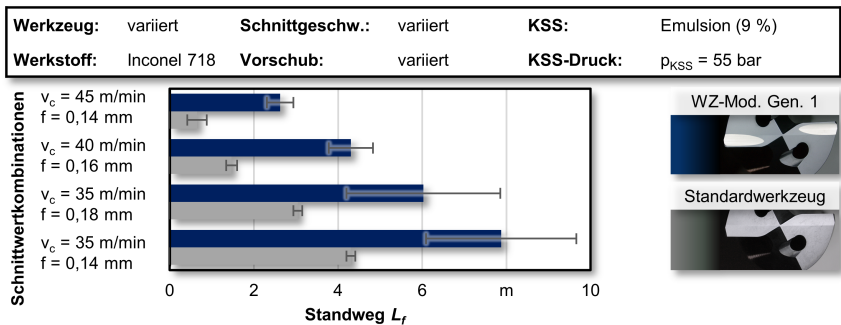


Abbildung 6.8: Standwegveränderung durch Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 nach [BUC18b]

Bei allen eingesetzten Schnittwertkombinationen wiesen die modifizierten Werkzeuge einen signifikant verlängerten Standweg auf. Dabei wurde ein besonders starker Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die erzielbare, relative Standwegsteigerung ermittelt. So wurde beim Einsatz einer moderaten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35 \text{ m/min}$ eine durchschnittliche Zunahme der Werkzeuglebensdauer um $\Delta L_f = 83 \%$ bzw. $\Delta L_f = 3,6 \text{ m}$ festgestellt. Dagegen betrug die beim Einsatz von $v_c = 45 \text{ m/min}$ ermittelte Standwegzunahme $\Delta L_f = 1,98 \text{ m}$, was einer relativen Erhöhung um $\Delta L_f = 305 \%$ entspricht. Die erzielten Ergebnisse konnten aufzeigen, dass die Werkzeugmodifikation insbesondere bei sehr anspruchsvoll gewählten Schnittwerten, die den eingesetzten Schneidstoff bis an seine thermische Grenze belasten, zu einem deutlich reduzierten Verschleißfortschritt führt [BUC18b].

Dies deutet auf eine Verbesserung des Kühlschmierstoffflusses an der Werkzeugschneide hin, die mit einer effektiveren Kühlung und damit einer Temperaturreduktion an der hoch belasteten Schneidenecke einhergeht. Dies kann sich insbesondere bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten positiv auswirken, bei denen vor allem die Referenzstandwege erheblich kürzer ausfielen [BUC18b]. Der Verschleißfortschritt der Standardwerkzeuge beim Einsatz einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35$ m/min mit einem Vorschub von $f = 0,14$ mm im Vergleich zur WZ-Mod. Gen. 1 ist in Abbildung 6.9 veranschaulicht.

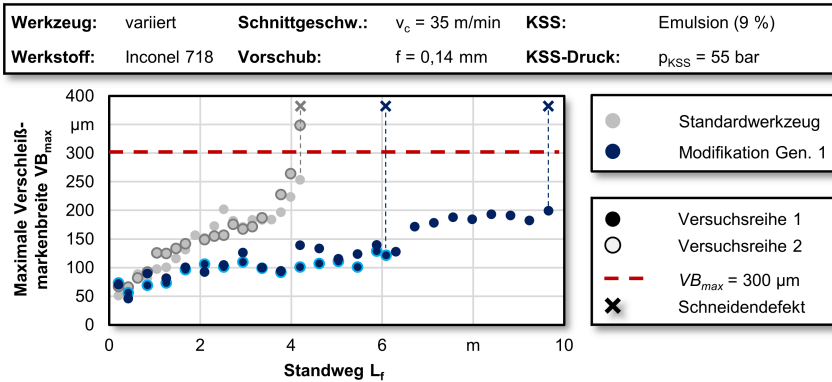


Abbildung 6.9: Verschleißentwicklung beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 nach [BUC18b]

Die beiden untersuchten Werkzeugvarianten wiesen zunächst eine identische Einlaufphase auf. An allen eingesetzten Werkzeugen stieg zu Beginn die maximale Verschleißmarkenbreite über einen Bohrweg von $L_f = 1,26$ m auf ca. $VB_{max} \approx 100 \mu\text{m}$ an. Im weiteren Verlauf nahm der Freiflächenverschleiß an den Standardwerkzeugen bis zu einem Bohrweg von $L_f = 3,36$ m um ca. $\Delta VB \approx 90 \mu\text{m}$ zu, bevor die progressive Verschleißphase eintrat. Dabei kam es zu einem signifikanten Anstieg der Verschleißrate, die beim maximal erreichten Bohrweg von $L_f = 4,2$ m im Erreichen des Verschleißkriteriums $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$ resultierte. Der Verschleiß der WZ-Mod. Gen. 1 hingegen wies eine ausgeprägte stationäre Phase bis zu einem Bohrweg von ca. $L_f = 6$ m auf. Danach wurde bei einem der eingesetzten Werkzeuge ein spontan auftretender Ausbruch an einer Schneidenecke festgestellt. Ein weiteres untersuchtes Werkzeug trat im weiteren Verlauf in eine Phase mit einer erhöhten, aber weiterhin konstanten Verschleißmarkenbreite von $VB \approx 200 \mu\text{m}$ ein, bevor bei einem maximal erreichten Bohrweg von $L_f = 9,24$ m ein Ausbruch an der Eckenschutzfase auftrat [BUC18b]. Der Zustand eines Referenzwerkzeugs sowie eines modifizierten Werkzeugs nach Standwegende sind einander beispielhaft in Abbildung 6.10 gegenübergestellt.

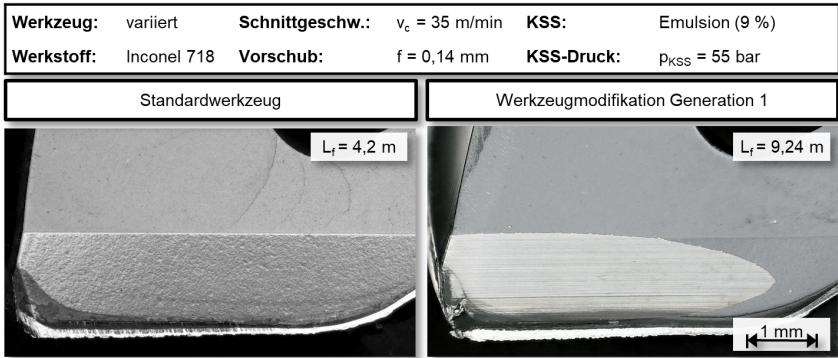


Abbildung 6.10: Standardwerkzeug und WZ-Mod. Gen. 1 nach Erreichen des Verschleißkriteriums nach [BUC18b]

Den mikroskopischen Aufnahmen ist zu entnehmen, dass das Standardwerkzeug ausgeprägte KSS-Verkokungen im Bereich der Schneidenecke aufweist, die bei der WZ-Mod. Gen. 1 nur in geringem Maße im Freiflächenabsatz auftreten. Jedoch wiesen die modifizierten Werkzeuge, verglichen mit den Referenzwerkzeugen, eine größere Streuung hinsichtlich der erzielten Standwege auf. Sie weist darauf hin, dass die Streubreite der erzielten Werkzeugstandwege mit zunehmendem Bohrweg ansteigt. Dies ist sowohl auf den zunehmenden Verschleißfortschritt zurückzuführen als auch auf mögliche Fertigungsungenauigkeiten bei der Einbringung der Modifikation.

Durch sie kann die resultierende Gestalt der Modifikation am Werkzeug erheblich beeinflusst werden, wodurch die große Wichtigkeit einer präzisen Einbringung des Freiflächenabsatzes deutlich wird, um die Gefahr einer zu starken lokalen Schwächung der Schneide zu minimieren. Insbesondere die Tiefe des geschliffenen Absatzes sowie die resultierende Stegbreite der Schneide stellen hierbei kritische Faktoren für die mechanische Stabilität dar, wie die zuvor durchgeführten Simulationen zeigen konnten.

7 Ganzheitliche Freiflächenmodifikation

7.1 Zielgrößen der Werkzeugmodifikation Generation 2

Der erfolgreiche Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 konnte zeigen, dass bereits die Einbringung eines Freiflächenabsatzes in einer Steigerung der erreichbaren Werkzeugstandzeiten resultiert, die sich auf die geometrische Limitierung des Freiflächenverschleißes in Verbindung mit einer simulationsbasiert ermittelten Verbesserung des KSS-Flusses zurückführen lässt.

Im Rahmen der bislang durchgeführten Untersuchungen wurde die thermische Schneidstoffbelastung als maßgeblicher Faktor für die Werkzeuglebensdauer identifiziert. Die vorliegenden Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass trotz des verbesserten KSS-Strömungsverhaltens beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 weiterhin eine Stauzone im Bereich der thermisch besonders hoch belasteten Schneidenecken auftritt. Der zugeführte KSS erreicht zwar effektiver die Schneide, scheint dort jedoch aufgrund einer fehlenden Abströmmöglichkeit nahezu stationär zu verbleiben. Um das Strömungsverhalten weiter zu verbessern und bestehende Produktivitätspotenziale effektiver auszunutzen, wurde im weiteren Verlauf der Arbeit der grundlegende Freiflächenabsatz zu einer ganzheitlichen Freiflächenmodifikation weiterentwickelt. Daraus ging die in Abbildung 7.1 dargestellte Werkzeugmodifikation Generation 2 hervor, die über zusätzliche Modifikationselemente zur Verbesserung der KSS-Versorgung verfügt.

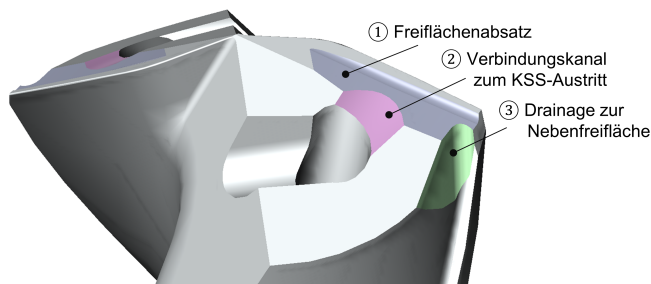


Abbildung 7.1: Elemente der Werkzeugmodifikation Gen. 2 nach [BUC20]

Diese zusätzlichen Elemente dienen insbesondere der effektiveren Kühlschmierstoff-Versorgung der Schneidenecken und umfassen, neben dem ursprünglichen Freiflächenabsatz (1), zwei weitere Kanäle. Diese bilden eine Verbindung vom Kühlkanalaustritt zur Schneide (2) sowie eine Drainage von der Haupt- zur Nebenfleäche (3). Dadurch soll eine gezielte Lenkung des KSS-Flusses entlang der Hauptschneide um die Schneidenecke erreicht und das Auftreten von Stauzonen vermieden werden. Neben

der effektiveren Kühlung der primären Hauptschneide ergibt sich daraus auch eine gesteigerte KSS-Versorgung der Nebenschneiden, durch deren zusätzliche Schmierung eine Verbesserung der erzielbaren Bohrungsqualität angestrebt wird.

7.2 Simulationsgestützte Evaluierung

Zur Untersuchung des Einflusses der zusätzlich eingebrachten Modifikationselemente auf die im Schneidstoff resultierende Vergleichsspannung wurden FEM-Simulationen an virtuell mit einer WZ-Mod. Gen. 2 versehenen Werkzeugen durchgeführt. Auf Basis der Schnittwertkombinationen aus einem Vorschub von $f = 0,18 \text{ mm}$ und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35 \text{ m/min}$ wurde das virtuell modifizierte Werkzeug mit den zuvor experimentell ermittelten Prozesskräften beaufschlagt. In Abbildung 7.2 ist dargestellt, wie sich die Spannungsverteilung an den beiden Generationen der Werkzeugmodifikation vom Standardwerkzeug unterscheidet.

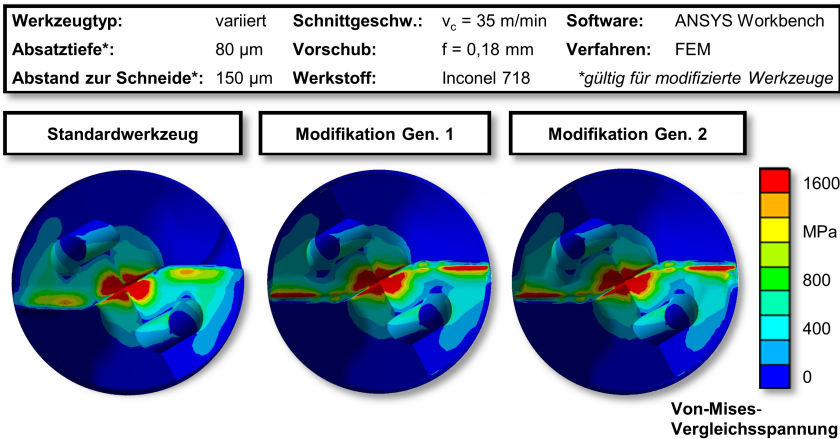


Abbildung 7.2: Einfluss der Werkzeugmodifikationen auf die Von-Mises-Vergleichsspannung im Schneidstoff während des Bohrprozesses nach [BUC18b; OEZ20]

Dabei traten keine signifikanten Erhöhungen der im Schneidstoff auftretenden Von-Mises-Vergleichsspannungen im Vergleich zur WZ-Mod. Gen. 1 auf, was auf die geometrische Lage der zusätzlichen Modifikationselemente zurückzuführen ist. Obwohl in beiden Fällen, bedingt durch die Kerbwirkung des eingebrachten Freiflächenabsatzes, eine hohe Vergleichsspannung im Übergang zwischen Absatz und Freifläche auftritt, ist eine weitere Erhöhung der Schneidstoffbelastung an dieser Stelle nicht feststellbar.

Dadurch wurde weiterhin an keinem der modifizierten Werkzeuge die zuvor festgelegte kritische Grenze der Vergleichsspannung von $\sigma_{V.M.} = 1600$ MPa überschritten [BUC18b; OEZ20]. In Ergänzung zur simulationsgestützten Ermittlung der mechanischen Schneidstoffbelastung wurden CFD-Simulationen zur Bewertung des Einflusses der zusätzlichen Modifikationselemente auf den KSS-Fluss durchgeführt. Ein Vergleich der strömungstechnischen Unterschiede zwischen den untersuchten Werkzeugvarianten ist in Abbildung 7.3 grafisch veranschaulicht [BUC20].

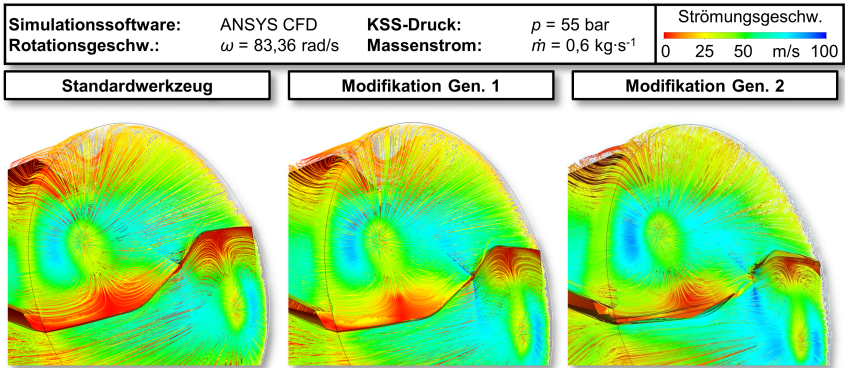


Abbildung 7.3: Simulationsbasiert ermittelte Unterschiede der KSS-Strömung in Abhängigkeit von der eingesetzten Werkzeugmodifikation nach [BUC20]

Den durchgeführten Simulationen zufolge trat durch die Einbringung der zusätzlichen Strömungskanäle im Rahmen der WZ-Mod. Gen. 2 eine weitere Annäherung der Strömungslinien insbesondere an die Schneidenecken auf. Darüber hinaus wurde eine Zunahme der ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten um ca. $\Delta v_{KSS} \approx 20$ m/s sowohl im Bereich der Schneidenecken als auch auf der Strecke vom Kühlkanalaustritt zur Schneide festgestellt. Insbesondere die Schneidenecke selbst wurde infolgedessen effektiver umspült, wobei die Dichte der Strömungslinien im Bereich der Drainage abnahm. Den Simulationsergebnissen zufolge ist durch die zusätzlichen Elemente eine verbesserte KSS-Versorgung der Schneidenecke zu erwarten, die jedoch mit einer geringen Reduktion der Strömungsdichte, bedingt durch die Vergrößerung des Strömungskanals, einhergeht. Die positiven Ergebnisse der durchgeführten CFD-Simulationen stützen die Annahme, dass sich das Ziel einer verbesserten Schneidenkühlung durch die Umsetzung der WZ-Mod. Gen. 2 an realen Bohrwerkzeugen erreichen lässt [BUC20].

7.3 Fertigung der zusätzlichen Elemente

Analog zur Fertigung der WZ-Mod. Gen. 1 wurde auch bei der Herstellung der WZ-Mod. Gen. 2 der freiflächenseitige Absatz mithilfe einer 1A1-Schleifscheibe der Körnung D46 mit einem Durchmesser von $d = 100$ mm eingebracht. Das Fertigen der weiteren Absätze zur Verbindung des Kühlkanalaustritts mit dem Freiflächenabsatz sowie der Drainage von der Haupt- zur Nebenfleifläche erfolgte, aufgrund der notwendigen Zugänglichkeit für das Schleifwerkzeug, unter Einsatz einer 14F1-Schleifscheibe mit einem Durchmesser von $d = 60$ mm, einer Eckenrundung von $R = 1,5$ mm und einer Gesamtstärke von $t = 6$ mm. Die resultierenden Modifikationselemente am realen Werkzeug sind in Abbildung 7.4 dargestellt.

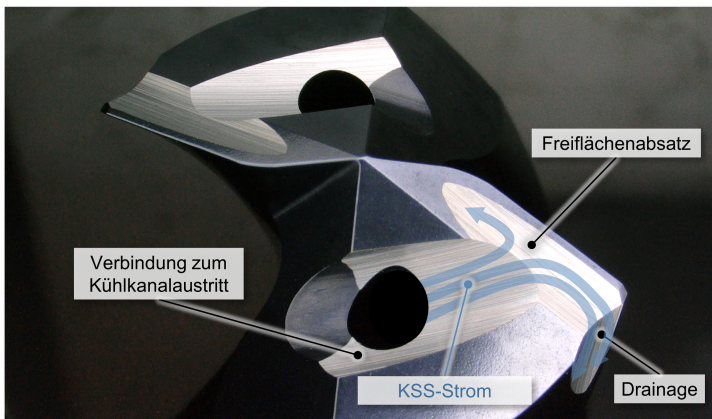


Abbildung 7.4: Elemente der Werkzeugmodifikation Generation 2 und angestrebte Beeinflussung des KSS-Stroms nach [IOV21]

Die lichtmikroskopische Kontrolle des Bearbeitungsergebnisses zeigte, dass die schleifende Einbringung der Strömungskanäle in einer lokalen Schädigung der TiAlN-Deckschicht am Rand des jeweils bearbeiteten Bereichs führen kann. Dies ist auf die ausgeprägte Kante zurückzuführen, die bei der Schleifbearbeitung entsteht und die sich nachteilig auf die Schichthftung im betroffenen Bereich auswirkt. Dadurch wird vereinzelt der darunterliegende Multilayer-Bereich freigelegt. In der industriellen Fertigung hingegen erfolgt in der Regel eine Schichtvorbehandlung der geschliffenen Werkzeuge, in deren Rahmen die entstandenen Kanten vor dem Beschichtungsvorgang verrundet und dadurch die Schichthftung verbessert werden.

7.4 Experimentelle Validierung

7.4.1 Verschleißverhalten

Die Ergebnisse der zuvor durchgeführten simulationsbasierten und experimentellen Untersuchungen deuteten auf eine besondere Bedeutung der Schneidenkühlung bei hohen Schnittgeschwindigkeiten hin. Im Rahmen der experimentellen Validierung der WZ-Mod. Gen. 2 konnte nachgewiesen werden, dass sie, im Vergleich zur WZ-Mod. Gen. 1, bei einer erhöhten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45$ m/min in einer weiteren Steigerung des erzielbaren Standwegs von bis zu $\Delta L_f = 2,9$ m bzw. $\Delta L_f = 140$ % resultierte. In Abbildung 7.5 ist der Verschleißfortschritt sowohl im Vergleich zu unmodifizierten Standardwerkzeugen als auch zur WZ-Mod. Gen. 1 anhand der Entwicklung der maximalen Verschleißmarkenbreite dargestellt.

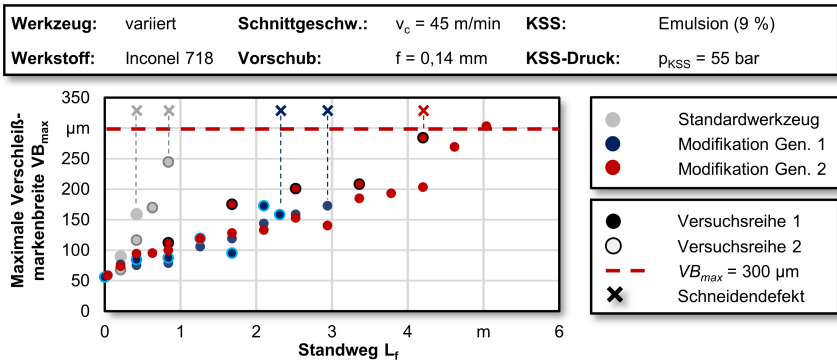


Abbildung 7.5: Verschleißentwicklung modifizierter Werkzeuge bei erhöhter Schnittgeschwindigkeit $v_c = 45$ m/min nach [BUC20]

Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen erreichten alle mit $v_c = 45$ m/min eingesetzten Standardwerkzeuge und WZ-Mod. Gen. 1 das Standwegkriterium durch Schneidendefekte in Form von Rissen oder Ausbrüchen an den Schneiden. Beim Einsatz der weiterentwickelten WZ-Mod. Gen. 2 hingegen wurde das Eintreten unterschiedlicher Standwegkriterien beobachtet. Eines der Werkzeuge wies nach einem Bohrweg von $L_f = 4,2$ m Ausbrüche der Schneidenecken auf. Ein weiteres Werkzeug erreichte einen Bohrweg von $L_f = 5,04$ m, bevor die kritische maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$ erreicht wurde. Während die erzielten Standwege stärker schwankten als beim Einsatz der Referenzwerkzeuge, lassen die Beobachtungen auf ein deutliches Potenzial zur Erhöhung der erzielbaren Werkzeuglebensdauer durch die WZ-Mod. Gen. 2 schließen [BUC20].

Insbesondere bei hohen Schnittgeschwindigkeiten kam es sowohl an unmodifizierten Standardwerkzeugen als auch der WZ-Mod. Gen. 1 zu ausgeprägten Werkstoffadhäsionen an den Nebenschneiden. Durch den Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 jedoch konnte der starken Adhäsionsneigung des Werkstoffs effektiv entgegengewirkt werden, was auf eine verbesserte Kühlschmierung der Nebenschneiden hindeutet [BUC20]. Ein Vergleich der Nebenschneiden an Werkzeugen mit unterschiedlicher Modifikation nach einem identischen Bohrweg von $L_f = 2,1$ m ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

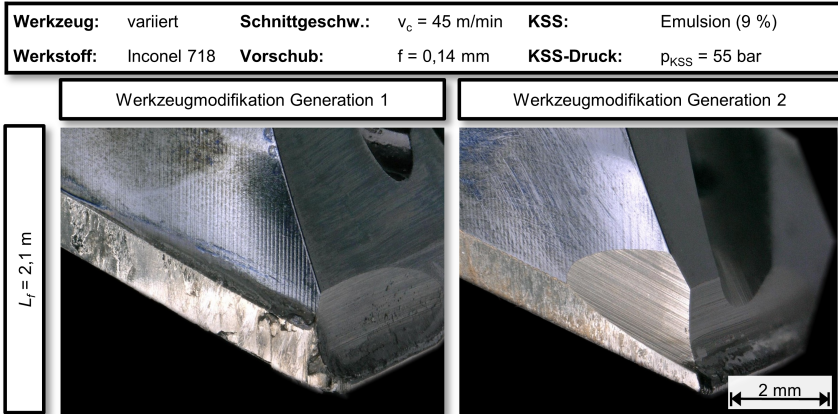


Abbildung 7.6: Werkstoffadhäsion an den Nebenschneiden eingesetzter Werkzeuge nach einem Bohrweg von $L_f = 2,1$ m nach [BUC20]

Die vorliegenden Ergebnisse deuten auf einen überproportionalen Standwegvorteil modifizierter Werkzeuge beim Einsatz erhöhter Schnittgeschwindigkeiten hin. Aus diesem Grund wurde die eingesetzte Schnittgeschwindigkeit in einer weiteren Versuchsreihe auf $v_c = 60$ m/min erhöht, was einer Steigerung des Zeitspanvolumens in Relation zur Referenz-Schnittwertkombination um $\Delta Q_W = 70$ % auf $Q_W \approx 29 \frac{cm^3}{min}$ entspricht. Bei dieser sehr stark erhöhten Schnittgeschwindigkeit wurden erneut Standardwerkzeuge mit den beiden entwickelten Werkzeugmodifikationen verglichen und ihr Verschleißverhalten analysiert. Die aus den mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min durchgeführten Versuchen resultierenden Verschleißverläufe sind nachfolgend in Abbildung 7.7 dargestellt.

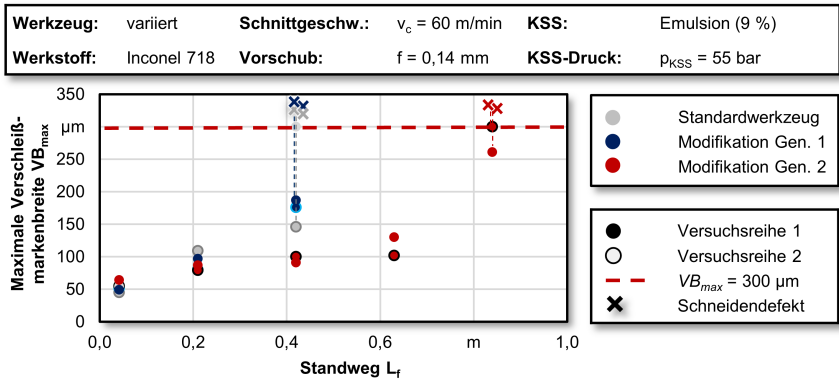


Abbildung 7.7: Verschleißentwicklung modifizierter und unmodifizierter Werkzeuge bei stark erhöhter Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/min nach [IOV21]

Im Gegensatz zu den mit $v_c = 45$ m/min durchgeführten Untersuchungen wurde beim Einsatz der erhöhten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min kein signifikanter Unterschied im Verschleißverhalten zwischen Standardwerkzeugen und der WZ-Mod. Gen. 1 beobachtet. In beiden Fällen kam es zu einer schnellen Zunahme der Verschleißmarkenbreite über einen Bohrweg von $L_f = 0,21$ m. Im weiteren Verlauf traten bereits bei $L_f = 0,42$ m Risse und Ausbrüche an den Schneiden auf, die sich auf eine erhebliche thermische Beanspruchung des Schneidstoffs zurückführen lassen und das Erreichen des Verschleißkriteriums bedeuteten [IOV21]. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte auch von *Denkena* bei Untersuchungen zum Einsatz einer Freiflächenmodifikation beim Hartfräsen beobachtet werden, die jedoch ohne Einsatz von KSS durchgeführt wurden. Dabei reduzierte sich der Standzeitvorteil freiflächenmodifizierter Werkzeuge mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit aufgrund der steigenden thermischen Belastung kontinuierlich [DEN13]. Die eingesetzten Werkzeuge mit einer WZ-Mod. Gen. 2 erreichten nach einem Bohrweg von $L_f = 0,21$ m eine stationäre Verschleißphase, die bis zu einem Bohrweg von $L_f = 0,63$ m in einer annähernd konstanten maximalen Verschleißmarkenbreite resultierte. Erst nach einem Bohrweg von $L_f = 0,84$ m wurden bei beiden eingesetzten Werkzeugen Ausbrüche der Schneidenecken festgestellt. Daraus folgt ein um $\Delta L_f = 0,42$ m bzw. $\Delta L_f = 100$ % verlängerter Standweg beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 [IOV21].

Die Ergebnisse der Standweguntersuchungen deuten insgesamt darauf hin, dass die WZ-Mod. Gen. 2 ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Werkzeuglebensdauer aufweist. Dies lässt sich durch einen verbesserten KSS-Fluss insbesondere im Bereich der Schneidenecken erklären, der durch die eingebrachten Modifikationselemente hervorgerufen wird und in einer verbesserten Kühlung der Schneidenecken resultiert.

Die beobachteten Vorteile waren bei einer moderat erhöhten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45$ m/min am größten und nahmen bei einer weiteren Steigerung der Schnittgeschwindigkeit wieder ab. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die erzielten Verbesserungen der Schneidenkühlung sich besonders positiv bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten auswirken, jedoch nicht beliebig skalierbar sind.

Dieser Zusammenhang könnte dadurch begründet sein, dass die zunehmende Einbringung thermischer Energie durch gesteigerte Schnittgeschwindigkeiten ab einer kritischen Grenze die Verbesserung der Wärmeabfuhr beim Einsatz der Werkzeugmodifikation übersteigt. Dadurch kann die zusätzliche Belastung nicht mehr kompensiert werden, woraus eine thermische Überlastung des Schneidstoffs folgt. Die Versuchsergebnisse deuten daher darauf hin, dass das Potenzial einer Werkzeugmodifikation zur Erhöhung der Prozessproduktivität vor allem in einem definierten Schnittgeschwindigkeitsbereich zum Tragen kommt.

7.4.2 Temperaturen

Die durchgeführten Untersuchungen zum Verschleißverhalten konnten einen signifikanten Standwegvorteil modifizierter Werkzeuge nachweisen. Dass dieser insbesondere bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten zum Tragen kam, deutet darauf hin, dass der Einsatz einer Werkzeugmodifikation in einer reduzierten thermischen Schneidstoffbelastung resultiert. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Werkzeugmodifikationen auf die Freiflächentemperaturen der eingesetzten Werkzeuge wurden pyrometrische Analysen mithilfe einer im Bohrweg platzierten Lichtleiterfaser durchgeführt. Da im Rahmen der zuvor durchgeführten Referenzuntersuchungen die höchsten Temperaturen stets im Bereich der Schneidenecke detektiert wurden, wurde das Messverfahren in allen nachfolgend dargestellten Versuchen auf den äußeren Schneidenradius von $r_a = 6,35$ mm angewendet. Die für unterschiedliche Werkzeugvarianten und Schnittwerte ermittelten Temperaturen der Freiflächen sind einander in Abbildung 7.8 vergleichend gegenübergestellt.

Die Freiflächentemperaturen weisen eine ähnliche Tendenz wie die zuvor durchgeführten Standwegversuche auf. Durch den Einsatz einer Werkzeugmodifikation, unabhängig von der untersuchten Generation, konnten die Freiflächentemperaturen im Bereich der Schneidenecken über alle eingesetzten Schnittwertkombinationen hinweg effektiv gesenkt werden. Dabei zeigten sich von den eingesetzten Schnittwerten abhängige Unterschiede der erfassten Temperaturen zwischen den beiden untersuchten Werkzeugmodifikationen. So wurde beim Einsatz des Standardwerkzeugs mit $f = 0,14$ mm und $v_c = 35$ m/min eine mittlere Temperatur von $T = 518$ °C ermittelt, die durch den Einsatz einer WZ-Mod. Gen. 1 auf $T = 489$ °C reduziert wurde. Die durchgeführ-

ten Versuche mit der WZ-Mod. Gen. 2 wiesen eine weitere Reduktion um lediglich $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ auf, die in Anbetracht der Standardabweichung von $\sigma = 27^\circ\text{C}$ vernachlässigbar ist. Deutlichere Unterschiede wurden hingegen bei $v_c = 45\text{ m/min}$ festgestellt. Hier betrug die Temperatur am Standardwerkzeug $T = 651^\circ\text{C}$, während der Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 in einer Verringerung der freiflächenseitigen Temperatur auf $T = 593^\circ\text{C}$ resultierte. Temperaturmessungen an der WZ-Mod. Gen. 2 zeigten eine weitere signifikante Verringerung auf $T = 544^\circ\text{C}$ [IOV21].

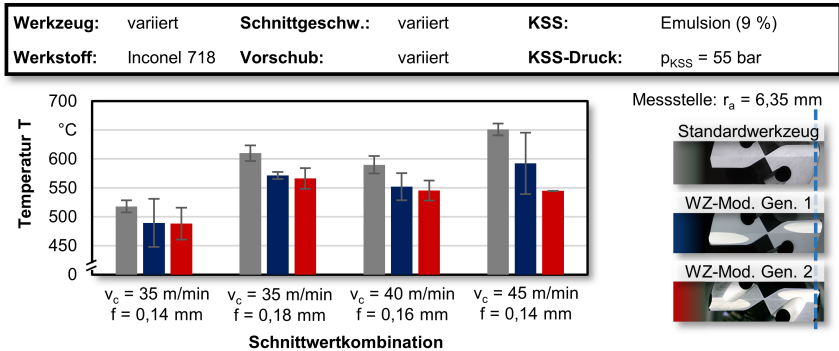


Abbildung 7.8: Durch Pyrometrie ermittelte Freiflächentemperaturen modifizierter und unmodifizierter Werkzeuge im Vergleich nach [IOV21]

Die Ergebnisse der durchgeführten pyrometrischen Untersuchungen lassen darauf schließen, dass analog zu den Ergebnissen der Standweguntersuchungen auch hinsichtlich der Werkzeugtemperaturen von einem erheblichen Vorteil der Werkzeugmodifikation, insbesondere bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten, auszugehen ist. Dies lässt sich auf die verbesserten KSS-Strömungseigenschaften der modifizierten Werkzeuge zurückführen, die mit einer effektiveren Kühlung der Schneiden einhergehen. Bedingt durch den beim Einsatz hoher Schnittgeschwindigkeiten ebenfalls größeren Temperaturgradienten zwischen Schneidstoff und KSS ist es naheliegend, dass eine Verbesserung der KSS-Versorgung in einem proportional zunehmenden Vorteil der modifizierten Werkzeuge bei hoher thermischer Belastung resultiert.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die mit der Rotationsgeschwindigkeit zunehmenden Zentrifugalkräfte den KSS zusätzlich zum Zuführdruck in Richtung der Schneidenecken transportieren. Insbesondere die an der WZ-Mod. Gen. 2 vorhandene Drainage scheint zu bewirken, dass sich der KSS dort nicht weiter anstaut, sondern die zusätzliche Beschleunigung zu einer verbesserten KSS-Versorgung und damit einer effektiveren Kühlwirkung an der Werkzeugschneide führt.

7.4.3 Bohrungsintegrität

Die erzielbare Bohrungsintegrität stellt einen zentralen Aspekt zur Aufrechterhaltung der Prozesssicherheit dar, der durch die auftretenden Wirkstellentemperaturen und Prozesskräfte maßgeblich beeinflusst wird. Mithilfe einer Analyse der gefertigten Bohrungen hinsichtlich der Bohrungsgüten und ihrer Randzonenbeeinflussung wurden die Auswirkungen einer Werkzeugmodifikation auf das erzielbare Bearbeitungsergebnis untersucht. Die zu diesem Zweck durchgeführten Analysen der Durchmesser- und Rundheitsabweichungen sowie der Oberflächenrauheiten erfolgte durch taktile Messung. Diese Parameter sind in Abbildung 7.9 für die unter Einsatz von $f = 0,14$ mm und $v_c = 45$ m/min gefertigten Bohrungen beispielhaft dargestellt.

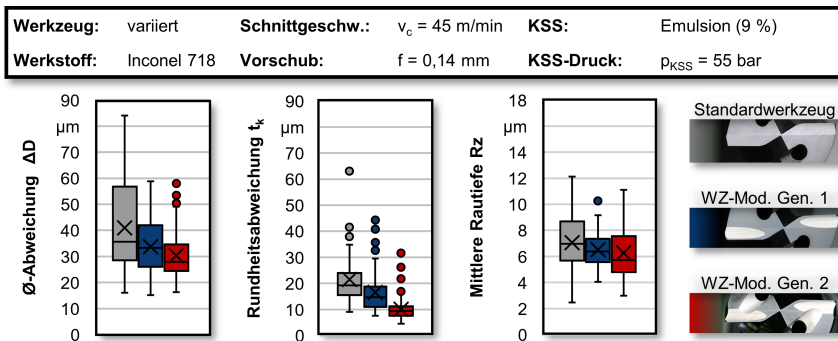


Abbildung 7.9: Bohrungsqualität der erzeugten Bohrungen in Abhängigkeit von der eingesetzten Werkzeugmodifikation nach [IOV21]

Wie den Messergebnissen zu entnehmen ist, wurden beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 und 2 die erzielten Bohrungsgüten über den gesamten Bohrweg hinweg deutlich verbessert. Sowohl die Durchmesser- als auch die Rundheitsabweichungen verringerten sich nicht nur signifikant hinsichtlich ihrer Mittelwerte und Mediane, sondern auch in Bezug auf die auftretende Streuung. Da die modifizierten Werkzeuge diese bessere Bohrungsgüte über den erzielbaren Standweg der Standardwerkzeuge hinaus beibehielten, ist von einer kontinuierlichen Stabilisierung des Prozesses auszugehen. Insbesondere die WZ-Mod. Gen. 2 geht mit einer deutlichen Verringerung der Führungsfasenbreite einher, woraus zunächst auf eine schlechtere radiale Abstützung des Werkzeugs an der Bohrungswand geschlossen werden kann. Dies würde in einer Beeinträchtigung der erzielbaren Rundheiten resultieren. Allerdings zeigen die gegenteiligen Untersuchungsergebnisse, dass die schmalen Führungsfasen vor allem in einer verringerten Reibung zwischen dem Werkzeug und der Bohrungsoberfläche zu resultieren scheinen, woraus sich die beobachtete Verbesserung der Bohrungsgüten ergibt. Darüber hinaus

wurde während der Standwegversuche eine starke Reduktion der Werkstoffadhäsionen an den Nebenschneiden festgestellt, die sich auf eine verbesserte Kühlschmierung der Nebenschneiden zurückführen lässt und in einer geringeren Aufschmierung von Werkstoffpartikeln auf die Bohrungswand resultiert [IOV21].

Insgesamt konnte durch den Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 die mittlere Durchmesserabweichung von $\Delta D = 41 \mu\text{m}$ auf $\Delta D = 30 \mu\text{m}$ reduziert werden, während die Rundheitsabweichung im arithmetischen Mittel von $t_k = 22 \mu\text{m}$ auf $t_k = 10 \mu\text{m}$ abnahm, was einer Verbesserung von $\Delta t_k = 52 \%$ entspricht. Auch die mittlere Rautiefe wurde verringert, sodass sich eine durchschnittliche Verbesserung von $Rz = 7,1 \mu\text{m}$ auf $Rz = 6,2 \mu\text{m}$ einstellt. Wie in den zuvor durchgeführten Untersuchungen auch, lassen sich die beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 festgestellten Prozessvorteile zwischen denen des unmodifizierten Standardwerkzeugs und den Ergebnissen der WZ-Mod. Gen. 2 einordnen. Daraus lässt sich schließen, dass der Freiflächenabsatz selbst einen maßgeblichen Anteil an den durch eine WZ-Mod. Gen. 2 erzielbaren Vorteilen hat [IOV21].

Darüber hinaus wurde eine Analyse des Randzonengefüges hinsichtlich des Auftretens von Aufhärtungseffekten und weißen Schichten durchgeführt. Dabei wurde eine signifikante Reduktion der Ausbildung weißer Schichten durch den Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 festgestellt, wie Abbildung 7.10 zu entnehmen ist.

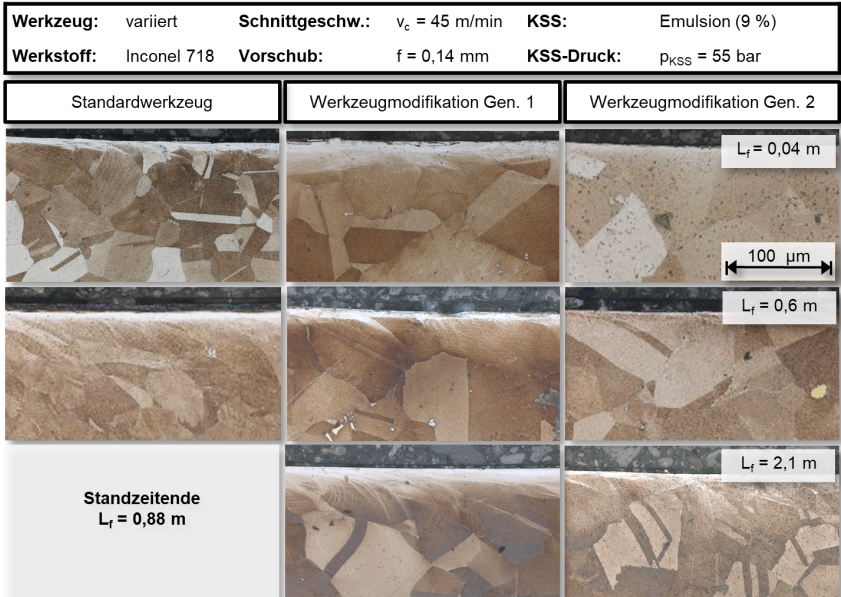


Abbildung 7.10: Ausbildung weißer Schichten im Randzonengefüge in Abhängigkeit vom Bohrweg und dem eingesetzten Werkzeug

Die nach unterschiedlichen Bohrwegen angefertigten Querschliffe der Bohrungsrandzonen zeigen, dass der Einsatz einer WZ-Mod. Gen. 1 zu Beginn des Werkzeugstandwegs in einer Verringerung weißer Schichten im Randzonengefüge resultiert. Allerdings traten diese im weiteren Verlauf bereits nach einem Bohrweg von $L_f = 0,6$ m auf, sodass sich dieser Vorteil über die weitere Werkzeuglebensdauer relativiert. Dagegen blieben weiße Schichten beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 bis zu einem Bohrweg von $L_f = 2,1$ m aus und wiesen im weiteren Verlauf des Bohrwegs nur geringe Ausprägungen auf. Im Gegensatz zum Referenzwerkzeug, bei dem die weißen Schichten konstante Dicken von $t = 15...20$ μm aufwiesen, betrugen diese beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 maximal $t = 12$ μm .

Aus der Analyse der Bohrungsquerschliffe konnte zudem auf eine starke Beeinflussung des Korngefüges unterhalb der weißen Schichten geschlossen werden. Dabei war der Grad der Beeinflussung sowohl vom Verschleißzustand als auch der eingesetzten Werkzeugvariante abhängig. Beim Einsatz des unmodifizierten Standardwerkzeugs waren bereits zu einem frühen Zeitpunkt Deformationen der im Randbereich liegenden Kornvolumen und -grenzen erkennbar, die sich auf eine hohe mechanische Beanspruchung des Gefüges in Schnitttrichtung zurückführen lassen. Vereinzelt traten auch Zwillingsbildungen auf, die jedoch auch im Gefüge nicht zerspanter Vergleichsproben festgestellt wurden und sich deshalb nicht eindeutig dem Bohrprozess zuordnen lassen. Beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 wurden Korndeformationen ab einem Bohrweg von $L_f = 0,6$ m beobachtet, wobei sich Ausläufer der weißen Schichten teilweise bis in den deformierten Bereich erstreckten. Querschliffe von Bohrungen, die mit der WZ-Mod. Gen. 2 gefertigt worden waren, wiesen dagegen über alle untersuchten Bohrungen eine deutliche Reduktion dieser Einflüsse im Korngefüge auf.

Die im Rahmen der Gefügeanalyse zunächst qualitativ gewonnenen Erkenntnisse konnten durch Untersuchungen der Randzonenaufhärtungen bestätigt werden. In Abbildung 7.11 sind die Ergebnisse der Mikrohärteprüfungen an drei verschiedenen Proben exemplarisch nach einem Bohrweg von $L_f = 0,042$ m dargestellt. Unter Einbeziehung der jeweiligen Probengrundhärte unterschieden sich sowohl der Grad der Aufhärtung als auch ihre Tiefe in den Werkstoff geringfügig. Sowohl beim eingesetzten Standardwerkzeug als auch der WZ-Mod. Gen. 1 trat eine Erhöhung der Randzonenhärte von anfangs $\Delta\text{RZH} = 103$ HV 0,025 auf, die sich insgesamt bis ca. $t \approx 250$ μm in die Probe hinein erstreckte. Die mit der WZ-Mod. Gen. 2 gefertigte Bohrung wies eine Aufhärtung von $\Delta\text{RZH} = 70$ HV 0,025 mit einer Tiefe von $t \approx 200$ μm auf.

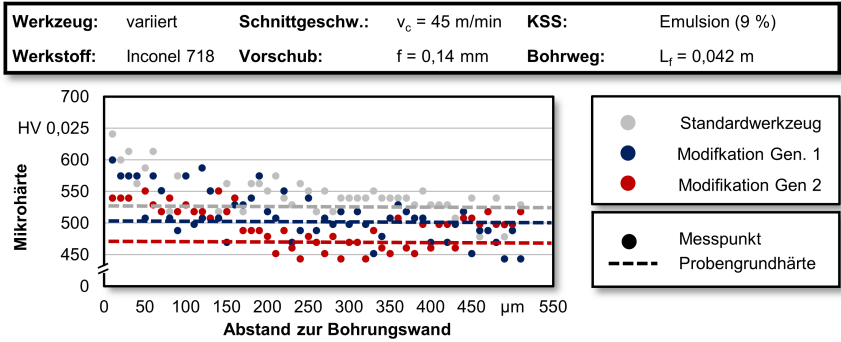


Abbildung 7.11: Mikrohärteverlauf der Bohrungsrandzone beim Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge nach einem Bohrweg von $L_f = 0,042 \text{ m}$

In Abbildung 7.12 sind die über den gesamten Werkzeugstandweg durchschnittlich ermittelten Randzonenaufhärtungen beim Einsatz der jeweiligen Werkzeuge in Abhängigkeit von der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die WZ-Mod. Gen. 1 über den gesamten erreichten Standweg eine deutlich erhöhte Randzonenaufhärtung aufwies. Diese betrug durchschnittlich $\Delta RZH = 175 \text{ HV } 0,025$, während sie beim Einsatz eines Standardwerkzeugs $\Delta RZH = 120 \text{ HV } 0,025$ im Vergleich zur Probengrundhärte betrug. Dies lässt sich vor allem auf den geringeren Verschleißfortschritt der modifizierten Werkzeuge zurückführen, die zum Einsatz stärker verschlissener Werkzeuge über längere Teile des Bohrwegs führten.

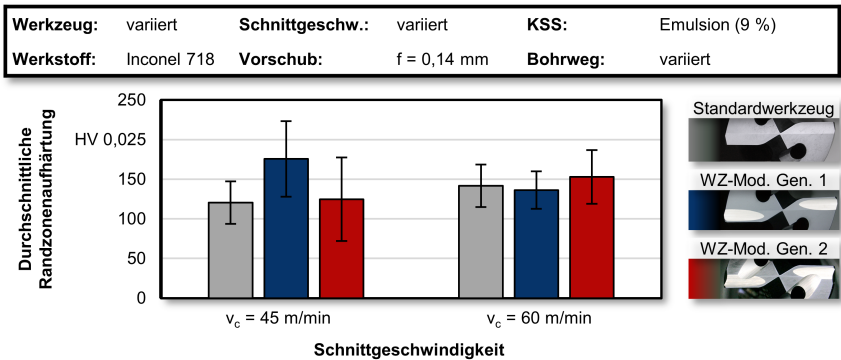


Abbildung 7.12: Durchschnittliche Randzonenaufhärtung in Abhängigkeit von der eingesetzten Schnittgeschwindigkeit und Werkzeugmodifikation

Dieser Effekt wurde, beim Einsatz einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45$ m/min, durch den Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 deutlich reduziert, sodass über den gesamten Werkzeugstandweg eine nur unwesentlich höhere durchschnittliche Randzonenaufhärtung von $\Delta RZH = 124$ HV 0,025 festgestellt wurde, obwohl die so modifizierten Werkzeuge erheblich länger eingesetzt worden waren. Dadurch konnte eine grundsätzliche Verringerung der Randzonenbeeinflussung beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 nachgewiesen werden. Beim Einsatz von $v_c = 60$ m/min hingegen stieg der Verschleißfortschritt der über einen, im Vergleich zu den anderen Werkzeugvarianten, doppelt so langen Bohrweg eingesetzten Werkzeuge mit der WZ-Mod. Gen. 2 erheblich stärker an, sodass sich eine höhere mittlere Randzonenaufhärtung ergab.

Die beobachteten Reduktionen der Randzonenbeeinflussung bei vergleichbarem Bohrweg lassen sich unter anderem auf die Verringerung der Prozesstemperaturen zurückführen, die im Rahmen der pyrometrischen Untersuchungen festgestellt wurden. Zudem ist es wahrscheinlich, dass sich auch die bessere KSS-Versorgung der Nebenschneiden, in Verbindung mit einer Verringerung der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Bohrungswand durch die bei der WZ-Mod. Gen. 2 schmalere Führungsfase, positiv auswirkt. Da sich eine starke Randzonenbeeinflussung vor allem durch das auf den Werkstoff wirkende Belastungskollektiv ergibt, ist davon auszugehen, dass die Kombination dieser Faktoren in einer Verringerung der für die Ausbildung weißer Schichten verantwortlichen Rekristallisationsvorgänge resultiert. Diese sind im Allgemeinen die Ursache für das helle Erscheinungsbild der Schichten, das auf die extreme Kornfeinung in diesen Bereichen zurückgeht. Da ihre hohe Härte in Verbindung mit der damit einhergehenden Versprödung die Integrität der gefertigten Bohroberflächen beeinträchtigt, stellt ihr Ausbleiben über weite Teile des Werkzeugstandwegs eine Verbesserung der Prozesssicherheit dar.

7.4.4 Strömungssituation

Die in den bisherigen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse deuteten konsistent auf eine deutliche Verbesserung der KSS-Versorgung beim Einsatz einer Werkzeugmodifikation hin. Um diese These zu überprüfen, wurden experimentelle Analysen der KSS-Strömung durchgeführt, anhand derer die Strömungsverteilung entlang der Haupt- und Nebenschneiden untersucht und die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Simulationen validiert wurden.

Die experimentelle Untersuchung der Auswirkungen einer Werkzeugmodifikation auf das KSS-Strömungsverhalten wurde anhand von Analogieversuchen durchgeführt. Dabei wurden statische Werkzeuge eingesetzt, mit denen zuvor eine Bohrung in eine rotierende Acrylglasprobe mit polierter Oberfläche gesetzt wurde. Der gewählte

Versuchsaufbau ermöglichte die Untersuchung der Strömungssituation an den modifizierten Werkzeugen mithilfe einer Keyence VHX 9000-Hochgeschwindigkeitskamera, schloss jedoch zusätzliche Einflüsse durch die Rotation des Werkzeugs sowie den durch die Vorschubbewegung verringerten effektiven Freiwinkel aus. Um die Strömung im Bereich der Schneidenecke sichtbar zu machen, wurde reines Wasser mit weiß reflektierenden Kunststoffpartikeln versetzt und dem Versuch zugeführt. Der durchschnittliche Partikeldurchmesser betrug $d_{Partikel} = 55 \mu\text{m}$, während die Partikel in einer Dichte von $\beta = 2 \text{ g/l}$ im Wasser verteilt waren. Auf diese Weise wurde die nachträgliche Analyse der Strömungssituation durch Nachverfolgung der Partikelpositionen von Bild zu Bild ermöglicht. In Abbildung 7.13 sind die beiden eingesetzten Versuchsanordnungen zur axialen und radialen Untersuchung der Strömungssituation dargestellt [IOV21].

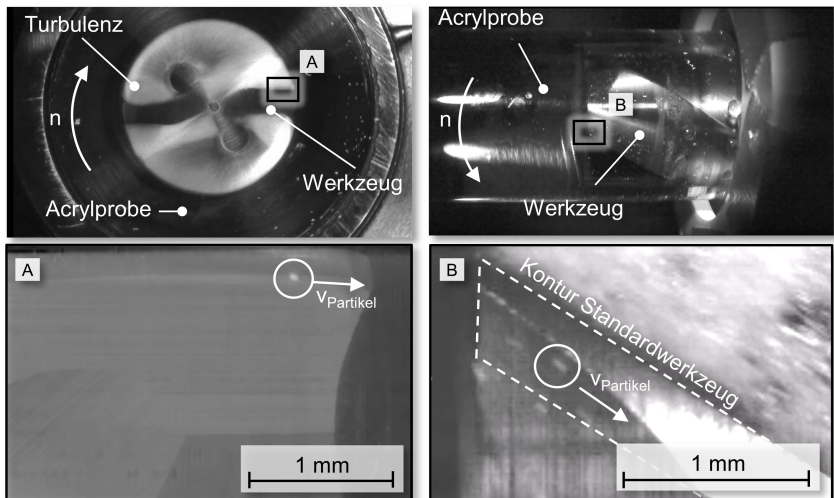


Abbildung 7.13: Versuchsaufbau zur Untersuchung des KSS-Flusses an der Haupt- (links) und der Nebenfleäche (rechts) nach [IOV21]

Die aufgezeichneten Hochgeschwindigkeitsvideos wurden anschließend mit der Software VW-9000 Motion Analyzer ausgewertet. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine Bildaufnahmerate von $f = 57.000 \text{ s}^{-1}$ bei einer Belichtungszeit von $t = 0,004 \text{ ms}$ verwendet, wodurch sich das von der Kamera ausgegebene Bild auf eine Größe von $A = 160 \cdot 112 \text{ Pixel}$ bei einer maximalen Aufnahmedauer von $t = 5,813 \text{ s}$ reduzierte. Während der Untersuchungen wurden, in Abhängigkeit von der eingesetzten Versuchsanordnung, bis zu 50-fache Vergrößerungen eingesetzt. Daraus resultierte ein Blickfeld von maximal $6,0 \cdot 1,8 \text{ mm}^2$, das ausreichend war, um die

Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit der im KSS verteilten Partikel zu erfassen und auf den auftretenden Kühlschmierstofffluss zu schließen.

Zur Analyse des Partikelflusses an den Hauptschneiden wurde ein eigener Versuchsstand entwickelt, in dem die Acrylglasprobe in ein stationäres Stehlager eingespannt wurde. Der Antrieb erfolgte durch einen drehzahlgeregelten Gleichstrommotor mit einer Antriebsleistung von $P_A = 50 \text{ W}$, dessen Drehbewegung durch einen Flachriemen auf die Probe übertragen wurde. Die Versuche zur Analyse des Partikelflusses an den Nebenschneiden erfolgten unter Einsatz der CNC-gesteuerten Drehmaschine Monforts RNC 602. Das Versuchswerkzeug wurde in eine stationäre Werkzeugaufnahme eingesetzt, während die in der Maschinenspindel gespannte Acrylglasprobe in Rotation versetzt wurde. In beiden Fällen wurde dem stationären Werkzeug mithilfe einer externen Hochdruckpumpe das mit Partikeln versetzte Wasser bei einem Druck von $p_{KSS} = 55 \text{ bar}$ zugeführt. Dadurch konnten die Bewegungstrajektorien der im Wasser verteilten Partikel mithilfe der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und anschließend ausgewertet werden.

Während der mit unterschiedlichen Werkzeugen durchgeführten Versuche wurden deutliche Unterschiede in der Partikel-Strömungsgeschwindigkeit und ihrer räumlichen Verteilung festgestellt. Diese Unterschiede sind ausschließlich auf die geometrischen Unterschiede an den eingesetzten Werkzeugen zurückzuführen, da im Rahmen der durchgeführten Analogieversuche eine Variation der Drehzahl nur durch Änderung der Probendrehzahl möglich war. Dadurch stellte sich lediglich ein Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit auf die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Probe, nicht jedoch auf die Rotation des Fluids beim Austritt aus den Kühlkanälen des Werkzeugs und die damit verbundene Masseträgheit und Zentrifugalkraft ein. Zudem konnte nicht untersucht werden, wie sich die durch eine Vorschubbewegung hervorgerufene Verringerung des effektiven Freiwinkels auf die Strömung zwischen Werkzeugstirnseite und Bohrungsgrund auswirkt. Die nachfolgend dargestellte Auswertung bezieht sich daher durchgängig auf eine Probendrehzahl von $n = 1023 \text{ min}^{-1}$, die einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45 \text{ m/min}$ entspricht. In Abbildung 7.14 sind die Auswirkungen der eingesetzten Werkzeugmodifikationen auf das Strömungsverhalten der verfolgten Partikel im Bereich der primären Hauptschneide veranschaulicht.

Die Analyse der Partikeltrajektorien zeigte beim Standardwerkzeug das Ausbleiben einer Strömung direkt hinter der Schneide. Dies lässt sich zunächst auf den zur Schneide hin abnehmenden Strömungsquerschnitt zurückführen, der durch den nominellen Freiwinkel von $\alpha = 8^\circ$ bedingt ist und in einem Abstand von $s = 180 \mu\text{m}$ lediglich eine Höhe von $h = 25 \mu\text{m}$ aufweist. Aus dem mittleren Durchmesser der eingesetzten Partikel von $d_{\text{partikel}} = 55 \mu\text{m}$ ergibt sich eine maximale theoretische Annäherung an die Schneide von $s \approx 400 \mu\text{m}$. Allerdings wurde bei keinem analysierten Partikel eine

Annäherung von $s \leq 700 \mu\text{m}$ festgestellt, wodurch nachgewiesen werden konnte, dass die Begrenzung der beobachteten Strömung nicht durch das geometrische Verhältnis zwischen den eingesetzten Partikeln und dem vorhandenen Querschnitt bedingt ist.

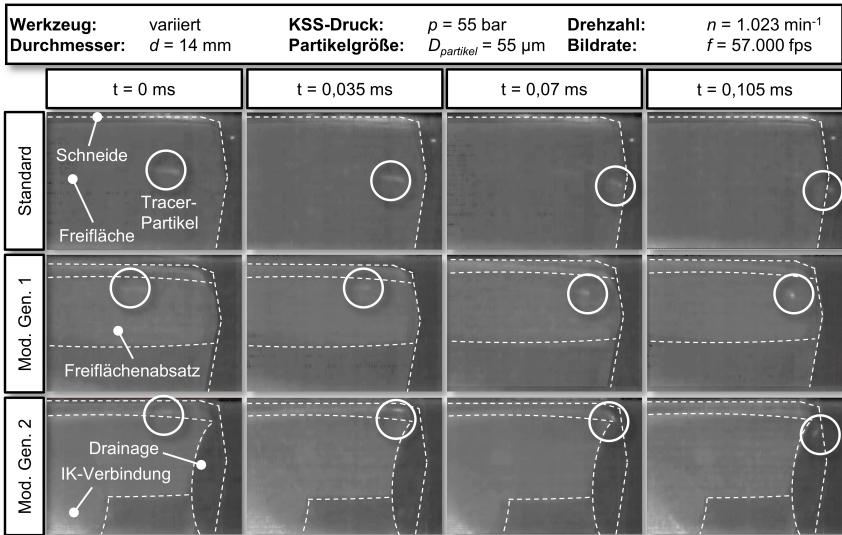


Abbildung 7.14: Nachverfolgung der Partikeltrajektorien an den Hauptfreiflächen von Werkzeugen mit unterschiedlicher Modifikation

Stattdessen lässt sich die ausbleibende Strömung durch die Entstehung von Stauzonen im Bereich hinter den Werkzeugschneiden erklären, die aus dem geringer werdenden Strömungsquerschnitt resultieren und die durch ihren erhöhten Strömungswiderstand eine Verlangsamung des KSS-Flusses in Richtung der Schneide bis hin zum Stillstand bewirken. Die Einbringung einer Werkzeugmodifikation führte in allen untersuchten Fällen zu einer deutlichen Annäherung der Partikeltrajektorien an die Rückseite der Werkzeugschneide, die sich durch die Schaffung des Strömungskanals hinter der Schneide erklären lässt. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Effekt bei Ausführung einer Vorschubbewegung aufgrund der Abhängigkeit des effektiven Freiwinkels vom eingesetzten Vorschub noch weiter verstärkt, da sich dadurch der real vorhandene Strömungskanal am unmodifizierten Werkzeug weiter verringert. Durch diesen Umstand kommt die Vergrößerung des Strömungskanals durch einen Freiflächenabsatz im Bohrprozess noch stärker zum Tragen.

Anhand der Strömungsanalysen konnte nachgewiesen werden, dass sich die durchschnittliche Partikelgeschwindigkeit beim Einsatz einer WZ-Mod. Gen. 1 von ursprüng-

lich $v_{Partikel} = 23,98$ m/s am Standardwerkzeug auf $v_{Partikel} = 20,72$ m/s reduziert. Dies lässt sich auf den vergrößerten Strömungsquerschnitt zurückführen, der bei laminarer Strömung zu einer geringeren Dichte der Flusslinien und damit zu einer abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit führt. Der Einsatz einer WZ-Mod. Gen. 2 resultierte dagegen, trotz des ebenfalls vergrößerten Strömungskanals, in einer signifikanten Steigerung der Partikelgeschwindigkeiten um $\Delta v_{Partikel} = 39\%$ auf $v_{Partikel} = 33,44$ m/s. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verlangsamung der Strömung aufgrund eines größeren Strömungskanalquerschnitts durch die Einbringung der Drainage überkompensiert wird [IOV21].

Signifikante Unterschiede wurden auch bei der Untersuchung der KSS-Strömung im Bereich der Nebenschnitten festgestellt. So zeigte sich, neben einer geringen Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere eine signifikante Annäherung der Partikel an die Nebenfleäche durch Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2, wie aus Abbildung 7.15 ersichtlich wird. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der pyrometrischen Untersuchungen, bei denen eine signifikante Reduktion der Werkzeugtemperaturen an den Schneidenecken festgestellt wurde.

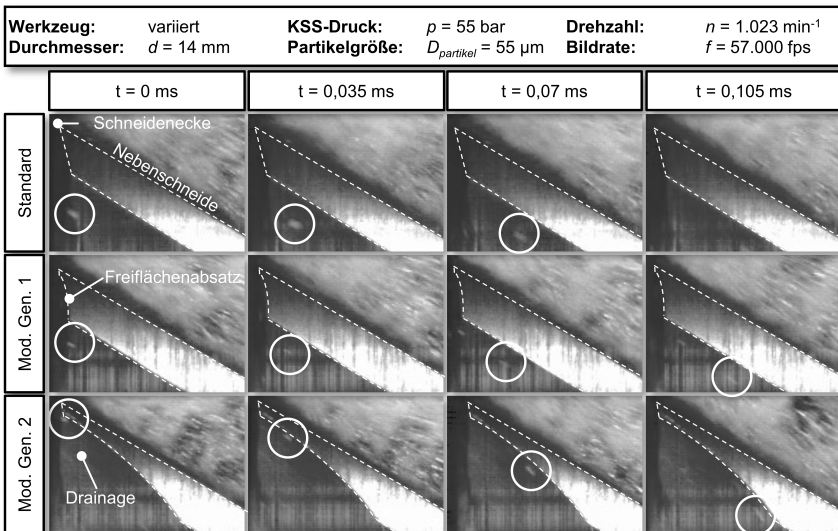


Abbildung 7.15: Strömungsgeschwindigkeiten an den Nebenfleächen von Werkzeugen mit unterschiedlicher Werkzeugmodifikation

Wie die Darstellung der Partikelpositionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zeigt, nimmt die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Nebenschnide, verglichen mit dem Standardwerkzeug, beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 1 geringfügig zu. So wurde eine

durchschnittliche Partikelbewegungsgeschwindigkeit von $v_{Partikel} = 21,61$ m/s gegenüber $v_{Partikel} = 19,18$ m/s festgestellt, die zudem mit einer Annäherung der sich von der primären Freifläche um die Schneidenecke herum bewegenden Partikel in Richtung der Nebenschneide einherging. Beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 kam es zu einer signifikanten Geschwindigkeitssteigerung auf durchschnittlich $v_{Partikel} = 25,03$ m/s, was einer Erhöhung um $\Delta v_{Partikel} = 30,5$ % entspricht.

Allerdings wiesen die untersuchten Partikel hohe Geschwindigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von ihrer Position auf. Während sie sich nach dem Passieren der Schneidenecke zunächst für eine Dauer von ca. $t \approx 0,4$ ms mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit wie bei der WZ-Mod. Gen. 1 direkt entlang der Nebenschneidenrückseite bewegten, nahm ihre Geschwindigkeit anschließend im weiteren Verlauf ihrer Bewegungsbahn stark zu. Dies lässt sich auf die Verkleinerung des Strömungskanal zurückführen, die mit dem Auslauf der Drainage an der Führungsfase des Werkzeugs einhergeht und in einer höheren Strömungsgeschwindigkeit resultiert. Die durchschnittlichen Bewegungsgeschwindigkeiten der verfolgten Partikel entlang der Haupt- und Nebenschneiden unterschiedlich modifizierter Werkzeuge sind in Abbildung 7.16 zusammengefasst.

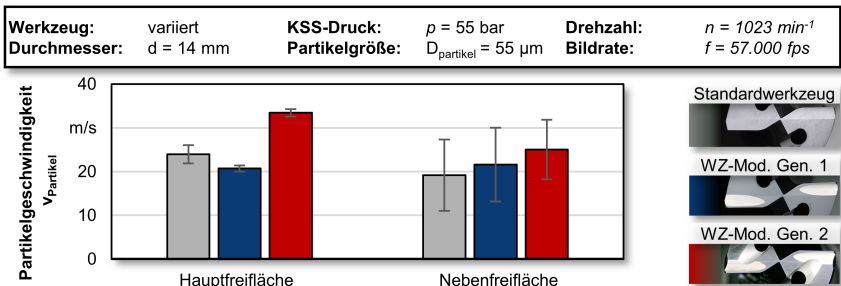


Abbildung 7.16: Strömungsgeschwindigkeiten an Werkzeugen mit unterschiedlichen Freiflächenmodifikationen nach [IOV21]

Die Ergebnisse der Strömungsuntersuchungen ließen sich auch durch die Analyse der KSS-Rückstände an den im Rahmen der zuvor durchgeführten Standweguntersuchungen eingesetzten Werkzeuge nachvollziehen. So wiesen sowohl die eingesetzten Standardwerkzeuge als auch die WZ-Mod. Gen. 1 großflächige KSS-Verkokungen an den Freiflächen auf. In Abbildung 7.17 ist veranschaulicht, wie sich die Art und Menge der KSS-Rückstände an der Schneidenecke zwischen den beiden eingesetzten Modifikationsvarianten unterscheiden.

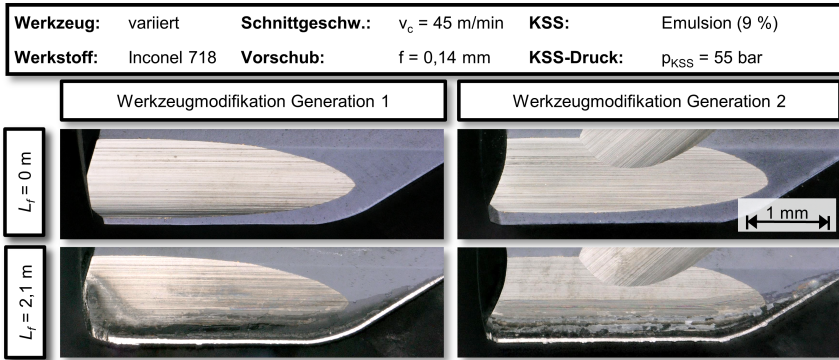


Abbildung 7.17: Unterschiedlich stark ausgeprägte KSS-Verkokungen an den Werkzeugmodifikationen der Generationen 1 und 2 nach [BUC20]

Die sichtbaren Verkokungen an der WZ-Mod. Gen. 1 traten primär im Bereich der Schneidenecken auf, an denen besonders hohe Prozesstemperaturen und eine potenzielle Stauzone des KSS vorliegen. Während an den unmodifizierten Standardwerkzeugen großflächige Verkrustungen auf der gesamten primären Freifläche vorzufinden waren, breiteten sie sich bei der WZ-Mod. Gen. 1 von den Schneidenecken ausgehend im Freiflächenabsatz aus. Nachgelagerte EDX-Untersuchungen konnten hohe Konzentrationen an Kohlenstoff im Bereich der dunklen Verfärbungen nachweisen, was darauf hindeutet, dass es sich bei den identifizierten Ablagerungen tatsächlich um Verkokungen des KSS handelt, die durch den Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 wirksam unterbunden werden konnten.

Die Ergebnisse der experimentellen Strömungsuntersuchungen dokumentieren den positiven Einfluss einer Werkzeugmodifikation auf den KSS-Fluss. So konnte aufgezeigt werden, dass die Einbringung eines großflächigen Absatzes an der Werkzeugfreifläche in einer signifikanten Annäherung der Strömung an die Wirkstelle resultiert, wodurch die Prozesskühlung verbessert wird. Dies untermauert die Ergebnisse der zuvor ermittelten Reduktion der Prozesstemperaturen beim Einsatz modifizierter Werkzeuge. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass insbesondere eine Drainage an der Schneidenecke zu einer erheblichen Verbesserung der KSS-An- und Abströmung an den Schneidenecken führt, wodurch Stauzonen und die daraus resultierende Verkokung von KSS im Bereich der Schneidenecke vermieden werden. Die großflächige Ausbildung verkorkter KSS-Schichten auf der Werkzeugfreifläche kann zudem dazu beitragen, den Wärmeübergang vom Schneidstoff in den KSS weiter zu verschlechtern. Die nachgewiesene Verbesserung der Kühlschmierung an den Schneiden modifizierter Werkzeuge kann somit als maßgebliche Ursache für die Verlängerung der erzielten Standwege,

die Reduktion der auftretenden Werkzeugtemperaturen und die Verbesserung der Bohrungsintegrität beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 angenommen werden.

7.4.5 Einsatz in weiteren Werkstoffen

Zur Untersuchung der grundsätzlichen Übertragbarkeit der schleiftechnisch eingebrachten Werkzeugmodifikation auf andere, schwer zerspanbare Werkstoffe wurden modifizierte Werkzeuge sowohl zur Bearbeitung der Titanlegierung Ti6Al4V als auch des austenitisch-ferritischen Duplexstahls mit der Werkstoffnummer 1.4462 eingesetzt. Bei Ti6Al4V handelt es sich um einen Werkstoff mit geringer Dichte, der jedoch aufgrund seiner hohen Festigkeit, einer starken Adhäsionsneigung und geringen Wärmeleitfähigkeit die Zerspanung erschwert. Zur Untersuchung der sich aus dem Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 ergebenden Produktivitätspotenziale wurden sowohl unmodifizierte als auch modifizierte Werkzeuge in vergleichenden Standweguntersuchungen eingesetzt. Um die mechanische Belastung vergleichbar zu halten, wurde ein gegenüber den vorherigen Versuchen erhöhter Vorschub von $f = 0,2 \text{ mm}$ bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45 \text{ m/min}$ gewählt. Die resultierenden Verschleißfortschritte der eingesetzten Werkzeuge sind in Abbildung 7.18 vergleichend gegenübergestellt.

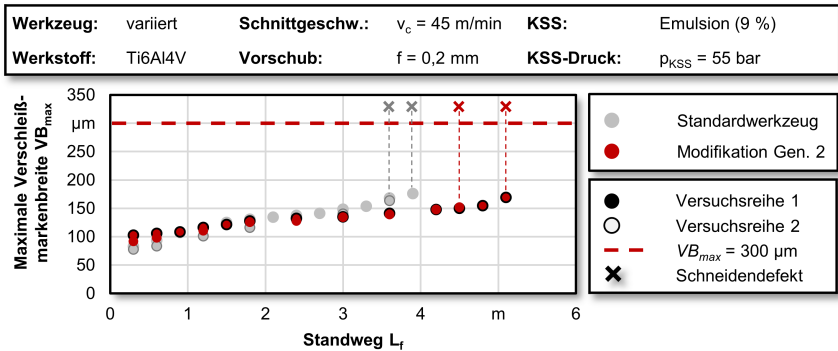


Abbildung 7.18: Verschleißentwicklung beim Einsatz in Ti6Al4V nach [IOV21]

Die Auswertung der an den Werkzeugen auftretenden Verschleißmarkenbreiten zeigt eine erzielbare Verlängerung des erreichbaren Standwegs von $L_f = 3,9 \text{ m}$ bei Standardwerkzeugen auf $L_f = 5,04 \text{ m}$ beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2. Darüber hinaus wurde auch beim Einsatz in Ti6Al4V eine deutliche Reduktion der Werkstoffadhäsionen an den Haupt- und Nebenschneiden der modifizierten Werkzeuge festgestellt, die auf eine Verringerung der Prozesstemperaturen hindeuten. Dadurch wurde insbesondere der adhäsive Verschleiß effektiv verlangsamt, sodass es bei modifizierten Werkzeugen

erst nach einem durchschnittlich um $\Delta L_f = 31\%$ längeren Bohrweg zu Ausbrüchen an den Schneiden kam. Allerdings war die relative Standwegzunahme signifikant geringer als bei den zuvor durchgeführten Versuchen in Inconel 718 [IOV21]. Ähnliche Potenziale beim Einsatz einer modifizierten Freifläche in der Drehbearbeitung von Ti6Al4V wurden von *Denkena et al.* festgestellt [DEN17b], was auf eine grundsätzliche Vergleichbarkeit des Einsatzes modifizierter Werkzeuge bei unterschiedlichen Prozessen hindeutet. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass sowohl eine Anpassung der eingesetzten Schnittwerte als auch eine Adaption der Modifikation an die geringere mechanische Festigkeit des Werkstoffs in Verbindung mit seiner schlechteren Wärmeleitfähigkeit weiteres Potenzial zur Erhöhung der Prozessproduktivität bergen [FAN09; PRA15].

Ergänzend dazu wurden Standzeituntersuchungen zur Bohrbearbeitung des austenitisch-ferritischen Duplexstahls 1.4462 durchgeführt, der ebenfalls eine hohe Adhäsionsneigung bei vergleichsweise geringer Wärmeleitfähigkeit aufweist. Der Vorschub $f = 0,3\text{ mm}$ und die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 130\text{ m/min}$ wurden dabei ebenfalls so gewählt, dass eine ähnliche mechanische Belastung der Werkzeugschneide bei gleichzeitig hoher thermischer Belastung resultierte. Die über den Bohrweg ermittelten Verschleißkurven der eingesetzten Werkzeuge sind Abbildung 7.19 zu entnehmen.

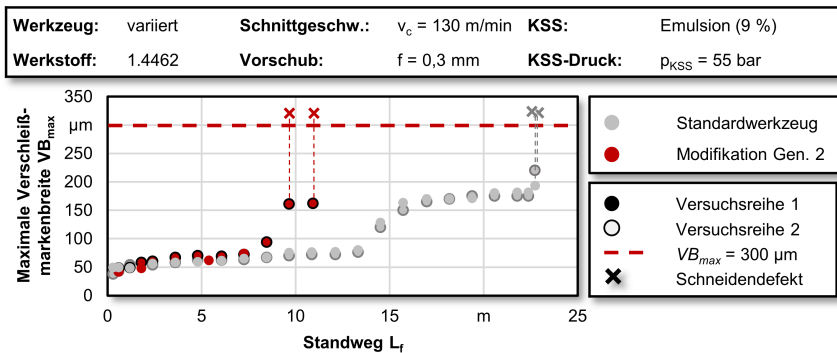


Abbildung 7.19: Verschleißentwicklung beim Einsatz im Duplexstahl 1.4462

Beide eingesetzten Werkzeugtypen wiesen einen charakteristischen Verschleißverlauf auf. Nach einer sehr kurzen Einlaufphase folgte eine ausgeprägte stationäre Phase mit einer geringen Zunahme der ermittelten Verschleißmarkenbreiten, die jedoch sehr unterschiedlich ausfiel. Während die Standardwerkzeuge nach einem Bohrweg von $L_f = 14\text{ m}$ einen signifikanten Anstieg des Freiflächenverschleißes aufwiesen, trat dieser beim Einsatz der WZ-Mod. Gen. 2 bereits nach einem Bohrweg von $L_f = 8\text{ m}$ auf. Dieser Anstieg betrug in beiden Fällen ca. $\Delta VB_{max} = 100\%$ und blieb im wei-

teren Verlauf über einen unterschiedlich langen Bohrweg konstant. Die modifizierten Werkzeuge zeigten kurz darauf großflächige Ausbrüche an den Freiflächen, die auf eine starke thermische Überlastung des Schneidstoffs hindeuten. Der Verschleißzustand eines modifizierten Werkzeugs nach Standzeitende ist in Abbildung 7.20 veranschaulicht. Das eingesetzte Standardwerkzeug wies nach einem Bohrweg von insgesamt $L_f = 23$ m Kammrissen und kleinflächige Ausbrüche an der Schneide auf.

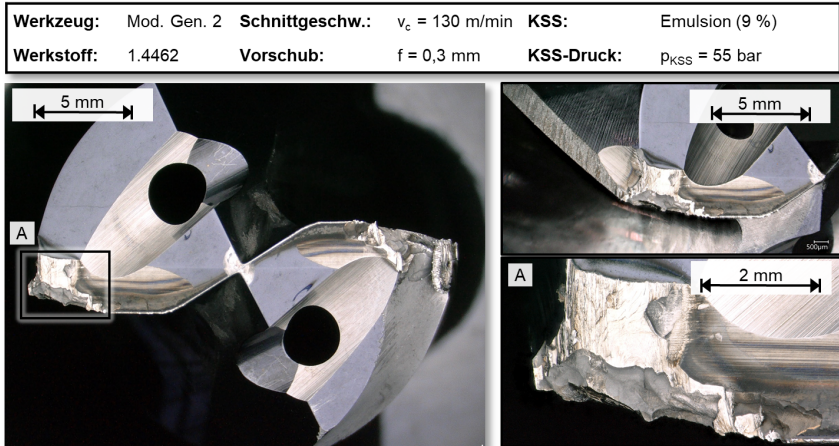


Abbildung 7.20: Zustand des modifizierten Werkzeugs nach Erreichen des Standzeitkriteriums beim Einsatz in 1.4462

Wie die Analyse der auftretenden Prozesskräfte und -momente ergab, ließen sich die erheblichen Beschädigungen am modifizierten Werkzeug nicht auf eine mechanische Überlastung infolge der Prozesskräfte zurückführen. Die während der Bearbeitung des Duplexstahls aufgezeichneten Belastungen befanden sich stets unterhalb der definierten Grenzwerte, die zur Auslegung der Werkzeugmodifikation herangezogen worden waren. Die bereits nach einem kurzen Bohrweg stark ausgeprägten KSS-Verkokungen an den Freiflächen jedoch deuten auf überhöhte Prozesstemperaturen hin, aus denen ein hoher Temperaturgradient innerhalb des aus der Freiflächenmodifikation resultierenden Schneidenstegs resultiert. Während dieser spanflächenseitig sehr hohen Temperaturen ausgesetzt ist, wird seine Rückseite kontinuierlich durch den zugeführten Kühlschmierstoff gekühlt, so dass thermisch bedingte Spannungen im Schneidstoff die Folge sein können. Das beobachtete Auftreten von Kammrissen mit darauf folgenden Ausbrüchen der Schneide lässt sich darauf zurückführen.

Die Analyse der Einsatzversuche zeigt, dass ein ausgewogenes Verhältnis aus mechanischer und thermischer Belastung für den erfolgreichen Einsatz modifizierter Werkzeuge von zentraler Bedeutung ist. Während die Modifikation grundsätzlich für die auftretenden Prozesskräfte angemessen dimensioniert war, führte die verbesserte Schneideneckkühlung nicht zu einer Verlängerung des Werkzeugstandwegs.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur Bearbeitung von Inconel 718, in denen der Vorteil der Werkzeugmodifikation bei sehr stark erhöhten Schnittgeschwindigkeiten deutlich zurückging. In künftigen Untersuchungen wird daher zu analysieren sein, wie sich die Modifikation beim Einsatz verringerter Schnittgeschwindigkeiten bei der Bohrbearbeitung des Duplexstahls 1.4462 auswirkt und welche Anpassungen der Werkzeuge an den zu bearbeitenden Werkstoff zielführend sein werden, um einen Produktivitätsvorteil zu generieren.

7.4.6 Modifikation durch Fräsbearbeitung

Um die während des Bohrprozesses im Bereich der Schneidenecken auftretenden Spannungen zu reduzieren, wurde in Ergänzung zur schleiftechnischen Modifikation die Anwendung eines Mikrofräsprozesses zur Einbringung aufwendigerer Modifikationselemente in das Hartmetallsubstrat untersucht. Dies ermöglichte das Erzeugen einer geometrisch komplexeren Werkzeugmodifikation, bei der ein Teil des Schneidstoffs hinter der Schneidenecke zurückbleibt. Diese Entwicklung folgte den im Rahmen der Standwegversuche gemachten Beobachtungen, denen zufolge Ausbrüche der Schneidenecken die häufigste Ursache für das Erreichen des Standwegkriteriums darstellten. Auf diese Weise sollte eine Verringerung der im Bereich des Freiflächenabsatzes auftretenden Spannungsspitzen im Schneidstoff erreicht und die Schneidenecke stabilisiert werden, um Schneidenausbrüchen vorzubeugen. Ein entsprechendes Werkzeugmodell wurde zunächst mithilfe von CAD ausgelegt und die Auswirkung auf die im Schneidstoff auftretenden Spannungen durch FEM-Simulationen ermittelt, wie in Abbildung 7.21 dargestellt ist.

Die Ergebnisse der anschließend durchgeführten FEM-Simulationen wiesen auf eine signifikante Verringerung der auftretenden Vergleichsspannungen im Schneidstoff hin. Zur Fertigung des entwickelten Werkzeugs wurde ein VHM-Kugelfräser des Typs Mitsubishi DC2SBR0050 eingesetzt, der über eine diamantbasierte Beschichtung zur Bearbeitung von Hartmetallen verfügt. Allerdings resultierte der auftretende Werkzeugschleiß in einer limitierten Ausbringungsmenge modifizierter Bohrwerkzeuge.

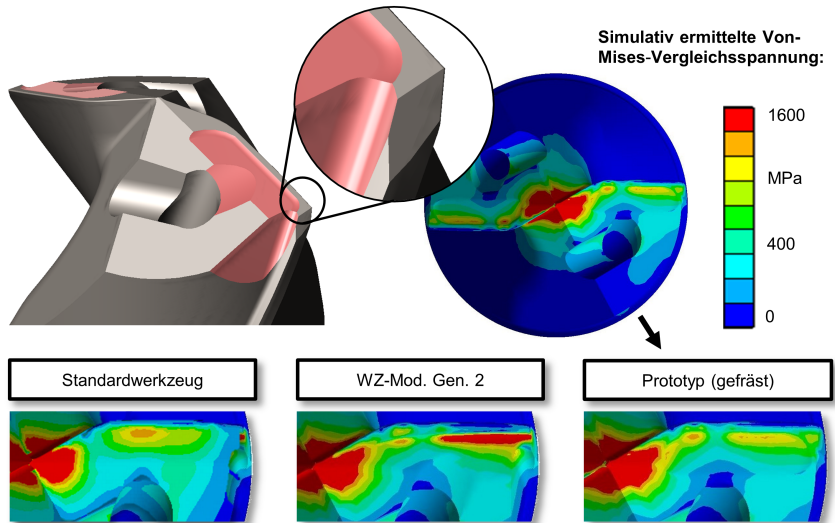


Abbildung 7.21: CAD-Modell und Spannungsverteilung einer prototypischen Werkzeugmodifikation mit verstärkter Schneidenecke (oben), Vergleich der Von-Mises-Spannungen an den primären Freiflächen unterschiedlicher Werkzeugvarianten (unten)

In Abbildung 7.22 ist das Fräs Werkzeug im Neuzustand (links) und nach der vollständigen Modifikation eines VHM-Wendelbohrers (rechts) dargestellt. Deutlich zu erkennen sind erhebliche Abplatzungen der Umfangsschneide, die darauf hindeuten, dass das Fräs Werkzeug nach der vollständigen Bearbeitung eines Bohrwerkzeugs nicht mehr weiter einsatzfähig ist.

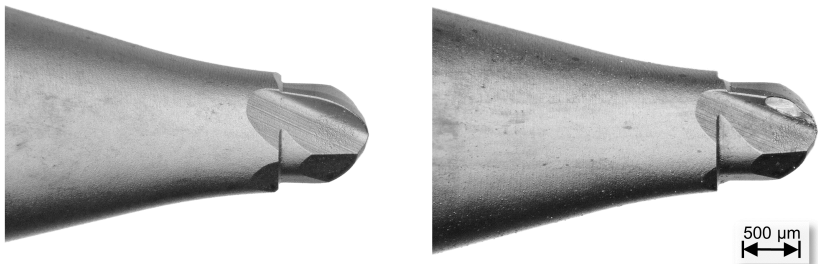


Abbildung 7.22: Mikrofräs Werkzeug vor (links) und nach (rechts) der vollständigen Modifikation eines beschichteten Wendelbohrers

Bei der Einordnung des beobachteten Verschleißes ist zu berücksichtigen, dass der eingesetzte Mikrofräser zur Bearbeitung eines bereits mit einer Verschleißschutzbe-

schichtung versehenen Bohrwerkzeugs aus Feinstkornhartmetall eingesetzt wurde. Die hohe Härte der oberflächlichen TiAlN/TiN-Multilayer-Beschichtung stellt eine besonders starke Belastung für das Werkzeug und dessen diamantbasierte Beschichtung dar. Obwohl damit die vollständige Modifikation eines Bohrers erfolgreich umgesetzt werden konnte, lässt sich aufgrund der hohen Anschaffungskosten der für diese Anwendung geeigneten Mikrofräswerkzeuge ein ungünstiges Kostenverhältnis ableiten.

Die Fräsbahnen wurden mithilfe der CAM-Software CimatronE berechnet und die Bearbeitung auf dem Hochgeschwindigkeits-BAZ Kern HSPC 2522 durchgeführt. Da die Mikrofräsbearbeitung von Hartmetall grundsätzlich zu einer hohen Belastung des eingesetzten Werkzeugs führt, wurden die Schnittwerte mit $v_c = 100$ m/min, $f_z = 0,006$ mm, $a_e = 0,02$ mm und $a_p = 0,03$ mm sehr moderat gewählt. Um die Belastung des bearbeiteten Substrats während der Fräsbearbeitung zu minimieren, wurde eine Gleichlaufstrategie gewählt. Das durch Mikrofräsbearbeitung modifizierte Werkzeug ist in Abbildung 7.23 dargestellt.

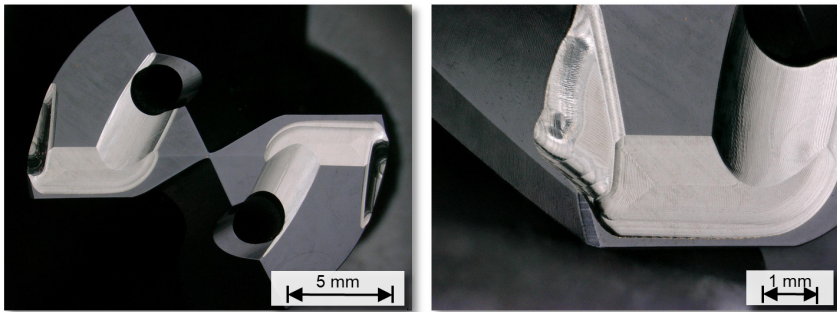


Abbildung 7.23: Durch Mikrofräsen modifiziertes Werkzeug mit verstärkter Schneidenecke

Wie den mikroskopischen Aufnahmen zu entnehmen ist, war durch die Bearbeitung mithilfe des Mikrofräsens eine gezielte Aussparung der Schneidenecke während der Einbringung der Elemente der WZ-Mod. Gen. 2 möglich. Deutlich zu erkennen sind die für das Fräsen typischen Bearbeitungsspuren, die insbesondere im Bereich der Drainage hinter der Nebenschneide stark ausgeprägt sind. Das so modifizierte Werkzeug wurde anschließend in experimentellen Standweguntersuchungen mit einem Vorschub von $f = 0,14$ mm und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 45$ m/min eingesetzt. Diese Schnittwertkombination hatte sich in bisherigen Untersuchungen als besonders vorteilhaft für den Einsatz modifizierter Werkzeuge herausgestellt. In Abbildung 7.24 ist der Verschleißfortschritt des durch Mikrofräsen hergestellten Werkzeugs dem eines Werkzeugs mit geschliffener Werkzeugmodifikation vergleichend gegenübergestellt.

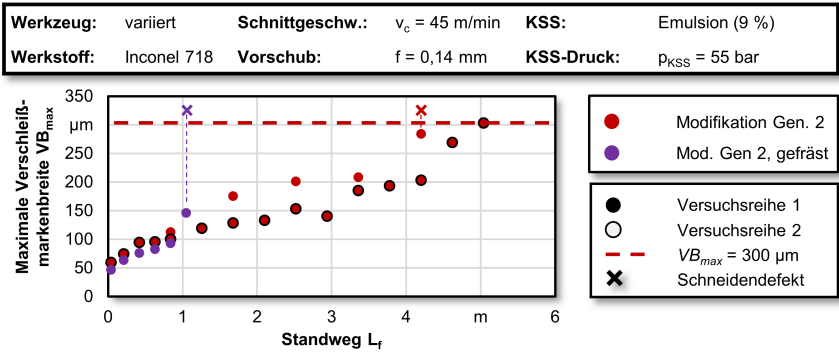


Abbildung 7.24: Verschleißentwicklung beim Einsatz eines durch Mikrofräsen hergestellten Werkzeugs im Vergleich zur schleifend hergestellten WZ-Mod. Gen. 2

Am Verlauf der maximalen Verschleißmarkenbreiten lässt sich erkennen, dass die gefräste Werkzeugmodifikation zunächst einen signifikant geringeren Verschleißfortschritt aufwies. Werkzeuge mit einer schleiftechnisch erzeugten Modifikation wiesen im arithmetischen Mittel ca. $\Delta VB_{max} \approx 25 \%$ höhere maximale Verschleißmarkenbreiten auf. Allerdings zeigten sich am durch Fräsen modifizierten Werkzeug bereits nach einem Bohrweg von $L_f = 1,47 \text{ m}$ erhebliche Verschleißerscheinungen in Form von tiefen Kammrissen an der Hauptschneide und rückseitigen Ausbrüchen der Führungsfasen. Diese sind in Abbildung 7.25 dargestellt.

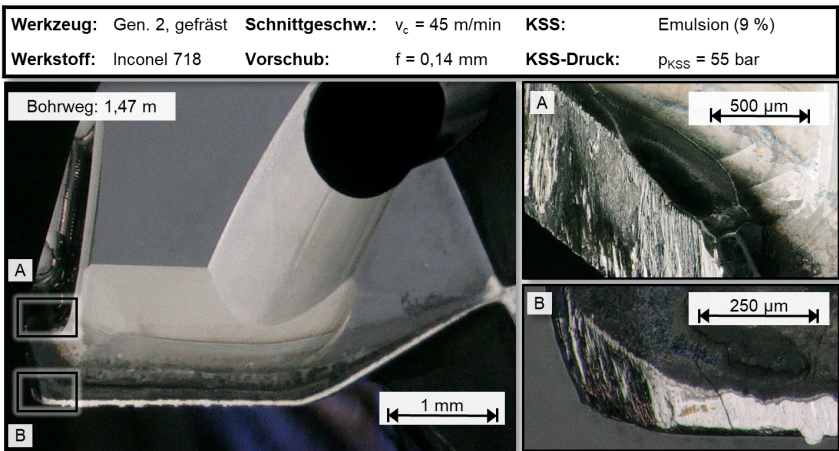


Abbildung 7.25: Verschleißerscheinungen an durch Mikrofräsen modifiziertem Werkzeug: Ausbruch an der Führungsfase (rechts oben), Kammrisse in der Hauptschneide (rechts unten)

Neben dem frühzeitigen Auftreten kritischer Verschleißerscheinungen waren zudem ausgeprägte Kühlschmierstoffverkokungen im freiflächenseitigen Absatz erkennbar. Diese lassen auf einen signifikant reduzierten KSS-Fluss durch den hinter der Schneidenecke verbleibenden Schneidstoff schließen. Neben einer höheren thermischen Belastung deuten die beobachteten Ausbrüche und Risse im Substrat zudem auf eine Schwächung des Schneidstoffs durch Vorschädigungen oder das Vorliegen ungünstiger Eigenspannungen hin. Diese könnten durch eine nachteilige Prozessführung bei der Mikrofräsbearbeitung eingebracht worden sein.

Als Indiz dafür ist zu werten, dass die beobachteten Schäden primär in Bereichen auftraten, die zuvor der Fräsbearbeitung ausgesetzt waren. Es besteht die Möglichkeit, dass sich eine Vorschädigung des Schneidstoffs durch die Fräsbearbeitung mit einer angepassten Bearbeitungsstrategie oder noch weiter herabgesetzten Schnittwerten vermeiden lassen könnte. Allerdings deuten die aufgetretenen KSS-Verkokungen darauf hin, dass eine Verstärkung der Schneidenecke dem Ziel eines verbesserten KSS-Flusses entgegensteht und nicht dazu in der Lage ist, die Verschlechterung der Schneidstoffkühlung durch gesteigerte mechanische Stabilität zu kompensieren.

7.4.7 Vollständig beschichtete Modifikation

Die beim Einsatz einer Werkzeugmodifikation beobachteten Standwegsteigerungen konnten durch simulationsbasierte und experimentelle Untersuchungen mit einer Verbesserung des KSS-Flusses in Verbindung gebracht werden. Dies stützt die Annahme, dass höhere Strömungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit einer wirkstellennahen Kühlung zu einer geringeren thermischen Belastung des Schneidstoffs bei modifizierten Werkzeugen führen. Die untersuchten Modifikationen wurden jedoch stets an bereits beschichteten Werkzeugen ausgeführt, sodass die eingebrachten Kanäle keine Beschichtung aufwiesen und das Hartmetallsubstrat in den modifizierten Bereichen freigelegt war. Bei einer industriellen Umsetzung der entwickelten Werkzeugmodifikation in der Serienfertigung von Wendelbohrern ist aufgrund der üblicherweise eingesetzten Prozessreihenfolge davon auszugehen, dass auch die Modifikationselemente mit einer Beschichtung versehen sein werden.

Die vorrangig eingesetzten Beschichtungen auf Ti- und TiAlN-Basis weisen sehr geringe Wärmeleitkoeffizienten auf, was in der Regel als positiv für den Verschleißschutz der Werkzeuge angesehen wird, sich aber negativ auf den Wärmeartrag aus dem Hartmetall in den Kühlschmierstoff auswirken kann. Um den Effekt einer Beschichtung der Modifikationselemente zu untersuchen, wurden unbeschichtete Werkzeugrohlinge schleiftechnisch modifiziert und nachträglich mit der auch an den Standardwerkzeugen

eingesetzten Multilayer-Kopfbeschichtung versehen. Das modifizierte Werkzeug vor und nach dem Beschichtungsvorgang ist in Abbildung 7.26 dargestellt.

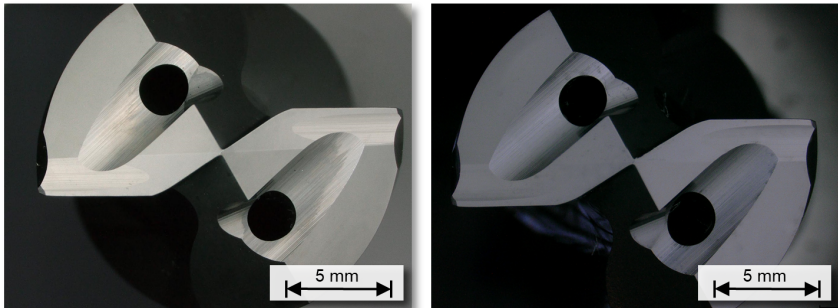


Abbildung 7.26: Modifiziertes Werkzeug vor (links) und nach (rechts) dem Beschichtungsvorgang

Trotz der nachträglich aufgebrachtten Beschichtung ist die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit zwischen den schleifend modifizierten Flächen und dem restlichen Werkzeug deutlich erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die eingebrachten Nuten nicht gesondert schichtvorbehandelt wurden, wodurch die zu erwartende Homogenisierung der Werkzeugoberfläche an diesen Stellen ausblieb. Daraus ergab sich eine erhöhte Gefahr der verringerten Schichthaftung an den scharfen Kanten und Übergängen, die sich jedoch während des Prozesses nicht im Eingriff befinden und daher als vernachlässigbar eingestuft wurden.

Die bislang vorliegende Literatur zum Einfluss einer Verschleißschutzbeschichtung auf den Wärmeein- bzw. austrag an Zerspanwerkzeugen deutet darauf hin, dass aufgrund der geringen Schichtdicken nicht mit einer relevanten Isolationswirkung zu rechnen ist [REC04b; REC05; ZHA21]. Zur ersten Abschätzung ggf. bestehender Unterschiede im Wärmeabgabeverhalten beschichteter und unbeschichteter Werkzeugmodifikationen wurde deshalb zunächst ein thermographischer Versuch durchgeführt. Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 7.27 veranschaulicht.

Dabei wurden Werkzeuge sowohl mit beschichteten als auch mit unbeschichteten Modifikationselementen geregelt auf eine Temperatur von $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt. Ihre Oberflächen waren dabei geschwärzt, um Einflüsse durch unterschiedliche Emissionskoeffizienten der beschichteten und unbeschichteten Bereiche zu minimieren und Reflexionen zu reduzieren. Das Abkühlverhalten der Werkzeuge wurde anschließend sowohl bei freier als auch bei durch einen konstanten Luftstrom erzwungener Konvektion thermografisch erfasst und ausgewertet.

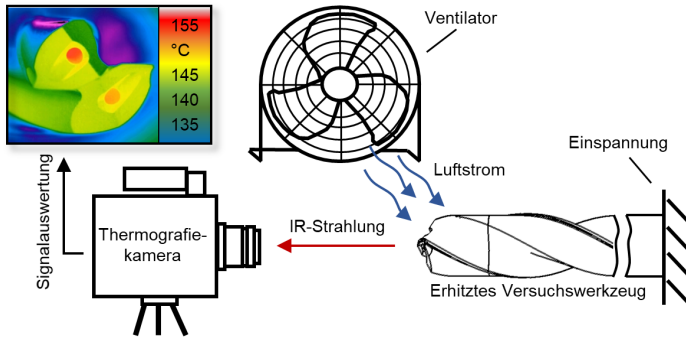


Abbildung 7.27: Versuchsaufbau zur thermografischen Untersuchung

Die Erzeugung des Luftstroms erfolgte mithilfe eines Ventilators vom Typ QUIGG VT50.14 mit einer Antriebsleistung von $P_A = 50 \text{ W}$, der in einem Abstand von $l = 0,5 \text{ m}$ zum ortsfest eingespannten Werkzeug aufgestellt war. Zur Erfassung der von den Werkzeugen emittierten Infrarotstrahlung wurde eine Thermografiekamera des Typs Infratec ImagerL eingesetzt und die gewonnenen Daten anschließend mit der PC-Software IRBIS 3 ausgewertet. Zur quantitativen Erfassung der emittierten Infrarotstrahlung wurde diese, in Abhängigkeit von der Abkühldauer, an definierten Punkten sowohl in den Kanälen der Werkzeugmodifikation als auch auf den umliegenden Flächen ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Abkühlung an einem Werkzeug ohne Beschichtung der Werkzeugmodifikation ist in Abbildung 7.28 anhand thermografischer Aufnahmen beispielhaft veranschaulicht.

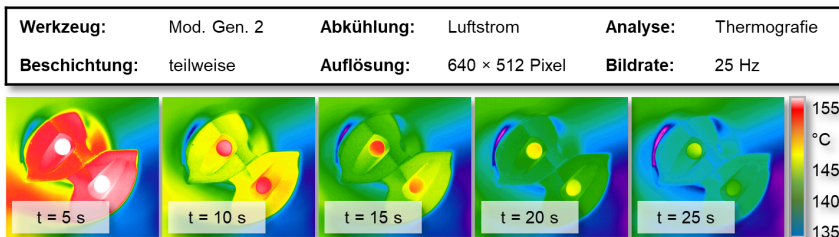


Abbildung 7.28: Thermografieaufnahmen eines unter erzwungener Konvektion abkühlenden Werkzeugs ohne Beschichtung der Modifikation

Die grafische Darstellung macht deutlich, dass zwischen den beschichteten und unbeschichteten Flächen am Werkzeug kaum Unterschiede in der emittierten Wärmestrahlung feststellbar sind. Während aus dem Inneren der Kühlkanäle die höchste

Emission erfolgte, wiesen die umliegenden Bereiche ein gleichmäßiges Abkühlverhalten auf. Dabei erfolgte die Abkühlung in den Randbereichen des Werkzeugs schneller, da hier ein höheres Verhältnis aus Werkzeugoberfläche und -masse vorlag. An den Schneidenecken wurde über einen Zeitraum von $\Delta t = 20$ s eine Abkühlung von $T = 150$ °C auf $T = 135$ °C ermittelt. Der quantitative Vergleich der Abkühlung zwischen Werkzeugen mit beschichteter und unbeschichteter Modifikation anhand definierter Messpunkte zeigte geringfügige Unterschiede über eine Abkühlzeit von $t = 25$ s auf. Ihre Auswertung ist in Abbildung 7.29 anhand von zwei beispielhaft ausgewählten Messpunkten an der Werkzeugstirnseite dargestellt.

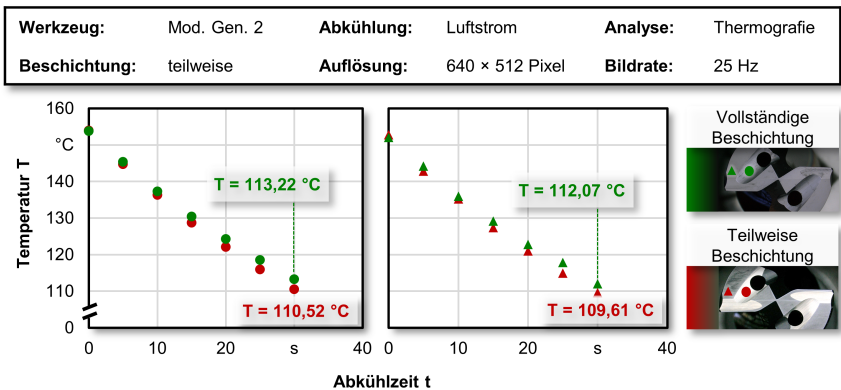


Abbildung 7.29: Abkühlvorgang an unterschiedlichen Messpunkten beschichteter und unbeschichteter Werkzeugmodifikationen im Vergleich

Bei einer Starttemperatur von $T = 153,73$ °C wurde am Ende des untersuchten Abkühlzeitraums von $t = 25$ s eine Differenz von $\Delta T = 2,7$ °C im Bereich des Strömungskanals vom Kühlkanalaustritt zum Freiflächenabsatz zwischen den Werkzeugen mit und ohne Beschichtung der Werkzeugmodifikation ermittelt. An der sekundären Freifläche, die bei beiden untersuchten Werkzeugen beschichtet war, ließ sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 2,46$ °C feststellen. Die dargestellten Temperaturen stellen Mittelwerte aus jeweils zwei Messungen dar, deren maximale Abweichung $\Delta T = \pm 1,3$ °C betrug. Während sich der eingesetzte Versuchsaufbau hinsichtlich einer Vielzahl von Einflussfaktoren vom realen Prozess unterscheidet, lassen sich die erzielten Ergebnisse als Indiz für eine ggf. vorhandene, in diesem Fall jedoch nur gering ausgeprägte Beeinflussung des Wärmeabgabeverhaltens der modifizierten Werkzeuge durch das Vorhandensein einer Beschichtung in der Werkzeugmodifikation werten.

Zur Einordnung der sich tatsächlich ergebenden Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Bohrwerkzeuge wurden darüber hinaus vergleichende Standweguntersuchungen

durchgeführt. Der Verschleißfortschritt von Werkzeugen mit unbeschichteten Modifikationselementen ist denen von Werkzeugen mit vollständiger Beschichtung in Abbildung 7.30 vergleichend gegenübergestellt.

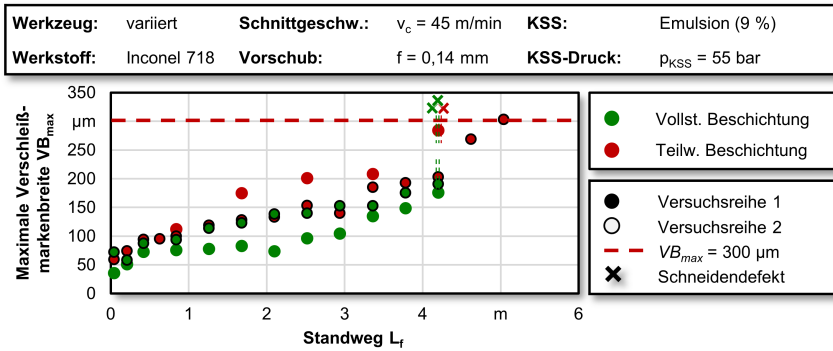


Abbildung 7.30: Werkzeugstandweg beim Einsatz vollständig beschichteter Werkzeuge im Vergleich zu Werkzeugen ohne Beschichtung der Werkzeugmodifikation

Die eingesetzten Werkzeuge mit beschichteter Werkzeugmodifikation erreichten in beiden Versuchsreihen zueinander identische Standwege. Während diese geringer als das arithmetische Mittel der Werkzeuge mit unbeschichteter Modifikation ausfielen, waren sie mit einem der beiden unterschiedlichen erzielten Standwege identisch. Die Standwege der Werkzeuge ohne beschichtete Modifikation umfassten einen Bereich von $L_f = 4,2 \dots 5,04 \text{ m}$, woraus eine hohe Standardabweichung hervorgeht.

Die Auswertung der maximalen Verschleißmarkenbreiten deutete zudem auf Unterschiede im Verschleißverhalten der jeweiligen Werkzeuge hin. So nahm die Verschleißmarkenbreite bei Werkzeugen mit beschichteter Modifikation zu Beginn des Bohrwegs weniger stark zu und verblieb im weiteren Verlauf auf deutlich geringerem Niveau. Während die maximale Verschleißmarkenbreite im weiteren Verlauf bei beiden untersuchten Werkzeugvarianten nur geringfügig zunahm, wiesen Werkzeuge mit einer vollständigen Beschichtung eine um durchschnittlich $\Delta VB_{max} \approx 50 \text{ µm}$ geringere Verschleißmarkenbreite auf.

Allerdings zeigten sich an beiden vollständig beschichteten Werkzeugen nach einem einheitlichen Bohrweg von $L_f = 4,2 \text{ m}$ Ausbrüche der Schneidenecken. Diese wurden an einem der Vergleichswerkzeuge ebenfalls festgestellt, wobei das andere jedoch einen Bohrweg von $L_f = 5,04 \text{ m}$ ohne sichtbare Schneidendefekte erreichte. Der Verschleißzustand beider Werkzeugtypen bei einem Standweg von $L_f = 4,2 \text{ m}$ ist in Abbildung 7.31 exemplarisch dargestellt.

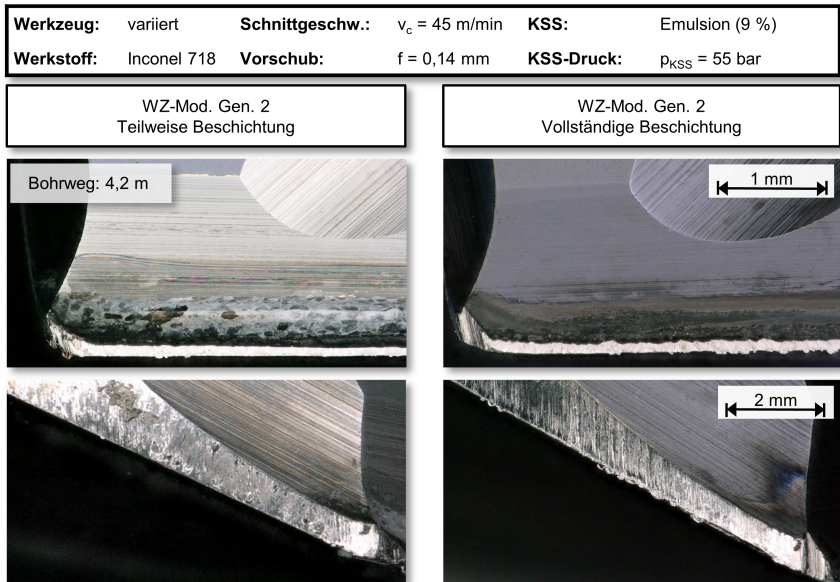


Abbildung 7.31: Verschleißfortschritt an teilweise (links) und vollständig (rechts) beschichteten Werkzeugen nach einem Bohrweg von $L_f = 4,2 \text{ m}$

Den mikroskopischen Aufnahmen ist zu entnehmen, dass sowohl der Verschleißfortschritt als auch die Ausbildung von KSS-Verkokungen an beiden Werkzeugtypen vergleichbar ausfielen. Auch war in beiden Fällen eine ähnliche Reduktion der Werkstoffadhäsionen an den Nebenschneiden zu erkennen. Am vollständig beschichteten Werkzeug traten geringere unverkockte KSS-Rückstände auf, was darauf hindeutet, dass diese schlechter an der Beschichtung haften. Im Rahmen der Verschleißuntersuchungen wurde ein ähnliches Verschleißverhalten festgestellt. Während vollständig beschichtete Werkzeuge einen geringfügig verringerten Verschleißfortschritt aufwiesen, konnte in einem der untersuchten Fälle ein höherer Standweg durch ein Werkzeug ohne Beschichtung der Modifikation erreicht werden. Die beobachteten Unterschiede sind jedoch nicht deutlich genug, um sie ausschließlich auf das Vorhandensein einer Beschichtung zurückführen zu können.

Insgesamt lassen die geringen Unterschiede, die sowohl im Abkühl- als auch im Verschleißverhalten von Werkzeugen mit und ohne Beschichtung der Modifikation festgestellt wurden, nicht auf einen signifikanten Einfluss der Verschleißschutzbeschichtung schließen. Dies zeigt, dass die entwickelte Werkzeugmodifikation erfolgreich in bestehende Fertigungsreihenfolgen integrierbar ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bearbeitung hochwarmfester Nickelbasislegierungen wie Inconel 718 stellt für die Zerspanung eine große Herausforderung dar. Insbesondere in der Bohrbearbeitung führen die hohe Festigkeit und die geringe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs schnell zu einer Überlastung der eingesetzten VHM-Werkzeuge, wodurch die erreichbare Produktivität eingeschränkt wird. Frühere Arbeiten konnten nachweisen, dass die Einbringung eines Absatzes an der primären Freifläche von Wendelbohrwerkzeugen zu einer signifikanten Verlängerung der Standzeiten führt, was sich unter anderem auf eine Verbesserung des KSS-Strömungsverhaltens entlang der Schneide zurückführen lässt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Konzept der Freiflächenmodifikation aufgegriffen und weiterentwickelt. Das Ziel bestand in der Erarbeitung eines Werkzeugdesigns mit gesteigertem Produktivitätspotenzial bei gleichzeitig guter Übertragbarkeit auf industrielle Anwendungen. Neben der erzielbaren Leistungssteigerung stand auch die Sicherstellung hoher Bohrungsgüten im Fokus der Entwicklung, um die Notwendigkeit einer kostenintensiven Nachbearbeitung zur Vermeidung von Ausschuss oder verringerten Dauerfestigkeiten der gefertigten Bauteile zu reduzieren.

Mithilfe experimenteller und simulationsbasierter Analysen wurden zunächst die im Prozess auftretenden thermomechanischen Werkzeugbelastungen analysiert. Darauf basierend erfolgte die geometrische Auslegung der Werkzeugmodifikationen. Zunächst wurde im Rahmen der Werkzeugmodifikation Generation 1 die Umsetzung eines großvolumigen Absatzes an der Freifläche angestrebt, um den Freiflächenverschleiß und die zwischen Freifläche und Bohrungsgrund auftretende Reibung zu begrenzen. Die Freiflächenmodifikation wurde anschließend an kopfbeschichteten VHM-Wendelbohrern umgesetzt und in experimentellen Versuchen validiert. Bei moderaten Schnittgeschwindigkeiten wurde eine Verdoppelung des Standwegs durch den Einsatz modifizierter Werkzeuge beobachtet. Der Standwegvorteil der modifizierten Werkzeuge erhöhte sich bei gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten noch weiter, sodass sie bis zu vier mal so lange Standwege erreichten. Aufgrund der bei hohen Schnittgeschwindigkeiten generell erheblich verringerten Werkzeuglebensdauer fiel die absolute Zunahme des Standwegs jedoch vergleichsweise gering aus.

Auf dieser Basis wurde die Werkzeugmodifikation weiterentwickelt, um eine gezielte Verbesserung des KSS-Strömungsverhaltens zu erreichen. Dazu wurden weitere Modifikationselemente in das Werkzeug eingebracht, die den ursprünglichen Absatz an der Freifläche ergänzen. Dabei handelt es sich um einen Zuflusskanal vom Kühlkanalaustritt in Richtung des Freiflächenabsatzes sowie um eine Drainage, die eine Abströmung des KSS von der Hauptfreifläche in Richtung der Nebenfleifläche ermöglicht. Das Ergebnis dieser Entwicklung einer ganzheitlichen Modifikation stellt

die Werkzeugmodifikation Generation 2 dar. Die jeweiligen Generationen der Werkzeugmodifikationen sind dem unmodifizierten Standardwerkzeug in Abbildung 8.1 vergleichend gegenübergestellt.

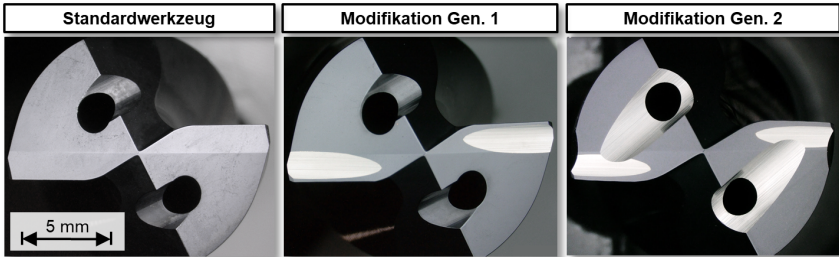


Abbildung 8.1: Entwickelte Werkzeugmodifikationen im Vergleich zum Standardwerkzeug: Gen. 1 (mittig) und Gen. 2 (rechts)

Im Rahmen der experimentellen Validierung wurden die modifizierten Werkzeuge hinsichtlich ihrer Verschleißentwicklung bei der Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe, der resultierenden Prozesstemperaturen, ihrer KSS-Strömungseigenschaften und der erzielbaren Bohrungsqualität untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere die Werkzeugmodifikation Generation 2 bei der Bearbeitung von Inconel 718 eine deutliche Produktivitätssteigerung erzielt. So wurde bei gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten ein, im Vergleich zu unmodifizierten Referenzwerkzeugen, mehr als fünf mal so langer Standweg erreicht. Dies lässt sich auf die experimentell nachgewiesene Verbesserung der KSS-Versorgung der Schneide zurückführen, die in einer deutlichen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten resultiert. Daraus folgen reduzierte Schneidentemperaturen und eine Verringerung von Werkstoffadhäsionen an den Nebenschneiden. Durch die verbesserte Kühlschmierung in Verbindung mit dem langsamer fortschreitenden Werkzeugverschleiß werden die Bohrungsrundheiten verbessert und das Auftreten von Randzonenbeeinflussungen deutlich vermindert.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen konnten die durch eine Werkzeugmodifikation erreichbaren Vorteile erfolgreich belegen. Um diese in der industriellen Praxis nutzbar zu machen, erfolgten alle Entwicklungen unter der Maßgabe der Herstellbarkeit durch Einsatz gängiger Schleifwerkzeuge. Der Fokus künftiger Arbeiten wird auf der weiterführenden Analyse der Wirkmechanismen liegen, die den positiven Anwendungseigenschaften einer Werkzeugmodifikation zugrunde liegen. Darüber hinaus soll evaluiert werden, wie sich das Konzept auf weitere herausfordernde Bohrprozesse übertragen lässt, zu denen vor allem das Tiefbohren zählt. Die weitere Entwicklung und Anwendung der Werkzeugmodifikation kann zukünftig dazu beitragen, anspruchsvolle Bohroperationen produktiver und wirtschaftlicher zu gestalten.

Literaturverzeichnis

- [ABE10] E. Abele und M. Fajara. »Simulation-based twist drill design and geometry optimization«. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59.1 (2010), S. 145–150. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.063.
- [ADA96] P. Adam und M. Eckstein. »Zeitfestigkeit und Randschicht - Eigenschaften durch Zerspanung bei Nickellegierungen«. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 27.6 (1996), S. 272–279. ISSN: 09335137. DOI: 10.1002/mawe.19960270605.
- [ADA98] P. Adam. *Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken*. Basel: Birkhäuser Basel, 1998. ISBN: 978-3-0348-9766-2. DOI: 10.1007/978-3-0348-8769-4.
- [AIH12] L. Aihua u. a. »Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings«. In: *International Journal of Refractory Metals and Hard Metals* 31 (2012), S. 82–88.
- [AKH14] W. Akhtar u. a. »Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review«. In: *Frontiers of Mechanical Engineering* 9 (2014), S. 106–119. DOI: 10.1007/s11465-014-0301-2.
- [ANA02] A. Anagonye. »Modelling Cutting Temperatures for Turning Inserts With Various Tool Geometries and Materials«. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 124 (2002), S. 544–552.
- [AST14] V. P. Astakhov. *Drills: Science and Technology of Advanced Operations*. Manufacturing Design and Technology. Hoboken: Taylor and Francis, 2014. ISBN: 9781466584341.
- [AST94] V. P. Astakhov, J. Frazao und M. O. M. Osman. »On the Experimental Optimization of Tool Geometry for Uniform Pressure Distribution in Single Edge Gundrilling«. In: *Journal of Engineering for Industry* 116.4 (1994), S. 449. ISSN: 00220817. DOI: 10.1115/1.2902127.
- [AUR13] J. C. Aurich und F. Fallenstein. »CFD-Simulation der Kühlung von innengekühlten VHM-Wendelbohrern: Kühlkanal-Austrittsposition und KSS-Volumenstrom optimieren Werkzeugkühlung«. In: *VDI-Z Special Werkzeuge II* (2013), S. 48–51.
- [BAC04] F.-W. Bach u. a. »Kontaktflächenanalyse beim Hochgeschwindigkeits-Bohren«. In: *VDI-Z* 146.1/2 (2004).

- [BAG06] E. Bagci und B. Ozcelik. »Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651«. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29.7-8 (2006), S. 629–636. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-005-2569-1.
- [BAK16] T. Bakša, M. Morávek und M. Zetek. »Influence of the coated carbide grade on the cutting tool life when machining Inconel 718«. In: *Key Engineering Materials*. Bd. 674. 2016, S. 271–276. ISBN: 9783038356554. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.674.271.
- [BAR12] H.-J. Bargel und G. Schulze, Hrsg. *Werkstoffkunde*. Berlin: Springer Vieweg, 2012. ISBN: 978-3-642-17717-0.
- [BEE14] N. Beer, E. Oezkaya und D. Biermann. »Drilling of Inconel 718 with geometry-modified twist drills«. In: *Procedia CIRP* 24 (2014), S. 49–55. ISSN: 22128271.
- [BEE15] N. Beer. »Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2015.
- [BEN12] T. Beno und U. Hulling. »Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling«. In: *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 531–536. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.091.
- [BER39] W. Bernt. *Altes Werkzeug*. München: Georg D. W. Callwey, 1939.
- [BIE08] D. Biermann und I. Terwey. »Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes«. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1.2 (2008), S. 76–80. ISSN: 17555817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2008.09.002.
- [BIE12c] D. Biermann und L.J. Zhang. »Kombination bringt den Erfolg - Untersuchungen zur Kühlung beim Drehen«. In: *Werkstatt und Betrieb* 2012.145 (9) (), S. 176–179.
- [BIE13b] D. Biermann, N. Beer und S. Sattel. »Führungsfaseneinfluss beim Bohren – Nickelbasislegierung Inconel 718 mit hoher Oberflächengüte bearbeiten«. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 155.Spezial I (2013), S. 28–30.
- [BIE13e] D. Biermann, Finkeldei, D., Abrahams, H. und L.J. Zhang. »Kühlkonzepte führen zum Erfolg: Zerspanung von „Inconel 718“ unter

- Verwendung verschiedener Kühlkonzepte«. In: *VDI-Z Integrierte Produktion* 155.10 (2013), S. 55–57.
- [BIE15c] D. Biermann und I. Iovkov. »Investigations on the formation of straightness deviation in MQL deep-hole drilling of thin-walled aluminium components«. In: *Production Engineering* 9.4 (2015), S. 527–535. ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-015-0632-9.
- [BIE17] D. Biermann und E. Oezkaya. »CFD simulation for internal coolant channel design of tapping tools to reduce tool wear«. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66.1 (2017), S. 109–112. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.024.
- [BIE17b] D. Biermann u. a. »Experimental investigations for a simulative optimization of the cutting edge design of twist drills used in the machining of Inconel 718«. In: *Procedia Manufacturing* 14 (2017), S. 8–16. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.002.
- [BIE18] D. Biermann, G. Petuelli und J. P. Jaeger. »Mit Kälte smart ins Harte: Tiefbohren, kryogene Kühlung, MMS-Lösungen«. In: *WB Werkstatt + Betrieb* 04 (2018), S. 18–21.
- [BON06] M. Bono und J. Ni. »The location of the maximum temperature on the cutting edges of a drill«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46.7-8 (2006), S. 901–907. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.020.
- [BRE18] B. Breidenstein u. a. »Laser material removal on cutting tools from different materials and its effect on wear behavior«. In: *Metal Powder Report* 73.1 (2018), S. 26–31. ISSN: 00260657. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.06.001.
- [BRI91] E. Brinksmeier. »Prozess- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung«. Dissertation, Hannover: Universität Hannover, 1991.
- [BRO10] T. Brochu, C. Batty und R. Bridson. »Matching fluid simulation elements to surface geometry and topology«. In: *ACM Transactions on Graphics* 29.4 (2010), S. 1. ISSN: 07300301. DOI: 10.1145/1778765.1778784.
- [BUC18b] M. Bücker u. a. »Investigations on the effects of an innovative flank face modification for the drilling of nickel-base alloys«. In: *Procedia Manufacturing* 18 (2018), S. 20–26. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.11.003.
- [BUC20] M. Bücker u. a. »A New Flank Face Design Leading to an Improved Process Performance when Drilling High-Temperature Nickel-Base

Alloys«. In: *Proceedings of the Machining Innovations Conference (MIC)* (2020), S. 20–26.

- [BUC71] G. Buck. »Spanformen beim Bohren mit Einlippenwerkzeugen«. In: *Werkzeugmaschine International* 1.2 (1971), S. 39–44.
- [BUC71b] G. Buck. »Spanformen beim Tiefbohren«. In: *Industrieanzeiger* 93.91 (1971), S. 2277–2278.
- [BUR15] R. Bürgel, H.-J. Maier und T. Niendorf. *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen; mit ... 66 Tab.* 4., überarb. Auflage. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2015. ISBN: 978-3-8348-1388-6.
- [CHO99] Y. K. Chou und C. J. Evans. »White layers and thermal modeling of hard turned surfaces«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39.12 (1999), S. 1863–1881. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00036-X.
- [CHR05] K. Christoffel und T. Bruchhaus. »Produktivitätssteigerung mit Wendeschneidplattenbohrern«. In: *Spanende Fertigung: Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*. Hrsg. von K. Weinert. Bd. 10. Essen: Vulkan Verlag, 2005, S. 172–179.
- [DAV07] M. A. Davies u. a. »On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes«. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56.2 (2007), S. 581–604. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.009.
- [DEN08] B. Denkena, D. Boehnke und R. Meyer. »Reduction of wear induced surface zone effects during hard turning by means of new tool geometries«. In: *Production Engineering* 2.2 (2008), S. 123–132. ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-008-0089-1.
- [DEN09] B. Denkena und R. Ben Amor. »Hartbearbeitungswerkzeug für die spanende Bearbeitung gehärteter Werkzeuge: Patentschrift«. Pat. DE102006020613B4. 2009.
- [DEN09b] B. Denkena und R. Ben Amor. »Hartbearbeitungswerkzeug für die spanende Bearbeitung gehärteter Werkzeuge: Offenlegungsschrift«. Pat. DE102006020613A1. 2009.
- [DEN11] B. Denkena und H. K. Tönshoff. *Spanen: Grundlagen*. 3., bearb. und erw. Aufl. VDI. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-19771-0.

- [DEN13] B. Denkena. *Entwicklung innovativer Freiflächengeometrien zur Standzeiterhöhung beim Hartfräsen: Berichte aus dem VDW-Forschungsinstitut: Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 17225 N.* Hannover, 2013.
- [DEN14] B. Denkena und D. Biermann. »Cutting edge geometries«. In: *CIRP Annals* 63.2 (2014), S. 631–653. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
- [DEN15] B. Denkena, J. Köhler und B. Bergmann. »Development of cutting edge geometries for hard milling operations«. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 8 (2015), S. 43–52. ISSN: 17555817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.10.002.
- [DEN17] B. Denkena. *Grundlagen für den industriellen Einsatz von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation für die Drehbearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen: Berichte aus dem VDW-Forschungsinstitut: Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18635 N.* Hannover, 2017.
- [DEN17b] B. Denkena u. a. »Increasing productivity in turning of hard-to-cut materials by means of modified flank faces«. In: *Procedia Manufacturing* 14 (2017), S. 97–104. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.011.
- [DEV68] M. F. DeVries, U. K. Saxena und S. M. Wu. »Temperature Distributions in Drilling«. In: *Journal of Engineering for Industry* 90 (1968), S. 231–238.
- [DUD04] D. Dudzinski u. a. »A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44.4 (2004), S. 439–456. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00159-7.
- [DUD96] I. Dudas und G. Varga. *Umweltgerechte Zerspanungstechnik: Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfsstoffen beim Bohren.* Hrsg. von Dept. of Production Engineering. 1996.
- [DUR83] C. Duret und R. Pichoir. »Protective coatings for high temperature materials: Chemical vapour deposition and pack cementation processes«. In: *Coatings for High Temperature Applications.* Hrsg. von E. Lang. London: Appl. Sci. Publ., 1983, S. 33–78.
- [EIS99] G. Eisenblätter. »Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 1999.

- [EMR01] A. K. Emrich. »Optimierung des Spanraumes bei Bohrwerkzeugen mit Hilfe genetischer Algorithmen«. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [FAL14] F. Fallenstein und J. C. Aurich. »CFD based Investigation on Internal Cooling of Twist Drills«. In: *Procedia CIRP* 14 (2014), S. 293–298. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.112.
- [FAL15] F. Fallenstein und J. C. Aurich. »Kühlkanalaustrittsbedingungen beim Bohren: Einfluss von Kühlkanalaustrittspositionen und KSS-Menge auf den Verschleiß von VHM-Wendelbohrern«. In: *wt Werkstattstechnik online* 105.7-8 (2015), S. 459–500.
- [FAN09] N. Fang und Q. Wu. »A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool«. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209.9 (2009), S. 4385–4389. ISSN: ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.013.
- [FU10] S. Fu u. a. *Research on Inconel 718 Type Alloys With Improvement of Temperature Capability*. Pittsburgh, Pennsylvania, October 10-13, 2010.
- [FUJ11] M. Fujara. »Methode zur rechnerunterstützten Auslegung und Optimierung der Geometrie des Vollhartmetall-Spiralbohrers«. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [GOM14] Gomeringer, R. Heinzler, M. u. a. *Tabellenbuch Metall*. 46. Aufl. Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. Haan-Gruten: Europa-Lehrmittel, 2014. ISBN: 978-3-8085-1676-8.
- [GUH03] Gühning OHG. »Kühlkanal-Geometrie«. Pat. DE20321908U1. 18.12.2003.
- [HAN03] P. Hänle und D. Gsänger. »Das Bohrwerkzeug für den MSS-Einsatz fit gemacht«. In: *WB Werkstatt und Betrieb* 2003.136 (2003), S. 86–88. ISSN: ISSN 0043-2792.
- [HAN05] P. Hänle und M. Schwenck. »Optimization of Cutting Tools using CA-Technologies«. In: *Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. Hrsg. von Reimund Neugebauer. Chemnitz: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2005, S. 463–468. ISBN: 9783937524245.

- [HAO19] G. Hao u. a. »Influences of TiAlN Coating on Cutting Temperature during Orthogonal Machining H13 Hardened Steel«. In: *Coatings* 9.6 (2019), S. 355–369. DOI: 10.3390/coatings9060355.
- [HIN00] B. K. Hinds und G.M Treanor. »Analysis of stresses in micro-drills using the finite element method«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40.10 (2000), S. 1443–1456. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00007-9.
- [HOF86] M. Hoff. »Analyse und Optimierung des Bohrprozesses«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 1986.
- [HOP03] S. Hoppe. »Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2004.
- [IOV16] I. Iovkov. »Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2016.
- [IOV21] I. Iovkov, M. Bücken und D. Biermann. »A modified tool design for the drilling of high-performance aerospace materials«. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 70.1 (2021), S. 83–86. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.024.
- [KAL17] A. Kale und N. Khanna. »A Review on Cryogenic Machining of Super Alloys Used in Aerospace Industry«. In: *Procedia Manufacturing* 7 (2017), S. 191–197. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.047.
- [KIR16] M. Kirschner. »Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmesser«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2016.
- [KIR17] M. Kirschner u. a. »In situ chip formation analyses in micro single-lip and twist deep hole drilling«. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95.5-8 (2017), S. 2315–2324. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-017-1339-1.
- [KLO05] F. Klocke und W. König. *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 978-3-540-23458-6.
- [KLO06b] F. Klocke, W. König und D. Veselovac. »High frequency temperature measurements during drilling operations in TiAl6V4«. In: *CIRP International Conference on High Performance Cutting*. Bd. 2. 2006, S. 1–12.

- [KLO09] F. Klocke u. a. »Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718«. In: *Production Engineering* 3.4-5 (2009), S. 391–399. ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-009-0182-0.
- [KLO11] F. Klocke u. a. »Influence of Temperature on Surface Integrity for Typical Machining Processes in Aero Engine Manufacture«. In: *Procedia Engineering* 19 (2011), S. 203–208. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.102.
- [KLO99] F. Klocke und K. Gerschwiler. *Zerspanung von Nickelbasis- und Titanlegierungen*. Braunschweig, 12.-14. Oktober 1999.
- [KOE05] W. Koehler. »Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess«. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2005.
- [KON87] W. König und K. Gerschwiler. »Inconel 718 mit Keramik und CBN drehen«. In: *Industrieanzeiger* 1987.109 (1987).
- [KOT06] D. Kötter. »Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen«. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2006.
- [KRE07] J. Kress. »Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben«. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2007.
- [LAZ17] I. Lazoglu u. a. »Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling«. In: *CIRP Annals* 66.1 (2017), S. 105–108. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.020.
- [LEI09] L. Leitz u. a. »Verbesserung industrieller Bohrprozesse: Simulationsgestützte Optimierung von Werkzeuggeometrie und Kühlschmierstoff-Einsatz«. In: *wt Werkstattstechnik online* 99.1/2 (2009), S. 42–48.
- [LOI04] A. Loichinger. »Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoff-Versorgung von rotierenden Werkzeugen«. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2004.
- [MAZ89] M. Mazurkiewicz, Z. Kubala und J. Chow. »Metal Machining With High-Pressure Water-Jet Cooling Assistance—A New Possibility«. In: *Journal of Engineering for Industry* Vol 111/7 (1989).

- [MEY11] Roland Meyer. »Neue Schneidengeometrien zur Verbesserung des Werkzeugeinsatzverhaltens beim Hartdrehen«. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2011.
- [MIC14] J. Michna. »Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4«. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [MS15] R. M'Saoubi u. a. »High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials«. In: *CIRP Annals* 64.2 (2015), S. 557–580. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.002.
- [MUE01] B. Mueller und U. Renz. »Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities«. In: *Review of Scientific Instruments* 72.8 (2001). ISSN: 00346748. DOI: 10.1063/1.1384448.
- [MUL04] B. Müller. »Thermische Analyse des Zerspanens metallischer Werkstoffe bei hohen Schnittgeschwindigkeiten«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2004.
- [MUL18] D. Müller u. a. »Kühlkanalsaustrittsbedingungen an Wendelbohrern«. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113.7-8 (2018), S. 471–474. ISSN: 0947-0085. DOI: 10.3139/104.111947.
- [MUL19] D. Müller, B. Kirsch und J. C. Aurich. »The influence of structured flank faces on cooling performance when drilling«. In: *Procedia CIRP* 82 (2019), S. 415–420. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.274.
- [OBI13] T. Obikawa und M. Yamaguchi. »Computational Fluid Dynamic Analysis of Coolant Flow in Turning«. In: *Procedia CIRP* 8 (2013), S. 271–275. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.101.
- [OEZ16] E. Oezkaya, N. Beer und D. Biermann. »Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 108 (2016), S. 52–65. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.06.003.
- [OEZ17] E. Oezkaya und D. Biermann. »Decreasing Drill Damage«. In: *ANSYS ADVANTAGE MAGAZINE* 1 (2017), S. 24–27.
- [OEZ18] E. Oezkaya und D. Biermann. »A new reverse engineering method to combine FEM and CFD simulation three-dimensional insight into the chipping zone during the drilling of Inconel 718 with internal cooling«.

In: *Machining Science and Technology* 51 (2018), S. 1–18. ISSN: 1091-0344. DOI: 10.1080/10910344.2017.1415933.

- [OEZ19] E. Oezkaya u. a. »A thermomechanical analysis leading to a novel flank face design providing longer tool lives for tools used in the drilling of Inconel 718«. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18.102 (2019), S. 2977–2992. DOI: 10.1007/s00170-019-03417-7.
- [OEZ20] E. Oezkaya, M. Bücken und D. Biermann. »Simulative analyses focused on the changes in cutting fluid supply of twist drills with a modified flank face geometry«. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 180.105650 (2020). ISSN: 00207403. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105650.
- [OPA03] D. Opalla. »Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern«. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2003.
- [OSM79] M.O.M. Osman und G.S. Chahil. »A theoretical and experimental investigation of coolant flow in gundrilling«. In: *Internatiol Journal of Machine Tool Design and Research* 19.3 (1979), S. 143–155.
- [OZE14] T. Özel und D. Ulutan. »Effects of machining parameters and tool geometry on serrated chip formation, specific forces and energies in orthogonal cutting of nickel-based super alloy Inconel 100«. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)* 228.7 (2014), S. 673–686. ISSN: ISSN 0954-4054. DOI: 10.1177/0954405413510291.
- [OZK16] E. Oezkaya. »FEM-basiertes Softwaresystem für die effiziente 3D-Gewindebohrsimulation und Werkzeugoptimierung mittels CFD-Simulation«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2016.
- [OZK17] E. Oezkaya, S. Michel und D. Biermann. »Strömungsanalyse der Kühlschmierstoffverteilung in der Kontaktzone beim Wendeltiefbohren«. In: *Diamond Business* 4 (2017), S. 30–37.
- [PAU08] E. Pauksch u. a. *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. 12. Aufl. 2008. ISBN: 978-3-8348-9494-6.
- [PET18] G. Petuelli und J. P. Jaeger. *Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe mit innerer kryogener Minimalmengenschmierung*. Dortmund, 20.03.2018.

- [PRA15] S. Prabhu u. a. *Comparative Study on the Machining of Ti-6Al-4V Titanium Alloy and Inconel 718 Super Alloy*. Tirunelveli, Indien, 27.-28.03.2015.
- [PUS11] F. Pusavec u. a. »Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy Inconel 718«. In: *Journal of Materials Processing Technology* 211.4 (2011), S. 773–783. ISSN: ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.013.
- [RAH15] E. A. Rahim u. a. »Determination of mist flow characteristic for MQL technique using Particle Image Velocimetry (PIV) and Computer Fluid Dynamics (CFD)«. In: *Applied Mechanics and Materials* 773-774 (2015), S. 403–407. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.403.
- [REC04] M. Rechberger und J. Bertling. »Selbstschärfendes, schnitthaltiges Schneidwerkzeug für Mühlen«. Pat. DE102004052682B4. 2013.
- [REC04b] J. Rech, A. Kusiak und J. L. Battaglia. »Tribological and thermal functions of cutting tool coatings«. In: *Surface and Coatings Technology* 168.3 (2004), S. 364–371. ISSN: 02578972. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.11.027.
- [REC05] J. Rech, J. L. Battaglia und A. Moisan. »Thermal influence of cutting tool coatings«. In: *Journal of Materials Processing Technology* 159.1 (2005), S. 119–124. ISSN: ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.414..
- [REC06] J. Rech. »Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning«. In: *Surface and Coatings Technology* 200.16-17 (2006), S. 5132–5139. ISSN: 02578972. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.05.032.
- [RIS06] K. Risse. »Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2006.
- [SAM10] M. K. Samani u. a. »Thermal Conductivity of CrAlN and TiAlN Coatings Deposited by Lateral Rotating Cathode Arc«. In: *Key Engineering Materials* 447–448 (2010), S. 705–709. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.705.
- [SAM15] M. K. Samani u. a. »Thermal conductivity of titanium nitride/titanium aluminum nitride multilayer coatings deposited by lateral rotating

cathode arc«. In: *Thin Solid Films* 578 (2015), S. 133–138. DOI: 10.1016/j.tsf.2015.02.032.

- [SAM17] G. S. Samy und S. Thirumalai Kumaran. »Measurement and analysis of temperature, thrust force and surface roughness in drilling of AA (6351)-B 4 C composite«. In: *Measurement* 103 (2017), S. 1–9. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.02.016.
- [SAT13] W. Satana u. a. »Computational Study of the High Temperature Heat Transfer Coefficient for Different Cutting Fluids«. In: *Advanced Science Letters* 19.3 (2013), S. 726–730. ISSN: 19366612. DOI: 10.1166/asl.2013.4840.
- [SCH18b] J. Schneider, B. Lund und M. Fullen. »Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens«. In: *Additive Manufacturing* 21 (2018), S. 248–254. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.005.
- [SEL09] D. Sellmer. »Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung«. Dissertation. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2009.
- [SHA08] A.R.C. Sharman, A. Amarasinghe und K. Ridgway. »Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718«. In: *Journal of Materials Processing Technology* 200.1-3 (2008), S. 424–432. ISSN: ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.080.
- [SHA09] V. S. Sharma, M. Dogra und N. M. Suri. »Cooling techniques for improved productivity in turning«. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49.6 (2009), S. 435–453. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.12.010.
- [SHO13] A. Shokrani und V. Dhokia. »State-of-the-art cryogenic machining and processing«. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26 (7) (2013), S. 616–648.
- [SPU60] G. Spur. »Beitrag zur Schnitkraftmessung beim Bohren mit Spiralbohrern unter Berücksichtigung der Radialkräfte«. Dissertation. Braunschweig: Technische Hochschule Braunschweig, 1960.
- [TER11] I. Terwey. »Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2011.

- [THA15] A. Thakare und A. Nordgren. »Experimental Study and Modeling of Steady State Temperature Distributions in Coated Cemented Carbide Tools in Turning«. In: *Procedia CIRP* 31 (2015), S. 234–239. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.024.
- [TIK93] F. Tikal. *Vollhartmetallbohrer und -fräser: Qualität und Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 1993.
- [TRE96] C. Treffert. »Bearbeitung von Nickelbasislegierungen am Beispiel einer Triebwerkskomponente«. In: *VDI Berichte* 1996.1279 (1996).
- [UED07] T. Ueda, R. Nozaki und A. Hosokawa. »Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling -Effect of Oil Mist-«. In: *CIRP Annals* 56.1 (2007), S. 93–96. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.024.
- [UED08] T. Ueda u. a. »Development of infrared radiation pyrometer with optical fibers—Two-color pyrometer with non-contact fiber coupler«. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57.1 (2008), S. 69–72. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.056.
- [ULU11] D. Ulutan und T. Ozel. »Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review.« In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011), S. 250–280. ISSN: 08906955.
- [UMB13] D. Umbrello. »Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718«. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69.9-12 (2013), S. 2183–2190. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-013-5198-0.
- [VER07] H. K. Versteeg und W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. 2nd ed. Harlow, England und New York: Pearson Education Ltd., 2007. ISBN: 9780131274983.
- [VES13] D. Veselovac. »Process and product monitoring in the drilling of critical aero engine components«. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2013.
- [VES14] D. Veselovac, S. Gierlings und M. Brockmann. »Process monitoring for manufacturing of critical aero engine components: An overview«. In: *ASME Turbo Expo 2014* 6 (2014).
- [VIM15] M. Vimalash, S. Prabhu und K. S. Vijay Sekar. »Machinability Studies in Drilling of Inconel 718 Super Alloy«. In: *Applied Mechanics and Materials* 787 (2015), S. 480–484. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.787.480.

- [WAL12] Walter AG. *Zwei Wendeplattengruppen mit optimierten Geometrien*. Thalwil, Schweiz, 2012.
- [WAR74] G. Warnecke. *Spanbildung bei metallischen Werkstoffen*. Gräfelfing: Technischer Verlag Resch, 1974.
- [WES07] T. Wessels. »Bohren in Titan- und Nickelbasislegierungen«. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2007.
- [WOL19] M. Wolf. »Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2019.
- [WU09] J. Wu und R. D. Han. »A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model«. In: *Journal of Manufacturing Processes* 11.1 (2009), S. 19–30. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2009.07.001.
- [ZHA12] S. Zhang, J. F. Li und Y. W. Wang. »Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions«. In: *Journal of Cleaner Production* 32 (2012), S. 81–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.014.
- [ZHA14] L.J. Zhang. »Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718«. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2014.
- [ZHA21] J. Zhao u. a. »Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions: Comprehensive review and future research directions«. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 150.107302 (2021). DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107302.

Im Rahmen dieser Dissertation betreute studentische Arbeiten

Diese Arbeit wurde auf Basis der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen und der dabei gewonnenen Messdaten angefertigt. Zu diesem Zweck wurden vom Autor die folgenden studentischen Arbeiten thematisch ausgelegt und betreut, aus denen ausgewählte Daten Eingang in diese Arbeit gefunden haben. Für die Durchführung der Versuche möchte ich allen Studierenden meinen besonderen Dank aussprechen.

Bechler, N.: *Analyse des Einflusses einer Verschleißschutzbeschichtung auf das Wärmeabgabeverhalten einer Freiflächenmodifikation an VHM-Wendelbohrern*.

Fachwissenschaftliche Projektarbeit, ISF, TU Dortmund, 2021.

Verwendet in Kapitel 7.4.7.

Haase, M.: *Untersuchungen zum Standzeitverhalten von VHM-Bohrwerkzeugen bei der Bearbeitung von Inconel 718*. Bachelorarbeit, ISF, TU Dortmund, 2017.

Verwendet in Kapitel 5.1, 6.4.3, 6.4.1, 6.4.2, und 7.4.1.

Haase, M.: *Analyse der Randzonenbeeinflussung bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Fachwissenschaftliche Projektarbeit, ISF, TU Dortmund, 2018.

Verwendet in Kapitel 7.4.3.

Hensler, U.: *Untersuchungen zum Einfluss einer modifizierten Freifläche von VHM-Wendelbohrern auf die Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Bachelorarbeit, ISF, TU Dortmund, 2020. Verwendet in Kapitel 7.4.1 und 7.4.2.

Schad, C.: *Analyse der Schneidenbelastung bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Bachelorarbeit, ISF, TU Dortmund, 2017. Verwendet in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3.

Strodick, S.: *Analyse der thermischen Werkzeugbelastung bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Masterarbeit, ISF, TU Dortmund, 2018.

Verwendet in Kapitel 5.2.4 und 7.4.2.

Sygor, C.: *Untersuchungen zum Einfluss modifizierter Freiflächen von VHM-Wendelbohrern auf die Bohrungsqualität bei der Bearbeitung von Inconel 718*.

Fachwissenschaftliche Projektarbeit, ISF, TU Dortmund, 2021.

Verwendet in Kapitel 7.4.3.

Zimon, M.: *Untersuchungen zum Standzeitverhalten von VHM-Bohrwerkzeugen mit modifizierter Freiflächengestalt bei der Bearbeitung von Inconel 718*. Bachelorarbeit, ISF, TU Dortmund, 2019. Verwendet in Kapitel 6.4.3, 6.4.1, 6.4.2 und 7.4.1.

Zimon, M.: *Untersuchungen zum Einfluss einer modifizierten Freifläche auf den Kühlschmierstofffluss bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Masterarbeit, ISF, TU Dortmund, 2021. Verwendet in Kapitel 7.4.4.

Bisherige 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 3-8027-8760-9
- Band 105 Jaeger, J.: *Wendeltiefbohren kleinster Durchmesser in schwer zerspanbare Werkstoffe mit kryogener Minimalmengenschmierung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN: 978-3-8027-8921-2
- Band 104 Bathe, T.: *Untersuchungen zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2020, ISBN: 978-3-8027-8919-9
- Band 103 Hannich, S.: *Experimentelle und simulative Untersuchungen zum stirnseitigen Fließbohren von Leichtmetallen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2020, ISBN: 978-3-8027-8920-5
- Band 102 Kansteiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton*. Dissertation, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: *Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern*. Dissertation, 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, 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, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: *Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschälenschleifens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8914-4
- Band 94 Böhmer, J.: *Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzstrukturen beim Honen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8799-7
- Band 93 Hense, R.: *Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Turbinenschaufeln*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: *Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelemente und funktionaler Oberflächenstrukturen*. Dissertation, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: *Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens*. Dissertation, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5

-
- Band 88 Abrahams, A.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*. Dissertation, 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 Durchmesser*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinishen*. Dissertation, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, 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, 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, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2

- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannungen 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, 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 NiTi*. 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 fünfachsiges 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 Fräsworkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720X

- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 18 Löbbe, 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-Längsschleifens 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, Ch.: *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

