



87

tu technische universität
dortmund

Technische Universität Dortmund
44221 Dortmund

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

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

Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen
mit kleinsten Durchmessern

Kirschner

Marko Kirschner

Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern

Schriftenreihe des ISF
Hrsg.: Dirk Biermann

ISBN 978-3-8027-8791-1



 **Vulkan Verlag**

 **ISF**

Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Marko Kirschner

aus

Jever

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

Dortmund, 2016

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 978-3-8027-8791-1

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. Dirk Biermann, danke ich für seine stete Förderung und persönliche Unterstützung sowie die große Gestaltungsfreiheit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation (FBK) der Technischen Universität Kaiserslautern, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich, gilt mein Dank für die Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. Dr. h. c. Klaus Weinert, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Spanende Fertigung, für die Übernahme des zweiten Koreferats sowie Frau Jun. Prof. Dr.-Ing habil. Sandra Klinge für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Teile der in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse sind im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse für das Tiefbohren kleinster Durchmesser von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen“ entstanden, für dessen Förderung ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken möchte. Weiterhin möchte ich mich für die Unterstützung aus der Werkzeugmaschinen- und Werkzeugindustrie bedanken. In diesem Zusammenhang möchte ich Herrn Hermann Randecker (TBT Tiefbohrtechnik GmbH & Co) sowie Herrn Jürgen Wenzelburger und Herrn Armin Kullik (botek Präzisionsbohrtechnik GmbH) hervorheben. Sehr dankbar bin ich zudem Herrn Dr.-Ing. Hans Fuß (BGTB GmbH und Vorsitzender des Fachausschusses Präzisions- und Tiefbohren des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)) für die interessanten Gespräche und Anekdoten rund um das Thema Tiefbohren.

Mein herzlicher Dank gilt den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des ISF, insbesondere den Kollegen aus der Abteilung Zerspanung, für die gute Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Diskussionen. Das hervorragende Arbeitsklima und die allzeit vorherrschende Hilfsbereitschaft am ISF werde ich immer in guter Erinnerung behalten. Besonderer Dank gilt Moritz Fuß, Stefan Hannich, Yang Liu, Marcel Tiffe, Florian Vogel, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Henning Hartmann sowie Dr.-Ing. Ivan Iovkov für das freundschaftliche Verhältnis und die gegenseitige Unterstützung. Meinem Bürokollegen Maximilian Metzger danke ich für die zahlreichen Diskussionen über rein berufliche Themen hinaus, die Korrektur meiner Arbeit sowie die Bereitschaft zur Akklimatisation in Raum R2.025. Meinem langjährigen Freund und Mitstreiter Dr.-Ing. Hendrik Abrahams danke ich für einen unvergesslichen gemeinsamen Weg seit der Schulzeit. Darüber hinaus möchte ich mich bei Martin Gerwert, Wolfram Krückendorf und Michael Kater für die technische Unterstützung bei der Versuchsdurchführung sowie bei Nicole Kneppé für das Lektorat meiner Arbeit bedanken. Weiterhin gilt mein Dank meinen studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Abschlussarbeitern für die gute Zusammenarbeit und ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit, von denen ich an dieser Stelle Sebastian Berger, Daniel Eberhardt, Julian Freiesleben, Florian Husemeier, Marc Mittelbach und Benjamin Naal besonders hervorheben möchte.

Im privaten Bereich danke ich meinen Freunden und meinem Bruder Martin für die Unterstützung. Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir den Bildungsweg bis hin zur Promotion ermöglicht und mich auf diesem immer liebevoll bestärkt haben. Gleiches möchte ich meinen wunderbaren Großeltern aussprechen, deren Hingabe an die Familie keine Grenzen kennt. Euch möchte ich diese Arbeit widmen.

Marko Kirschner

Marko Kirschner

Dortmund, Dezember 2016

Kurzfassung

In der industriellen Praxis werden hochbelastbare und leistungsfähige Werkstoffe zur Verbesserung der Bauteileigenschaften und Erhöhung der Ressourceneffizienz stets nachgefragt und halten in anspruchsvollen Anwendungen kontinuierlich Einzug. Zwei Werkstoffgruppen, die in diesem Zusammenhang in den Fokus der Automobil-, Luft-, und Raumfahrtindustrie sowie weiterer Anwendungsbranchen gelangt sind, sind hochfeste bainitische Stähle und hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen. Den herausragenden Materialeigenschaften steht dabei eine besonders schwierige Zerspanbarkeit dieser Werkstoffe gegenüber. Eine wirtschaftliche Fertigung ist jedoch eine notwendige Voraussetzung, um das Potenzial der Verwendung von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen vollständig ausschöpfen zu können. Eine Anpassung und Weiterentwicklung bestehender Fertigungstechnologien ist daher unerlässlich.

In der vorliegenden Arbeit wird die Erzeugung von Tiefbohrungen mit kleinsten Durchmessern und großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen unter Einsatz mechanischer Verfahren detailliert untersucht. Das Einlippen- und Wendeltiefbohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern bringt dabei zusätzliche Problematiken in Form sehr geringer Werkzeugsteifigkeiten, hoher mechanischer Werkzeugbelastungen aufgrund der begrenzt realisierbaren Vorschubraten und der folglich hohen Quetsch- und Reibvorgänge im Bereich der Schneidkantenverrundung sowie eines erschwerten Spanabtransportes durch die limitierten Spanraumquerschnitte mit sich. Zur Begegnung der umfassenden werkstoff- und verfahrensspezifischen Herausforderungen und zur Erzielung einer prozesssicheren und produktiven Tiefbohrbearbeitung erfolgt für beide Werkstoffgruppen eine dezidierte Werkzeug- und Prozessauslegung. In den experimentellen Untersuchungen wird der Einfluss der Schnittdaten, der Werkzeuggestalt hinsichtlich des Schneidenschliffes, der Zusammensetzung der Werkzeugbeschichtung und der Schichtdicke sowie des Kühlschmierstoffes für das Einlippentiefbohren evaluiert. Darüber hinaus zeigt eine Gegenüberstellung des Einlippen- und Wendeltiefbohrens die Vor- und Nachteile beider Verfahren auf. Zur Bewertung der unterschiedlichen Einflussgrößen wird eine umfangreiche Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, des Werkzeugverschleißes und der Bohrungsqualität hinsichtlich der Maß- und Formtoleranzen und der Oberflächenqualität durchgeführt. Eine neu entwickelte Analysemethodik ermöglicht zudem erstmals eine tiefergehende Betrachtung der Spanformung an den Werkzeugschneiden sowie des Spanabtransportes entlang der Spannuten beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern. Hierbei werden Werkstoffproben aus dem jeweiligen Versuchsmaterial in blickdurchlässige Acrylglaträger eingebracht und die Spanbildungsvorgänge im Bereich der Wirkstelle mithilfe der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie dokumentiert. Der Einsatz der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse trägt gleichzeitig zu einer deutlichen Steigerung des allgemeinen Prozessverständnisses bei.

Eine abschließende Gegenüberstellung der charakteristischen Prozesskenngrößen und der technologischen Zusammenhänge für das Tiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern verdeutlicht das stark voneinander abweichende tribologische Einsatzverhalten. Die differierenden Verschleißmechanismen und damit verbundenen Verschleißerscheinungsformen resultieren in sehr individuellen Anforderungen an eine effiziente Werkzeug- und Prozessauslegung. Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen werden Empfehlungen für die industrielle Praxis abgeleitet, die zukünftig eine stabile und wirtschaftliche mechanische Fertigung von Tiefbohrungen mit kleinsten Durchmessern unter gleichzeitiger Realisierung einer hohen Bohrungsqualität für beide Werkstoffgruppen ermöglichen.

Abstract

In industrial practice, high-strength and performance-orientated materials contribute to enhance component properties and to improve resource efficiency. Consequently, these materials are constantly in demand and used more and more frequently in challenging applications. Within this context, high-strength bainitic steels as well as high-temperature-proof nickel-based alloys are two of these material groups which are focused increasingly by automotive, aerospace and other applications sectors. The excellent material properties are linked to a sophisticated machining ability. Nevertheless, an economical manufacturing is an essential requirement to exploit the full potential of the use of high-strength bainitic steels and high-temperature-proof nickel-based alloys. Therefore, it is absolutely indispensable to adopt and optimize existing manufacturing technologies.

The research activities described in this thesis focus on the production of deep bore holes with smallest diameters and high length-to-diameter-ratios based on mechanical processes. However, additional difficulties arise when single-lip and twist deep hole drilling with smallest tool diameters are applied. Mentionable examples are very low tool rigidities, high mechanical tool loads owing to the limitedly realizable feed rates and the subsequently strong material squeezing and friction in the rounding of the cutting edge as well as the complicated chip removal through the small cross-sections of the chip flutes. In order to encounter the material- and process-specific challenges and to achieve a stable and productive deep hole drilling, a determined tool and process design for both materials is carried out. In the course of the experimental investigations the influence of the cutting data, the tool design with respect to the cutting tip design, the tool coating composition and the coating thickness as well as the cooling lubricant in single-lip deep hole drilling is evaluated. Furthermore, a comparison of single-lip and twist deep hole drilling shows the advantages and disadvantages of both manufacturing processes. A comprehensive analysis of the mechanical tool loads, chip formation, tool wear and bore hole quality regarding the dimension and form tolerances as well as the surface quality is made to evaluate the various influencing variables. Additionally, a newly developed methodology of analysis allows a closer look on the chip formation at the corresponding cutting edges and the chip removal along the chip flutes in smallest diameter deep hole drilling for the very first time. Here, samples made of the particular test materials are inserted in transparent acrylic glass carriers and the chip formation in the operating zone is documented by high-speed microscopy. At the same time, the findings of this high-speed chip formation analysis contribute to a substantial increase in fundamental process knowledge.

A concluding comparison of the representative process characteristics and the technological correlations in deep hole drilling of high-strength bainitic steels and high-temperature-proof nickel-based alloys with smallest diameters clarifies the significantly divergent tribological application behavior. The differing mechanisms of tool wear as well as the related wear forms result in very individual and particular requirements on an efficient tool and process design. Based on the achieved knowledge, recommendations for the industrial practice are derived which facilitate a reliable and cost-efficient mechanical manufacturing of deep bore holes with smallest diameters for both materials, while simultaneously ensuring high bore hole quality in future.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	III
Formelzeichen	V
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Prozesstechnische Grundlagen	3
2.1.1 Einlippentiefbohren	4
2.1.2 Wendeltiefbohren	12
2.1.3 Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern	18
2.2 Werkstofftechnische Grundlagen	21
2.2.1 Hochfeste bainitische Stähle.....	21
2.2.2 Hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen.....	26
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4 Experimentelle Randbedingungen.....	37
4.1 Versuchswerkstoffe	37
4.1.1 Bainitischer Stahl 20MnCrMo7.....	37
4.1.2 Nickelbasislegierung Inconel 718.....	38
4.2 Versuchsmaschine	40
4.3 Versuchswerkzeuge.....	42
4.4 Versuchsdurchführung	44
4.5 Mess- und Analysetechnik	48
4.5.1 Mechanische Werkzeugbelastungen	48
4.5.2 Spanbildung.....	49
4.5.3 Werkzeugverschleiß	49
4.5.4 Bohrungsqualität	50
5 Spanbildungsanalyse beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern	51
mittels Hochgeschwindigkeitsmikroskopie	51
5.1 Konzeption und Entwicklung der wirkstellennahen Analysemethodik.....	51
5.2 Integration des Versuchsaufbaus in die konventionelle Tierbohrmaschine.....	52
5.3 Dimensionierung und Fertigung der Versuchsproben.....	54
5.4 Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen	56
6 Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7	59
6.1 Vorversuche zur Identifikation prozessgünstiger Schnittdaten	59
6.2 Einsatzversuche unter Variation des Schneidenanschliffes	66
6.3 Analyse des Einflusses der Werkzeugbeschichtung	77
6.4 Analyse des Kühlschmierstoffeinflusses	85
6.5 Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte	90

7	Tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718	99
7.1	Vorversuche zur Identifikation prozessgünstiger Schnittdaten	99
7.2	Einsatzversuche unter Variation des Schneidenanschliffes	102
7.3	Analyse des Kühlschmierstoffeinflusses	111
7.4	Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte	116
8	Prozessgestaltung für das Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern	125
8.1	Gegenüberstellung von charakteristischen Prozesskenngrößen	125
8.2	Empfehlungen für günstige Werkzeug- und Prozessparameter	128
9	Zusammenfassung und Ausblick	133
10	Literaturverzeichnis	135

Abkürzungen

Abkürzung Bedeutung

AFP	Ausscheidungshärtender ferritisch-perlitischer Stahl
Al	Aluminium
AlCrN	Aluminiumchromnitrid
AlTiN	Aluminiumtitannitrid
AlTiN-TiSiN	Aluminiumtitannitrid-Titansiliziumnitrid
AlTiN-TiN	Aluminiumtitannitrid-Titannitrid
AS	Außenschneide
AW	Anti-wear, Anti-Verschleiß
B	Bor
BTA	Boring and Trepanning Association
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design, Rechnergestütztes Konstruieren
CCD	Charge Coupled Device, Ladungsgekoppeltes Bauteil
CNC	Computerized Numerical Control, Rechnergestützte numerische Steuerung
Co	Cobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CrAlN	Chromaluminiumnitrid
ECM	Electrochemical Machining, elektrochemisches Abtragen
EP	Extreme Pressure, extremer Druck
EDM	Electro Discharge Machining, Funkenerodieren
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ELB	Einlippentiefbohrer
ER	Engagement Ratio, Eingriffsverhältnis
Fe	Eisen
fps	Frames per second, Bildrate
HB	Brinellhärte
HC	Beschichtetes Hartmetall
HF	Hochfrequenz
HS	Hauptschneide
HSS	High Speed Steel, Schnellarbeitsstahl
HV	Vickershärte

IS	Innenschneide
ISO	International Organization for Standardization
IT	ISO-Toleranz
KSS	Kühlschmierstoff
l/D	Bohrungstiefe-zu-Durchmesser-Verhältnis
MB	Metallboride
MC	Metallkarbide
Mo	Molybdän
Mn	Mangan
N	Stickstoff
Nb	Niob
NC	Numerical Control, Numerische Steuerung
Ni	Nickel
P	Phosphor
PVD	Physical Vapour Deposition, Physikalische Gasphasenabscheidung
QS	Querschneide
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schwefel
Si	Silizium
Sn	Zinn
SA	Sonderanschliff
SiN	Siliziumnitrid
Ta	Tantal
Ti	Titan
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiCN	Titankarbonnitrid
TiN	Titannitrid
TiSiN	Titansiliziumnitrid
TS	Teilschneide
V	Vanadium
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHM	Vollhartmetall
W	Wolfram
WTB	Wendeltiefbohrer
Zr	Zirkonium

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Freiwinkel
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
γ_{eff}	°	effektiver Spanwinkel
γ_{nom}	°	nomineller Spanwinkel
γ_{S}	°	Seitenspanwinkel
ν	mm ² /s	kinematische Viskosität
ρ	g/cm ³	Dichte
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ_{s}	-	Spandickenstauchung
λ_1	nm	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung
φ	°	Drallwinkel
σ	°	Spitzenwinkel
Φ	°	Scherwinkel
K	°	Einstellwinkel
K_1	°	Einstellwinkel der Außenschneide
K_2	°	Einstellwinkel der Innenschneide
K_3	°	Einstellwinkel der dritten Teilschneide
A	%	Bruchdehnung
c	%	Konzentration
d	mm	Werkzeughdurchmesser
d_{rk}	mm	Rubinkugeldurchmesser
D	mm	Bohrungsdurchmesser
D_{a}	mm	Außendurchmesser
f	µm	Vorschub pro Umdrehung
F_{c}	N	Schnittkraft
F_{f}	N	Vorschubkraft
F_{p}	N	Resultierende Passivkraft
$F_{\text{p,AS}}$	N	Passivkraft an der Außenschneide
$F_{\text{p,IS}}$	N	Passivkraft an der Innenschneide
$F_{\text{p,RSF}}$	N	Passivkraft an der Rundschliffase
FLR	mm	Führungsleistenrückversatz
h	µm	Spanungsdicke

h_l	μm	Spandicke
h_a	μm	Höhe der Aufbauschneide
H_m	HB	mittlere Härte
KG	μm	mittlere Korngröße
l	mm	Länge
l_f	mm	Bohrweg
L_f	mm	Standweg
l_{sp}	mm	Spanlänge
l_t	mm	Bohrtiefe
$l_{t,PB}$	mm	Pilotbohrungstiefe
M_b	Nm	Bohrmoment
n	min^{-1}	Spindeldrehzahl
p_{KSS}	bar	Kühlschmierstoffdruck
P_s	kW	Spindelleistung
P_o	mW	optische Leistung
Δr	mm	Mittenverlauf
r_B	μm	Schneidkantenradius
r_t	μm	Tastspitzenradius
R_a	μm	arithmetischer Mittenrauwert
RZ	μm	gemittelte Rautiefe
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Streckgrenze
s_d	μm	Schichtdicke
t	s	Zeit
T_k	μm	Rundheitsabweichung
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T_{max}	$^{\circ}\text{C}$	maximale Einsatztemperatur
U	μm	Messunsicherheit
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
VB	μm	mittlere Verschleißmarkenbreite
VB_{max}	μm	maximale Verschleißmarkenbreite
z	mm	Zustelltiefe im Entspanzyklus

1 Einleitung

Infolge der globalen Erwärmung gewinnen der nachhaltige Einsatz von Ressourcen und die Reduzierung von Abgasen immer mehr an Bedeutung. In den kommenden Jahren werden daher die industriellen Bestrebungen zur Senkung der Treibhausgase zunehmend in den Fokus rücken. Mit Blick auf die unterschiedlichen Sektoren hat dabei, nach der Energiewirtschaft und der produzierenden Industrie, der Verkehr den größten Anteil an der Gesamtproduktion von Treibhausgasen [Uba15]. Durch den gesellschaftlichen Trend zur Mobilität bei wachsenden Leistungs- und Komfortansprüchen ist zukünftig mit einem deutlichen Anstieg der weltweiten Produktion von Verbrennungsmotoren für Personenkraftwagen und leichte Nutzkraftwagen in der Automobilindustrie zu rechnen [Abe14, Mey13]. Gleichzeitig nehmen der Flugverkehr und somit die Produktion von Triebwerken in der Luftfahrtindustrie stetig zu [Dir15]. Um den gesetzlichen Umweltauflagen und den definierten Meilensteinen gerecht zu werden, sind seitens dieser Industriebranchen kontinuierliche werkstoff- und verfahrenstechnische Weiterentwicklungen unabdingbar [Ger10, Hoc11].

Eine Steigerung der Effizienz von Verbrennungsmotoren in der Automobilindustrie und von Gasturbinen in der Luftfahrt- und Energietechnik verlangt den Einsatz von hochbelastbaren und leistungsfähigen Bauteilen [Abe14, Ger10, Hoc11]. Zwei Werkstoffgruppen, die in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung gewinnen, sind hochfeste bainitische Stähle und hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen [Gra14, Han12, Vdi15]. Bainitische Stähle zeichnen sich durch ihre hohen Festigkeiten bei gleichzeitig guten Zähigkeitswerten aus und besitzen großes Potenzial für die Verwendung in Komponenten aus dem Antriebsstrang. Die Herstellung bainitischer Gefüge kann unmittelbar aus der Walz- oder Schmiedehitze erfolgen, woraus geringe Herstellungs- und Werkstoffkosten im Vergleich zu gegenwärtig noch verbreiteten Vergütungsstählen resultieren [Eng11, Mer14]. Nickelbasislegierungen charakterisieren sich demgegenüber durch ihre ausgezeichnete Hochtemperaturfestigkeit, Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit. Durch ihre hohe thermomechanische Belastbarkeit bieten Nickelbasislegierungen ideale Voraussetzungen für die Verwendung in Ventiltriebkomponenten im Auslassbereich von Verbrennungsmotoren sowie in Verdichter- und Turbinenscheiben von Gasturbinen [Don03, Ree06, Sch15]. Demgegenüber stellen bainitische Stähle und Nickelbasislegierungen durch ihre Materialeigenschaften besondere Herausforderungen an die spanende Fertigung [Bom07, Cho98, Har13, Oka11]. Das Potenzial dieser leistungsfähigen Werkstoffe lässt sich dabei nur dann vollständig ausschöpfen, wenn eine wirtschaftliche Bearbeitung sichergestellt wird. Zu diesem Zwecke ist eine kontinuierliche und intensive Weiterentwicklung vorhandener Technologien zwingend notwendig.

Ein Fertigungsverfahren, dem in den beschriebenen Einsatzgebieten große Bedeutung zukommt, ist das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern. Ein konkretes Anwendungsfeld für das Tiefbohren bainitischer Stähle mit kleinsten Durchmessern liefert dabei die Erzeugung der Zu- und Rückläufe sowie die Ventilsteuerbohrungen für die Kraftstoffeinspritzung in Injektorhaltekörpern [Han12, Eng11, Mer14]. Anwendungsbeispiele für das Tiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern liegen in der Fertigung von natriumgefüllten Auslassventilen für Verbrennungsmotoren und der Herstellung von natriumgefüllten Heat Pipes in Turbinenscheiben. In beiden Fällen dient das flüssige Natrium der Wärmeabfuhr und reduziert die vorherrschenden Temperaturen und Spannungen in den kritischen Bauteilbereichen [Cao13, Eis15, Fuc15, Sch15]. Trotz der großen industriellen Relevanz liegen zum mechanischen Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Werkzeugdurchmessern und größeren Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, die werkstoff- und verfahrensspezifischen Herausforderungen zu überwinden und die Voraussetzungen für ein prozesssicheres und produktives Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern zu schaffen. Den

Schwerpunkt der Untersuchungen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren bildet eine individuelle Werkzeug- und Prozessauslegung für beide Werkstoffe. Im Rahmen dessen werden die Einflüsse der Schnittdaten, der Werkzeuggestaltung, des Kühlschmierstoffes und des Werkzeugkonzeptes auf die resultierenden mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung, den Werkzeugverschleiß und die Bohrungsqualität detailliert betrachtet. Gleichzeitig werden die technologischen Zusammenhänge der einzelnen Prozesskenngößen analysiert und die wesentlichen Herausforderungen beim Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen herausgestellt. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Empfehlungen für industrielle Anwendungen abgeleitet. Der Spanbildung wird aufgrund der hohen Bedeutung für die Prozessstabilität das analytische Hauptaugenmerk gewidmet. Zu diesem Zweck wird eine neue Analysemethodik zur Visualisierung und Aufnahme der Spanbildung mithilfe der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie konzipiert und eingesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Spanbildungsanalysen tragen dabei auch grundlegend zur Steigerung des Prozessverständnisses für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern bei.

2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel erläutert die prozess- und werkstofftechnischen Grundlagen. In den prozess-technischen Grundlagen werden zunächst die eingesetzten Fertigungsverfahren Einlippen- und Wendeltiefbohren vorgestellt. Im Anschluss wird auf die Herstellung, Eigenschaften und Zerspanbarkeit von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen eingegangen.

2.1 Prozesstechnische Grundlagen

Das Tiefbohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Bohrungen mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen von $l/D = 10 \dots 400$. Aufgrund der hohen Produktivität und der dabei erreichbaren Bohrungsqualitäten findet das Tiefbohren gelegentlich auch bei Verhältnissen zwischen Bohrungstiefe und Bohrungsdurchmesser kleiner zehn Anwendung [VDI3208, VDI3210]. Die Wahl des Tiefbohrverfahrens ist dabei abhängig vom zu bearbeitenden Bohrungsdurchmesser. **Abbildung 1** zeigt eine durchmesserbezogene Zuordnung der mechanischen Tiefbohrverfahren.

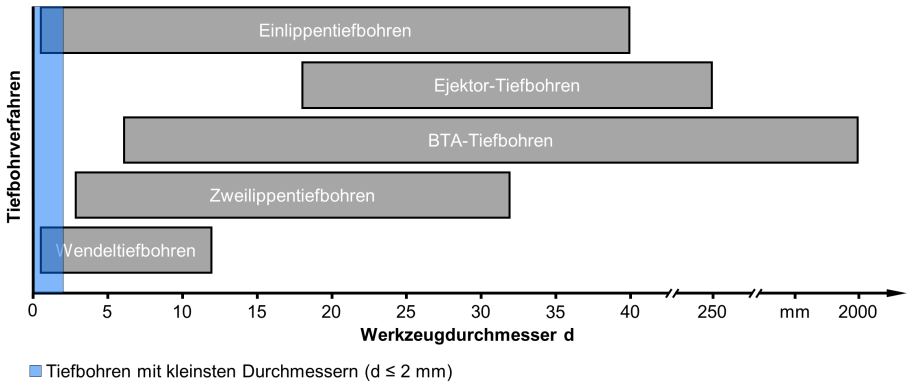


Abbildung 1: Durchmesserbezogene Klassifizierung der Tiefbohrverfahren nach [VDI3208, VDI3210, VDI3211]

Mit Blick auf die klassischen Tiefbohrverfahren mit asymmetrischem Werkzeugaufbau wird zwischen dem Einlippentiefbohren ($D = 0,5 \dots 80$ mm), dem Ejektor-Tiefbohren ($D = 18 \dots 250$ mm) und dem BTA (Boring and Trepanning Association)-Tiefbohren ($D = 6 \dots 2000$ mm) unterschieden [VDI3208, VDI3210]. Das Zweilippentiefbohren ($D = 2,8 \dots 32$ mm) ermöglicht bei kurzspanenden Werkstoffen die Realisierung von Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen $l/D \geq 30$ und wird daher den verwandten Tiefbohrverfahren zugeordnet [VDI3211]. Durch eine kontinuierliche Werkzeugentwicklung und die konzeptbedingt hohe Wirtschaftlichkeit hält zudem das Wendeltiefbohren ($D = 0,5 \dots 12$ mm), mit dem sich je nach Anwendung Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse bis $l/D = 40$ ohne Entspannen, d. h. mit kontinuierlicher Vorschubbewegung, realisieren lassen, zunehmend Einzug [Abe07, Eli08, Mü106]. Neben den genannten konventionellen Verfahren kommen eine Reihe von nicht-konventionellen Verfahren, wie z. B. das Laserbohren, das Funkenerodieren (EDM) oder Elektrochemisches Abtragen (ECM), zur Herstellung von Tiefbohrungen mit kleinsten Durchmessern zum Einsatz [Alt03, Ehn08, Foe11]. Die nicht konventionellen Verfahren erweisen sich jedoch in vielen Anwendungen aufgrund der limitierten Bauteilintegrität und Wirtschaftlichkeit als nicht oder nur wenig geeignet [Eck08, Hei12]. Das mechanische Tiefbohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern $d \leq 2$ mm erfolgt ausschließlich durch das Einlippen- und Wendeltiefbohren. Auf beide Verfahren wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1.1 Einlippentiefbohren

Das Tiefbohren mit Einlippenbohrern kommt im Durchmesserbereich von $d = 0,5 \dots 80$ mm zur Realisierung von Bohrungen mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen bis $l/D = 400$ in zahlreichen Industriebranchen zum Einsatz [VDI3208, VDI3210]. Industrielle Anwendungsbeispiele sind z. B. die Fertigung von Getriebewellen, Kurbelwellen, Ventilen und Injektoren für die Automobilindustrie, die Produktion von Gewehrläufen für die Waffenindustrie, die Fabrikation von Lebens- und Futtermittelmatrizen für die Lebensmittel- und Agrarindustrie, die Herstellung von Kühlluftbohrungen in Flugantrieben der Luft- und Raumfahrt sowie die Erzeugung von kanülierten Implantaten und chirurgischen Instrumenten. Tiefbohrungen mit besonders großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen werden auch in Form von Kühlbohrungen im Werkzeug- und Formenbau sowie zur Versorgung mit elektrischer Energie und zum Datentransfer in Bohrgestängen der Offshore-Industrie benötigt. Der allgemeine Maschinenbau liefert eine Vielzahl weiterer Anwendungen, die unter anderem der Herstellung von pneumatischen und hydraulischen Versorgungsbohrungen durch das Einlippentiefbohren bedürfen [Fel11, Gla10, Löb03, Top01, Wit07].

Der Werkzeugaufbau besteht grundlegend aus den drei Elementen Bohrkopf, Werkzeugschaft und Einspannhülse. Der Bohrkopf aus Hartmetall und der Werkzeugschaft aus gehärtetem Stahl sind über eine stoffschlüssige Lötverbindung oberhalb der Richthülse miteinander verbunden. Darüber hinaus existieren Sonderlösungen für Einlippenbohrer mit Werkzeugdurchmessern $d \geq 12$ mm, bei denen wechselbare Schneidplatten und Führungsleisten auf einen Bohrkopf aus Stahl aufgelötet oder mit diesem verschraubt werden. Bei Einlippentiefbohrern mit kleinsten Werkzeugdurchmessern bestehen Bohrkopf und Werkzeugschaft aus Vollhartmetall [Hei12, VDI3208]. Die Werkzeugaufnahme und die Einleitung des Drehmomentes beim Tiefbohren erfolgt über die Einspannhülse (**Abbildung 2**).

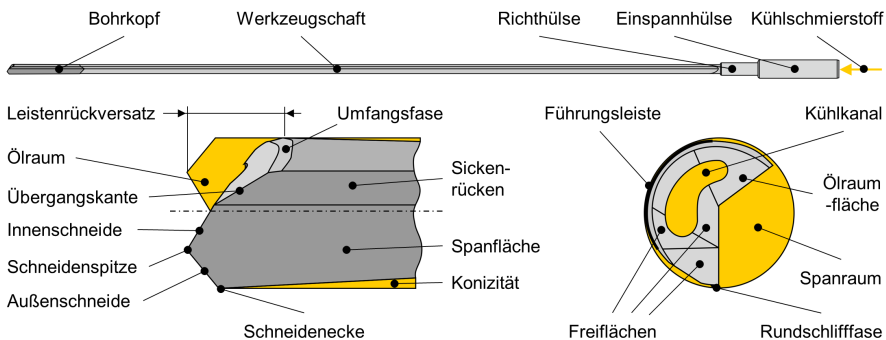


Abbildung 2: Grundlegender Werkzeugaufbau eines Einlippentiefbohrers [nach VDI3208]

Die Zufuhr des Kühlschmierstoffes erfolgt über einen oder mehrere Kühlkanäle innerhalb des Werkzeuges. Einlippentiefbohrer mit kleineren Werkzeugdurchmessern aus Vollhartmetall weisen einen nierenförmigen Kühlkanal auf, wogegen größere Durchmesser mit aufgelöteten Bohrköpfen regulär zwei kreisrunde Kühlkanäle enthalten [Ket10]. Die nierenförmigen Kühlkanalquerschnitte weisen gegenüber der konventionellen Zwei-Loch-Ausführung ein besseres Durchflussverhalten auf [Hau92, Wit07]. Das Einbringen der Kühlkanäle wird im Extrusionsprozess der Hartmetallrohlinge realisiert [Kir13]. Die Abfuhr des Kühlschmierstoff-Späne-Gemisches erfolgt über die seitlich in das Werkzeug eingebrachte Sicke mit einem Öffnungswinkel zwischen $110^\circ \dots 130^\circ$. Die resultierende Oberflächenqualität kann bei Kontakt der abzuführenden Späne mit der Bohrungswand beschädigt werden. Durch die Längsnut zur Spanabfuhr verfügen Einlippenbohrer über eine deutlich geringere Steifigkeit als symmetrisch aufgebaute

Wendelbohrer. Um eine Durchbiegung und den Mittenverlauf langschäftiger Einlippenbohrer zu reduzieren, wird der Werkzeugaufbau ab Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen von $l/D > 30 \dots 50$ über Lünetten abgestützt [End94, Pfl76, Str73, Top01, VDI3208].

Das Einlippentiefbohren kann auf konventionellen Tiefbohrmaschinen, Bearbeitungszentren und Drehmaschinen durchgeführt werden. Aufgrund des asymmetrischen Werkzeugaufbaus ist dabei eine Führung der Einlippenbohrer im Anbohrvorgang mittels einer Anbohrbuchse (konventionelle Tiefbohrmaschinen) oder einer Pilotbohrung (Bearbeitungszentren und Drehmaschinen) erforderlich. Die Genauigkeit bzw. das Anbohrführungsspiel und die Form der Pilotbohrung beeinflussen maßgeblich die resultierende Bohrungsqualität und das Standzeitverhalten der Werkzeuge [Cha15, Sak81, VDI3208]. Zur Erzielung genauester geometrischer Verhältnisse und einem geringen Werkzeugverschleiß wird ein Anbohrführungsspiel von 0,01 mm empfohlen [Stü83, VDI3210].

Charakteristisch für das Einlippentiefbohren ist ein Spanwinkel von $\gamma = 0^\circ$ sowie ein asymmetrischer, einschneidiger Werkzeugaufbau [Gla10]. Bei den praxisbewährten Standardanschliffen teilt sich die Schneide im Bereich der Schneidenspitze in eine Außen- und Innenschneide. Die Außen- und Innenschneide sind unter definierten Einstellwinkeln von $K_1 = 50^\circ \dots 70^\circ$ und $K_2 = 105^\circ \dots 120^\circ$ angeschliffen. Die Wahl der Standardanschliffe erfolgt in Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser [Top01, VDI3208]. Aus Gründen der Funktionalität und der kontinuierlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Fertigungsprozessen ging die Entwicklung zahlreicher Sonderanschliffe für das Einlippentiefbohren hervor. In **Abbildung 3** ist die Schneidengestalt üblicher Standardanschliffe und verbreiteter Sonderanschliffe dargestellt.

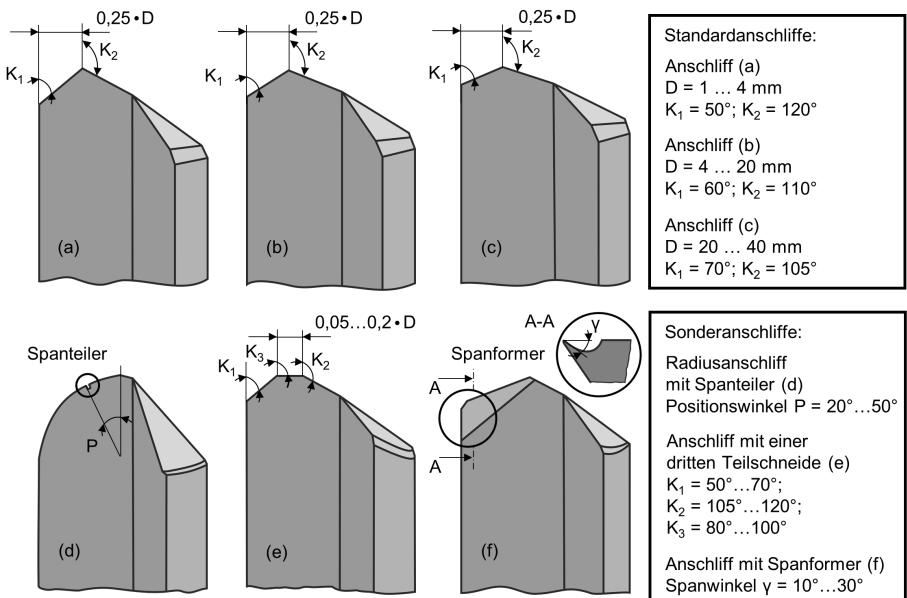


Abbildung 3: Schneidengestalt der Standardanschliffe und verbreiteter Sonderanschliffe [Dec09, Dec09b, Ran03, VDI3208]

Die Sonderanschliffe (d) - (f) repräsentieren drei weit verbreitete Beispiele für Sonderanschliffe beim Einlippentiefbohren. Der Sonderanschliff (d) weist einen Radiusanschliff im Bereich der Außenschneide und eine sehr geringe Innenschneidenlänge auf. Die Radiuskontur der Außenschneide ermöglicht die Erzeugung eines runden Bohrungsgrundes. Dieser Sonderanschliff findet beispielsweise bei der Fertigung von Hochdruckbohrungen in Injektorhaltekörpern Einsatz. Eckige Bohrungsausläufe und -übergänge ziehen in den Haltekörpern eine hohe Kerbempfindlichkeit und Rissanfälligkeit, eingeleitet von dem unter hohem Druck zugeführten Kraftstoff, nach sich. Der Sonderanschliff (d) kann zudem die Besonderheit eines Spanteilers, welcher einen Übergang vom inneren zum äußeren Schneidenteil bildet, in Form einer Nut oder Stufe aufweisen. Zielsetzung des Spanteilers ist die Erzeugung von kurzen und schmalen Spänen, die einen sicheren Spanabtransport und somit hohe Vorschubgeschwindigkeiten ermöglichen. Der Spanteiler sorgt für eine Teilung der Späne in Längsrichtung. Die Spanbreite ist so wesentlich geringer. Der nach außen gekrümmte Umriss kann durch einen Radius oder mehrere Geraden als Polygon erzeugt werden. Der Positionswinkel des Spanteilers liegt vorzugsweise bei $20^\circ \dots 50^\circ$. Bei größeren Werkzeugdurchmessern können auch mehrere Spanteiler entlang der Schneidenbereiche vorgesehen werden. Im Gegensatz zu den standardisierten Einlippentiefbohrern kann somit eine dreifach höhere Vorschubrate erreicht werden [Dee09b]. Die Sonderanschliffe (e) und (f) ermöglichen gegenüber den Standardanschliffen deutliche Produktivitätssteigerungen und eine Reduzierung der Fertigungszeit pro Bauteil [Bie10, Kle06, Zab12]. Durch Einsatz des Sonderanschliffes (e) werden die Spanformung und die Spanabfuhr entlang der Spannut optimiert. Die Schneide ist dabei streng konvex gekrümmt oder durch mehrere Teilschneiden einer konvexen Kontur angenähert. Die bewährteste Variante des Sonderanschliffes sieht drei Teilschneiden in Form von geraden Abschnitten vor. Die dritte, mittlere Teilschneide weist einen Einstellwinkel zwischen $K_3 = 80^\circ \dots 100^\circ$ (in den meisten Fällen $K_3 = 90^\circ$) und eine Länge von $5 \dots 20\%$ des Werkzeugdurchmessers auf [Dee09]. Die Einstellwinkel der umgebenden Schneiden basieren häufig auf den Einstellwinkeln der Außen- und Innenschneide der Standardanschliffe (a) - (c). Durch die Gestalt der Schneide werden bei der Spanabnahme Spannungen in den Span induziert und so auch bei zähen Werkstoffen der Spanbruch begünstigt. Die günstige Formung der Späne ermöglicht die Erzielung höherer Vorschubgeschwindigkeiten. Ein weiterer Vorteil des Sonderanschliffes (e) ist die vergleichsweise einfache Herstellung und das Nachschleifen der Schneidenkontur [Dee09]. Die Besonderheit des Sonderanschliffes (f) liegt in der modifizierten Spanflächengeometrie. Durch das Einbringen eines Spanformers in die Spanfläche liegt ein positiver Spanwinkel und nicht wie bei herkömmlichen Einlippentiefbohrern ein Spanwinkel von $\gamma = 0^\circ$ vor. Die Spanwinkel der eingeschliffenen Spanformer liegen vorzugsweise im Bereich $\gamma = 10^\circ \dots 30^\circ$ [Ran03]. Durch den Spanformer wird der Span beim Auftreffen auf die Spanfläche weniger stark gestaucht. Die thermische und mechanische Belastung auf die Schneidkanten wird durch den weichen Schnitt verringert. Der Spanformer teilt sich in eine Spanleitfläche zur Spanleitung und einen Spanbruchabschnitt zur Brechung der Späne. Der Span trifft dabei zunächst auf die Spanleitfläche unter einem großen positiven Spanwinkel. Die Brechung des Spanes erfolgt im anschließenden Spanbruchabschnitt. Die Spangröße lässt sich durch den Abstand des Spanbruchabschnittes von der Schneidkante beeinflussen. Die Festlegung erfolgt in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren, wie beispielsweise den Materialeigenschaften des zu bearbeitenden Werkstücks und den Schnittdaten [Ran03]. Der Sonderanschliff mit Spanformer zeichnet sich neben der modifizierten Spanfläche durch einen auf die Belastungen abgestimmten Schaft, eine Vollbeschichtung, glatte und nachbehandelte Schichten und engere Toleranzen der Winkel und Längen aus. Darüber hinaus wird zur Vermeidung von Hartmetallausbrüchen im Bereich der Schneidenecke häufig eine Schutzfase angebracht. Eine Zerspanleistung von etwa $50 \dots 80\%$ der Wendeltiefbohrer wird durch den Einsatz des Einlippentiefbohrers in dieser modifizierten Hochleistungsausführung angestrebt [Ran03, Ran10].

Der Bohrkopf des Einlippentiefbohrers wird im stationären Prozess über die Führungsleisten am Umfang des Werkzeuges in der Bohrung abgestützt. **Abbildung 4** zeigt die standardisierten Umfangsformen für Einlippenbohrer gemäß VDI3208. Neben den gezeigten Umfangsformen existiert noch eine Reihe weiterer herstellerepezifischer und auf verschiedene Anwendungen angepasster Umfangsformen [Ket10, VDI3208, Wit07].

Umfangsform	Werkstückstoff	Bemerkungen
	Stahl	Gute Führung, da hintere Führungsleiste noch über $d/2$, einsetzbar für die meisten Bearbeitungsaufgaben
	Stahl, Guss, Aluminium	Hintere Führungsleiste unter $d/2$, normale Anbohrverhältnisse, kleine Bohrdurchmesser, geringe Neigung zum Klemmen auch bei kleiner Konizität
	Grauguss, weiches Aluminium	Werkstoffe mit guter Schmierfähigkeit
	Bevorzugt Aluminium, Stahl, Messing	Bei ungünstigen Anbohrverhältnissen (z.B. unterbrochene Bohrungen, schräge Flächen, Überbohren von Unterbrechungen)

Abbildung 4: Anordnung der Führungsleisten [nach VDI3208]

Die Selbstführung mittels Führungsleisten und Rundschliffase ermöglicht die Realisierung von Bohrungen mit großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen bis $l/D = 400$ und geringem Mittenverlauf [Gri85, Sak81, Sto78]. Die Wahl der Umfangsform erfolgt dabei in erster Linie in Abhängigkeit vom zu zerspanenden Versuchswerkstoff [VDI3208]. Die Anordnung und Breite der Führungsleisten gilt es im Hinblick auf einen maximalen Stabilitätsgrad und eine gleichmäßige Flächenpressung zur Erzielung eines günstigen Verschleißverhaltens anzupassen [Pfl76]. Die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen, Oberflächengüte und Randzonenintegrität werden durch die Umfangsform maßgeblich beeinflusst [Ast02, Biel1b, Eic96, Pfl76, Wes07, Wit05]. Um den Mittenverlauf beim Tiefbohren zu reduzieren, kommen auch längere Bohrköpfe mit Kombinationen unterschiedlicher Umfangsformen in Schafrichtung zum Einsatz.

Mechanische Werkzeugbelastungen

Das mechanische Belastungskollektiv resultiert beim Einlippentiefbohren aus dem inneren und äußeren Kraftfluss. Der äußere Kraftfluss resultiert aus dem eingeleiteten Drehmoment der Werkzeugspindel und ist verantwortlich für die Spanabnahme an den Schneiden. Die an der Schneide angreifende Zerspankraft setzt sich aus den Kraftkomponenten der Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft zusammen. Die resultierende Passivkraft wird durch die drei wirkenden Anteile an der Innen- und Außenschneide sowie

der Rundschliffase gebildet. Aus dem charakteristischen asymmetrischen Werkzeugaufbau entsteht ein weiterer geschlossener Kraftfluss. Die auftretenden Schnitt- und Passivkräfte erzeugen eine entsprechende Radialkraft. Diese werden im inneren Kraftfluss als Normal- und Reibkräfte über die Führungsleisten und die Rundschliffase auf die Bohrungswand übertragen. Infolgedessen kommt es zu einer Glättung und Verfestigung durch plastische Umformung der geschnittenen Bohrungsoberfläche [Gri85, Pfl76]. Das Bohrmoment setzt sich aus dem Schnitt- und Reibmoment, das von den Reibkräften an den Führungsleisten und der Rundschliffase verursacht wird, zusammen [Fin77, Pfl76, Str73]. Die Axialkraft, die das Werkzeug in Vorschubrichtung belastet, teilt sich in die Vorschubkraft und die Kühlschmierstoffkraft auf [Löb03].

Die Belastungssituation und das Kräfteverhältnis werden beim Einlippentiefbohren von der Wahl der Bohrkopfgestaltung und den Einstellwinkeln beeinflusst [Hei12, Gla10, Wit07]. Die Innenschneide ist dabei über das Bohrerzentrum hinaus ausgeführt, um hohe plastische Materialverformungen im Werkzeugzentrum und ein Verklebmen des Werkzeuges auszuschließen. Aus der über Mitte geschliffenen Schneide resultieren geringere mechanische Werkzeugbelastungen im Vergleich zum Wendeltiefbohren.

Der Schaft des Einlippenbohrers wird im Bohrprozess durch Verdrehung und Durchbiegung dynamisch belastet [Str73, Wes07]. Das Auftreten von Schwingungen verschlechtert die Werkzeugstandzeit und die Bohrungsqualität [Hau92]. Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens und Unterdrückung von Schwingungen existieren Untersuchungen zum Einsatz von adaptiven Werkzeughaltern auf Basis magnetorheologischer Flüssigkeiten, von Feder- und Dämpfungselementen zwischen Bohrspindel und Spannschaft sowie auch von dämpfenden, geklebten Fügestellen zwischen Schaft und Einspannhülse [Bie15b, Hau92, Heis13, Heis13b, Str73, Wei11].

Spanbildung

Der Spanbildung kommt beim Tiefbohren eine besondere Bedeutung zu. Die Voraussetzung einer hohen Prozesssicherheit liegt in einer prozessgünstigen und möglichst kurz gebrochenen Spanform. Die Entstehung von langen und ungünstig geformten Spänen führt bei der Abfuhr des KSS-Späne-Gemisches zu einer Beschädigung der geschnittenen Topographie oder gar zu einem Werkzeugbruch durch ein Verklebmen der Späne zwischen Werkzeugsicke und Bohrungswand. Die Spanbildung beim Einlippentiefbohren lässt sich für unterschiedliche Werkstoffe durch die Wahl der Schnittdaten aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub sowie die Gestaltung des Schneidenanschliffes gezielt beeinflussen [Buc71, Buc71b, Fin77, Zab12]. Bei Wahl einer prozessgünstigen Kombination aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub treten typischerweise gewendelte bzw. zylindrische Faltpäne auf, welche eine große Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff bieten und zuverlässig aus der Bohrung gespült werden. Mit steigendem Vorschub nimmt nicht nur die Spannungsdicke, sondern auch die Spandickenstauchung zu, sodass damit die Biegefestigkeit und -steifigkeit der Späne weit überproportional ansteigen. Die Erzeugung kurzbrüchiger Späne durch die Wahl hoher Vorschubwerte führt jedoch beim Einlippentiefbohren nicht immer zum Erfolg [Heis03].

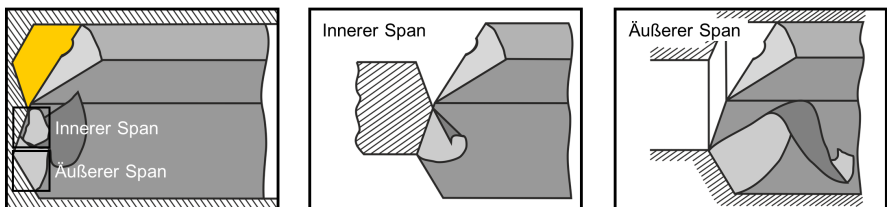
Beim Einlippentiefbohren hochfester Werkstoffe kommt es unter Einstellung von relativ niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und hohen Vorschüben häufig zur Ausbildung von Band- und Kommaspänen, die sich beim Abtransport leicht verklebmen und einen Werkzeugbruch zur Folge haben können. Die Einstellung hoher Schnittgeschwindigkeiten führt hingegen oft zur Bildung langer Wirrspäne, die eine Anpassung der Vorschubwerte verlangt [Heis05].

Charakteristisch für alle Bohrprozesse ist die von der Schneidenecke zum Werkzeugzentrum linear auf null abfallende Schnittgeschwindigkeit. Im Werkzeugzentrum bildet sich ein reiner Scherspan, der sich aus einzelnen, teilweise miteinander verschweißten Spanlamellen zusammensetzt und das Einreißen des Spans senkrecht zur Ablaufrichtung begünstigt [Buc71, Fin77]. Mit steigendem Schnittgeschwindigkeits-

gradienten entlang der Hauptschneide des Einlippentiefbohrers geht der Scherspan in den Bereich der Fließspanbildung über [Buc71, Heis05].

Es existieren dabei zwei unterschiedliche Spanbildungstheorien für das Einlippentiefbohren (**Abbildung 5**). Gemäß der Spanbildungstheorie beim Einlippentiefbohren nach *Fink* entstehen zwei separate Spanteile an der Innen- und Außenschneide mit unterschiedlichen Krümmungsradien. Die Spanteile laufen in sich kreuzender Richtung ab und behindern einander. Es bildet sich der für das Einlippentiefbohren typische gewendelte Faltspan. Der schneller ablaufende Span an der Außenschneide reißt dabei häufig den enger gerollten inneren Span ein. Das Einreißen wird durch die Scherspanbildung im Werkzeugzentrum und den einzelnen miteinander verschweißten Spanlamellen begünstigt [Eic96, Fin77]. Dagegen beobachtete *Heilmann* in seinen Untersuchungen zum Tiefbohren nichtrostender Stähle mit kleinsten Werkzeugdurchmessern unter Verwendung eines Standardanschliffes erstmals das Ausbleiben einer Spanteilung im Bereich der Schneidenspitze zwischen Innen- und Außenschneide. Die Späne entstehen unabhängig vom Schneidenanschiff über die gesamte Schneidenbreite. Die Kontur des Schneidenschliffes bildet sich dabei deutlich auf der Spanoberseite ab. Aufgrund des Schnittgeschwindigkeitsgradienten läuft der Span an den Schneiden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ab, was zu einem Einreißen des langsamer ablaufenden Innenspans führt [Hei12, Zab12].

Konventionelle Spanbildungstheorie beim Einlippentiefbohren nach Fink



Spanbildung beim Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle mit kleinsten Durchmessern nach Heilmann

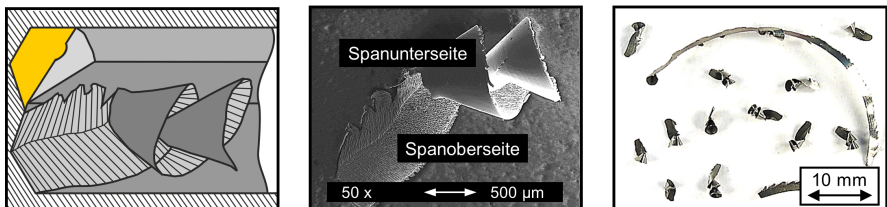


Abbildung 5: Spanbildungstheorien für das Einlippentiefbohren [Fin77, Hei12]

Eine Möglichkeit, die Spanlänge und -form gezielt zu beeinflussen, bietet die Einkopplung von Schwingungen. Durch die Überlagerung des Vorschubes mit einer zusätzlichen, oszillierenden Axialbewegung mittels piezoelektrischen Translatoren lassen sich kurzbrüchige Späne auch bei anspruchsvollen Werkstoffen und Prozessbedingungen erzeugen [Heis03, Heis08, Sch08]. Zur Überwachung des Spanbruchs und Spanabtransports wurden bereits unterschiedliche Sensorkonzepte entwickelt [Klo14, Wei00, Wir10].

Zur Analyse der Spanbildung beim Einlippentiefbohren mit größerem Werkzeugdurchmesser $d \geq 5$ mm wurden in der Vergangenheit zum einen Bohrunterbrechungsrichtungen eingesetzt. Durch eine abrupte Trennung von Werkzeug und Werkstück in Schnitt- und Vorschubrichtung wird dabei der Zustand in der Wirkzone eingefroren, und es werden Spanwurzeln erzeugt. Die Spanwurzeln lassen sich nach metallographischer Präparation mikroskopisch untersuchen [Biel3d, Fin77, Gri86, Wit07]. Zum anderen wurde

der Einsatz der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie beim Einlippentiefbohren überprüft. Die Beobachtung der Spanbildung beim Einlippentiefbohren mit stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück, bestehend aus vorgefertigten Stiften in einem transparenten Halter aus Acrylglas, erfolgte senkrecht zur Spanfläche. Als Kühlmittel diente Wasser mit rosthemmenden Zusätzen [Buc71, Buc71b]. Weitere Versuche erfolgten unter Anordnung der Hochgeschwindigkeitskamera über einem stehenden Probenhalter. Die Rotation des Einlippenbohrers wurde hierbei mit einem Stroboskop synchronisiert. Eine begrenzte Vergrößerung und eine unbefriedigende Auflösung erschweren jedoch die Beurteilung der Spanbildung [Heis05].

Werkzeugverschleiß

Die bestimmenden Verschleißerscheinungsformen beim Einlippentiefbohren sind der Schneidkantenverschleiß, die Verschleißmarkenbreite und -länge auf der Rundschliffase, die Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche, Kolkverschleiß sowie der Schneideneckenverschleiß. Bei kleinen Werkzeugdurchmessern erfolgt die Spanbildung im Bereich der Schneidkantenverrundung, wodurch der Span nur teilweise in Kontakt mit der Spanfläche gerät und kein Kolkverschleiß auftritt. Der Schneidkantenverschleiß führt zu einer steigenden Schneidkantenverrundung [Eic96, Fin77]. Durch den Übergangsbereich zwischen Scher- und Fließspanbildung kann es darüber hinaus beim Einlippentiefbohren von Stahlwerkstoffen entlang der Schneide zur Aufbauschneidenbildung kommen [Fin77]. Die Führungsleisten am Werkzeugumfang unterliegen einem axialen und radialen Verschleiß. Dabei kommt es häufig zu einem dreiecksförmigen Verschleißbild im Auslaufbereich der Führungsleisten [Löb03].

Zur Verbesserung der Werkzeugstandzeit und Prozessstabilität werden die Schneidkanten von Einlippentiefbohrern in vielen Anwendungen definiert verrundet. Die Schneidkantenverrundung gilt es dabei, auf die Eingriffsbedingungen und den Versuchswerkstoff abzustimmen [Bie12b, Bie13, Klo12]. Zur Vermeidung der Entstehung von Ausbrüchen an den Schneidkanten im Anbohrvorgang aufgrund zu hoher mechanischer Belastungen ist die Abstimmung der Einstellwinkel an Innen- und Außenschneide bei hochfesten Werkstoffen notwendig [Cha15].

Die Zusammensetzung der Werkzeugbeschichtung nimmt maßgeblichen Einfluss auf das Verschleißverhalten von Einlippentiefbohrwerkzeugen. Der Adhäsions- und Abrasivverschleiß sowie Diffusions- und Oxidationsvorgänge können mithilfe von Werkzeugbeschichtungen unterbunden oder reduziert werden. Um die Eigenschaften des Hartmetallsubstrates und der Lötverbindungen nicht zu verändern, erfolgt die Abscheidung der Beschichtungen bei vergleichsweise geringen Prozesstemperaturen durch PVD-Verfahren [Bie13, Eic96, Ter13, Wei06]. Die industriell meist verwendete Bohrer-Beschichtung besitzt die Schichtzusammensetzung TiAlN. Zudem sind in der Praxis Werkzeugbeschichtungen auf TiN- und TiCN-Basis häufig zu finden [Elz03, Tsc07].

Bohrungsqualität

Das Einlippentiefbohren ermöglicht aufgrund des asymmetrischen Werkzeugaufbaus und der Abstützung des Bohrkopfes über die Bohrungswand die Herstellung enger Maß- und Formtoleranzen sowie Oberflächenqualitäten in den Toleranzen IT5 bis IT10 [Heis03b]. Aufgrund der hohen erzielbaren Bohrungsqualität sind nachgelagerte Arbeitsvorgänge, wie z. B. Reiben oder Honen, nicht erforderlich [VDI3210]. Mit Blick auf die Oberflächentopographie wird beim Tiefbohren allgemein zwischen offenen Profilen mit Rillen und Plateaus sowie einer Abbildung des Vorschubes, teilweise geschlossenen Profilen und geschlossenen Profilen mit Pittings und Riefen unterschieden [Fuß86, Wit07]. Entscheidend für die Erzielung geringer Mittenverläufe ist neben den eingestellten Schnittdaten und der verwendeten Werkzeuggestalt die Wahl der Arbeitsweise. Beim Einlippentiefbohren wird zwischen den drei Arbeitsweisen Einlippentiefbohren mit feststehendem Werkstück und rotierendem Werkzeug, Einlippentiefbohren mit rotierendem Werkstück und nicht rotierendem Werkzeug und Einlippentiefbohren mit gegenläufig rotierendem Werkstück und Werkzeug unterschieden. Die gegenläufige Kinematik für

rotationssymmetrische Werkstücke ermöglicht die Erzielung der geringsten Bohrungsverläufe [End94, Sak81, Stü83, VDI3208].

Der Mittenverlauf bei Anwendungen mit besonders großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen lässt sich über eine gezielte Pulsation des Kühlschmierstoffes beeinflussen. Hierbei wird der Kühlmitteldruck, welcher durch den Werkzeugschaft zum Bohrkopf fließt, gepulst [End94, Stü83]. Die Druckimpulse werden durch ein Servoventil mit geringen Reaktionszeiten realisiert und mit der Spindelorientierung synchronisiert. Hierdurch können die Kraftverhältnisse am Bohrkopf, insbesondere die angreifenden Radialkräfte senkrecht zur Bohrachse, gezielt gesteuert und so der Mittenverlauf minimiert werden [Met06].

Kühlschmierstoff

Der Kühlschmierstoff gehört neben der Bearbeitungsmaschine, den Schnittdaten, dem Werkzeug und dem Werkstück zu den elementaren Einflussgrößen eines Tiefbohrprozesses. Qualitativ hochwertige Emulsionen und Tiefbohröle führen bei korrekter Anwendung und Pflege zu einer höheren Wirtschaftlichkeit [Kla08, Müll08, Zwi74]. Im Allgemeinen besitzen Kühlschmierstoffe beim Tiefbohren drei wichtige Primärfunktionen. Diese sind die Gewährleistung einer ausreichenden Schmierung der Schneiden und Kontaktelemente zur Führung des Werkzeuges am Bohrkopfumfang, der rückstandsfreie Spanabtransport und die effektive Wärmeabfuhr [Tha99]. Zur sicheren Abfuhr der produzierten Späne erfordert das Einlippentiefbohren mit abnehmendem Werkzeugdurchmesser und steigendem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis der Bohrungen höhere Kühlschmierstoffdrücke. Demgegenüber fallen die erforderlichen Kühlschmierstoffvolumenströme zur störungsfreien Abfuhr der Späne (**Abbildung 6**).

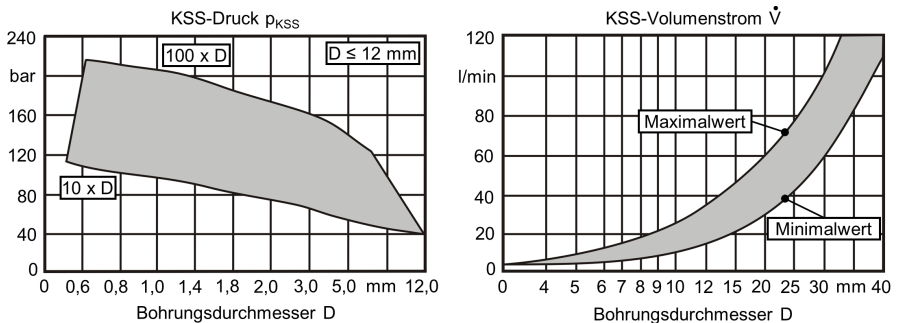


Abbildung 6: Richtwerte für den Kühlschmierstoffdruck und Kühlschmierstoffvolumenstrom beim Einlippentiefbohren [VDI3208]

Die Sekundärfunktionen, wie z. B. die Minimierung des Werkzeugverschleißes, Korrosions- und Oxidationsschutz, Reduzierung der Schaumneigung und geringe Ölnebelbildung, werden durch eine geeignete Additivierung des Kühlschmierstoffes eingestellt [Tha99, VDI3397].

Tiefbohröle bestehen im Wesentlichen aus einem Grundöl als Basisflüssigkeit und entsprechenden Additiven. Die Grundöle sind hochausraffinierte und hydrierte Mineralöle auf Paraffin- oder Naphthenbasis. Eine Alternative zu Mineralölen bilden seit einiger Zeit Schneidöle auf Basis synthetischer Ester. Esteröle bieten eine höhere Gesundheits- und Umweltverträglichkeit durch ihre Aromatenfreiheit bei gleichzeitig geringerem Verbrauch durch das überlegene Benetzungs- und Verdampfungsverhalten. Im Zerspanprozess besitzen Esteröle durch ihre hohe Polarität eine deutlich höhere Schmierwirkung als Mineralöle. Zudem zieht das ausgezeichnete Luftabscheideverhalten einen geringen Einschluss von Luft im Öl nach sich und verleiht auf Ester basierenden Ölen eine bessere Wärmeabfuhr und Kühlwirkung. Die technologischen Vorteile relativieren oft die höheren

Anschaffungskosten von Esterölen [Fre09, Mec13]. Deutliche Standzeitvorteile durch den Einsatz von Esterölen anstelle von Mineralöl konnte *Klocke* beim Einlippentiefbohren des Vergütungsstahls 50CrMo4 mit einer Festigkeit von $R_m = 1350 \dots 1450$ MPa mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 2,5$ mm feststellen [Klo12]. Untersuchungen von *Meckel* zum Einlippentiefbohren des nichtrostenden martensitischen Stahls X20Cr13 mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 4,3$ mm unter Verwendung eines esterbasierten Tiefbohröls bestätigen ein besseres Verschleißverhalten durch den Nachweis einer Verdopplung der Standmenge [Mec13]. Die kinematische Viskosität des Fertigproduktes ergibt sich hauptsächlich aus der Viskosität des Basisöls. Die Additive verleihen dem Tiefbohröl die charakteristischen Eigenschaften. Dabei gilt es, die Additive aufeinander abzustimmen, um chemische Reaktionen untereinander zu umgehen. Zur Verbesserung der Schmierfähigkeit werden polare Zusatzstoffe, wie z. B. natürliche Fettstoffe auf pflanzlicher Basis, Fettsäureester, synthetische Ester oder Polymerester, hinzu additiviert. Extreme Pressure (EP)-Additive und Anti-Wear (AW)-Additive dienen zur Erhöhung des Verschleißschutzes und bestehen häufig aus Schwefel- und Phosphorverbindungen. Die EP-Additive verhindern durch das Bilden einer Reaktionsschicht auf der Oberfläche des zu zerspanenden Werkstoffes ein Fressen oder Verschweißen von Werkzeug, Werkstück und Span in der Wirkzone. Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Additive und das damit verbundene Einsetzen der chemischen Reaktionen ist das Vorliegen spezifischer Temperaturen und Drücke. Die Verwendung von AW-Additiven basiert auf einer physikalischen Adsorption auf den Oberflächen der Reibpartner. Es erfolgt eine Unterbindung des direkten metallischen Kontaktes. Weitere wichtige Additive sind Korrosions- und Oxidationsinhibitoren zur Vermeidung der Korrosion erzeugter Bohroberflächen und Zersetzungs Vorgängen in den Tiefbohrölen [Sch06, Tha99, VDI3397].

Auf konventionellen Tiefbohrmaschinen kommen in der Regel Tiefbohröle zum Einsatz. Auf modernen Bearbeitungszentren laufen integrierte Tiefbohrprozesse dagegen meist unter Verwendung von wassermischbaren Kühlschmierstoffen mit höheren Konzentrationen von $8 \dots 12$ % [Ket10, Löb03, VDI3210]. Als dritte Kühlschmierstoffart sind Spezialprodukte für die Minimalmengenschmierung zu finden. Das Einlippentiefbohren unter Minimalmengenschmierung kann in Ausnahmefällen wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen, bietet jedoch einen deutlich kleineren, beherrschbaren Bereich geeigneter Schnittdaten und verlangt insbesondere für die Stahlbearbeitung eine Maschinen- und Werkzeuganpassung [Bie11, Bie12, Eiss15, Tha99].

2.1.2 Wendeltiefbohren

Das Wendeltiefbohren findet im Durchmesserbereich von $d = 0,5 \dots 12$ mm Verwendung. Vollhartmetallwendeltiefbohrer mit speziellen Nutgeometrien und Beschichtungen erreichen dabei Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse bis $l/D = 40$ mit kontinuierlicher Vorschubbewegung [Abe07b, Eli08, Mü06]. Die realisierbaren Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse sind gegenüber dem Einlippentiefbohren somit deutlich limitierter. Bis zu Bohrtiefen des 40-fachen Durchmessers kann jedoch die Produktivität durch den Einsatz von Wendeltiefbohrern deutlich gesteigert werden. Aufgrund der zweischneidigen Konstruktion und der größeren Torsions- und Biegesteifigkeit sind mit innengekühlten Wendeltiefbohrern höhere Vorschubgeschwindigkeiten erreichbar [Eli08, Mü06, Spu70]. Ein weiterer Vorteil ist die mögliche Verwendung von Wendeltiefbohrern mit kleinen Werkzeugdurchmessern auf Standardmaschinen, da im Gegensatz zum Einlippentiefbohren mit kleinen Werkzeugdurchmessern geringere Kühlschmierstoffdrücke erforderlich sind. Nachteilig sind die höheren Fertigungskosten bedingt durch den aufwendigen Schleifprozess im Vergleich zur Herstellung gerade genuteter Einlippentiefbohrer. Beispiele für die vielseitigen industriellen Einsatzgebiete von Wendeltiefbohrern sind die Bearbeitung

von Öl- und Kühlwasserbohrungen in Zylinderkurbelgehäusen sowie Ölverbindungsbohrungen in Kurbelwellen [Eil08, Hae04, Lin06, Scha15].

Der Werkzeugaufbau von Wendeltiefbohrern setzt sich aus dem Schneidteil und dem Spannschaft zusammen. Der Schneidteil, bestehend aus der Spitzegeometrie, den Führungsfasen und den Spannuten, ist direkt am Zerspanprozess beteiligt. Der Spannschaft überträgt das Drehmoment und dient dem Spannen und Zentrieren [Kul07]. Wendeltiefbohrer weisen dabei für gewöhnlich im Vergleich zum Einlippentiefbohren keine Lötverbindung am Übergang zum zylindrischen Spannschaft auf. Die Kühlschmierstoffzufuhr erfolgt über zwei innen liegende Kühlschmierstoffkanäle unter einer im Herstellungsprozess der Hartmetallrohlinge definierten Steigung auf einem bestimmten Teilkreisdurchmesser. Die Kühlkanalaustrittsposition auf der Freifläche und der Kühlschmierstoffvolumenstrom haben dabei einen Einfluss auf die thermische Belastung des Schneidkeils sowie den resultierenden Werkzeugverschleiß [Fal14, Fal15]. Die Zerspanarbeit erfolgt am Schneidteil, wogegen der Spanabtransport über die gewendelten Spannuten unter dem Drallwinkel φ erfolgt. Der Zerspanvorgang findet an beiden primären und sekundären Hauptschneiden und an der Querschneide im Bohrerzentrum statt. Darüber hinaus sind in Abhängigkeit vom Anschliff und der Verjüngung des Werkzeuges Teile der Nebenschneide am Zerspanvorgang beteiligt [Tsc07]. Die Werkzeugaufnahme bzw. das Spannen des Werkzeuges erfolgt über den Spannschaft. **Abbildung 7** zeigt den grundlegenden Aufbau und die wichtigsten Funktionsflächen eines Wendeltiefbohrers.

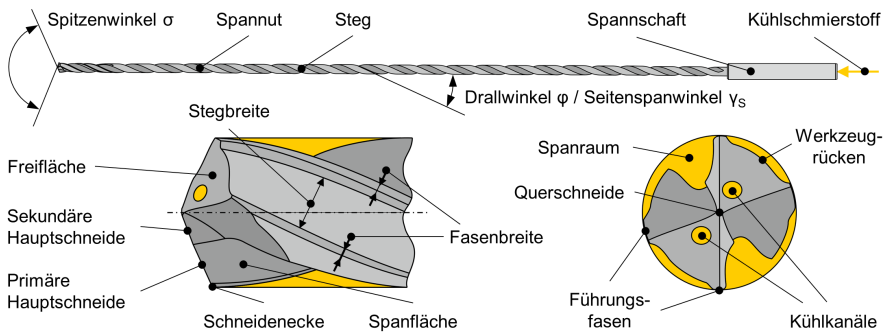


Abbildung 7: Grundlegender Aufbau eines Wendeltiefbohrers [nach DIN1412, DIN1414, DIN5419]

Im Hinblick auf den Schneidstoff sind Wendelbohrer für gewöhnlich aus Hartmetall oder Schnellarbeitsstahl (HSS) hergestellt. Hartmetalle weisen gegenüber HSS eine deutlich höhere Warmhärte und Verschleißbeständigkeit auf. Aufgrund der höheren Leistungsfähigkeit und den erzielbaren Zerspanraten werden moderne Wendeltiefbohrer daher überwiegend aus Ultrafeinstkornhartmetallen hergestellt [Eil08, Elz03, Kre08, Kut13, Ric15].

Das Wendeltiefbohren erfordert analog zum Einlippentiefbohren wegen der großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse die Führung der Werkzeuge im Anbohrvorgang durch eine Anbohrbuchse oder Pilotbohrung. Beim Wendeltiefbohren ohne Führung im Anbohrvorgang können große Maß-, Lage-, und Formabweichungen auftreten [Hein12b]. Die Tiefe der Pilotbohrungen zur Zentrierung der symmetrischen Wendeltiefbohrer entspricht in der Regel dem zweifachen Durchmesser und ist damit im Vergleich zu den asymmetrischen Einlippentiefbohrern, deren Einsatz eine größere Führungslänge im Anschnitt verlangen, häufig kürzer ausgeführt [Hein06, Hein12, Hein12b]. Die Pilotbohrungen werden in der Regel mit kurzen und steifen Wendelbohrern in einer abgestimmten Durchmesser-toleranz m7 gefertigt. Zur Einhaltung eines geringfügigen Übermaßes und Vermeidung eines Verklemmens der Werkzeuge weisen gewöhnliche Wendeltiefbohrer eine Toleranz von h7 auf [Kre08, Mül06]. Ebenso gilt

es, die Spitzenwinkel von Pilotbohrern und Wendeltiefbohrern aufeinander abzustimmen, um Ausbrüche an den Schneidenecken durch eine mechanische Überbelastung im Anschnitt zu vermeiden [Kre08]. Die Wahl des Spitzenwinkels hängt zudem von dem zu zerspanenden Werkstoff ab. Große Spitzenwinkel ziehen eine Zunahme des Bohrungsdurchmessers und einen stärkeren Mittenverlauf nach sich. Demgegenüber begünstigt das Aufbohren bei rückfedernden Werkstoffen einen stabileren Bohrprozess. Wendelbohrer mit geringen Spitzenwinkeln besitzen im Anbohrvorgang eine bessere Zentrierung und erzielen daher höhere Maßgenauigkeiten. Dagegen steigen die Schnittmomente und die Reibung an der Bohrungswand an [Klo08, Tsc07].

Die Schneiden eines Wendelbohrers teilen sich jeweils in die drei Bereiche primäre Hauptschneide, sekundäre Hauptschneide und Querschneide. Im Gegensatz zum Einlippenbohren variiert der Spanwinkel entlang der Schneiden beim Wendelbohren. Im Bereich der Querschneide liegen dabei stark negative Spanwinkel vor. In Kombination mit der zur Bohrermitte abfallenden Schnittgeschwindigkeit kommt es an der Querschneide zu starken Reib- und Quetschvorgängen. Durch eine Ausspitzung werden die Spanwinkel der Querschneide vergrößert und die Querschneidenlänge reduziert. Demzufolge lassen sich hohe Drücke auf die Querschneide und ein Verlaufen des Werkzeuges reduzieren [Tsc07]. In Richtung Schneidenecke steigen die Spanwinkel entlang der sekundären und primären Schneidenecke an. Der größte Spanwinkel, der sogenannte Seitenspanwinkel, ist mit hinreichender Genauigkeit identisch zu dem Drallwinkel und liegt an der Schneidenecke vor [Ell08, Tsc07, Wes07]. Die Wahl des Drallwinkels nimmt maßgeblich Einfluss auf den Spanbruch und ist ebenfalls stark abhängig vom zu zerspanenden Werkstoff. Übliche Wendelbohrer weisen dabei einen Drallwinkel zwischen $\varphi = 18^\circ \dots 30^\circ$ auf. Extrem weiche Materialien, wie z. B. Aluminium, verlangen mitunter eine Vergrößerung des Drallwinkels auf $\varphi = 35^\circ \dots 45^\circ$, wogegen bei harten und spröden Werkstoffen ein kleiner Drallwinkel von $\varphi = 10^\circ \dots 15^\circ$ vorgesehen wird [Klo08].

Der Spitzegeometrie kommt beim Wendeltiefbohren eine hohe Bedeutung zu. Das Tiefbohren mit hohen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen erfordert dabei eine Anpassung der konventionellen Kegelmantelschliffe mit S-Ausspitzung und der 4-Flächen-Anschliffe mit runder Ausspitzung. Eine gute Kombination aus Stabilität und Schnittfreudigkeit bieten Kegelmantelschliffe mit runder S-Ausspitzung, die sich für viele Anwendungen des Wendeltiefbohrers bewährt haben. In einzelnen Anwendungen kommen zudem aufwendige 8-Flächen-Anschliffe mit runder S-Ausspitzung zum Einsatz. Die 8-Flächenanschliffe bieten das beste Zentrierverhalten und eine anwendungsgerechte Einstellung von Frei- und Spanwinkeln vom Zentrum bis zur Schneidenecke. Außerdem begünstigt die abgewinkelte Bohrer Spitze eine Reduzierung der Radialkräfte beim Ausbohren schräger Flächen und beim Eintritt in Querbohrungen [Kre08]. In **Abbildung 8** sind verbreitete stirnseitige Anschliffe für das Wendeltiefbohren dargestellt.

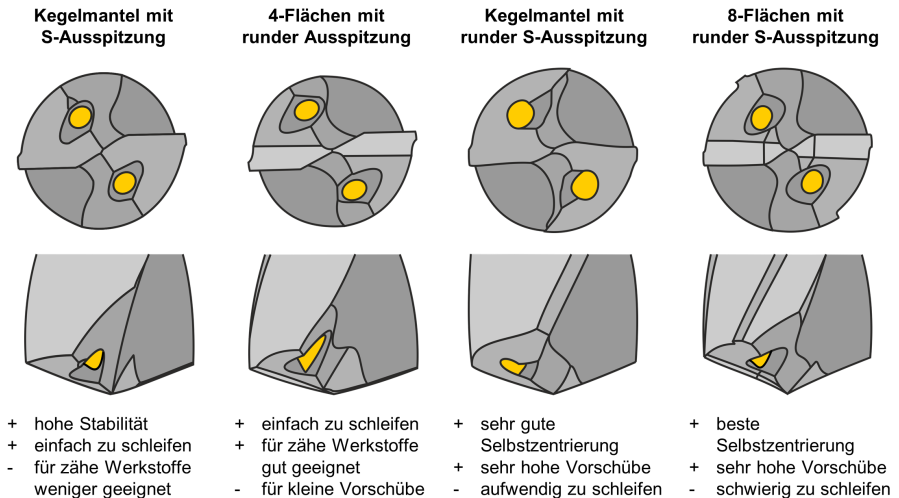


Abbildung 8: Stirnseitige Ancliffe für das Wendeltiefbohren [nach Kre08]

Der Einsatz von Wendelbohrern zum Tiefbohren erfordert eine geometrische Anpassung der Spannutenprofile. Eine Verwendung von engen Spannuten führt zu Problemen mit Blick auf die Spanabfuhr und limitiert die erreichbare Bohrungstiefe- und Oberflächenqualität [Hein06]. Aus diesem Grund sind beim Einsatz konventioneller Wendelbohrer bei größeren Bohrtiefen eine angepasste Vorschubstrategie bzw. regelmäßige Entspannungsübungen notwendig [Kim09]. Dabei wird die Vorschubbewegung gestoppt, der Bohrer komplett oder teilweise aus der Bohrung gefahren und somit die Spannuten vollständig von den produzierten Spänen befreit. Entspannungszyklen stellen jedoch unerwünschte Nebenzeiten und wiederkehrend hohe mechanische Belastungen auf die Schneidkanten beim Materialeintritt dar, die zu einer schnellen Ermüdung des Hartmetalls führen können [Kre08]. Zur Erzielung einer hohen Prozessstabilität und störungsfreien Abfuhr der Späne entlang der gewendelten Spannuten beim Tiefbohren mit kontinuierlicher Vorschubbewegung ist in der Regel eine Verjüngung der Kerndicke vom Bohrkopf zum Schaftende notwendig. Der Querschnitt der Spannuten in Richtung Werkzeugschaft vergrößert sich und die Späne können bei größeren Bohrtiefen leichter abgeführt werden [Har14, Kre08, Mü06]. Neben dem Querschnitt der Spannuten übt der Drallwinkel bzw. der Seitenspanwinkel einen großen Einfluss auf den Spanabtransport aus [Tsc07].

Wendeltiefbohrer weisen am Werkzeugumfang üblicherweise zwei oder vier Führungsfasen auf, die sich in ihrer Breite unterscheiden können. Bei Abstützung durch lediglich eine Führungsfasen je Schneide kann es bei starken Pendelbewegungen der Werkzeugschneide zum Kontakt der hinterschliffenen Bereiche des Bohrerrückens hinter den Führungsfasen mit der Bohrungswand und einem Verkleben der Werkzeuge kommen. Die Abstützung des Bohrers an der Bohrungswand lässt sich durch vier Führungsfasen deutlich verbessern. Bei einem zu weiten Abstand zwischen den zwei Führungsfasen einer Schneide können Konturverletzungen wiederum der Grund für ein Verkleben des Werkzeuges sein [Tsc07]. Einerseits resultiert eine Erhöhung der Anzahl und Breite der Führungsfasen in einer verbesserten Abstützung des Bohrkopfes und folglich besseren Kreis- und Zylinderformtoleranzen [Abe08c, Biel3b, Tsc07]. Andererseits kann eine Vergrößerung der Kontaktfläche zu größeren Randzonenbeeinflussungen führen [Biel3b].

Mechanische Werkzeugbelastungen

Das mechanische Belastungskollektiv beim Wendeltiefbohren resultiert aus den an Haupt- und Nebenschneiden angreifenden Zerspankräften sowie den Reibkräften an den Führungsfasen und der gebildeten Späne in den Spannuten und an der Bohrungswand. Die Zerspankräfte setzen sich wiederum aus den axial wirkenden Vorschubkräften F_f , den radial gerichteten Passivkräften F_p und den tangential angreifenden Schnittkräften F_c zusammen. Das Bohrmoment resultiert aus den unter einem bestimmten Hebelarm an beiden Hauptschneiden angreifenden Schnittkräften. Dabei nehmen die Kräfte und Momente trotz Konizität des Schneidteils mit steigender Bohrtiefe zu [Den11, Kul07].

Entlang der Schneide erfolgt der Materialabtrag beim Wendeltiefbohren mit variierenden Spanwinkeln und Schnittgeschwindigkeiten. Im Bereich der Querschneide liegen nur geringe Relativgeschwindigkeiten und stark negative Spanwinkel zwischen Werkzeug und Werkstück vor. Die vorherrschenden Quetsch- und Schervorgänge ähneln in diesem Bereich eher einem Fließpressvorgang. Die Spanbildung erfolgt unter hohem hydrostatischem Druck vor den Schneiden [Den11]. Dabei werden 70 ... 80 % der Vorschubkraft bis zum Eingriff der primären Hauptschneide erreicht [Abe08, Scha15, Tsc07].

Die an den Schneiden radial in entgegengesetzter Richtung wirkenden Radialkräfte heben sich bei einem ideal symmetrischen Bohrwerkzeug auf. Die Fertigungstoleranzen des Schleifprozesses der Wendelbohrer begrenzen dabei die erreichbare Symmetrie. Unsymmetrische Spannuten und Anschliffe, ungleiche Längen der Hauptschneiden, Differenzen in der Schneidhöhe und -schärfe sowie ungleiche Frei- und Spanwinkel führen zu resultierenden Radialkräften. Des Weiteren können Werkstoffinhomogenitäten und ungleichmäßige Schneidenbelastungen zur Entstehung von Radialkräften beitragen [Kul07]. Die Differenz des Kräfteverhältnisses an den Schneiden wird im Einsatz durch einen unregelmäßigen Verschleiß verstärkt [Ter11].

Die auftretenden Zerspankräfte hängen vor allem vom zu zerspannenden Werkstoff, der Spitzengeometrie und den Schnittdaten ab [Kul07]. Die auftretenden Axialkräfte und das dynamische Verhalten von Wendeltiefbohrern werden zudem durch das Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis unmittelbar beeinflusst. Die natürlichen Torsionsfrequenzen sind bei Werkzeugen mit großem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis deutlich geringer. Die Vorschubkräfte nehmen bedingt durch die gesteigerten Axial- und Torsionsschwingungen deutlich zu [Abe07, Abe07b, Ell08].

Spanbildung

Durch vorangetriebene Entwicklungen im Bereich der Stirn- und Nutgeometrien lassen sich eine günstige Spanbildung und -abfuhr für zahlreiche Werkstoffe erzielen. Hierdurch wurden die Voraussetzungen für den Einsatz des Wendeltiefbohrens mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen bis $l/D = 40$ ohne Entspannungshübe geschaffen [Kre08, Mül04]. Aufgrund der Kinematik fallen die Schnittgeschwindigkeit und damit auch die Fließgeschwindigkeit der Späne von der Schneidenecke über den Verlauf der Hauptschneide zum Bohrerzentrum hin ab. Folglich laufen die normal zu den Hauptschneiden entstehenden Späne in Richtung Werkzeugzentrum und werden über die Kontur der Spannuten gewendet (**Abbildung 9**).

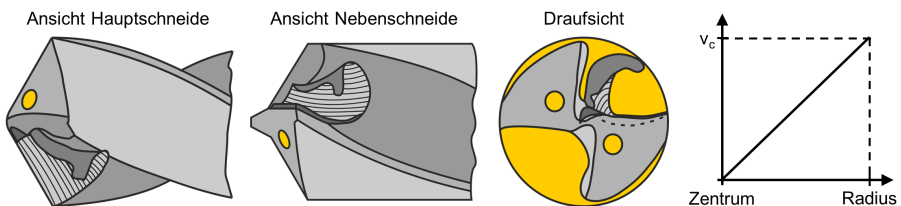


Abbildung 9: Schematische Spanbildung beim Wendelbohren [nach Kre08]

Der Radius der Spannuten bestimmt maßgeblich den Grad der Wendelung und somit auch die Querschnitte der Späne [Kre08]. Im Werkzeugzentrum bzw. in der Mitte der Querschneide fällt die Schnittgeschwindigkeit auf den Wert Null, und es dominieren Reib- und Quetschvorgänge. Der Spanfluss im Bereich der Querschneide bedarf einer zusätzlichen Querverschiebung, um aus dem Bereich des Bohrerkerens bzw. der Ausspitzung in die Spannuträume zu gelangen [Den11].

Das Einbringen von Spanbrechern in die Spanfläche kann auch bei Wendelbohrern in einem kurzen Spanbruch resultieren, wodurch einerseits die Gefahr von Spanklemmern in den Spannuten verringert und andererseits die erreichbaren Bohrtiefen gesteigert werden können. Die Breite des eingebrachten Spanbrechers und der Winkel zur Schneidkante beeinflussen maßgeblich den Spanbruch. Zudem führen die Spanbrecher zu einer Reduzierung der Vorschub- und Schnittkräfte sowie Bohrmomente. Infolge der geringeren mechanischen Belastungen werden auch höhere Standzeiten erzielt [Sah03].

Eine Analyse der Spanbildung wird durch den Einsatz von Bohrunterbrechsvorrichtungen ermöglicht. Die erzeugten Spanwurzeln verbinden die Werkstückrandzone mit dem Span und zeigen die Spanabhebung in einem stationären Zustand. Mehrere orthogonale Schnitte entlang der Hauptschneide bringen umfangreiche Kenntnisse zu relevanten Größen wie z. B. der Spandicke, dem Scherwinkel und der Mikrohärtigkeit in den unterschiedlichen Wirkzonen der Spanentstehung [Bie14b, Smo12, Koe04, Koe08, Ter11].

Werkzeugverschleiß

Die thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen in der Kontaktzone verursachen eine Reihe von Verschleißerscheinungsformen, wie z. B. Freiflächen-, Kolk-, Führungsfasern-, Schneidenecken-, und Querschneidenverschleiß. Als gängigste Kenngrößen zur Beurteilung des Werkzeugverschleißes werden die mittlere und maximale Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche und die Kolkentiefe auf der Spanfläche herangezogen. Zur Quantifizierung der mittleren Verschleißmarkenbreite VB werden mehrere Messwerte entlang der primären und sekundären Hauptschneide erfasst und gemittelt. Die höchste Verschleißmarkenbreite VB_{max} liegt in der Regel im Bereich der Schneidenecken vor. An den Schneidenecken liegt aufgrund der verfahrensbedingt größten Schnittgeschwindigkeit die höchste thermische Belastung vor. Die hohen thermischen Belastungen sind gleichzeitig Ursache für eine Abrundung der Schneidenecken sowie abnehmende Maßgenauigkeiten und Oberflächenqualitäten. Kolkverschleiß reduziert die Schneidkantenstabilität und erhöht die Anfälligkeit gegenüber Ausbrüchen entlang der Schneidkanten [Eli08, Ter11]. Das Verschleißverhalten bzw. die erreichbaren Standwege werden durch das dynamische Verhalten und auftretende Schwingungen maßgeblich beeinflusst [Eli08, Scha15].

Eine Leistungssteigerung beim Einsatz von Vollhartmetallwendelbohrern kann durch eine Vor- und Nachbehandlung der Schneidkanten erzielt werden. Bei der Einstellung der Schneidkantenverrundung gilt es, einen optimalen Kompromiss aus hoher Kantenstabilität und Materialtrennung bei geringen Prozesskräften zu finden [Ter11]. Zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit liegen Wendeltiefbohrer in vielen Anwendungen zudem mit einer Werkzeugbeschichtung vor. Die meist verwendeten Hartstoffschichten sind TiN-, TiCN- und TiAlN-Beschichtungen [Elz03, Tsc07]. Wendeltiefbohrer werden dabei häufig mit einer Kopfbeschichtung versehen. Hierbei werden die Bohrköpfe idealerweise nur im belasteten Eingriffsbereich, der sich üblicherweise über $1 \dots 1,5 \times d$ erstreckt, beschichtet. Bei der Wiederaufbereitung der Werkzeuge wird der gesamte beschichtete Kopf stirnseitig nachgeschliffen und nachbeschichtet. Diese Vorgehensweise garantiert eine maximale Anzahl an Aufbereitungszyklen und konstant geringe Fertigungstoleranzen [Mül06]. Neben der Steigerung von Schnittdaten und Standzeit kommt dem sicheren Spanabtransport zur Realisierung größerer Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse eine steigende Bedeutung zu. Zu diesem Zwecke werden Werkzeugbeschichtungen häufig mechanisch

nachbehandelt und poliert. Eine Glättung der Schichtoberfläche reduziert die Reibung mit den Spänen in den Spannuten und optimiert die Spanabfuhr [Mül01, Mül06, Pet03].

Bohrungsqualität

Vollhartmetallwendelbohrer erreichen üblicherweise Fertigungstoleranzen von IT8 bis IT11, in Ausnahmefällen und mit hohem Aufwand auch von IT7. Pendelt das Werkzeug im Schnitt in entgegengesetzter Drehrichtung um die Werkzeugmittelachse, kann es zur Fertigung von unrunder Bohrungen mit der Form eines n-eckigen Polygons kommen. Die Pendelbewegung entsteht kurz nach dem Übergang von sekundärer zu primärer Hauptschneide. Die Werkzeugspitze bewegt sich dabei auf einer elliptischen Bahn entgegengesetzt zur Drehrichtung des Bohrers [Abe08, Tsc07]. Hohe mechanische Schlag- und Wechselbelastungen auf die Schneidkanten und -ecken reduzieren die Werkzeugstandzeit erheblich. Die Pendelbewegung und die sich somit ergebende Abweichung von der Kreisformtreue lassen sich durch die Anzahl und Gestalt der Führungsfasen, eine Erhöhung des Vorschubes pro Umdrehung und geringe Freiwinkel reduzieren. Ebenso verbessern eine größere Querschneidenlänge und stark negative Spanwinkel der sekundären Hauptschneide das dynamische Verhalten und die Bohrungsqualität [Abe08b, Tsc07].

Kühlschmierstoff

Beim Wendelbohrer beeinflusst der Kühlschmierstoff den Spanabtransport nur indirekt. Der Spanabtransport erfolgt vorwiegend mechanisch durch die wendelförmigen Spannuten nach dem Prinzip der Archimedischen Schraube. Das durch innenliegende Kühlkanäle zugeführte Kühlschmiermittel dient in erster Linie der Schmierung der Wirkelemente und dem Abtransport der entstehenden Prozesswärme. Zudem wird die Temperatur der entstehenden Späne reduziert und der Spanbruch gefördert. Aufgrund dieser Anforderungen werden Wendeltiefbohrer oft unter Verwendung von Emulsion als Kühlmittel bei geringeren Kühlschmierstoffdrücken eingesetzt. Der Einsatz von Emulsion und die geringen erforderlichen Kühlschmierstoffdrücke ermöglichen das Wendeltiefbohren auf Bearbeitungszentren. Eine Beschaffung von Sondermaschinen ist nicht notwendig, wodurch erhebliche Investitionskosten eingespart werden können und unter Umständen eine Komplettbearbeitung möglich ist [Mül06]. Der Einsatz von Esterölen kann beim Wendeltiefbohren, analog zum Einlippentiefbohren, erhebliche Standzeitvorteile gegenüber Emulsionen und Mineralölen bieten [Klo12]. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen wird das Wendeltiefbohren auch unter Minimalmengenschmierung durchgeführt. Die Minimalmengenschmierung verlangt neben einer richtigen Schmierstoffauswahl eine angepasste Maschinen- und Prozessauslegung [Bie15, Hae04, Hein06, Gra15].

2.1.3 Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern

Das Tiefbohren mit Werkzeugdurchmessern $d \leq 2$ mm wird als „Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern“ oder auch „Mikrotiefbohren“ bezeichnet [Eic96, Hei12, Heis11]. Der Begriff des „Mikrotiefbohrens“ bezieht sich dabei nicht auf den Werkzeugdurchmesser, sondern den in der Regel stark limitierten, wenige Mikrometer betragenden Bohrvorschub pro Umdrehung. Das mechanische Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern kann durch das Einlippen- und Wendeltiefbohren erfolgen. Durch unterschiedliche Entwicklungstendenzen in verschiedenen Industriebereichen und die steigenden Anforderungen an die Bauteilqualität gewinnt das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern kontinuierlich an Bedeutung [Hei12]. Klassische industrielle Anwendungsgebiete liegen unter anderem in der Fertigung von Kraftstoffkanälen in Einspritzsystemen in der Automobilindustrie, Ventil-, Steuer- und Entlüftungsbohrungen in hydraulischen und pneumatischen Bauelementen im allgemeinen Maschinenbau und in der Luftfahrtindustrie sowie kanülierten Implantaten und chirurgischen Elementen in der Medizintechnik [Eic96, Hei12, Heis11, Wen15, Wit07].

Das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern stellt dabei höchste Anforderungen an die maschinenseitigen Prozessrandbedingungen. Vorliegende Ungenauigkeiten der Werkzeugmaschine, wie z. B. der Rundlufffehler der Spindel oder Positionierfehler durch die Linearachsen, können eine Überbeanspruchung und einen unmittelbaren Bruch der langschäftigen Tiefbohrwerkzeuge mit geringer Stabilität hervorrufen [Eic96, Kut13]. Die Führungsgenauigkeit der Bohrbuchse oder Führungsbohrung im Werkstück sollte in einer engen G6-Toleranz vorliegen. Zur Realisierung ausreichender Schnittgeschwindigkeiten beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern sind außerdem hohe Drehzahlen und der Einsatz von präzisen Hochfrequenzspindeln erforderlich [Mit13]. Aufgrund der geringen Kühlkanalquerschnitte, aber auch wegen des kleinen Spanraumquerschnitts, sind beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern extrem hohe Kühlschmierstoffdrücke bis zu $p_{KSS} = 230$ bar und eine geringe kinematische Viskosität zwischen $v = 5 \dots 10$ mm²/s notwendig. Die hohen Kühlschmierstoffdrücke stellen zudem hohe Anforderungen an die Abdichtung der Kühlschmierstoffübergabe und erfordern aufgrund der hohen Axialkräfte auf den Übergabequerschnitt eine angepasste Werkzeugschneidung. Der Kühlschmierstoff muss mithilfe von Ölkühlern temperiert werden und sollte zwischen $T = 20 \dots 40$ °C vorliegen. Geringere Temperaturen führen zu größeren Luft einschüssen, stärkerer Schaumbildung und geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Bei Temperaturen über $T = 40$ °C tritt dagegen ein Abfall der Viskosität und Wirksamkeit der polaren Zusätze ein [Mit13, VDI3210, Zwi74]. Zur Kühlschmierstoffversorgung beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern ist die Integration von leistungsstarken Hochdruckpumpen in den Kühlkreislauf unumgänglich. Die Bedeutung der Filtrierung des Kühlschmierstoffes beim Tiefbohren nimmt mit abnehmendem Werkzeugdurchmesser zu. Das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern erfordert eine hohe Filterfeinheit, um ein Verstopfen des innenliegenden Kühlkanals zu vermeiden. Andernfalls werden Partikel und Rückstände im Kühlschmierstoff von den Führungsleisten in die Bohrungsoberfläche eingeebnet und reduzieren so die Oberflächenqualität [Klo12, Mit13].

Aufgrund der geringen Werkzeugsteifigkeiten sind die erzielbaren Vorschübe beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern stark limitiert. Die realisierbaren Vorschübe liegen häufig im Bereich der Schneidkantenverrundung, und es treten zum Teil stark negative effektive Spanwinkel auf [Eic96]. Die Spanabnahme wird folglich nicht mehr durch die nominellen Spanwinkel von $\gamma = 0^\circ$ beim Einlippentiefbohren sowie die variierenden nominellen Spanwinkel entlang der primären und sekundären Hauptschneiden und der Querschneide beim Wendeltiefbohren bestimmt. **Abbildung 10** stellt die schematischen Eingriffsverhältnisse beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern dar.

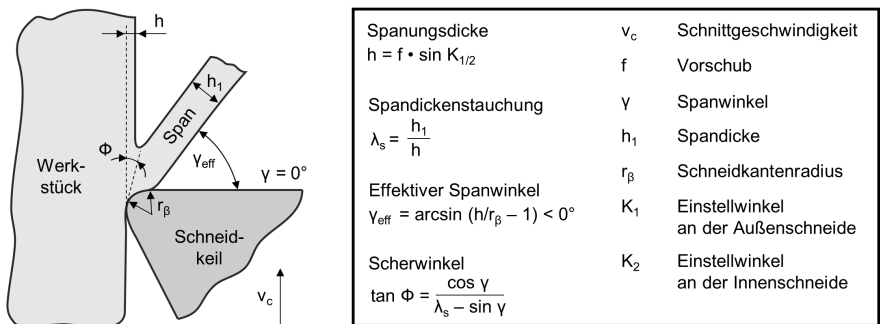


Abbildung 10: Eingriffsverhältnisse beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern [nach Eic96]

Das Verhältnis aus Spanungsdicke h zu Schneidkantenverrundung bestimmt maßgeblich die auftretenden mechanischen Werkzeugbelastungen beim Bohren mit Kleinstwerkzeugen. Mit abnehmendem Verhältnis aus Spanungsdicke zu Schneidkantenverrundung $h/r_\beta < 1$ kommt es zu einem nichtlinearen Anstieg der Schnitt- und Vorschubkräfte bzw. der spezifischen Wirkarbeit [Klo09, Ris06, Vol09]. In Abhängigkeit

vom zu zerspanenden Werkstoff liegt die minimale Spannungsdicke im Bereich von 5 ... 45 % des Schneidkantenradius [Imr08]. Bei Unterschreiten der minimalen Spannungsdicke nimmt durch die hohen mechanischen Belastungen der Schneidkantenverschleiß und somit die Verrundung weiter zu. Bei diesen Eingriffsbedingungen dominieren ungewünschte Kraftkomponenten durch Materialquetschungen und Ploughing [Alb60, Klo09, Ris06, Vol09]. Die Anwendung der Victor-Kienzle-Gleichung zur Abschätzung der auftretenden Zerspankräfte beim Bohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern verlangt eine entsprechende Erweiterung [Eic96, Klo09]. Zur Vermeidung einer signifikanten Vergrößerung der Schneidkantenradien im Beschichtungsprozess werden beschichtete Kleinstbohrer mit Dünnsschichten versehen. Darüber hinaus sollen die Aufmaße und Fertigungstoleranzen der Werkzeuge beim stirnseitigen Nachschleifen und Nachbeschichten so gering wie möglich gehalten werden. Ein alternatives Entschichten führt oftmals zu einer Schädigung des Hartmetalls. Mithilfe einer gezielten Schneidkantenverrundung lässt sich dagegen die Hauptschneidenmikrogestalt von Kleinstbohrern hinsichtlich der Kantenstabilität optimieren und die Standzeiten deutlich steigern [Ris06]. Des Weiteren führt ein steigendes Verhältnis von Querschneidenbreite zu Werkzeugdurchmesser zu einem deutlichen Anstieg der bezogenen Vorschubkräfte beim Mikrobohren [Klo09]. Eine Möglichkeit zur Verringerung der mechanischen Werkzeugbelastungen beim Bohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern besteht in der von *Okasha* entwickelten Verfahrenskombination aus Laserbohren und mechanischem Aufbohren. Mithilfe des Lasers wird eine Vorbohrung erzeugt und die hohen verfahrensbedingten Belastungen im Bereich der Querschneide und sekundären Hauptschneiden umgangen. Die Zerspanung erfolgt ausschließlich im Bereich der primären Hauptschneiden, wodurch sich die Standzeit im Vergleich zum rein mechanischen Vollbohren deutlich steigern lässt [Oka10, Oka11].

Das Verhältnis aus Spannungsdicke zu Schneidkantenverrundung bestimmt neben den mechanischen Werkzeugbelastungen auch die Spanformung [Klo07, Klo09, Vol09]. Aufgrund der geringen Querschnitte der Spannuten ist dabei eine prozessgünstige Spanform beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern von entscheidender Bedeutung [Eic96, Hei12]. Mit fallendem Verhältnis kommt es beim Wendelbohren mit kleinsten Durchmessern zu einer Entwicklung von klassischen Spiralspänen zu stark verformten Spänen. Wird die Mindestspannungsdicke deutlich unterschritten, kommt es zur Bildung von Bröckelspänen [Klo09]. Beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern führt eine Abnahme des Verhältnisses aus Spannungsdicke zu Schneidkantenverrundung zu einer deutlichen Zunahme der Spandickenstauchung [Eic96]. Die Spandickenstauchung beschreibt das Verhältnis aus Spandicke zu Spannungsdicke und wird von den geometrischen Verhältnissen am Schneidkeil, dem Formänderungsvermögen des Werkstoffes und den Schnittdaten beeinflusst [Den11, Klo08]. Die Span- und Gratabbildung besitzt beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern auch mit Blick auf die Bauteilsauberkeit einen großen Stellenwert. In den stetig anspruchsvolleren, eng tolerierten und miniaturisierten Bauteilen nimmt die Sauberkeit unmittelbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses. Es gilt dabei, eine aufwendige und kostenintensive Nacharbeit und Bauteilreinigung durch eine geeignete Auslegung der Prozessparameter zu umgehen. Eine Beeinflussung der kurz-, aber auch langzeitigen Funktionstauglichkeit industrieller Komponenten gilt es, durch eine hinreichende Bauteilsauberkeit und Beseitigung von verbleibenden Restpartikeln, wie z. B. Spänen und Graten, auszuschließen [Ste97, Heis11].

Zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern existieren verschiedene Ansätze zum Einsatz einer Prozessüberwachung und -regelung. Die unterschiedlichen Strategien basieren auf der Detektion von Zerspankräften, Bohrmoment, Schallemission, Kühlschmierstoffdruck sowie Spanfrequenz und -länge [Heis08b, Sab14, Wir10]. Das Tiefbohren mit Werkzeugdurchmessern $d \leq 0,5$ mm ist dabei nur eingeschränkt prozesssicher. Die Realisierbarkeit hängt stark von dem zu bearbeitenden Werkstoff und der jeweiligen Werkstoffcharge ab [Mit13].

2.2 Werkstofftechnische Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die werkstofftechnischen Grundlagen zu bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen erläutert. Diesbezüglich wird auf die Verwendung, die Zusammensetzung und Morphologie der Werkstoffe eingegangen. Außerdem wird die Zerspanbarkeit anhand der mechanischen Werkstoffeigenschaften beschrieben und die bislang vorliegenden Erkenntnisse zum Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen zusammengefasst.

2.2.1 Hochfeste bainitische Stähle

Stähle sind im allgemeinen Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt $< 2,06\%$, die als Mischkristalle vorliegen [Bar08]. Die Fremdatome sind dabei im Eisengitter anstelle eines Eisenatoms oder in Gitterlücken gelöst. Im Herstellungszustand liegen die Stahllegierungen dabei selten in den gewünschten Anforderungen vor und bedürfen einer anwendungsorientierten Wärmebehandlung. Der Werkstoffzustand und die Eigenschaften, wie z. B. die Festigkeit und Zähigkeit, können mithilfe der Wärmebehandlung gezielt eingestellt werden [Lie05]. Im Rahmen der Wärmebehandlung werden die Werkstücke ganz oder teilweise Zeit-Temperatur-Folgen unterworfen und so eine Änderung der Eigenschaften und/oder des Gefüges herbeigeführt. Gegebenenfalls erfolgt durch die Wärmebehandlung auch eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung [DIN10052]. In Abhängigkeit von der anwendungsorientierten Zielsetzung wird zwischen einer Reihe von industriell gebräuchlichen Wärmebehandlungsverfahren unterschieden. Beim Glühen, Härten, Anlassen, Vergüten und Bainitisieren wird der Werkstoffzustand über den gesamten Querschnitt verändert. Weitere Verfahren, wie z. B. das Einsatzhärten oder unterschiedliche Diffusionsbehandlungen, konzentrieren sich hauptsächlich auf die Modifikation der Eigenschaften in der Randschicht, wobei der Werkstoffzustand im Querschnitt zwangsläufig auch betroffen ist. Zudem existieren Verfahren, wie z. B. das Nitrieren und Randschichthärten, die ausschließlich eine Veränderung des Werkstoffzustandes in der Randschicht verfolgen [Lie05]. Bei Anwendung eines Glühverfahrens folgt in der Regel eine langsame Abkühlung auf das Glühen bzw. der Umwandlung in eine austenitische Kristallstruktur. Glühbehandlungen dienen der Veränderung eines Gefüges in Richtung eines dem Gleichgewicht näheren Zustandes. Motivation verschiedener Glühverfahren kann die Reduzierung von Seigerungen und Spannungen, die Veränderung der Korngröße oder auch die Erhöhung der Verformbarkeit eines Werkstoffes sein. Beim Härten hingegen wird eine rasche Abkühlung des Austenits angestrebt. Es kommt zur Ausbildung eines martensitischen Werkstoffzustandes, charakterisiert durch eine höhere Härte [Bar08]. In Abhängigkeit von der Stahllegierung können neben den martensitischen Gefügeanteilen auch geringe Anteile an Bainit nach dem Härten vorliegen. Zur Einstellung des optimalen Verhältnisses aus Festigkeit und Formänderungsvermögen und Vermeidung der Rissbildung werden Werkstücke meist nach dem Härten einem zusätzlichen Anlassen unterzogen. Die Kombination beider Verfahren wird als Vergüten bezeichnet. Beim Bainitisieren wird ein Werkstoffzustand angestrebt, bei dem die bainitischen Gefügeanteile dominieren. Es lassen sich vergleichbare Härtewerte und Festigkeiten wie beim martensitischen Härten einstellen. Im Gegensatz zum Härten erfolgt auf das Bainitisieren jedoch kein anschließendes Anlassen [Som02]. Trotzdem bieten bainitische Stähle ein größeres Formänderungsvermögen gegenüber martensitischen Stählen gleicher Härte [Bar08, Lie05].

Bainitische Gefügestrukturen wurde 1930 erstmals von *Davenport* und *Bain* im Rahmen von Experimenten zur isothermen Umwandlung entdeckt und später nach einem der Entdecker benannt [Bha01, Han12, Dav70]. Ein bainitisches Gefüge bildet sich im Temperaturbereich unterhalb der Perlit- und oberhalb der Martensitstufe [Lün91]. Aus diesem Grund wird diese Gefügeform auch häufig als bainitisches Zwischengefüge bezeichnet. In diesem Temperaturbereich ist eine Eisendiffusion

ausgeschlossen und eine Kohlenstoffdiffusion erheblich erschwert. Im Wesentlichen bestehen Bainite aus Ferrit mit eingelagerten Karbiden. Die Größe der Karbide wird durch die Umwandlungstemperatur und -geschwindigkeit bestimmt [Bar08, Bha01]. Analog zum Härten muss das Werkstück zum Bainitisieren zunächst auf die Austenitisierungstemperatur erwärmt und gehalten werden. Es wird der austenitische Zustand auf dieser Temperatur herbeigeführt und gleichzeitig eine ausreichende Menge Kohlenstoff im Austenit in Lösung gebracht. Die Austenitisierungstemperatur entspricht meist der unteren Grenze des für das Härten zweckmäßigen Temperaturbereichs. Die Bildung von Bainit setzt erst nach Unterschreiten der Bainit-Starttemperatur ein. In Abhängigkeit vom Legierungskonzept liegen die Bainit-Starttemperaturen zwischen $T = 200 \dots 600 \text{ °C}$ [Für10]. Das Bainitisieren setzt dabei eine ausreichend hohe Härbarkeit und Umwandlungscharakteristik voraus. Für die Verwendung ist das Zulegieren der Legierungselemente Chrom, Molybdän und Mangan, die beim Abkühlen eine Umwandlung des Austenits in Ferrit und/oder Perlit unterdrücken, entscheidend [Hofm06]. Der bainitische Zustand kann durch zwei Umwandlungsmethoden eingestellt werden. Einerseits besteht die Möglichkeit einer kontinuierlichen Abkühlung aus der Austenitisierungstemperatur. Bei dieser Variante kommt es häufig zur Ausbildung unterschiedlich strukturierter Bainitgefüge und einer Umwandlung von Teilen in Ferrit und/oder Perlit vor Erreichen des Bainitbereiches. Andererseits kann ein bainitisches Gefüge durch isothermes Umwandeln im Bainitbereich erreicht werden. Beim isothermen Umwandeln wird zügig von der Austenitisierungstemperatur auf eine Temperatur unterhalb von etwa $T = 500 \text{ °C}$, jedoch oberhalb der Martensittemperatur der entsprechenden Stahllegierung, abgekühlt. Es folgt ein Halten auf dieser Temperatur bis zur vollständigen Umwandlung des Austenits. Das isotherme Umwandeln führt zu geringen Temperaturunterschieden zwischen Kern und Rand, sodass sich nur geringe Eigenspannungen ausbilden. Abschließend wird der bainitische Stahl in beliebiger Geschwindigkeit auf Raumtemperatur abgekühlt. Zur Durchführung des Bainitisierens werden gewöhnlich Salzbadtiegelöfen oder Wirbelbetten verwendet [Han12, Lie05].

Die bainitischen Gefüge bilden sich in einer großen Vielfalt an Morphologien aus, wobei zwischen den zwei Hauptformen nadeliger und körniger Bainit differenziert wird. Der körnige Bainit entsteht ausschließlich bei kontinuierlicher Abkühlung. Der Austenit reichert sich, bedingt durch die beginnende Ferritausscheidung, mit Kohlenstoff an. Die Umwandlung dieser Austenitbereiche in regellos angeordneten Ferrit und Karbid, nadeligen Bainit und Martensit hängt stark von der Abkühlwirkung ab. Nadeliger Bainit kann sowohl nach kontinuierlicher Abkühlung als auch isothermer Umwandlung vorliegen [Bar08, Bha01]. Die Entstehung bainitischer Ferritplatten erfolgt diffusionslos an den Austenitkorngrenzen, wobei der überschüssige Kohlenstoff bei diesem Umklappprozess in den Austenit diffundieren kann. Der bainitische Ferrit bildet sich in Form von Clustern als dünne linsenförmige Plättchen aus. Die Ferritplatten sind in der Regel durch Restphasen aus Austenit und Zementit voneinander getrennt und werden häufig auch als „Sub-Units“ bezeichnet [Egg14]. Ein Komplex aus mehreren „Sub-Units“ bildet wiederum Bainitnadeln, sogenannte „Sheaves“ [Bha01, Lün91]. In Abhängigkeit von der Bildungstemperatur wird bei nadeligen Ausprägungsformen zwischen unterem und oberem Bainit unterschieden. **Abbildung 11** zeigt die entsprechende Entwicklung und Morphologie des unteren und oberen Bainits.

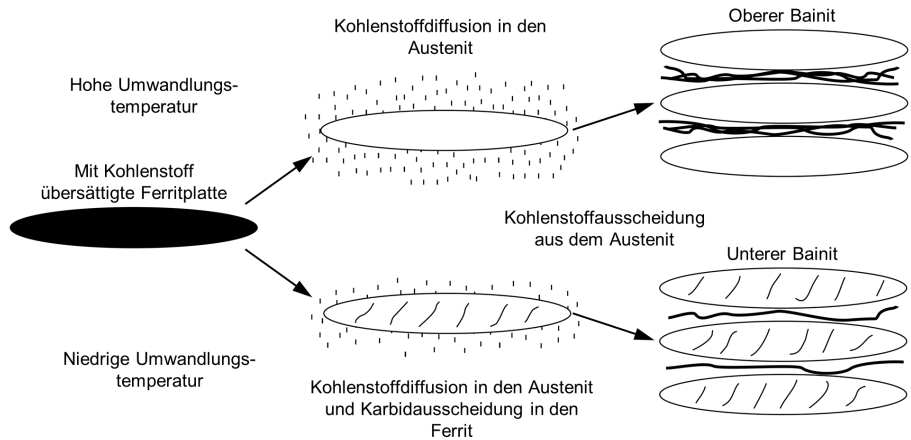


Abbildung 11: Entwicklung und Morphologie des unteren und oberen Bainits [nach Bha01, Für10, Pee14]

Unterer Bainit entsteht bei Umwandlung im unteren Temperaturbereich kurz oberhalb der Martensittemperatur. Aufgrund dessen besteht große Ähnlichkeit von unterem Bainit mit martensitischen Gefügestrukturen. Bei der Entstehung des unteren Bainits klappt der kubisch-flächenzentrierte γ -Mischkristall in büschelförmig angeordnete Ferritplatten um. Im kubisch-raumzentrierten α -Gitter setzt die im austenitischen Mischkristall bereits nahezu eingeflossene Diffusion des Kohlenstoffs wieder ein, und es bilden sich Karbide mit der Stöchiometrie Fe_3C . Die Eisenkarbide ordnen sich in einem charakteristischen Winkel von etwa 60° zur Hauptachse der Ferritnadeln an [Bha01, Für10, Lün91]. Die feine Mikrostruktur und Karbidverteilung infolge der geringen Umwandlungstemperaturen begünstigt maßgeblich die hervorragende Kombination aus Materialfestigkeit und -zähigkeit [Gerd10]. Im oberen Temperaturbereich kommt es dagegen zur Ausbildung von oberem Bainit. Die hohen Temperaturen wirken sich dabei günstig auf das Diffusionsverhalten aus. Der Kohlenstoff wandert aus dem Inneren der Ferritnadeln an deren Korngrenzen, und es bildet sich ein gebündeltes, lanzettenartiges Gefüge. Die Karbidfilme liegen zwischen den einzelnen Ferritplatten [Für10, Keu12, Lün91]. Im Gegensatz zum unteren Bainit sind die Karbide beim oberen Bainit unterbrochen und unregelmäßig angeordnet, wodurch das Gefüge einem Perlit ähnelt. Aus den kompakten und groben Karbiden resultieren schlechtere mechanische Materialkennwerte verglichen mit dem des unteren Bainits [Bar08].

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften bieten bainitische Stähle neben hohen Festigkeiten und einer guten Ermüdungslebensdauer gleichzeitig eine hohe Zähigkeit, Verformbarkeit und Rissbeständigkeit. Die Härtewerte nähern sich denen der martensitischen Gefügestrukturen umso mehr, desto näher die Umwandlungstemperatur am Martensitpunkt liegt. Ebenso ist die Dehngrenze bainitischer Stähle höher als im vergüteten Zustand [Lie05]. Die Auslegung hochbelasteter Komponenten und Sicherheitsbauteile fordert in vielen Anwendungen genau diese Kombination aus mechanischen Eigenschaften ein [Egg14, Eng11, Som02]. Im Bereich der Schmiedestähle rücken daher hochfeste bainitische Stähle als Alternative zu den meist verwendeten Vergütungsstählen und den ausscheidungsgehärteten, ferritisch-perlitischen Stählen (AFP-Stähle) zunehmend in den Fokus [Keu12, Rae12]. Bei den Vergütungsstählen erhöhen sich die Herstellungskosten durch die nachträgliche Wärmebehandlung des Schmiedeteils um bis zu 10 % [Egg14]. Bainitische Stähle ermöglichen dagegen die Einsparung des Anlassens durch ein direktes Abkühlen aus der Schmiede- oder Walzhitze. AFP-Stähle erreichen dabei nur annähernd die Festigkeits- und Zähigkeitswerte von bainitischen Stählen und Vergütungsstählen [Egg14, Mer14]. Ein Anwendungsbeispiel, das hohe statische und dynamische Festigkeiten und eine

ausreichende Zähigkeit einfordert, sind hochbelastete Komponenten aus dem Antriebsstrang in der Automobilindustrie [Har14b, Per08, Eng11]. Das Wachstum der weltweiten Produktion von Verbrennungskraftmotoren, insbesondere von 2-, 3- und 4-Zylindermotoren, wird die Nachfrage an höherfesten Stählen zusätzlich verstärken [Abe14, Mey13]. Vor dem Hintergrund der steigenden Anforderungen an die Ressourceneffizienz ist zukünftig auch in weiteren Industriebranchen, wie z. B. im Maschinen- und Anlagenbau oder auch im Schiffbau, mit einem steigenden Bedarf an hochfesten bainitischen Stählen zu rechnen [Kue08, Pee14].

Zerspanbarkeit bainitischer Stähle

Um die Vorteile hochfester bainitischer Stähle in industriellen Anwendungen nutzen zu können, kommt der Zerspanbarkeit eine wichtige Bedeutung zu. Neben den Kosten für die Wärmebehandlung von Schmiedeteilen wird ein erheblicher Anteil von bis zu 70 % der Gesamtkosten durch die anschließende spanende Bearbeitung bestimmt [Tön00]. Die Zerspanbarkeit von Stählen wird dabei maßgeblich durch die vorherrschende Gefügestruktur beeinflusst. Die Randbedingungen der spanenden Fertigung von bainitischen Stählen sind stark von der Morphologie abhängig. Die perlitähnliche Gefügestruktur des oberen Bainits führt im Allgemeinen zu hohen Zerspankräften und starkem abrasiven Werkzeugverschleiß. Beim unteren Bainit, der große Ähnlichkeit mit dem Martensit besitzt, ist die Zerspanbarkeit durch ein hohes thermomechanisches Belastungskollektiv und einen erhöhten abrasiven Werkzeugverschleiß gekennzeichnet [Klo08]. Einen höheren Werkzeugverschleiß beim Bohren der Stähle 20MoCrS4 und 27MnSiVS6 mit bainitischer Gefügestruktur verglichen mit der ferritisch-perlitischen Gefügestruktur konnten auch *Tönshoff et al.* herausstellen [Tön00].

Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Gefügestruktur beim Einlippentiefbohren von hochfesten geschmiedeten Stählen war Gegenstand der Untersuchungen von *Bomont-Arzur et al.* Als Anwendungsbeispiel diente die Fertigung von Schmierbohrungen in Kurbelwellen für die Schwerindustrie. Der betrachtete Werkzeugdurchmesser betrug $d = 7$ mm, wobei Bohrungstiefen bis $l_1 = 100$ mm realisiert wurden. Die Untersuchungen beinhalteten eine generelle Machbarkeitsstudie gefolgt von einer Prozessoptimierung. In der Gegenüberstellung wurde ein vergüteter Referenzstahl aus 34CrNiMo6 mit einer Härte von 310 ... 340 HV mit drei mikrolegierten, hochfesten Stählen, die keine energie- und kostenintensive Wärmebehandlung erforderten, verglichen. Im Rahmen dessen wurden ein bainitischer Stahl (340 ... 360 HV), eine kombinierte Struktur mit etwa 40 % Perlit und 60 % Bainit (320 ... 390 HV) sowie ein perlitischer Stahl (240 ... 260 HV) eingesetzt. Die Messung der mechanischen Belastungen zeigte eine starke Abhängigkeit von der Gefügestruktur und den Materialfestigkeiten. Beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls mit Festigkeiten deutlich oberhalb von $R_m = 1000$ MPa lagen hohe Axialkräfte, ein hoher Werkzeugverschleiß und geringere Standzeiten vor, wenngleich die Bearbeitung in einem großen Schnittdatenfenster möglich war. Dagegen begünstigte die hohe Härte des bainitischen Stahls die Entstehung von sehr kurzen Spänen unabhängig von den eingestellten Schnittdaten [Bom07, Per08].

Smolenicki et al. beschäftigten sich mit dem Tiefbohren von bainitischen Stählen und Vergütungsstählen. Die Untersuchungen konzentrierten sich exemplarisch auf das Vollhartmetallwendeltiefbohren mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 4$ mm und ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_1/D = 15$. Im Fokus der Versuche stand ein neuartiger bainitischer Stahl HSX130D mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 980$ MPa und ein herkömmlicher Vergütungsstahl 51CrV4V mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 1070$ MPa. Darüber hinaus wurde ein nichtkommerzieller Stahl mit unterem bainitischem Gefüge und einer Zugfestigkeit von $R_m = 1068$ MPa eingesetzt [Roe14, Smo12b]. Bei einer Gegenüberstellung des bainitischen Stahls HSX130D mit dem Vergütungsstahl 51CrV4V unter Einstellung konstanter Schnittdaten wurden bei Einsatz des bainitischen Stahls dünnere Späne sowie geringere Vorschubkräfte und Bohrmomente nachgewiesen [Smo12]. Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten dabei Analysen zur Spanbildung.

Diesbezüglich wurde mittels Spanwurzeln das Fließverhalten der Späne in Abhängigkeit der eingesetzten Werkstoffe betrachtet. Die Auswertung der Spanwurzeln erfolgte zerstörungsfrei mithilfe der Computertomographie als auch zerstörend mittels Auftrennen durch Drahterodieren. Im Detail wurden die Spandicke, Spanstauchung, Materialflussrichtung und Scherwinkel entlang der S-förmig ausgespitzten Werkzeugschneide ermittelt. Steigende Zähigkeitswerte führten in den Versuchen zu einem Anstieg der Schnittkräfte, Spandicke und Spandickenstauchung. Der Scherwinkel wird durch die Werkzeuggeometrie, Schnittdaten, Kontaktflächenreibung und Materialkennwerte bestimmt [Roe14, Smo12b]. Ergänzende Untersuchungen zu mineralölbasierten und pflanzlichen Schneidölen zeigten nur geringfügige Unterschiede in der Kühl- und Schmierwirkung [Smo12].

Untersuchungen zur Zerspanbarkeit höherfester bainitischer Stähle im Vergleich mit industriell verbreiteten Vergütungsstählen führte auch *Felderhoff* durch. Der eingesetzte bainitische Stahl 20MnCrMo7 und der schwefelarme Vergütungsstahl 42CrMo4 lagen mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 1265$ MPa bzw. $R_m = 960$ MPa vor. Die Versuche zum Einlippentiefbohren konzentrierten sich auf einen Werkzeugdurchmesser von $d = 5$ mm und ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l/D = 30$. Hierbei kamen unbeschichtete Standardwerkzeuge sowie vor- und nachbehandelte Hochleistungs-Einlippentiefbohrer in beschichteter Ausführung zum Einsatz. Beim Tiefbohren des Vergütungsstahls mit dem konventionellen Einlippentiefbohrer konnte bei moderaten Schnittdaten $v_c = 80$ m/min und $f = 20$ μ m ein Bohrweg von $l_f = 30$ m erreicht werden. Durch das geringe thermomechanische Belastungskollektiv stellte sich nur ein geringer Kolk- und Freiflächenverschleiß ein. Das Tiefbohren des hartesten bainitischen Stahls 20MnCrMo7 resultierte einerseits in einer günstigen Spanform. Andererseits führten die höheren Festigkeitswerte zu einem signifikanten Anstieg im Werkzeugverschleiß. Unter konstanten Schnittdaten konnte mit einem unbeschichteten Standardwerkzeug lediglich ein Bohrweg von $l_f = 1,95$ m erreicht werden. Der Einsatz eines modifizierten Hochleistungs-Einlippentiefbohrers bot eine deutliche Verbesserung der Verschleißentwicklung, wodurch wiederum vergleichbare Standzeiten zum Tiefbohren des schwefelarmen Vergütungsstahls unter Verwendung eines Standardwerkzeuges erreicht werden konnten. Der Radiusanschliff des Hochleistungs-Einlippentiefbohrers führte dennoch zu veränderten Kraftverhältnissen und einer negativen Beeinträchtigung der Maß- und Formtoleranzen [Bie10, Fel11]. *Hartmann et al.* knüpften an diese ersten Erkenntnisse an und führten weitere Untersuchungen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren von bainitischen Stählen und Vergütungsstählen in den gleichen Dimensionen durch. Beim Einlippentiefbohren wurden die Werkzeugentwicklungen weiter vorangetrieben und ein neuer Hochleistungs-Einlippentiefbohrer eingesetzt. Die optimierte Bohrkopfgestaltung und eine Anpassung der Schnittdaten ermöglichte die Erzielung eines deutlich höheren Standweges von $l_f = 20$ m bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität um bis zu 75 %. Darüber hinaus konnte durch die optimierte Schneidengestalt eine günstigere Spanform und folglich eine höhere Prozessstabilität erreicht werden. Ebenso waren im Hinblick auf die Bohrungsqualität Vorteile gegenüber dem Einsatz des konventionellen Einlippentiefbohrers sowohl beim bainitischen Stahl 20MnCrMo7 als auch beim Vergütungsstahl nachweisbar [Har13, Har13b]. Die Untersuchungen zum Wendeltiefbohren erfolgten zunächst unter Verwendung von herkömmlichen Vollhartmetallwerkzeugen, die sich für das Tiefbohren von Vergütungsstählen bewährt haben. Hierbei traten massive Probleme in der Spanabfuhr durch die Ausbildung dickerer Späne auf, die zu einer Verstopfung der Spannuten und einem signifikanten Anstieg der mechanischen Belastungen mit steigender Bohrtiefe führten. Aus diesem Grund waren die Werkzeugstandzeiten stark limitiert. Eine Anpassung der Kernverjüngung führte zu einer sicheren Abfuhr der Späne, ohne die Stabilität des Werkzeuges zu beeinträchtigen. Infolgedessen ergab sich ein moderater Freiflächenverschleiß über einen erreichten Bohrweg von $l_f = 20$ m [Har14]. Dass für eine wirtschaftliche Zerspannung von anspruchsvollen bainitischen Stählen eine Werkzeug- und Prozessanpassung unabdingbar ist, bestätigten ergänzende Untersuchungen zum Tiefbohren von Common-Rail-

Verteilerleisten unter den Bedingungen eines Serienprozesses. Im Rahmen dessen wurden das Einlippentiefbohren eines Referenzstahls 38MnVS6 in modifizierter Ausführung ($R_m = 960$ MPa) mit dem eines höherfesten bainitischen Stahls 20MnCrMo7 ($R_m = 1250$ MPa) mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 9$ mm und einer Bohrtiefe von $l_t = 185$ mm gegenübergestellt. Durch den Einsatz eines optimierten Einlippentiefbohrers konnten bei der Bearbeitung des hochfesten bainitischen Stahls 20MnCrMo7 das Verschleißverhalten verbessert und gleiche Bohrwege im Vergleich zur Bearbeitung des modifizierten Referenzstahls 38MnVS6 mit einem standardisierten Serienwerkzeug erzielt werden [Har14b].

2.2.2 Hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen

Nickelbasislegierungen zählen zu den Superlegierungen und definieren sich durch ihre Anforderungen an die Langzeitwarmfestigkeit unter mechanischer Beanspruchung bei Temperaturen oberhalb von 500 °C [DIN10302]. Die Hochtemperaturwerkstoffe auf Nickel-Basis besitzen ein herausragendes mechanisches, thermisches und korrosives Materialverhalten unter Einsatztemperaturen bis 1000 °C und finden ein breites industrielles Anwendungsfeld, wie z. B. im Turbinenbau in der Luft-, Raumfahrt- und Energietechnik, in der Automobilindustrie zur Fertigung von Ventiltriebssystemen und Komponenten von Abgasturbo ladern sowie in der chemischen Industrie zur Herstellung von Pumpen und Ventilen [Aru04, Bür11, Wes07]. Die Herstellung kann sowohl durch Guss- als auch durch Schmiedeverfahren erfolgen. Zur Einstellung der gewünschten Materialeigenschaften schließt sich dem Gießen oder Schmieden in der Regel eine Wärmebehandlung an. Die meist verwendete Knetlegierung ist die bereits 1964 von der Inco Alloys International (seit 1998 Special Metals Corporation) patentierte Nickelbasislegierung Inconel 718. Nickelbasislegierungen basieren auf einer austenitischen, kubisch-flächenzentrierten γ -Phase. Hinzu kommen eine Reihe von weiteren Sekundärphasen wie die γ' -Phase ($Ni_3(Al)$), die tetragonal-raumzentrierte γ'' -Phase ($Ni_3(Nb,Al,Ti)$), die orthorhombische δ -Phase (Ni_3Nb) und die hexagonal-dichteste gepackte η -Phase (Ni_3Ti). Zudem bilden sich eine Reihe von kubisch-flächenzentrierten Mischkarbiden sowie Boride und Karbosulfide [Bür11, Don03].

Das Basiselement Nickel bildet die Grundlage für die herausragenden Materialeigenschaften der Hochtemperaturwerkstoffe und liegt bei jeglichen Temperaturen bis zum Schmelzpunkt von 1455 °C in kubisch-flächenzentrierter Kristallstruktur mit einem inhärent niedrigen Diffusionskoeffizienten vor. Zudem existiert kein anderes Basiselement im Hochtemperaturbereich, das vergleichbare Festigkeitssteigerungen durch Mischkristallbildung und Bildung dispers verteilter Teilchen beim Aushärten ermöglicht [Bar08, Bür11]. Nickelbasislegierungen enthalten dabei bis zu 15 Legierungselemente mit einem Volumenanteil von bis zu 60 %. Die Wahl der Legierungselemente beeinflusst maßgeblich die Ausbildung der Phasen und folglich die sich einstellenden Materialeigenschaften in Nickelbasislegierungen. Die Grundmatrix aller Nickelbasislegierungen bildet ein kubisch-flächenzentrierter γ -Mischkristall, der einen hohen Anteil an Mischkristallhärtern wie Kobalt, Eisen, Chrom, Molybdän, Wolfram, Niob oder Tantal enthält [Bür11, Don03, Weiß07].

Den größten Einfluss auf die sich ausbildende Festigkeit einer Vielzahl von Nickelbasislegierungen bedingt die Ausbildung der intermetallischen γ' -Phase. Die γ' -Phase enthält den höchsten Nickelgehalt und liegt im binären Nickel-Aluminium-System in der dominanten Stöchiometrie $Ni_3(Al)$ vor. Im Gegensatz zur ungeordneten kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur der γ -Phase bildet die γ' -Phase geordnete, kubisch-primitive Kristallgitter [Ree06]. Die Ausbildung dieser Phase wird maßgeblich durch das Zulegieren der Elemente Titan und Aluminium gefördert. Die Größe und Verteilung der γ' -Phase wird durch die Wärmebehandlung reguliert. Hyperfeine γ' -Teilchen haben einen Durchmesser bis $0,05$ μm . Dagegen werden Ausscheidungen mit einem Durchmesser von $0,05$ μm bis $0,1$ μm als feine

γ' -Teilchen bezeichnet. Bis zu dieser Größe erfolgt eine meist kugelförmige Ausscheidung. Mittlere Ausscheidungen nehmen eine Größe von 0,1 bis 0,5 μm ein. Bei Werten über diesen wird von groben γ' -Ausscheidungen gesprochen. Die mittleren und groben γ' -Ausscheidungen erscheinen dabei meist in Form von kubischen bis hin zu langen, floßartigen Strukturen. Der Volumenanteil der γ' -Phase in Nickelbasislegierungen kann wenige Prozent bis hin zu 60 % betragen [Bür11]. In Schmiedelegierungen wie Inconel 718, Waspaloy, Udimet 720 LI und Allvac 718 Plus beträgt der Volumenanteil der γ' -Phase etwa 30 ... 40 % [Klo08].

Bei Nickel-Eisenlegierungen, wie z. B. Inconel 718, resultieren die hohen Festigkeiten primär aus der Ausbildung einer γ'' -Phase. Die γ'' -Phase wird durch Wärmebehandlungen zwischen $T = 650 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgeschieden und hat eine Lösungstemperatur von etwa $T = 885 \text{ }^\circ\text{C}$ [Don03, Pat01, Ren07]. Die γ'' -Teilchen bilden sich in einer tetragonal-raumzentrierten Gitterstruktur mit der Stöchiometrie $\text{Ni}_3(\text{Nb,Al,Ti})$ aus. Reduzierte Legierungsgehalte der Elemente Aluminium und Titan, aus denen die Bildung der γ' -Phase resultiert, begünstigen einen höheren Anteil der γ'' -Phase. Die γ'' -Teilchen liegen teilkohärent und scheiben- oder plattenförmig mit einer Dicke von etwa 10 nm und einem Durchmesser von bis zu 50 nm in der Matrix vor [Ree06]. Die scheiben- oder plattenförmigen Ausscheidungen tragen durch die Kohärenzspannungen zur hohen Materialfestigkeit und Zähigkeit von Inconel 718 bei. Die γ'' -Phase stellt eine Zwischenstufe des Ausscheidungsprozesses dar. Bei Betriebstemperaturen oberhalb von $650 \text{ }^\circ\text{C}$ wandelt sich die metastabile γ'' -Phase in die stabile δ -Phase um. Die orthorhombisch geordnete δ -Phase liegt inkohärent in der γ -Phase vor und ist gleichzeitig die Endstufe des Ausscheidungsprozesses. Die inkohärente Kristallstruktur und die grob-plattenförmige Erscheinung reduzieren die Materialfestigkeiten und die Duktilität der Legierung [Val12]. Zudem resultiert daraus eine erhöhte Korbempfindlichkeit, wodurch die Ausbildung der δ -Phase unerwünscht ist. Neuen Nickelbasislegierungen wird daher ein höherer Anteil an Titan und Aluminium zulegiert, wodurch die γ' -Phase stabilisiert und die alternen Anteile an γ'' - und δ -Phasen reduziert werden. Auf diese Weise wird eine höhere thermische Stabilität und Dauereinsatztemperatur oberhalb von $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ermöglicht [Bür11, Ren07].

Höhere Legierungsgehalte von Titan und Aluminium führen zudem zur Ausscheidung der η -Phase mit der Stöchiometrie Ni_3Ti . Die η -Phase bildet sich aus der γ' -Phase und liegt inkohärent und in hexagonal-dichtester Packung vor. Die Ausbildung der η -Phase reduziert die Duktilität, Zähigkeit, Korbempfindlichkeit sowie Ermüdungsfestigkeit [Bür11].

Legierungselemente wie Chrom, Molybdän, Titan, Tantal, Hafnium und Niob führen zudem zur Ausbildung unterschiedlicher Karbide und Boride in der Stöchiometrie MC , M_6C , M_{23}C_6 , M_7C_3 und M_3B_2 [Ree06]. Die Ausscheidungen an den Korngrenzen können zur Korngrenzenverfestigung beitragen und einem Gleiten der Korngrenzen entgegenwirken. Zudem können kohärent vorliegende Karbide in der Grundmatrix generell festigkeitssteigernd wirken. MC-Karbide bestehen vorrangig aus Titan, Tantal, Hafnium oder Niob und bilden sich bei hohen Schmelztemperaturen über $T = 1038 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1900 \text{ }^\circ\text{F}$) interdendritisch in den Dendritenzwischenräumen aus [Don03]. Es handelt sich häufig um Karbonnitride $\text{M}(\text{C,N})$, die aus Verbindungen mit dem Stickstoff der Schmelze sowie Reststickstoff aus dem erstarrten Werkstoff resultieren. Die block- oder kugelförmigen Karbonnitride erscheinen in metallographischen Gefügeschliffen in Abhängigkeit des Stickstoffgehalts orange bis grauviolett [Bür11]. MC-Karbide liegen instabil vor und wandeln sich langfristig in M_{23}C_6 -Karbide um. M_{23}C_6 -Karbide bilden sich vorrangig in Kombination mit Chrom und formen sich während der Aushärtungsbehandlung bei geringeren Temperaturen von $T = 760 \dots 816 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1400 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{F}$) an den Korngrenzen der γ -Matrix. In Legierungen mit Molybdän- und Wolframanteilen von über 6 % kommt es vermehrt zur Ausbildung von M_6C -Karbiden. M_6C -Karbide bilden sich bei Temperaturen von $T = 815 \dots 980 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1500 \dots 1800 \text{ }^\circ\text{F}$). M_7C_3 -Karbide treten lediglich vereinzelt in Nickel-Chrom-Titan-Aluminium-Superlegierungen wie Nimonic 80 A bei Aushärtungstemperaturen über $T = 999 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1830 \text{ }^\circ\text{F}$) auf. Durch Legierungszusätze aus Kobalt, Molybdän, Wolfram und Niob wird die Ausbildung von M_7C_3 -Karbiden in Nickelbasis-

legierungen unterdrückt. Zur Verbesserung der Dauerfestigkeit werden Nickelbasislegierungen mit geringen Anteilen an Zirkonium und Bor versehen. Hierdurch entstehen an den Korngrenzen von Nickelbasislegierungen harte Boride in der Stöchiometrie M_3B_2 und MB_{12} [Don03]. Zudem kommt es in einigen Werkstoffen zur Ausbildung hexagonaler Karbosulfide $(Zr,Ti)_2CS$, die auch als H-Phase bezeichnet werden. Bei Nickelbasislegierungen wie Inconel 718 mit hohen Anteilen an Niob treten Karbosulfide auch in der Stöchiometrie Nb_2SC auf. Die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen kann durch Karbosulfide reduziert werden [Bür11].

Zerspanbarkeit von Nickelbasislegierungen

Die Zerspanbarkeit von Nickelbasislegierungen wird durch die chemische Zusammensetzung und Gefügeausbildung beeinflusst. Im Allgemeinen steht den hervorragenden mechanischen, thermischen und chemischen Werkstoffeigenschaften dabei eine besonders anspruchsvolle Zerspanbarkeit gegenüber. Die hohen Festigkeiten bis zu Temperaturen, bei denen gewöhnliche Stähle beginnen zu erweichen, führen zu hohen mechanischen Werkzeugbelastungen und einem starken Werkzeugverschleiß. Dies wird verstärkt durch ausgeprägte dynamische Scherfestigkeiten und eine starke Neigung der austenitischen Gefügestruktur zur Kaltverfestigung. Die harten Ausscheidungen in Form von Karbiden und Karbonitriden sowie die hochfesten intermetallischen Phasen ziehen einen starken abrasiven Werkzeugverschleiß nach sich. Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Hochtemperaturwerkstoffe führt zu einem Wärmestau und hohen thermischen Werkzeugbelastungen. Bedingt durch die chemische Affinität zu vielen Schneidstoffen kommt es häufig bei hohen Prozesstemperaturen zu Diffusionsverschleiß [Gla10, Sha08]. Gleichzeitig unterliegen die Randzonen der zerspannten Werkstücke hohen thermomechanischen Belastungen. Es resultiert häufig eine randzonennahe Beeinflussung der Mikrostruktur und das Einbringen von Eigenspannungen [Aru04, Imr11, Oze11]. Darüber hinaus bedingt die hohe Duktilität der Nickelbasislegierungen eine Fließspanbildung und adhäsive Materialaufschmierung. Der starke Adhäsivverschleiß begrenzt die erzielbaren Oberflächenqualitäten [Sha08]. Die Einstellung kleinster Vorschübe und Spannungsdicken in der Mikrozerspanung kann zudem das Herausreißen ganzer Karbidkörner bedingen. Kommt es gleichzeitig zu Ploughing und Materialquetschungen unter der Schneidkante, können durch die herausgerissenen Karbide zerklüftete Oberflächentopographien entstehen [Oze11]. Bedingt durch die begrenzte Produktivität und den hohen Werkzeugverschleiß sind die Fertigungskosten im Vergleich zur Stahlbearbeitung um ein Vielfaches höher [Aru00, Don03, Ezu03]. Die Einteilung der Zerspanbarkeit von Nickelbasislegierungen kann dabei in fünf Zerspanbarkeitsgruppen erfolgen [Klo08]. In **Abbildung 12** ist die Zuordnung der Knet- und Gusslegierungen zu den Zerspanbarkeitsgruppen mit entsprechenden Legierungsbeispielen dargestellt. Die Herausforderungen in der Zerspanbarkeit steigen mit der Zerspanbarkeitsgruppe. Die Zerspanbarkeit der Legierungen in Gruppe 1 und 2 ist mit der von austenitischen Stählen vergleichbar, wobei sich eine Kaltumformung bzw. Kaltverfestigung günstig auf die Spanbildung und Oberflächenqualität auswirkt. In die Zerspanbarkeitsgruppen 3 und 4 werden durch eine Wärmebehandlung aushärtbare Nickelbasislegierungen eingeordnet, wodurch diese deutlich schwerer zu spanen sind. Die Klassifizierung der Gruppen 1 bis 4 berücksichtigt Knet- und Gusslegierungen. Dagegen fasst die Zerspanungsgruppe 5 ausschließlich besonders schwer zerspanbare Gusslegierungen zusammen. Dies begründet sich durch den hohen Anteil an Karbiden und der γ' -Phase, dem grobkörnigen Gefüge und der geringen Korngrenzenfestigkeiten [Ger10, Klo08].

Zerspanbarkeitsgruppe				
1	2	3	4	5
Knetlegierungen/Gusslegierungen				Gusslegierungen
Ni-Cu-Legierungen	Ni-(Cr)-Mo-Legierungen; Nicht aushärtbare Ni-Fe-Cr-Legierungen; Nicht aushärtbare Ni-Cr-Fe-Legierungen	aushärtbare Ni-Fe-Cr-Legierungen; aushärtbare Ni-Cr-Fe-Legierungen; aushärtbare Ni-Cr-Co-Legierungen		hochwarmfeste Gusslegierungen
Beispiele Monel 400 Monel 401 Monel 404 Monel R 405	Beispiele Hastelloy B Hastelloy X Incoloy 804 Incoloy 825 Inconel 600 Inconel 601	Beispiele Incoloy 901 Inconel 718 Inconel X-750 Nimonic 80 Waspaloy Allvac 718 Plus	Beispiele Nimonic 90 Rene 41 Udimet 700 Udimet 720 LI Astroloy LC PM René 95 PM	Beispiele IN-100 Inconel 713 C Inconel 718 C Mar-M-247 LC Nimocast 739

Abbildung 12: Einteilung der Nickelbasislegierungen in Zerspanbarkeitsgruppen [nach Klo08]

Die hohen thermomechanischen Werkzeugbelastungen und der schlechte Spanbruch führen bei der Bohrungsbearbeitung von Nickelbasislegierungen aufgrund der geschlossenen Wirkzone im Bauteilinneren zu besonderen Schwierigkeiten und stellen besondere Anforderungen an die Werkzeug- und Prozessauslegung. *Chen* und *Liao* beschreiben die Verschleißentwicklung beim Wendelbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 anhand einer Einteilung in vier Phasen. In Phase 1 wird die Werkzeugbeschichtung abrasiv abgetragen. Es ist demzufolge bereits nach einem geringen Bohrweg eine deutliche Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche zu detektieren. Bei weiterem Einsatz der Werkzeuge nehmen die Reibkräfte in Phase 2 kontinuierlich zu, und es kommt zur Aufbauschneidenbildung. Die Aufbauschneidenbildung begünstigt das Herausreißen von Hartmetallsubstrateilen an den Schneidkanten und einen weiteren Abtrag der Beschichtung. Die Mikrorisse im Bereich der entstandenen Fehlstellen bilden sich in Phase 3 weiter in Richtung Werkzeugzentrum aus und können großflächige Hartmetallausbrüche hervorrufen. Die verschleißbedingte Veränderung der Schneidengeometrie beeinflusst die Spanbildung negativ. Die Entstehung von längeren, sägezahnförmigen Spänen führt zu stark schwankenden Bohrmomenten und einer Reduzierung der Prozessstabilität. Die Verschleißmarkenbreiten nehmen in den Phasen 2 und 3 mit zunehmender Einsatzdauer kontinuierlich zu. In Phase 4 steigen die Verschleißrate und die Reib- und Quetschvorgänge beim Materialabtrag drastisch an. Die starken Schwankungen in den Kräften und Bohrmomenten sowie die Formung langer Späne führen zum Prozessabbruch in dieser Phase [Che03].

Zur Erzielung akzeptabler Werkzeugstandzeiten und gewünschter Bauteilqualitäten kommt der Wahl von Substrat, Beschichtung, Werkzeuggestalt, Bearbeitungsstrategie, Schnittdaten und Kühlschmierstoffkonzept beim Bohren von Nickelbasislegierungen eine zentrale Bedeutung zu [Dev06, Ger10, Gla10]. Beim Wendelbohren ist die Anzahl und Breite der Führungsfasen entscheidend. Für das Bohren von hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen empfiehlt sich die Abstützung über vier breite Führungsfasen. Der Einsatz von vier Führungsfasen führt zu einer verbesserten Abstützung, die reduzierte mechanische Werkzeugbelastungen und geringe Rundheits- und Oberflächentoleranzen begünstigen [Bie13b]. Als Schneidstoff für Bohrwerkzeuge sind Hartmetalle etabliert. Hartmetalle besitzen im Vergleich zu HSS eine deutlich höhere Warmhärte. Durch den Einsatz von Werkzeugbeschichtungen kann eine Verbesserung der Verschleißbeständigkeit und Bohrungsqualität eintreten [Ezu03]. In vielen

Fällen liegt in dem Einsatz von Werkzeugbeschichtungen bei der Zerspaltung von Nickelbasislegierungen im Gegensatz zur Stahlbearbeitung jedoch ein geringes Potenzial, da die Beschichtungen im Zerspanprozess von den extrem harten intermetallischen Phasen und Ausscheidungen in Form von Karbiden und Nitriden unmittelbar abgetragen werden [Che03, Gla10, Oze11, Zhu13]. Um Materialanhaftungen zu reduzieren und hohe Oberflächengüten zu erreichen, empfiehlt sich in der Bearbeitung mit kleineren Werkzeugdurchmessern der Einsatz scharfer, unbeschichteter Schneidkanten und positiver Spanwinkel. Eine starke Verrundung der Schneidkanten resultiert in hohen Prozesskräften [Ezu05]. Mit steigendem Werkzeugverschleiß nehmen auch die Randzonenbeeinflussung, Gratbildung und Oberflächenkennwerte zu [Aur09, Far09]. Der Spitzenwinkel und die Freiwinkel sollten beim Wendelbohren von Nickelbasislegierungen, wie z. B. Inconel 718, mit $\sigma \geq 130^\circ$ und $\alpha = 5^\circ \dots 10^\circ$ ausgelegt sein [Che03]. Eine konkave Gestaltung der Hauptschneiden führt zu einer günstigen Spanform und ist bei größeren Bohrtiefen geraden und konvexen Schneiden vorzuziehen [Bie13c]. Ein günstiges dynamisches Prozessverhalten und enge Fertigungstoleranzen setzen eine steife Werkzeug- und Werkstückspannung voraus [Ezu05].

Die Wahl der Schnittdaten aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub ist stark limitiert. Geeignete Schnittgeschwindigkeiten für die Zerspaltung von Nickelbasislegierungen mit Hartmetallwerkzeugen liegen gemäß den Ergebnissen zahlreicher abgeschlossener Untersuchungen und Empfehlungen von Werkzeugherstellern und industriellen Anwendern zwischen $v_c = 20 \dots 30$ m/min [Aru00, Eck08, Eck15, Wes07]. Die Einstellung von Schnittgeschwindigkeiten $v_c > 30$ m/min führt aufgrund der geringen thermischen Wärmeleitfähigkeit der Nickelbasislegierungen zu einem Wärmestau und hohen Temperaturen und Spannungen an der Werkzeugschneide und den Kontaktelementen am Werkzeugumfang, also an den Führungsfasen beim Wendeltiefbohren sowie der Rundschliffase und den Führungsleisten beim Einlippentiefbohren. Die Prozesstemperaturen können bei höheren Schnittgeschwindigkeiten die maximalen Einsatztemperaturen bzw. Erweichungtemperaturen üblicher Hartmetalle von $T = 1100$ °C überschreiten [Cho98, Ezu03]. Es kommt zu Diffusionsvorgängen von Karbidpartikeln in die Kobalt-Bindematrix des Hartmetallsubstrates, und die Schneidkante wird plastisch verformt. Die Werkzeugstandzeiten werden drastisch reduziert [Aru00]. Die realisierbaren Vorschübe betragen $f = 10 \dots 30$ μm und sind stark abhängig vom eingesetzten Werkzeug [Gla10].

Eine ausreichende Zuführung von Kühlschmierstoff mit guten Schmiereigenschaften unter einem hohen Druck zur Reduzierung der Prozesstemperaturen und Reibung in der Werkzone und an den Kontaktelementen ist daher unabdingbar. Durch die Modifikation der Freiflächengestalt lassen sich die Standzeit und die Kühlschmierstoffversorgung der hochbelasteten Bereiche beim Bohren signifikant verbessern. *Beer et al.* lösten dies durch das Einbringen einer Kerbe in der Freifläche parallel verlaufend zur Schneidkante mittels Laserbearbeitung. Der Verschleißfortschritt konnte deutlich hinausgezögert und die thermischen Belastungen im Bereich der Schneidenecken durch optimierte Kühlschmierstoffströmungen reduziert werden [Beel4, Beel5]. Als maßgebendes Kriterium für die Bewertung des Werkzeugverschleißes werden in der Regel die gemittelte und maximale Verschleißmarkenbreite, gemessen auf der Werkzeugfreifläche, herangezogen [Che03, Ger10, Sha08, Wes07].

Das Tiefbohren von Nickelbasislegierungen stand bislang vergleichsweise selten im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten und bietet daher noch erhebliches Optimierungspotenzial. *Imran et al.* betrachteten das Mikrowendelbohren der Nickelbasislegierung CMSX4 für einen Werkzeugdurchmesser von $d = 0,5$ mm und ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l/D = 10$. Die experimentellen Untersuchungen belegen, dass die Schnittdaten beim Wendeltiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Werkzeugdurchmessern nur in einem sehr engen Prozessfenster wählbar sind. Die Einstellung von hohen Vorschüben führte aufgrund der hohen mechanischen Belastungen auf die Werkzeugschneiden zu unmittelbaren Werkzeugbrüchen. Die Wahl sehr geringer Vorschübe führte ebenfalls zu geringen Standzeiten. Dies ist auf ein ungünstiges Verhältnis aus Schneidkantenradius zu sich einstellenden

Spannungsdicken und die daraus resultierenden hohen mechanischen Werkzeugbelastungen durch Quetsch- und Reibvorgänge zu begründen. Der maximale Standweg von $L_r = 400$ mm wurde bei einer Drehzahl von $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ und einem Vorschub von $f = 5 \text{ } \mu\text{m}$ erreicht. Das Wendeltiefbohren erfolgte unter Verwendung von Entspannungshüben mit einer Zustelltiefe von $z = 0,05 \dots 0,2$ mm. Zustelltiefen $z \geq 0,1$ mm resultierten durch das größere Spanvolumen und die höheren mechanischen und thermischen Werkzeugbelastungen in einer Verringerung der Standzeit. Das Mikrobohren von Nickelbasislegierungen erforderte aufgrund der hohen mechanischen Werkzeugbelastungen große Kerndicken und Spitzenwinkel. Zudem war eine Abstimmung zwischen Spitzenwinkel des Wendeltiefbohrers und des Pilotbohrers bzw. der Kontur der Pilotbohrung erforderlich. In den Versuchen zeigte sich eine progressive Entwicklung des Freiflächenverschleißes. Außerdem waren die Schneidenecken und Querschnitten stark abrasiv verrundet, was einen weiteren Anstieg der Reib- und Quetschvorgänge nach sich zog. Der Bohrungsdurchmesser nahm verschleißbedingt mit zunehmendem Bohrweg ab. Eine Gratbildung am Bohrungseintritt war nicht festzustellen [Imr08].

Die Prozessstabilität und Genauigkeit beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit einem Durchmesser von $d = 8$ mm und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse bis $l_r/D = 200$ wurde von *Woon et al.* betrachtet. Zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit bei der Fertigung der kostenintensiven Bauteile aus Inconel 718 und aufgrund des hohen abrasiven und adhäsiven Werkzeugverschleißes auf der Frei- und Spanfläche sowie der Rundschliffase und den Führungsleisten wurden die Einlippentiefbohrer in Intervallen von $50 \dots 90$ mm stirnseitig nachgeschliffen. In den Versuchen mit geringen Drehzahlen von $n = 700 \dots 900 \text{ min}^{-1}$ und Vorschüben um $f = 10 \text{ } \mu\text{m}$ traten Schwankungen im Mittenverlauf zwischen $\Delta r = 1,4 \dots 2,0$ mm/m auf. Die starken Schwankungen trotz konstanter Prozessbedingungen deuten auf die Instabilität des Prozesses hin. Eine Ursache liefert die Genauigkeit des Nachschleifens und den daraus resultierenden Eingriffsbedingungen beim Wiedereintreten des Einlippentiefbohrers. Es kommt zu einer starken Auslenkung und Belastung des Bohrkopfes, wenn die Genauigkeit der Einstellwinkel und Längen der Schneiden nicht reproduziert wird. Infolgedessen tritt ein erhöhter Werkzeugverschleiß und Mittenverlauf ein [Woo13]. Diesbezüglich führten *Chaudhari et al.* zur Wahl einer geeigneten Gestalt der Pilotbohrung das Engagement Ratio (ER) ein. Diese Größe beschreibt das Verhältnis aus der Zeit, in der die Innen- oder Außenschneide eingetreten sind, zur Zeit des vollständigen Eintritts des Werkzeugs. Beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 wird zur Vermeidung von Ausbrüchen ein $ER > 0,6$ empfohlen [Cha15]. Die Kraftverhältnisse am Bohrkopf verändern sich auch im stationären Bohrprozess durch einen ungleichmäßigen Materialabtrag an der Innen- und Außenschneide. Infolge der abnehmenden Schnittgeschwindigkeit zum Bohrerzentrum unterliegt die Außenschneide einem stärkeren Verschleiß. Anhand von EDX-Analysen wurde ein deutlich größerer Anteil von Kobalt auf den Frei- und Spanflächen im Vergleich zu den Führungsleisten detektiert. Eine Begründung liefern höhere Temperaturen und ein dadurch verstärkter Diffusionsverschleiß auf den Frei- und Spanflächen. In theoretischen Berechnungen übersteigen die vorherrschenden Temperaturen an den Führungsleisten und der Rundschliffase $T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ [Woo14]. Das resultierende Prozessergebnis hängt dabei stark von der Abstimmung zwischen Schneidengestalt und Schnittdaten ab. Ein geringes Verhältnis aus Spanungsdicke und Schneidkantenverrundung führt zu hohen Axialkräften, die den Mittenverlauf und den Werkzeugverschleiß negativ beeinträchtigen [Woo14b].

Den Einsatz des ultraschallgestützten Wendeltiefbohrens von Inconel 738 LC für ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_r/D = 10$ untersuchten *Bahlani et al.* Im Gegensatz zum konventionellen Bohren konnten für einen exemplarischen Werkzeugdurchmesser von $d = 5$ mm unter Verwendung einer Außenkühlung durch die frequenzgesteuerte Anregung der Werkzeuge in Vorschubrichtung kurz gebrochene Späne produziert und somit die Erzeugung von Tiefbohrungen realisiert werden. Das beste Prozessresultat ergab sich bei einer Drehzahl von $n = 355 \text{ min}^{-1}$ und einem Vorschub von $f = 50 \text{ } \mu\text{m}$ für eine Amplitude von $10 \text{ } \mu\text{m}$ und 5 Entspannungshüben über die Bohrtiefe von $l_r = 50$ mm [Bag13].

Wessels führte Untersuchungen zum Tiefbohren der Titanlegierungen TiAl6V4 und Ti6242S sowie der Nickelbasislegierung Inconel 718 durch. Dabei kamen Vollhartmetallwendelbohrer und Einlippenbohrer mit aufgelötetem Vollhartmetallbohrkopf mit einem Durchmesser von $d = 3 \dots 16$ mm und einem geringen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_f/D = 6,3$ zum Einsatz. Die Versuche zum Wendelbohren von Inconel 718 sahen eine Variation der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20 \dots 30$ m/min und des Vorschubs von $f = 25 \dots 100$ μm vor. Eine Steigerung des Vorschubes und der Schnittgeschwindigkeit führten zur Ausbildung kurzer Späne. Ebenso war mit steigender Schnittgeschwindigkeit eine Verringerung der Spanstauchung festzustellen. Beim Wendelbohren lieferten die Schnittdaten aus $v_c = 30$ m/min und $f = 50$ μm den geringsten Verschleiß, wogegen das Einlippenbohren von Inconel 718 eine Reduzierung des Vorschubes erforderte. Dort erwiesen sich ein Vorschub von $f = 25$ μm in Kombination mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 30$ m/min mit Blick auf das Verschleißverhalten als geeignete Schnittdaten. Bei beiden Werkzeugkonzepten dominierte ein abrasiver Verschleiß. Es traten keine Ausbrüche an den Schneidenecken auf. Der maximal erzielte Standweg betrug $L_f = 430$ mm. Der Einsatz der Umfangsform C führte in den Freischliffen am Werkzeugumfang zu größeren Materialansammlungen. Aus den kleineren Stützleistenflächen der Führungsleisten der Umfangsform C resultierten größere lokale Druckbeanspruchungen an der Bohroberfläche, die auch eine stärkere Randzonenbeeinflussung initiierten. Die Umfangsform G mit einer durchgehenden Führungsleiste lieferte hingegen weniger Angriffsfläche und erzeugte die besseren Oberflächengüten [Wes07].

Aufbauend auf den ersten Erkenntnissen von *Wessels* beschäftigte sich *Glaser* mit dem Einlippenbohren von hochwarmfesten, schwer zerspanbaren Nickelbasislegierungen. Im Fokus der Arbeit standen die Werkzeugdurchmesser $d = 7,22$ mm und $d = 11,76$ mm, die typischerweise zur Herstellung von Bolzenbohrungen in Hochdruckturbinenscheiben eingesetzt werden. In den Versuchen unter Variation der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 23 \dots 31$ m/min nahm der abrasive Schneidkantenverschleiß mit steigender Schnittgeschwindigkeit deutlich zu. Eine Vergrößerung des Vorschubes von $f = 20$ μm auf $f = 30$ μm führte vermehrt zu Schneidkantenausbrüchen und einer Abnahme der Standzeit. Des Weiteren konnte eine Verbesserung der Oberflächengüte über den Bohrweg festgestellt werden, die auf den verschleißbedingten Anstieg der Radialkräfte und einer besseren Einebnung der Rauheitsspitzen zurückzuführen ist. Die hohen mechanischen Belastungen führten zu einer starken Torsion und Durchbiegung der gelöteten Einlippenbohrer und resultierten schließlich in großen Durchmesserabweichungen. Im Hinblick auf die Spanbildung begünstigte der Einsatz hoher Schnittgeschwindigkeiten die Entstehung kurzer Spiralspanstücke und Bröckelspäne. Der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen wirkte sich beim Einlippenbohren von Inconel 718 durchgehend negativ aus. Die Standwege von beschichteten Einlippenbohrern lagen mindestens 25 % unterhalb des maximalen Standweges von $L_f = 339,6$ mm der unbeschichteten Ausführungen. Des Weiteren führte *Glaser* analytische Modalanalysen zur Bestimmung des dynamischen Werkzeugverhaltens im Prozess durch und identifizierte Torsionsschwingungen als Hauptursache für geringe Werkzeugstandzeiten. Die experimentellen und analytischen Ergebnisse wurden abschließend in ein Online-Prozessüberwachungssystem zur Bohrerbruchfrüherkennung für das Einlippenbohren von Nickelbasislegierungen überführt [Gla10].

Die Zusammenfassung der wenigen existierenden Untersuchungen belegt, dass das Tiefbohren von Nickelbasislegierungen besonders anspruchsvoll und bislang nur unzureichend erforscht ist. Zum Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern zur Realisierung von Bohrungen mit hohen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen liegen zudem bislang noch gar keine Erkenntnisse vor.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In vielen Industriebranchen halten innovative und leistungsfähige Werkstoffe stetig Einzug. Der Einsatz von hochfesten und hochtemperaturfesten Werkstoffen ermöglicht in vielen Anwendungen eine Verbesserung der Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit der Bauteile. Zwei Werkstoffgruppen, die insbesondere in der Automobil-, Luftfahrt- und Energieindustrie im Fokus stehen, sind bainitische Stähle und Nickelbasislegierungen. Bainitische Stähle eignen sich für den Einsatz in hochbelastbaren Komponenten im Antriebsstrang von Verbrennungsmotoren. Durch ihre günstigen Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte bei geringen Werkstoff- und Herstellungskosten deutet sich eine zukünftige Substitution von gegenwärtig noch verbreiteten Vergütungsstählen an. Nickelbasislegierungen bieten durch ihre charakteristische Hochtemperaturfestigkeit Möglichkeiten einer Leistungssteigerung für Komponenten im Auslassbereich von Verbrennungsmotoren sowie auch von Triebwerksteilen in der Luft- und Raumfahrt. Das Potenzial einer Verwendung dieser Werkstoffe lässt sich jedoch nur dann vollständig ausschöpfen, wenn eine prozesssichere und produktive Bearbeitung der Bauteile gewährleistet ist. Die spanende Fertigung von Bohrungen steht dabei oftmals am Ende der Bearbeitungsoperationen und bestimmt maßgeblich die Gesamtfertigungszeit und -kosten [Ast14, Elz03, Sha08, Stü09, Tsc07]. Die Auswertung der bislang vorliegenden Untersuchungen im Stand der Technik belegt, dass das Tiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochwärmfesten Nickelbasislegierungen als besonders anspruchsvoll einzustufen ist und große Herausforderungen an die Werkzeug- und Prozessgestaltung mit sich bringt. Beim mechanischen Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern kommt es durch die limitierten Werkzeugsteifigkeiten und den erschwerten Spanabtransport, bedingt durch die geringen Spanraumquerschnitte, zu weiteren Schwierigkeiten. Zum mechanischen Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern und hohen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen liegen demgegenüber bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor.

Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, die auftretenden material- und verfahrensspezifischen Herausforderungen zu überwinden und so die Voraussetzungen für ein prozesssicheres und produktives mechanisches Tiefbohren hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe zu schaffen (**Abbildung 13**).

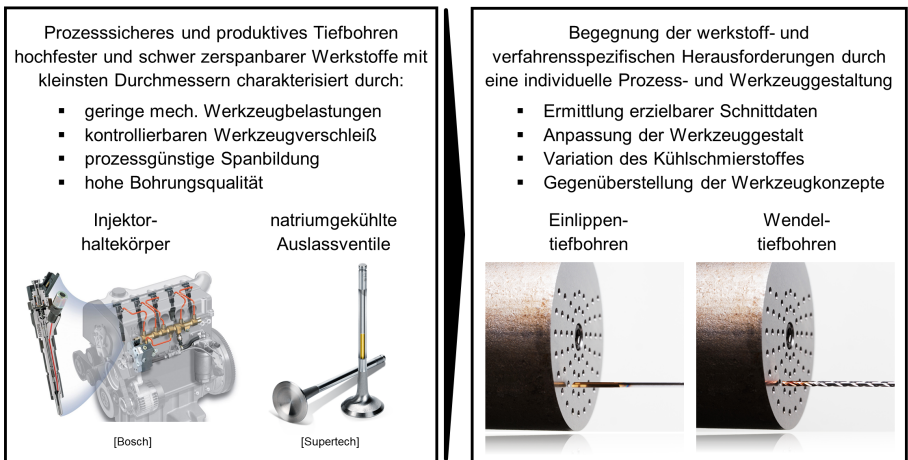


Abbildung 13: Zielsetzung und Vorgehensweise der vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen

Hierzu werden die technologischen Wirkmechanismen und deren Zusammenhänge beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern eines speziell für Anwendungen im Automobilbereich entwickelten bainitischen

Stahls sowie einer der gegenwärtig meist verwendeten Nickelbasislegierungen detailliert untersucht. Die technologische Bewertung des Tiefbohrens erfolgt anhand der Zielgrößen aus mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, dem Werkzeugverschleiß und der Bohrungsqualität. Durch eine gezielte Anpassung und Variation unterschiedlicher Prozess- und Werkzeugkenngrößen sollen diese Zielgrößen für beide Werkstoffe detailliert untersucht und eine prozessgünstige Kombination erarbeitet werden.

In einem ersten Schritt gilt es, dabei grundlegende Erkenntnisse zur allgemeinen Realisierbarkeit und zu geeigneten Schnittdaten aus Vorschub und Schnittgeschwindigkeit für das Einlippentiefbohren herauszustellen. Diese Untersuchungen basieren zunächst auf dem Einsatz von Einlippentiefbohrern mit einer Standardgeometrie. Durch Wahl der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubes wird direkt Einfluss auf die mechanischen Werkzeugbelastungen genommen, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem sich einstellenden Schneidverschleiß der Werkzeuge stehen. Unter Berücksichtigung der hohen Materialfestigkeiten und der Vielzahl an Hartphasen sollen Schnittdaten erarbeitet werden, die in einem gleichmäßigen und kontrollierbaren Werkzeugverschleiß resultieren. Mit Blick auf die Spanbildung gilt es, eine Spanform zu erzielen, die unter Berücksichtigung des limitierten Spanraumquerschnittes störungsfrei abzuführen ist. Gleichzeitig muss die produzierte Spanform eine hinreichende Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff bieten. Die Festlegung geeigneter Schnittdaten für fortführende Analysen setzt zudem die Erzielung einer hohen Bohrungsqualität voraus.

Das weitere Vorgehen sieht eine gezielte Einflussanalyse weiterer wichtiger Werkzeug- und Prozesskenngrößen beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern vor. Im Rahmen dessen erfolgt unter anderem eine Variation und Anpassung der Schneidengeometrie. Diesbezüglich wird der Einsatz mehrerer Sonderanschliffe für das Einlippentiefbohren untersucht. Durch die Veränderung der Schneidengeometrie in Form der Kontur der Schneide sowie der Einstellwinkel an Außen- und Innenschneide kann das äußere Kraftsystem, und so die mechanischen Belastungen auf das Werkzeug beim Einlippentiefbohren beeinflusst werden. Gleichzeitig soll durch die Veränderung der Schneidenkontur die Verschleißangriffsfläche reduziert und das Einsatz- und Standzeitverhalten der Werkzeuge optimiert werden. Neben den mechanischen Werkzeugbelastungen und dem Werkzeugverschleiß nimmt die Gestalt der Schneide wesentlichen Einfluss auf die Spanformung. Beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern von hochduktilen Werkstoffen liegen die realisierbaren Vorschubwerte oftmals im Bereich der Schneidkantenverrundung, und eine Spanteilung im Bereich der Schneidenspitze bleibt aus. Die Gestalt der Schneide bildet sich unmittelbar auf der Spanoberseite und -unterseite ab. Durch die Einstellwinkel der Schneiden kann zudem die Spankrümmung und schließlich die Spanablafrichtung nach der Materialabnahme an der Schneidkante beeinflusst werden. In den Versuchen zum Einlippentiefbohren des ausgewählten bainitischen Stahls erfolgt zusätzlich eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugbeschichtungen und eine exemplarische Variation der Schichtdicke. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss auf die Verschleißentwicklung über den Bohrweg betrachtet und die Wechselwirkungen mit den resultierenden mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung und der Bohrungsqualität analysiert.

Die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses werden maßgeblich durch die Wahl des Kühlschmierstoffes beeinflusst. In einem weiteren Abschnitt wird der Einfluss des Kühlschmierstoffes diskutiert und ein paraffinisches Mineralöl mit einem aktiv geschwefelten Esteröl gegenübergestellt. Der Kühlschmierstoffdruck, die Viskosität und die Filterung werden hierbei konstant gehalten. Um eine Vermengung der Tiefbohrerle im Maschinentank zu vermeiden, erfordert die Umsetzung der Versuche die Installation eines externen Kühlkreislaufs. Im Vergleich zu Emulsionen und Mineralölen kann die Verwendung von Esterölen, bedingt durch das hervorragende Schmier- und Benetzungsverhalten, eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes und somit eine erhebliche Steigerung der Standzeit begünstigen. Im Rahmen der Versuche wird geprüft, inwiefern sich diese Vorteile auf das Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern übertragen

lassen. Es erfolgt eine umfassende Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den resultierenden mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, dem Werkzeugverschleiß und der Bohrungsqualität.

Der Großteil der Untersuchungen in dieser Arbeit konzentriert sich auf das Einlippentiefbohren. Durch den konstruktiven Werkzeugaufbau in Form der Abstützung des Bohrkopfes in der Bohrung über die am Umfang angeordneten Führungsleisten und die Abfuhr des KSS-Späne-Gemisches entlang der gerade genuteten Spansicke begünstigt das Verfahren die Herstellung von Bohrungen mit hohen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen. Der zweischneidige Werkzeugaufbau von Wendelbohrern begünstigt die Erzielung einer vergleichsweise hohen Produktivität. Demgegenüber ist das Wendelbohren aufgrund der wendelförmigen Spannuten in den erzielbaren Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen der Tiefbohrungen limitiert. In den Versuchen unter Einsatz von Wendeltiefbohrern soll nachgewiesen werden, ob der Einsatz dieses Werkzeugkonzeptes ebenfalls die Realisierung großer Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse beim Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern ermöglicht. Es folgt eine detaillierte Gegenüberstellung des Einlippen- und Wendeltiefbohrens hinsichtlich der verschiedenen Prozesskenngrößen. Der Verfahrensvergleich soll zusammenfassend die Vor- und Nachteile der Verfahren für beide Werkstoffe aufzeigen.

Zur Bewertung der einzelnen Prozess- und Werkzeuganpassungen werden umfangreiche Analysen der mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, des Werkzeugverschleißes und der Bohrungsqualität durchgeführt. Im Hinblick auf die mechanischen Werkzeugbelastungen sind die anliegenden Vorschubkräfte und Bohrmomente mithilfe von Kraftmesstechnik werkstückseitig zu messen. Für ausgewählte Versuche werden die Entwicklungen der Vorschubkräfte und Bohrmomente über den gesamten Bohrweg aufgenommen und ausgewertet. Der Spanbildung wird in dieser Arbeit das analytische Hauptaugenmerk gewidmet. Zur tiefergehenden Analyse der Spanformung an der Werkzeugschneide und der Spanabfuhr entlang des Spanraumes erfolgen die Auslegung und der Einsatz einer speziellen Versuchsmethodik. Hierbei werden Werkstoffproben in blickdurchlässige Acrylglaträger eingebracht und die Spanbildung im Tiefbohrprozess mithilfe der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie festgehalten. Die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen ermöglichen es, den Einfluss verschiedener Werkzeug- und Prozessparameter im Detail zu analysieren und das grundlegende Prozessverständnis für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern zu steigern. Ergänzend erfolgen eine mikroskopische Auswertung der Spanformen und die Bestimmung der Spandickenstauchung durch eine metallographische Präparation. Zur genauen Analyse und Beschreibung des sich einstellenden Verschleißzustandes werden die Licht-, Rasterelektronen-, Streifenlicht- und die konfokale Weißlichtmikroskopie verwendet. Zusätzlich erfolgen energiedispersive Röntgenanalysen und metallographische Präparationen zur Erzeugung von Querschliffen verschlissener Werkzeugschneiden. In den Analysen der Bohrungsqualität sind die Maß- und Formtoleranzen sowie die Oberflächengüte durch den Einsatz von Koordinaten- und taktiler Oberflächenmesstechnik zu bestimmen.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften erfolgt für beide Werkstoffe eine getrennte Betrachtung in zwei separaten Kapiteln. Die Einflüsse der Schnittdaten, der Werkzeuggestalt, des Kühlschmierstoffes und des Werkzeugkonzeptes werden für einen bainitischen Stahl und eine Nickelbasislegierung detailliert beschrieben und diskutiert. Ein anschließendes Kapitel sieht eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der wichtigsten Prozesscharakteristika beim Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern vor. An dieser Stelle werden gleichzeitig Hinweise und Empfehlungen für eine optimale Werkzeug- und Prozessauslegung von Tiefbohrprozessen hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe mit kleinsten Durchmessern formuliert.

4 Experimentelle Randbedingungen

Das folgende Kapitel liefert eine Beschreibung der experimentellen Randbedingungen. Im Rahmen dessen werden die Versuchswerkstoffe, die Versuchsmaschine und die Werkzeuge vorgestellt. Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung der Versuchsdurchführung einschließlich der gewählten Prozessstrategien für das Einlippen- und Wendeltiefbohren. Abschließend werden die herangezogenen Mess- und Analysetechniken zum Zwecke einer detaillierten Analyse wichtiger Zielgrößen für den Tiefbohrprozess erläutert. Dies umfasst die Dokumentation und Auswertung der mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, des Werkzeugverschleißes und der Bohrungsqualität.

4.1 Versuchswerkstoffe

In den Untersuchungen stehen zwei unterschiedliche Werkstoffgruppen im Fokus. Die Untersuchungen erfolgen für den hochfesten bainitischen Stahl 20MnCrMo7 und die hochtemperaturfeste Nickelbasislegierung Inconel 718. Durch ihre vorteilhaften Materialeigenschaften genießen beide Werkstoffe ein hohes Potenzial bzw. eine hohe Relevanz mit Blick auf Anwendungen aus der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt sowie Energietechnik.

4.1.1 Bainitischer Stahl 20MnCrMo7

Höherfeste Stähle leisten einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung von Leichtbaukonzepten in der Automobilindustrie. Gemäß Prognosen wird der Anteil an höherfesten Stählen bis zum Jahre 2030 von rund 15 auf 40 % deutlich anwachsen. Fahrwerk und Antriebsstrang machen dabei zusammen durchschnittlich 41 % des Fahrzeugesamtgewichtes aus und bieten ein enormes Einsparpotenzial für Gewichtseinsparungen [Vdi15]. Durch weitere Forderungen der Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren und die damit verbundene Steigerung von Einspritzdrücken in der Common-Rail-Dieselseltechnologie bis zu 3000 bar rücken werkstofftechnische Entwicklungen in diesen Bereichen zunehmend in den Fokus [Eng11, Han12, Shi11]. Ein Werkstoff, der diesem Trend folgt und 2008 von der Firma Edelstahlzieherei Mark (EZM) gemeinsam mit Zulieferern aus der Automobilindustrie entwickelt wurde, ist der hochfeste bainitische Stahl 20MnCrMo7 [Lan08]. Die Einstellung des bainitischen Gefüges erfolgt durch direkte Abkühlung aus der Walzhitze an der Luft. Im Gegensatz zu Vergütungsstählen ist daher keine kosten- und energieintensive Wärmebehandlung erforderlich. Aus der geeigneten Kombination aus Mangan- und Chromzusätzen und unter Zulegierung von geringen Mengen Molybdän resultiert das stabile Gefüge im unteren Bainitbereich mit Martensitanteilen von 40 ... 60 %. Das Zulegieren von Niob und Titan begünstigt zudem die Einstellung eines sehr feinkörnigen bainitischen Gefüges mit mittleren Korngrößen von $K_G = 24 \mu\text{m}$. Hieraus resultiert eine hohe Festigkeit von $R_m = 1260 \text{ MPa}$ bei gleichzeitig guten Zähigkeitskennwerten. Die Bruchdehnung des vorliegenden Versuchswerkstoffes beträgt $A = 14,5 \%$ (**Abbildung 14**). Zur Gewährleistung der Zerspanbarkeit weist der bainitische Stahl 20MnCrMo7 einen Schwefelgehalt von etwa 0,013 % auf. Durch den geringen Schwefelanteil wird die Dauerschwingfestigkeit nicht reduziert. Dagegen kommt es im Gefüge, bedingt durch die Titanzusätze, vereinzelt zur Ausbildung von Titanitriden und Titankarbonitriden. Die Titanitrid- und Titankarbonitrid-Ausscheidungen liegen dabei in einer Größe von bis zu $13 \mu\text{m}$ vor und können die spanende Bearbeitung deutlich erschweren. Dies kann sich vor allem in einem starken Anstieg im Werkzeugverschleiß äußern. Die bereits vorliegenden und im Stand der Technik zusammengefassten Untersuchungen zum Einlippentiefbohren mit größeren Werkzeugdurchmessern $d \geq 5,0 \text{ mm}$ belegen die Herausforderungen der Bearbeitung des hochfesten bainitischen Stahls 20MnCrMo7. Gleichzeitig wurde

in den experimentellen Arbeiten nachgewiesen, dass sich durch eine gezielte Anpassung der Schnittdaten und eine Optimierung der eingesetzten Werkzeuge vergleichbare oder sogar höhere Standzeiten zu gegenwärtig verbreiteten Vergütungsstählen erzielen lassen [Fel11, Har13, Har14b].

Bainitischer Stahl 20MnCrMo7 (1.7911)							
▪ Dichte:	$\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$						
▪ Zugfestigkeit:	$R_m = 1260 \text{ MPa}$						
▪ Dehngrenze:	$R_{p0,2} = 860 \text{ MPa}$						
▪ Bruchdehnung:	$A = 14,5 \%$						
▪ Mittlere Korngröße:	$KG = 24 \pm 2 \mu\text{m}$						
▪ Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 42 \text{ W/mK}$						
▪ Härte:	$H_m = 388 \text{ HB}$						
▪ Chemische Zusammensetzung in Gewichtsprozent:							
Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti
Rest	0,22	0,49	1,7	1,57	0,29	0,19	0,028
Nb	N	P	S	Cu	Al	V	Sn
0,09	0,025	0,02	0,013	0,01	0,006	0,005	0,003

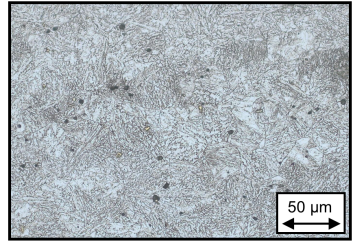


Abbildung 14: Materialeigenschaften des eingesetzten bainitischen Stahls 20MnCrMo7

Durch die vorteilhafte Kombination aus Festigkeits- und Zähigkeitskennwerten besitzt der bainitische Stahl 20MnCrMo7 hohes Potenzial für den Einsatz in hochbelastbaren Komponenten aus dem Antriebsstrang, wie z. B. Druckrohre, Injektorhaltekörper, Hochdruckanschlüsse und Düsenspannmutter von Common-Rail-Dieselsystemen. Die Fertigung von Hochdruckanschlüssen aus 20MnCrMo7 ist bereits in eine industrielle Serienproduktion überführt [Eng14]. Weitere industrielle Anwendungsgebiete, die einen zukünftigen Einsatz höherfester Stähle erfordern, liegen im Schiffsbau, in der Werkzeugindustrie sowie im allgemeinen Maschinenbau [Mer14, Kue08]. Die Hauptmotivation für die Untersuchungen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern ist dabei die Herstellung von Injektorhaltekörpern, die eine Fertigung mehrerer Tiefbohrungen mit großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen im Nieder- und Hochdruckbereich erfordert.

4.1.2 Nickelbasislegierung Inconel 718

Aus Gründen der Energie- und Ressourceneffizienz steigt in der Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrt gleichzeitig der Bedarf an verschleiß- und temperaturbeständigen Werkstoffen [Abe14, Ezu05]. Nickelbasislegierungen bieten durch ihre Mikrostruktur eine hervorragende Hochtemperaturfestigkeit, thermisches Ermüdungsverhalten sowie Oxidationsbeständigkeit und eignen sich somit ideal für Anwendungen, in denen hohe Einsatztemperaturen vorherrschen. In der vorliegenden Arbeit wird die industriell am häufigsten verwendete Nickelbasislegierung Inconel 718 betrachtet. Der Anteil von Bauteilen aus der Nickelbasislegierung Inconel 718 beträgt beispielsweise etwa 50 % des Gesamtgewichts und 55 ... 70 % des Gesamtvolumens moderner Flugzeugturbinen [Jen06, Oze11, Zhu13]. Bei Temperaturen von $T = 650 \text{ °C}$ besitzt die verwendete Legierung immer noch eine Zugfestigkeit von $R_m = 1170 \text{ MPa}$ und eine Dehngrenze von $R_{p0,2} = 1040 \text{ MPa}$. Die drei Legierungselemente Niob, Eisen und Chrom tragen dabei zur Ausbildung der austenitischen γ -Matrix bei. Zur Erzielung der hohen Festigkeitswerte erfolgt im Rahmen der Wärmebehandlung eine Ausscheidungshärtung unter Zulegierung von Niob, Molybdän, Titan und Aluminium. Hierbei kommt es zur Bildung der intermetallischen Phasen γ' und γ'' ($\text{Ni}_3(\text{Nb,Al,Ti})$) [Ren07, Sla97]. Die vorliegende Legierung aus Inconel 718 wurde zunächst bei 968 °C (1775 °F) für eine Stunde lösungsgeglüht. Nach dem Abkühlen an der Luft erfolgte eine

Ausscheidungshärtung über einen Zeitraum von acht Stunden bei $T = 718 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1325 \text{ }^\circ\text{F}$). Es folgte eine Abkühlung im Ofen auf $T = 621 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1150 \text{ }^\circ\text{F}$) mit einer Abkühlrate von $\Delta T = 56 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \text{ }^\circ\text{F}$) pro Stunde. Die Legierung wurde dann für acht Stunden auf $T = 621 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1150 \text{ }^\circ\text{F}$) gehalten und abschließend an Luft abgekühlt [Ati15]. Der Versuchswerkstoff lag in Rohlingen mit einem Durchmesser von 200 mm vor. Aus gesägten Scheiben wurden die verwendeten Versuchspröben für die Untersuchungen zum Tiefbohren herausgerodiert. Anhand der unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten der Rohlinge im Zentrum und im Randbereich erklären sich die Streuungen der bestimmten Korngrößen mit einem Mittelwert von $KG = 37 \text{ }\mu\text{m}$. Die Karbide und Nitride lagen in einer Größe von bis zu $15 \text{ }\mu\text{m}$ vor. Die messtechnisch erfassten Härtewerte der eingesetzten Werkstückproben liegen zwischen 39 ... 45 HRC. Die Streuung der Härtewerte resultiert aus der Verwendung von zwei unterschiedlichen Chargen sowie den Werkstoffinhomogenitäten innerhalb einer jeweiligen Charge. **Abbildung 15** gibt einen Überblick über die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Nickelbasislegierung Inconel 718.

Nickelbasislegierung Inconel 718 (2.4668)							
▪ Dichte:	$\rho = 8,19 \text{ g/cm}^3$						
▪ Zugfestigkeit:	$R_m = 1430 \text{ MPa}$						
▪ Dehngrenze:	$R_{p0,2} = 1230 \text{ MPa}$						
▪ Bruchdehnung:	$A = 17,2 \%$						
▪ Mittlere Korngröße:	$KG = 37 \text{ +/- } 9 \text{ }\mu\text{m}$						
▪ Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 11,2 \text{ W/mK}$						
▪ Mittlere Härte:	$H_m = 431 \text{ HB}$						
▪ Chemische Zusammensetzung in Gewichtsprozent:							
Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti+Ta	Al	Co
53,77	17,92	Rest	5,42	2,88	< 1,0	0,51	0,21
Si	Mn	V	Cu	W	P	Zr	B
0,08	0,06	0,03	0,04	0,02	0,011	< 0,01	0,004

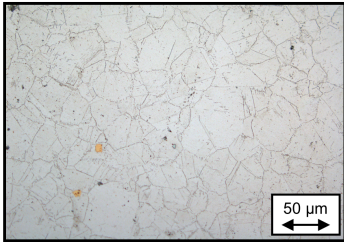


Abbildung 15: Materialeigenschaften der eingesetzten Nickelbasislegierung Inconel 718

Aufgrund des herausragenden Verhaltens bei hohen Einsatztemperaturen sowie der ausgeprägten Korrosionsbeständigkeit kommt Inconel 718 in zahlreichen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Energietechnik zum Einsatz. Ein Anwendungsgebiet, das die vorliegenden Untersuchungen zum Tiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern motiviert, ist die Fertigung von Turbinenscheiben für Luftfahrzeuge und Kraftwerke. Um die Wirkungsgrade von Gasturbinen weiter zu steigern, gibt es Bestrebungen, Turbinenscheiben mit Heat Pipes zu versehen. Diese Wärmerohre werden mit metallischem Natrium gefüllt, welches oberhalb einer Temperatur von $T = 97,5 \text{ }^\circ\text{C}$ verflüssigt. Durch die Rotationsbewegung der Turbinenscheibe führt das Natrium Wärme aus den kritischen Außenbereichen der Turbinenscheibe ab. Das thermomechanische Belastungskollektiv wird so deutlich reduziert [Cao13, Eis14, Eis15]. Ein potenzielles Verfahren zur Einbringung der Heat Pipes stellt das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern dar. Eine weitere Motivation liefert die Herstellung von Auslassventilen für Verbrennungsmotoren in der Automobilindustrie, die im Einsatz hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt und hochfrequent von heißen und korrosiv wirkenden Abgasen umströmt werden. Um den extremen thermomechanischen Belastungen in leistungsstarken Verbrennungsmotoren standzuhalten, müssen ausreichende Festigkeiten der Nickelbasislegierungen auch bei höchsten Abgastemperaturen gewährleistet sein. Zur Kompensation der hohen Temperaturbelastung sowie aus Gründen der Gewichtsreduzierung werden Auslassventile mit einer Grundbohrung im Ventilsitz versehen und anschließend analog zur Anwendung der Heat Pipes in Turbinenscheiben mit metallischem Natrium gefüllt. Durch den Abtransport der Wärme ist eine Temperaturreduzierung des Ventilschaftes um bis zu $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ erzielbar [Fuc15, Sch15].

4.2 Versuchsmaschine

Die Durchführung der Versuche erfolgt auf einer konventionellen einspindeligen Tiefbohrmaschine in horizontaler Bettbauweise. Die Tiefbohrmaschine der Firma TBT Tiefbohrtechnik GmbH vom Typ ML-200 ist mit einer Hochfrequenzspindel ausgerüstet und ermöglicht Drehzahlen bis zu $n_{\max} = 36\,000 \text{ min}^{-1}$. Zudem bietet eine Hochdruckpumpe die Bereitstellung von Kühlschmierstoffdrücken bis $p_{\text{KSS,max}} = 230 \text{ bar}$. Die verwendete Maschine ist somit speziell für die Tiefbohrbearbeitung im Durchmesserbereich $d = 0,5 \dots 6 \text{ mm}$ konzipiert (**Abbildung 16**).

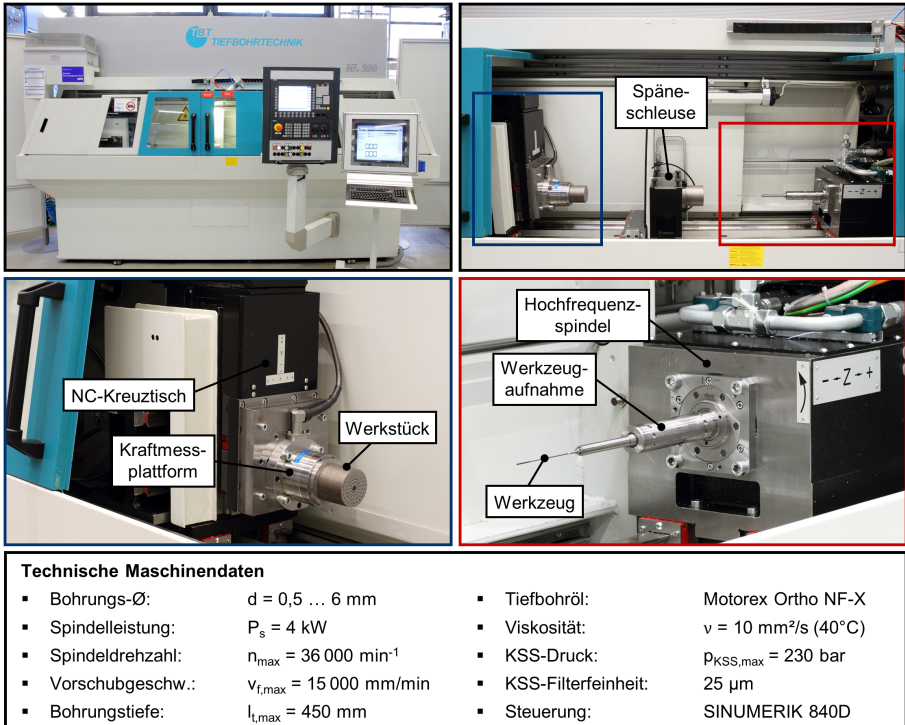


Abbildung 16: Eingesetzte Versuchsmaschine

Die maschinenherstellerspezifische Werkzeugaufnahme erfolgt über eine Stellhülse und eine Spannzange vom Typ 600E. Die Tiefbohrmaschine ermöglicht die Bearbeitung mit rotierendem Werkzeug und stehendem Werkstück sowie mit rotierendem Werkzeug und gegenläufig rotierendem Werkstück. Für die zuletzt genannte Arbeitsweise mit gegenläufiger Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück wird ein Reitstock zwischen Kreuzschlitten und Späneschleuse eingesetzt. Beim Tiefbohren mit rotierendem Werkzeug und stehendem Werkstück werden die zu bearbeitenden Werkstücke auf einem NC-Kreuztisch gespannt. Neben einer z-Achse für die Verfahrbewegungen der Hochfrequenzspindel besitzt der NC-Kreuztisch drei weitere Achsen (X,Y,W) zur flexiblen Werkstückpositionierung. Die Sondermaschine verfügt zusätzlich über einen zweiten, separaten Arbeitsraum mit einem Neodym-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Festkörperlaser und bietet die Möglichkeit einer Kombinationsbearbeitung in einer Aufspannung. Das Lasersystem kam jedoch in der vorliegenden Arbeit zum mechanischen Tiefbohren hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe mit kleinsten Durchmessern nicht zum Einsatz. Die

Programmierung der jeweiligen Maschinenbefehle erfolgt über eine Siemens-Steuerung vom Typ Sinumerik 840D.

Die vorgestellte Tiefbohrmaschine wird standardmäßig mit einem paraffinischen Mineralöl mit einer kinetischen Viskosität von $\nu = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) betrieben. Der Schmutz- und Reinöltank im Maschinenbett besitzt ein Gesamtfassungsvermögen von 800 Liter. Zur Analyse des Einflusses des Kühlschmierstoffes beim Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern wird in den Untersuchungen zusätzlich ein auf synthetischen Estern basierendes Schneidöl eingesetzt. Das synthetische Esteröl weist ebenfalls eine Viskosität von $\nu = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) auf und enthält eine aktive Schwefeladditivierung von 5 %. Zur Zuführung des synthetischen Esteröls und Vermeidung einer Vermischung der unterschiedlichen Tiefbohröle im Maschinentank wird ein externer Kühlkreislauf installiert. **Abbildung 17** zeigt die Installation des externen Kühlkreislaufs auf der Maschinenrückseite.

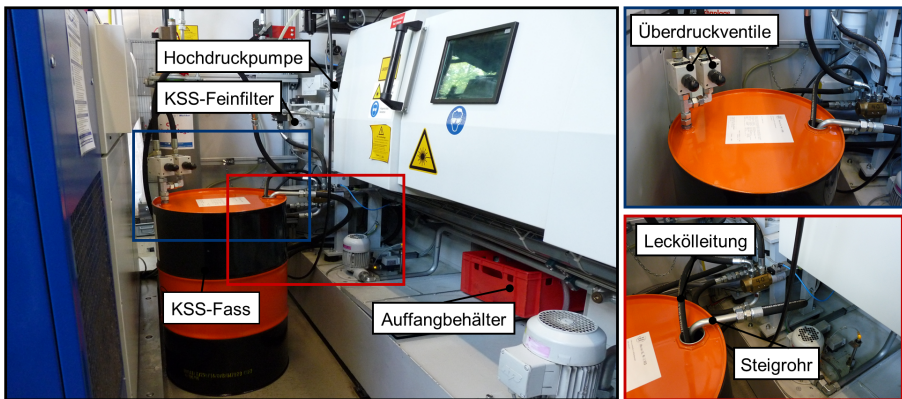


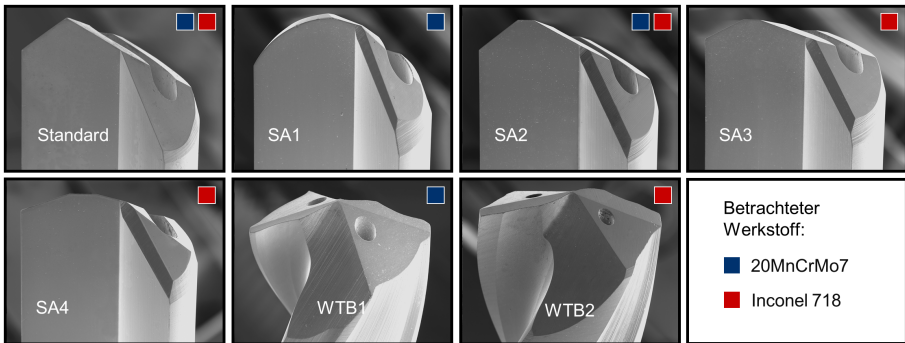
Abbildung 17: Installation eines externen Kühlkreislaufes

Das Steigrohr und die Leckölleitung der Hochdruckpumpe sowie die Überdruckventile werden dabei direkt mit einem KSS-Fass verbunden. Die Spindelkühlung wird über das Tiefbohröl im Maschinentank realisiert. Im Normalbetrieb wird das Tiefbohröl über eine separate Tauchpumpe zur Spindel geführt und danach über das Maschinenbett und durch die Späneschleuse in den Maschinentank zurückgeführt. Um den KSS-Kreislauf der Innenkühlung der Tiefbohrwerkzeuge zu entkoppeln, wird das Öl aus der Spindelkühlung über einen zusätzlichen Schlauch ins Maschinenbett zurückgeführt. Vor Beginn der Versuche werden sämtliche Leitungen und Anschlüsse mit dem jeweiligen Tiefbohröl gespült. Vermischtes Tiefbohröl gilt es, entsprechend aufzufangen und anschließend zu entsorgen. Im Versuchsbetrieb unter Verwendung des Esteröls wird das Tiefbohröl über Auffangbehälter aufgefangen, manuell gefiltert, sedimentiert und anschließend ins KSS-Fass zurückgeführt. Die Volumenströme bei Einsatz der Einlippentiefbohrer mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 1,3 \text{ mm}$ ($p_{\text{KSS}} = 170 \text{ bar}$) und $d = 2,0 \text{ mm}$ ($p_{\text{KSS}} = 120 \text{ bar}$) betragen etwa $\dot{V} = 0,7 \text{ l/min}$ bzw. $\dot{V} = 2 \text{ l/min}$. Die Volumenströme beim Wendeltiefbohren mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 1,3 \text{ mm}$ ($p_{\text{KSS}} = 140 \text{ bar}$) und $d = 2,0 \text{ mm}$ ($p_{\text{KSS}} = 40 \text{ bar}$) sind in beiden Anwendungen mit etwa $\dot{V} = 0,2 \text{ l/min}$ deutlich geringer. Außerdem wird vor den Einsatzversuchen zum paraffinischen Mineralöl und synthetischen Esteröl jeweils der Feinfilter mit einer Filterfeinheit von $25 \mu\text{m}$ gewechselt.

4.3 Versuchswerkzeuge

Im Rahmen der Untersuchungen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 kommen Einlipp- und Wendeltiefbohrwerkzeuge aus Vollhartmetall zum Einsatz. Die Einsatzversuche zum bainitischen Stahl 20MnCrMo7 konzentrieren sich dabei auf einen Werkzeugdurchmesser von $d = 2,0$ mm, wogegen in den Versuchen zur Nickelbasislegierung Inconel 718 exemplarisch Werkzeuge mit einem Durchmesser von $d = 1,3$ mm und $d = 2,0$ mm Verwendung finden. Die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen und eine abschließende Gegenüberstellung zum Einfluss des Versuchswerkstoffes setzen einen einheitlichen Werkzeugdurchmesser von $d = 2,0$ mm voraus.

Abbildung 18 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und Kenngrößen der Werkzeuge, die beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern der betrachteten Werkstoffe eingesetzt wurden.



Werkzeug	Standard	SA1	SA2	SA3	SA4	WTB1	WTB2
Einstellwinkel/ Spitzenwinkel	$K_1 = 50^\circ$ $K_2 = 120^\circ$	$r = 1,2$ mm $K_2 = 105^\circ$	$K_1 = 50^\circ$ $K_2 = 120^\circ$	$K_1 = 60^\circ$ $K_2 = 110^\circ$	$K_1 = 70^\circ$ $K_2 = 105^\circ$	$\sigma = 135^\circ$	$\sigma = 140^\circ$
Nomineller Spanwinkel	0°	0°	0°	0°	0°	30°	25°
proz. Länge der AS/prim. HS	$0,33 \times \varnothing$	$0,54 \times \varnothing$	$0,29 \times \varnothing$	$0,25 \times \varnothing$	$0,27 \times \varnothing$	$0,30 \times \varnothing$	$0,31 \times \varnothing$
proz. Länge der 3.TS/sek. HS	-	-	$0,09 \times \varnothing$	$0,08 \times \varnothing$	$0,17 \times \varnothing$	$0,22 \times \varnothing$	$0,20 \times \varnothing$
proz. Länge der IS/QS	$0,32 \times \varnothing$	$0,11 \times \varnothing$	$0,27 \times \varnothing$	$0,25 \times \varnothing$	$0,12 \times \varnothing$	$0,05 \times \varnothing$	$0,04 \times \varnothing$
Umfangsform/ Führungsfasen	Form G	Form G	Form G	Form G	Form G	2 Fasen je Schneide	2 Fasen je Schneide
Verjüngung	1:800	1:800	1:800	1:800	1:800	1:200	1:300
Schneidstoff	HC-K30	HC-K30	HC-K30	HC-K30	HC-K30	HC-K40	HC-K40
Werkzeug- beschichtung	variiert	AlTiN	AlTiN	AlTiN	AlTiN	TiAlN-TiSiN	AlCrN- SiN

Abbildung 18: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und Kenngrößen der eingesetzten Werkzeuge

In den Untersuchungen zum Einlippentiefbohren wird für beide Versuchswerkstoffe eine Analyse des Einflusses der Werkzeuggestalt durchgeführt. Die eingesetzten Einlippentiefbohrer unterscheiden sich

dabei primär in der Gestalt ihrer Schneide. Zusätzlich zum Standardanschiff (a) mit Einstellwinkeln an der Außenschneide (AS) und Innenschneide (IS) von $K_1 = 50^\circ$ und $K_2 = 120^\circ$ kommen in den Untersuchungen vier weitere Sonderanschliffe SA1-4 zum Einsatz [VDI3208]. Der Sonderanschiff SA1 weist die Besonderheit einer runden Außenschneide mit einem Radius von $r = 1,2 \text{ mm}$ und einer sehr kurzen Innenschneide mit einem Einstellwinkel von $K_2 = 105^\circ$ auf. Die Sonderanschliffe SA2-4 zeichnen sich durch eine dritte Teilschneide (TS) unter einem Winkel von $K_3 = 90^\circ$ aus. Die Einstellwinkel der Außen- und Innenschneide basieren auf der Gestalt der Schneiden für übliche Standardanschliffe (a), (b) und (c) gemäß VDI-Richtlinie 3208 und liegen zwischen $K_1 = 50^\circ \dots 70^\circ$ und $K_2 = 105^\circ \dots 120^\circ$ [Dee09, VDI3208]. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal zwischen dem Standardanschiff und den Sonderanschliffen SA1-4 ist die Fase im Bereich der Übergangskante zwischen Örraum und Sickenrücken zu nennen.

Die eingesetzten Wendeltiefbohrer weisen in beiden Anwendungen einen 4-Flächenanschiff mit ausgespitzter Querschneide (QS) auf. Die primäre Hauptschneide (HS) ist einheitlich konkav, wogegen die sekundäre Hauptschneide gerade (WTB1) bzw. konvex (WTB2) gestaltet ist. Außerdem charakterisieren sich die Wendeltiefbohrer durch zwei Führungsfasen je Schneide zur besseren Führung und Abstützung des Bohrkopfes, eine Negativfase zur Stabilisierung der Schneidenecke und einen Spitzenwinkel von $\sigma = 135^\circ$ (WTB1) bzw. $\sigma = 140^\circ$ (WTB2). Die Breite der zweiten Führungsfase und der Negativfase sind beim WTB2, der beim Wendeltiefbohren der hochtemperaturfesten Nickelbasislegierung Inconel 718 eingesetzt wird, deutlich größer dimensioniert. Zudem unterscheiden sich die Wendeltiefbohrer in der Verjüngung des Schneideteils und dem Drallwinkel bzw. dem nominellen Spanwinkel. Bei beiden Werkzeugkonzepten werden Ultrafeinstkornhartmetalle mit einer hohen Biegebruchfestigkeit der ISO-Anwendungsklassen K30 für das Einlippentiefbohren und K40 für das Wendeltiefbohren verwendet.

Neben der Analyse des Einflusses von Werkzeugkonzept und Schneidengestalt beim Einlippentiefbohren für beide Versuchswerkstoffe wird in den Untersuchungen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 der Einfluss der Werkzeugbeschichtung betrachtet. Diesbezüglich werden vier unterschiedliche Beschichtungszusammensetzungen als Vollbeschichtung abgeschieden und gegenübergestellt. Zudem ist eine Beschichtungszusammensetzung in zwei unterschiedlichen Schichtdicken eingesetzt worden. Alle Beschichtungen sind dabei in einem PVD-Beschichtungsprozess abgeschieden und im Anschluss durch Polierstrahlen nachbehandelt worden. **Abbildung 19** gibt einen Überblick über die eingesetzten Beschichtungszusammensetzungen und die jeweiligen Eigenschaften.

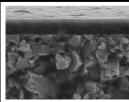
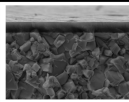
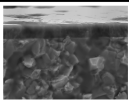
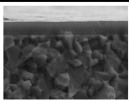
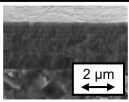
Beschichtungszusammensetzung	AlTiN	AlTiN-TiSiN	TiN	AlTiN-TiN	AlTiN-TiSiN
Mikrostruktur (REM)					
Mittlere Schichtdicke	0,89 µm	0,61 µm	0,85 µm	0,80 µm	2,73 µm
Mikrohärte	2500 HV	3200 HV	2300 HV	2500 HV	3200 HV
Max. Einsatztemp.	800 °C	1100 °C	600 °C	600 °C	1100 °C

Abbildung 19: Eigenschaften der eingesetzten Beschichtungen beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7

Zusätzlich zur Referenzbeschichtung in der Zusammensetzung Aluminiumtitannitrid (AlTiN) kommen beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7 Schichten in den Zusammensetzungen Aluminiumtitannitrid-Titansiliziumnitrid (AlTiN-TiSiN), Aluminiumtitannitrid-Titannitrid (AlTiN-TiN) und Titannitrid (TiN)

zum Einsatz. Die Schichten unterscheiden sich dabei in der Verschleißbeständigkeit, charakterisiert durch die Schichtmikrohärte und Oxidationsbeständigkeit, bis zu einer bestimmten Einsatztemperatur. Die Schichtdicken der beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7 getesteten Dünnschichten werden im Vorfeld durch metallographische Präparation und den Einsatz der hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopie erfasst und liegen standardmäßig zwischen $s_d = 0,61 \dots 0,89 \mu\text{m}$. Des Weiteren wird für die AlTiN-TiSiN-Multilayer-Schicht mit der höchsten Mikrohärte $H_m = 3200 \text{ HV}$ und der höchsten Einsatztemperatur $T_{\text{max}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ exemplarisch der Einfluss der Schichtdicke betrachtet. Die Einlippentiefbohrer mit einer AlTiN-TiSiN-Schicht besitzen dabei eine deutlich größere mittlere Schichtdicke von $s_d = 2,73 \mu\text{m}$. Alle Beschichtungen wurden als Vollbeschichtung abgeschieden.

In den Untersuchungen zum Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern kommt ausschließlich die Referenzschicht in der Zusammensetzung AlTiN zum Einsatz. Aufgrund des hohen Werkzeugverschleißes der Nickelbasislegierung werden hierbei teilbeschichtete Einlippentiefbohrer verwendet. Das stirnseitige Anschleifen der Freiflächenkontur und somit der Schneidengestalt erfolgt nach dem Beschichtungsprozess. Eine Aufbereitung inklusive einer Nachbeschichtung von vollbeschichteten Werkzeugen ist bei Werkstoffen mit hohem Verschleiß deutlich zeit- und kostenintensiver. Zudem bieten teilbeschichtete Werkzeuge meist eine schärfere Schneidkante, die eine Reduzierung des Ploughing-Effektes und eine günstigere Spanbildung in der Mikrobearbeitung hochduktiler, schwer zerspanbarer Werkstoffe zur Folge haben.

Die Wendeltiefbohrwerkzeuge WTB1 und WTB2 sind ebenfalls mit Werkzeugbeschichtungen versehen. Der Wendeltiefbohrer WTB1 weist eine TiAlN-TiSiN-Schicht mit einer Schichtdicke von $s_d = 1,20 \mu\text{m}$ und einer Mikrohärte von $H_m = 4000 \text{ HV}$ auf, wogegen der Wendeltiefbohrer WTB2 mit einer Aluminiumchromnitrid-Siliziumnitrid (AlCrN-SiN)-Schicht mit einer Schichtdicke von $s_d = 0,60 \mu\text{m}$ und einer Mikrohärte von $H_m = 3200 \text{ HV}$ vorliegt. Die maximalen Einsatztemperaturen der Wendeltiefbohrer liegen laut Herstellerangaben bei $T_{\text{max}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ (WTB1) und $T_{\text{max}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (WTB2).

Der Neuzustand aller eingesetzten Versuchswerkzeuge wird vor dem Einsatz dokumentiert und die Werkzeuge auf Hartmetallausbrüche und Beschichtungsfehler kontrolliert. Dies umfasst auch die Messung der Schneidkantenverrundungen an der Außen- und Innenschneide der Einlippentiefbohrer sowie der primären und sekundären Hauptschneide der Wendeltiefbohrer. Die Schneidkantenverrundung der Einlippen- und Wendeltiefbohrer mit einer standardmäßig applizierten Dünnschicht weist eine hohe Reproduzierbarkeit und gemittelte Schneidkantenradien zwischen $r_\theta = 5 \dots 8 \mu\text{m}$ auf. Die Schneidkantenvermessung der eingesetzten Einlippentiefbohrer mit einer AlTiN-TiSiN-Schicht und einer vergrößerten Schichtdicke von $s_d = 2,73 \mu\text{m}$ ergibt leicht vergrößerte Schneidkantenradien in einem Bereich von $r_\theta = 6 \dots 9 \mu\text{m}$.

4.4 Versuchsdurchführung

Die Darstellung und Diskussion der experimentellen Versuche untergliedert sich in mehrere Abschnitte. In **Kapitel 6** und **Kapitel 7** erfolgt zunächst eine detaillierte Analyse des Tiefbohrens des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern. Aufgrund der stark abweichenden Materialeigenschaften wird dabei eine separate Betrachtung der Werkstoffe vorgenommen. Ein darauf folgendes **Kapitel 8** zur Prozessgestaltung für das Tiefbohren bainitischer Stähle und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern fasst im Anschluss die wichtigsten werkstoffspezifischen Prozesscharakteristika zusammen. Die Untersuchungen zum bainitischen Stahl 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 basieren dabei auf einer Reihe von Eingangs- und Zielgrößen. Im Hinblick auf die Eingangsgrößen wird der Einfluss der Schnittdaten, des Werkzeuges und des Kühlschmierstoffes für beide Werkstoffe betrachtet. Die Zielgrößenbetrachtung umfasst übergeordnet

die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung, den Werkzeugverschleiß und die Bohrungsqualität. **Abbildung 20** gibt einen Überblick über die betrachteten Eingangs- und Zielgrößen.

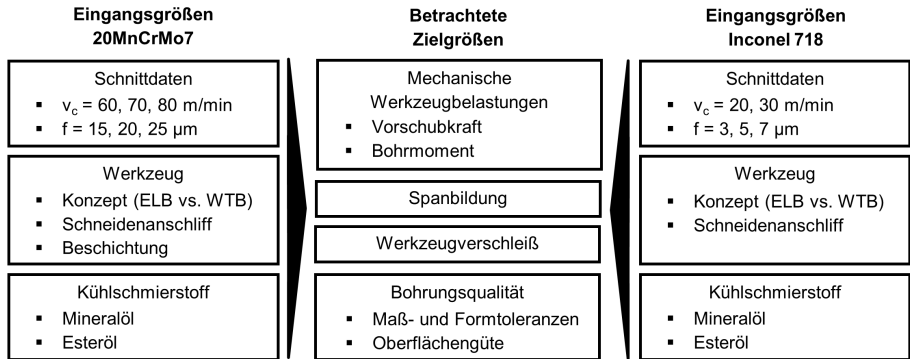


Abbildung 20: Betrachtete Eingangs- und Zielgrößen in den Untersuchungen

In den Versuchen zum bainitischen Stahl 20MnCrMo7 erfolgt in einem ersten Schritt die Ermittlung geeigneter Schnittdaten. Unter Verwendung eines Einlippentiefbohrers mit einem Standardanschiff wird eine dreistufige Variation der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60, 70, 80$ m/min und des Vorschubes $f = 15, 20, 25$ μm pro Umdrehung durchgeführt. Die gewählten Schnittwerte orientieren sich an den Empfehlungen für das Tiefbohren mit Einlippentiefbohrern gemäß VDI-Richtlinie 3208 [VDI3208]. Die anschließende Variation der Werkzeuge umfasst neben dem Einsatz von zwei Sonderanschiffen mit modifizierter Gestalt einen Konzeptvergleich zum Einlippen- und Wendeltiefbohren. Die Wahl der Schnittdaten zum Wendeltiefbohren basiert auf Herstellerempfehlungen. Aufgrund der resultierenden Verschleißerscheinungen werden zusätzliche Analysen zum Einfluss der Werkzeugbeschichtung beim Einlippentiefbohren durchgeführt. Im Rahmen dessen wird das Einsatzverhalten der Referenzbeschichtung in der Schichtzusammensetzung AlTiN mit einer AlTiN-TiSiN-, AlTiN-TiN- und reinen TiN-Schicht verglichen. Die Beschichtung mit der höchsten Mikrohärtigkeit in der Zusammensetzung AlTiN-TiSiN kommt in unterschiedlichen Schichtdicken zum Einsatz und legt somit obendrein die Auswirkungen der Schichtdicke auf das Prozessergebnis offen. Als weitere Eingangsgröße wird der Kühlschmierstoff beim Einlippentiefbohren variiert und das Potenzial eines synthetischen Esteröls mit einer 5 %-igen Schwefeladditivierung gegenüber einem paraffinischen Mineralöl untersucht. Beide Tiefbohrer zeichnen sich durch eine kinematische Viskosität von $\nu = 10$ mm^2/s (40 °C) aus. Die Umsetzung der Versuche unter Einsatz des synthetischen Esteröls erfordert dabei die Installation eines externen Kühlkreislaufes.

Zu Beginn der Versuche zur Nickelbasislegierung Inconel 718 wird der Einfluss der Schnittdaten unter Einsatz eines Einlippentiefbohrers mit Standardanschiff durch eine zweistufige Variation der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 20, 30$ m/min und eine dreistufige Variation des Vorschubes $f = 3, 5, 7$ μm pro Umdrehung analysiert. Die Wahl der Schnittgeschwindigkeit basiert auf den Erfahrungen vergangener Untersuchungen zur Bohrungsbearbeitung von Nickelbasislegierungen [Eck08, Eck15, Wes07]. Eine Schnittgeschwindigkeit über $v_c = 30$ m/min führte dabei aufgrund der hohen thermischen Werkzeugbelastung, bedingt durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Hochtemperaturwerkstoffe, zu einem signifikanten Anstieg im Werkzeugverschleiß [Aru00]. In darauf folgenden Untersuchungen wird das Einsatzverhalten von drei modifizierten Sonderanschiffen mit einer dritten Teilschneide beim Einlippentiefbohren getestet. Die Variation der Versuchswerkzeuge sieht auch für die Nickelbasislegierung Inconel 718 einen Konzeptvergleich zum Einlippen- und Wendeltiefbohren vor. Ebenso

wird der Einfluss des Kühlschmierstoffes beim Einlippentiefbohren betrachtet und ein paraffinisches Mineralöl mit einem synthetischen Esteröl verglichen.

Zur Bewertung der unterschiedlichen Zielgrößen erfolgt eine detaillierte Betrachtung der mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, des Werkzeugverschleißes und der Bohrungsqualität. Die mechanischen Werkzeugbelastungen werden durch Mittelwerte und Verläufe der Vorschubkraft und des Bohrmomentes beschrieben. Die Spanbildungsanalyse erfolgt unter Berücksichtigung der Spanabmessungen, Spanform und der Spandickenstauchung. Um die Spanformung im Prozess auswerten zu können, wird zudem eine Analysemethodik für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern ausgelegt und eingesetzt. Die Verwendung von blickdurchlässigen Probenträgern aus Acrylglas ermöglicht eine Visualisierung der Spanbildung im Schnittvorgang und somit auch eine grundlegende Erweiterung des Prozessverständnisses. Der Werkzeugverschleiß wird durch die regelmäßige Dokumentation des Verschleißzustandes und die Entwicklung der Verschleißmarkenbreite bewertet. Die Auswertung der Bohrungsqualität umfasst eine Ermittlung der Oberflächengüte und der Maß- und Formtoleranzen hinsichtlich des Bohrungsdurchmessers, der Rundheitsabweichung und des Mittenverlaufes.

Zielsetzung der Einsatzversuche zum Einlippen- und Wendeltiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 besteht in der prozesssicheren und produktiven Realisierung von Tiefbohrungen mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l/D = 30$. Die Untersuchungen mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 1,3$ mm und $d = 2,0$ mm sehen somit die Fertigung von Durchgangsbohrungen mit einer Bohrtiefe von $l_1 = 39$ mm bzw. $l_1 = 60$ mm vor. Die Durchführung der Versuche zum Einlippen- und Wendeltiefbohren erfolgt dabei unter Anwendung unterschiedlicher Prozessstrategien (**Abbildung 21**). Beim Einlippentiefbohren mit dem Werkzeugdurchmesser $d = 1,3$ mm werden die Werkzeuge im Anbohrvorgang sowohl durch eine Anbohrbuchse als auch eine Pilotbohrung abgestützt und geführt. Das Einlippentiefbohren mit Anbohrbuchse sieht zunächst ein Einfahren des Werkzeuges in die Anbohrbuchse vor. Die Anbohrbuchse ist auf der Rückseite mit einer Fase versehen und verhindert so eine Beschädigung der Werkzeuge. Vor Beginn der Werkzeugrotation wird die Innenkühlung aktiviert und anschließend die Vorschubstrategie abgefahren. Nach dem Durchstoßen wird die Spindelrotation gestoppt und der Kühlschmierstoff ausgeschaltet. Der Rückzug des Einlippentiefbohrers erfolgt stehend. Die Prozessstrategie mit Pilotbohrung startet mit der Erzeugung einer Pilotbohrung mit einer dreifachen Tiefe des Bohrungsdurchmessers zur ausreichenden Abstützung des Bohrkopfes im Anbohrvorgang. Die Durchmesser der verwendeten Pilotbohrer sind in ihrer Toleranz auf die Einlippentiefbohrer abgestimmt. Das Einfädeln des Einlippentiefbohrers mit einem sicheren Abstand zum Bohrungsgrund erfolgt mit einer reduzierten Drehzahl. Nach Erreichen der Einfädelposition werden die Innenkühlung und danach die Vorschubstrategie gestartet. Eine hohe Drehzahl oder auch die Aktivierung der Innenkühlung vor dem Einfädeln resultieren aufgrund der asymmetrischen Werkzeuggeometrie und der geringen Werkzeugsteifigkeiten in einer großen Werkzeugauslenkung und gegebenenfalls in einem Werkzeugbruch.

Für das Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 werden unterschiedliche Vorschubstrategien gewählt. Die Vorschubstrategie beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 sieht einen reduzierten Anbohrvorschub von 50 % bis zu einer Bohrtiefe von $l_1 = 10$ mm und eine lineare Vorschuberhöhung auf Nennvorschub bis auf eine Bohrtiefe von $l_1 = 15$ mm vor. Zudem wird der Vorschub vor dem Durchstoßen um 50 % reduziert. Durch diese Anpassung werden bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Belastungen auf die Schneidkante im Anschnitt reduziert und eine Beschädigung des Werkzeuges beim Durchstoßen ausgeschlossen. Aufgrund der sehr geringen einstellbaren Vorschübe beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 erfolgt das Bohren mit kontinuierlichem Nennvorschub über die gesamte Bohrtiefe.

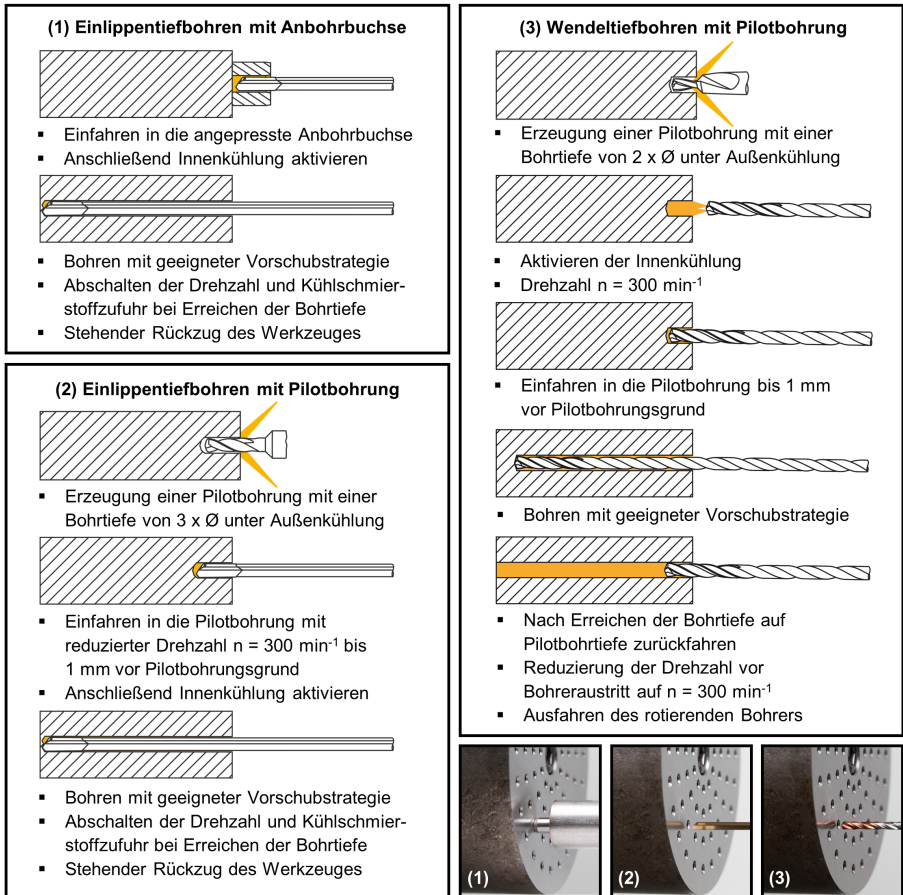


Abbildung 21: Verwendete Prozessstrategien

Das Wendeltiefbohren erfolgt ausschließlich unter Verwendung einer Pilotbohrung. Aufgrund des symmetrischen Werkzeugaufbaus ist eine Pilotbohrungstiefe des zweifachen Werkzeugdurchmessers zur Abstützung des Wendeltiefbohrers im Anbohrvorgang ausreichend. Das symmetrische Werkzeugkonzept erlaubt zudem die Aktivierung der Innenkühlung vor dem Einfädeln in die Pilotbohrung mit einer reduzierten Drehzahl. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zum Einlippentiefbohren mit Pilotbohrung ist die rotierende Rückzugsbewegung, um ein Verklemmen des Werkzeuges mit noch vorhandenen Spänen in den gewendelten Spannuten zu vermeiden. Vor dem Ausfahren wird die Drehzahl reduziert, um einem Auslenken oder Werkzeugbruch der Wendeltiefbohrer mit begrenzter Steifigkeit vorzubeugen. Die Innenkühlung wird nach dem Ausfahren nicht gestoppt und ist beim Anfahren weiterer Positionen kontinuierlich aktiviert.

Die Vorschubstrategien für das Wendeltiefbohren der betrachteten Versuchswerkstoffe sind nahezu identisch. In beiden Anwendungen ist eine kontinuierliche Vorschubbewegung ohne Entspannungszyklen realisierbar. Durch die höhere Stabilität der Querschnitte im Werkzeugzentrum ist auch bei den hohen

erzielten Vorschubgeschwindigkeiten keine Reduzierung des Vorschubes im Anschnitt erforderlich. Eine Verringerung des Vorschubes kann zusätzlich zu unkontrollierten Taumelbewegungen, Schwingungen und einem schlechteren Spanbruch führen [Kre08]. Aufgrund der hohen Produktivität bzw. Vorschubgeschwindigkeit beim Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 wird die Vorschubgeschwindigkeit vor dem Austritt des Bohrers um 50 % reduziert, um Ausbrüche an den Schneidenecken oder im ungünstigsten Fall einem Werkzeugverhaken und -bruch vorzubeugen.

Ein abschließendes Kapitel stellt die Besonderheiten und Herausforderungen beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern gegenüber. Der direkte Vergleich erfolgt basierend auf dem Einsatz eines Einlippentiefbohrers mit Standardanschiff und beschreibt repräsentativ die maßgebenden Auswirkungen auf die erzielbare Produktivität sowie den Werkzeugverschleiß, die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung und die Bohrungsqualität in Abhängigkeit vom Versuchswerkstoff. Basierend auf dieser Gegenüberstellung werden Hinweise und Empfehlungen für eine sichere und produktive Werkzeug- und Prozessgestaltung für das Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern gegeben.

4.5 Mess- und Analysetechnik

Zur Bewertung des Tiefbohrprozesses liefern die Analysen der mechanischen Werkzeugbelastungen, des Werkzeugverschleißes, der Spanbildung und der Bohrungsqualität wichtige Erkenntnisse. Zur Aufnahme und Messung der unterschiedlichen Zielgrößen werden im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit verschiedene Mess- und Analysetechniken eingesetzt. Neben den bereits zur Verfügung stehenden Messmitteln wird eine weitere Analysemethodik zur tiefergehenden Untersuchung der Spanbildungsvorgänge mittels Hochgeschwindigkeitsmikroskopie für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern ausgelegt und eingesetzt.

4.5.1 Mechanische Werkzeugbelastungen

Die Messung der mechanischen Werkzeugbelastungen erfolgt mit einem 4-Komponenten-Dynamometer der Firma KISTLER vom Typ 9272. Die Versuchsproben werden dabei über eine Zentrumschraube oder eine entsprechende Probenvorrichtung im Zentrum der Druckplatte des Mehrkomponentendynamometers gespannt. In den Versuchen werden die Vorschubkräfte und Bohrmomente im Prozess erfasst. Die Messung erfolgt dabei lediglich für das Tiefbohren unter Verwendung einer Pilotbohrung zur Führung des Werkzeuges im Anbohrvorgang. Die Messung der mechanischen Werkzeugbelastungen beim Tiefbohren unter Verwendung einer Anbohrbuchse wird durch den Kraftnebenschluss zwischen Anbohrbuchse und Werkstückstirnfläche beeinflusst. Die Vorschubkräfte und Bohrmomente werden dabei über die Druckplatte auf die Quarzkristall-Plattenpaare übertragen. Durch die Verformung der Quarzkristalle tritt der piezoelektrische Effekt ein, und es kommt zu einer messbaren Ladungsverschiebung. Ein Ladungsverstärker wandelt die Ladungssignale vom Dynamometer anschließend über Kalibrierfaktoren in ein zu den aufgetretenen Vorschubkräften und Bohrmomenten proportionales Spannungssignal um. Die Messsignale werden durch einen Messrechner mit einer Datenrate von 20 Kilosamples pro Sekunde erfasst und im Anschluss mit der Software DIAdem ausgewertet.

4.5.2 Spanbildung

Zur Analyse der Spanbildung werden die produzierten Späne in regelmäßigen Intervallen aufgefangen und gesammelt. Im Anschluss erfolgt die Anfertigung von photographischen Übersichtsaufnahmen zur Bewertung der Spanabmessungen sowie auch von Detailaufnahmen der entstandenen Späne mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops der Firma PHILIPS vom Typ XL40 ESEM zur detaillierten Interpretation der Spanformung. Darüber hinaus wird die Analyse der Spanbildung durch eine Erfassung der Spandickenstauchung ergänzt. Hierzu wird die Spandicke mehrerer Späne ausgewählter Prozesse gemessen und mit den Spannungsdicken ins Verhältnis gesetzt. Zur Vermessung der Spandicke werden Späne auf einer Klebefolie senkrecht zur Spanablafrichtung ausgerichtet, kalt eingebettet und anschließend mittels metallographischer Präparation die Spandicke im Bereich der Schneidenmitte freigelegt. Die Vermessung der Spandicke erfolgt dabei mit einem Lichtmikroskop der Firma KEYENCE vom Typ VHX-500.

Um die Spanbildungsvorgänge im Bereich der Werkzeugschneiden und den Spanabtransport entlang der Spannuten beim Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Werkzeugdurchmessern tiefergehend analysieren zu können sowie auch das Prozessverständnis grundlegend zu erhöhen, wird zudem eine neue Analysemethodik konzipiert und eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse erfolgt in **Kapitel 5**.

4.5.3 Werkzeugverschleiß

In den Versuchen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 wird die Verschleißentwicklung der Werkzeuge unter Einsatz verschiedener Messtechnik dokumentiert. Im Neuzustand werden die Schneidkantenverrundungen aller eingesetzten Werkzeuge mit einem Streifenlichtmessgerät der Firma GFM vom Typ MicroCAD bestimmt. In den Versuchen zum Tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 dient die Streifenlichtmesstechnik zudem zur Vermessung der Zunahme der Schneidkantenverrundung infolge des verschleißbedingten Materialabtrags über den Bohrweg. Bei der optischen Streifenlichtmesstechnik projiziert eine Weißlichtquelle über ein Maskenarray ein Streifenmuster auf die Schneidkante. Die resultierenden Strukturen werden unter einem Triangulationswinkel von einer CCD-Kamera erfasst und über die Verformung der Streifenmuster die Gestalt und Topographie berechnet [Wei07]. Die Einsatzversuche werden unter Dokumentation der tribologisch beanspruchten Kontaktelemente in festgelegten Intervallen mithilfe des Lichtmikroskops der Firma KEYENCE vom Typ VHX-500 durchgeführt. Beim Einlippentiefbohren werden die Spanfläche, Rundschliffase, Freifläche, Führungsleisteneinlauf und -auslauf mikroskopiert. Dagegen findet beim Wendeltiefbohren eine Erfassung des Verschleißzustandes der Hauptschneiden, der Führungsfasen und der Freifläche statt. Anhand der Freiflächenaufnahmen werden für beide Werkzeugkonzepte die mittlere und maximale Verschleißmarkenbreite gemessen. Des Weiteren wird zur detaillierten Analyse des Werkzeugverschleißes das hochauflösende Rasterelektronenmikroskop der Firma PHILIPS vom Typ XL40 ESEM in Kombination mit einer energiedispersiven Röntgenanalyseeinheit der Firma Oxford vom Typ INCA 200 eingesetzt. Die energiedispersive Röntgenanalyse ermöglicht eine qualitative Analyse der Elementverteilung und somit eine genauere Zuordnung von Verschleißmechanismen und Verschleißerscheinungsformen an den betroffenen Kontaktelementen. Die Größe der Probenkammer und die winklige Anstellung der Werkzeuge mittels einer speziellen Vorrichtung erlauben ein zerstörungsfreies Einschleusen der langschäftigen Werkzeuge. In den Untersuchungen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 kommt zur Detektion der Aufbauschneidenbildung zudem ein konfokales Weißlichtmikroskop der Firma NANOFOCUS vom Typ μ surf zum Einsatz. Der Strahlengang einer

Kaltlichtquelle und das reflektierte Fluoreszenzlicht werden hierbei durch zwei konfokal zur Objektivlinse positionierte Lochbilder in zwei sogenannten Nipkow-Scheiben geführt. Auf diese Weise gelangt nur das relevante Licht aus der Fokalebene zum Detektor, und es kann ein sehr detailreiches Höhenprofil der Aufbauschneide auf der Spanfläche erzeugt werden. Zusätzlich werden exemplarische Querschliffe der Außenschneide beim Einlippentiefbohren mittels metallographischer Präparation angefertigt und der werkstoffspezifische Verschleiß an der Schneidkante durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und energiedispersive Röntgenanalysen dargestellt.

4.5.4 Bohrungsqualität

Die Analyse der Bohrungsqualität erfolgt hinsichtlich der Maß- und Formtoleranzen sowie der Oberflächenqualität der erzeugten Tiefbohrungen (**Abbildung 22**). Um eine einwandfreie Messung der Zielgrößen zu gewährleisten, werden alle Bohrungen im Vorfeld entgratet und im Ultraschallbad gereinigt. Zur Vermessung der Maß- und Formtoleranzen werden eine 3D-Koordinatenmessmaschine der Firma ZEISS vom Typ PRISMO 5 HTG VAST und Messtaster mit einem Rubinkugeldurchmesser von $d_k = 0,5 \text{ mm}$ eingesetzt. Es werden die Bohrungsdurchmesser, Rundheitsabweichungen und der Mittenverlauf der Tiefbohrungen bzw. die Konzentrizität zwischen dem Bohrungseintritt und -austritt mit einer Messunsicherheit von $U = 0,4 \mu\text{m}$ bestimmt. Hierzu werden 350 Messpunkte auf dem Umfang erfasst. Die Grenzwellenzahl beträgt 50 Wellen/Umdrehung [VDI2631].

Im Hinblick auf die Auswertung der Oberflächenqualität wird die Oberflächenrauheit bestimmt und die Oberflächentopographie mikroskopiert. Die Rauheitsmessung erfolgt mithilfe des Perthometers der Firma Mahr vom Typ Mahrsurf XR20. Die Tastspitze zur Aufnahme des Messprofils weist einen Tastspitzenradius von $r_t = 2 \mu\text{m}$ und einen Spitzenwinkel von 90° auf. Zur Beschreibung der Oberflächengüte werden die gemittelte Rautiefe R_z und der arithmetische Mittenrauwert R_a gemäß DIN EN ISO 4287 erfasst [DIN4287]. Die gemittelte Rautiefe setzt sich aus dem Mittelwert der maximalen Rauheitsprofilhöhen von fünf gemessenen Einzelmessstrecken zusammen. Der arithmetische Mittenrauwert beschreibt das arithmetische Mittel der Absolutbeträge der Ordinatenwerte entlang einer Einzelmessstrecke. Die Messunsicherheit liegt bei etwa 5 % der erfassten Rauheitskennwerte. Ergänzend werden ausgewählte Bohrungen aufgetrennt und die Topographie mithilfe eines Lichtmikroskops der Firma ZEISS vom Typ AXIO analysiert.

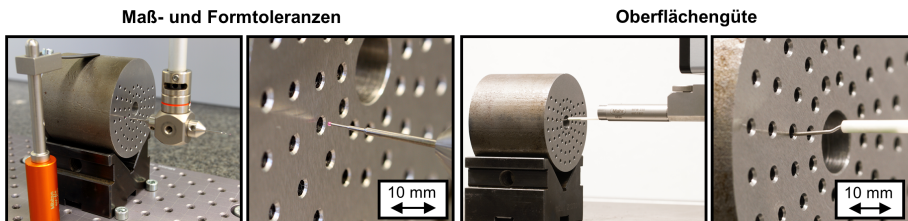


Abbildung 22: Mess- und Analysetechniken zur Erfassung der Bohrungsqualität

5 Spanbildungsanalyse beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern mittels Hochgeschwindigkeitsmikroskopie

Aufgrund der geschlossenen Wirkzone nimmt die Spanbildung beim Tiefbohren maßgeblichen Einfluss auf die Prozessstabilität und -sicherheit sowie die erzielbare Produktivität. Beim Einlippen- und Wendeltiefbohren mit kleinsten Durchmessern wird die Relevanz der Spanbildung durch die limitierten Spanraumquerschnitte nochmals verstärkt. Die Entstehung einer ungünstigen Spanform, z. B. in Form von langen Spänen, resultiert in einem Zusetzen der Spanräume und führt aufgrund der limitierten Werkzeugsteifigkeiten unmittelbar zu einem Werkzeugversagen. Zudem zieht die Ausbildung von unvorteilhaften Spanformen durch den Kontakt der Späne mit der Bohrungswand eine deutliche Verschlechterung der Oberflächenqualität nach sich. Folglich gilt es, der Spanbildung in den Untersuchungen zum Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen das analytische Hauptaugenmerk zu widmen. Im Rahmen dieses Kapitels wird die Konzeption, Umsetzung und Durchführung einer neuen Methodik zur werkstellennahen Analyse der Spanbildung beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern mittels Hochgeschwindigkeitsmikroskopie vorgestellt.

5.1 Konzeption und Entwicklung der werkstellennahen Analysemethodik

Beim Tiefbohren dringt das Werkzeug mit einer axialen Vorschubbewegung in den zu zerspanenden Werkstoff ein. Im Gegensatz zu anderen spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, wie z. B. dem Drehen und Fräsen, ist die Wirkstelle von außen nicht frei zugänglich. Eine unmittelbare Beobachtung und Analyse der Spanbildungsvorgänge beim Tiefbohren ist somit nicht möglich. Zur ganzheitlichen Analyse und Optimierung der Tiefbohrprozesse ist es jedoch unabdingbar, fundierte Erkenntnisse über die Spanbildungsvorgänge beim Tiefbohren zu generieren.

Zu diesem Zweck besteht einerseits die Möglichkeit, Bohrprozesse schlagartig zu unterbrechen und die Eingriffssituation des Bohrkopfes einschließlich des definierten Materialabtrags vor der Schneidkante einzufrieren [Gri86, Koe04, Smo12b, Wei02]. Infolgedessen entstehen sogenannte Spanwurzeln, welche die Werkstückrandzone mit dem Span verbinden. Im Anschluss an eine metallographische Präparation mehrerer Schliffebene lassen sich die Spanbildungs- und Wirkzonenvorgänge entlang der Schneiden genauer beschreiben [Bac03, Koe04, Ter11]. Hierbei wird entweder das Werkstück oder das Werkzeug schlagartig beschleunigt und somit der Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug aufgehoben. Die Schnittunterbrechung setzt sich aus einer Translation in entgegengesetzter Vorschubrichtung und gleichzeitig einer Rotation zusammen, um eine Beschädigung der Spanwurzel zu vermeiden. Das Zeitintervall, in dem die maximale Beschleunigung erreicht wird, gilt es, so gering wie möglich zu halten. Beim Tiefbohren sollte die Unterbrechungszeit die Zeit unterschreiten, in der sich Werkzeug und Werkstück um ein Vielfaches des Bohrvorschubes pro Umdrehung oder um etwas mehr als den Abstand zwischen Schneidenecke und vorderer Fase der Führungsleisten voneinander entfernt haben. Zudem gilt es, einen möglichst geringen, in dieser Zeit zugelassenen Drehwinkel zwischen Werkzeug und Werkstück zu realisieren [Fuß86]. Aus diesen Anforderungen gehen Restriktionen für den Einsatz von Bohrunterbrechungsrichtungen hervor. Eine Schnittunterbrechung beim Tiefbohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern ist, bedingt durch die extrem hohen Anforderungen an die Beschleunigung und Trennung von Werkzeug und Werkstück, nicht praktikabel [Bie15c]. Weder mechanische, hydraulische, pneumatische, elektromagnetische noch piezoelektrische Antriebskonzepte liefern eine ausreichend geringe Unterbrechungszeit bei zugleich hinreichender Funktionssicherheit.

Um den Restriktionen einer Schnittunterbrechung zu begegnen und dennoch eine Analyse der Spanbildungsvorgänge zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine alternative Analysemethodik für

das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern konzipiert und eingesetzt [Bie14, Bie15c]. Die Grundidee dieser Methodik basiert auf der Substitution der die Wirkzone kreisförmig umgebenden, blickundurchlässigen Bohrungswand durch blickdurchlässiges Acrylglas [Buc71, Buc71b]. Die Werkstoffproben aus dem zu untersuchenden Versuchswerkstoff, in diesem Fall der bainitische Stahl 20MnCrMo7 und die Nickelbasislegierung Inconel 718, werden in ziehriefenfreie und transparente Acrylglasträger eingebracht und in den anschließenden Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen auf einer konventionellen Tiefbohrmaschine zerspannt. Die Visualisierung und Aufnahme der Wirkvorgänge erfolgt mithilfe der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie. Die Wahl der Arbeitsweise mit stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück erlaubt eine ununterbrochene Betrachtung der Spanbildung auf der Spanfläche. Würde das Werkzeug die rotatorische Bewegung durchführen, wäre eine Betrachtung der Spanbildung nur dann gegeben, wenn der Öffnungswinkel der Spannut der Hochgeschwindigkeitskamera zugeneigt ist. Im Gegensatz zur Schnittunterbrechung, die lediglich den eingefrorenen Zustand zu einzelnen Zeitpunkten repräsentiert, ist auf diese Weise eine kontinuierliche Auswertung aller Phasen eines Bohrprozesses vom Anschnitt bis zum stationären Bohrprozess möglich. Die Spanbildungsvorgänge an den jeweiligen Teilschneiden beim Einlippentiefbohren bzw. der primären und sekundären Hauptschneide sowie der Querschneide beim Wendeltiefbohren lassen sich wirkstellennah analysieren. Darüber hinaus gewähren die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zusätzliche Erkenntnisse zur Spanabfuhr entlang der Spanfläche beim Einlippentiefbohren bzw. der Spannuten beim Wendeltiefbohren. Insgesamt lässt sich mithilfe der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse eine grundlegende Erweiterung des Prozessverständnisses für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern erzielen.

5.2 Integration des Versuchsaufbaus in die konventionelle Tiefbohrmaschine

Die Auslegung und Realisierung der neuen Analysemethodik berücksichtigt die Integration in die konventionelle Tiefbohrmaschine. Dabei kommen zur Realisierung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zahlreiche Komponenten zum Einsatz, die es im Vorfeld zu konstruieren und anzufertigen gilt. Um die Arbeitsweise mit stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück und somit eine kontinuierliche Betrachtung der Spanbildung und der Spanabfuhr orthogonal zur Spanfläche zu ermöglichen, wird im Vergleich zu den Einsatzversuchen die Funktion der Hochfrequenzspindel und des NC-Kreuztisches sowie die Vorschubrichtung umgekehrt. Die Vorschubbewegung erfolgt in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen werkzeugseitig über den NC-Kreuztisch. Die Versuchswerkzeuge sind dabei über ein 4-Komponenten-Dynamometer der Firma KISTLER vom Typ 9272, ein zu fertigendes Zwischenstück, eine Werkzeugaufnahme, eine Stülhülse und eine Spannzange mit dem Kreuztisch verbunden. Eine Triggerung zwischen Aufnahmegesäß der Hochgeschwindigkeitskamera und Kraftmesstechnik ermöglicht zusätzlich eine synchrone Messung der mechanischen Werkzeugbelastungen. Das Zwischenstück dient zum einen der Verbindung der maschinenherstellerspezifischen Werkzeugaufnahme mit dem 4-Komponenten-Dynamometer. Zum anderen ist das Zwischenstück mit einem Gewinde und entsprechenden Bohrungen für die Adaptierung und Zuführung des Kühlschmierstoffes versehen. Die Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen ist somit generell unter Verwendung unterschiedlicher Kühlschmierstoffkonzepte möglich. Da die in dieser Arbeit zu betrachtenden Werkstoffe durch ihre Eigenschaften hohe Anforderungen an die Kühlung und Schmierung stellen, erfordern die Untersuchungen den Einsatz einer Innenhochdruckkühlung. Hierzu wird das in der Versuchsmaschine zur Verfügung stehende und in den Einsatzversuchen durch Hochfrequenzspindel und Werkzeug zugeführte Mineralöl mithilfe zusätzlicher Hochdruckschläuche von der Hochdruckpumpe zur Kühlschmiermitteladaptierung am Zwischenstück geführt. Die Aufnahme der blickdurchlässigen Acrylglasträger einschließlich der darin gespannten Werkstückproben erfolgt durch eine spezielle Spanzangenaufnahme in der Hochfrequenzspindel sowie einen in der Späneschleuse montierten, gelagerten

Spannkonus. Der Konenöffnungswinkel des Spannkonus beträgt 60° . Der Spannbereich der Sonderanfertigungen ist auf den Außendurchmesser der Acrylglaträger abgestimmt. Die Rotation der Versuchsproben ist dabei durch die Hochfrequenzspindel stufenlos einstellbar. Um ein Mitlaufen der gelagerten Spannkone bei der Einstellung hoher Schnittgeschwindigkeiten zu gewährleisten, wird die Hochfrequenzspindel jedoch in mehreren Schritten auf Nennzahl gefahren. Durch die beidseitige Spannung der Acrylglaträger sowie das werkzeugseitige Eintauchen der Werkzeugaufnahme in ein angepasstes Tauchgehäuse in der Späneschleuse ist der Prozess komplett abgedichtet. Die Rückführung des Kühlschmierstoffes erfolgt schließlich über die Späneschleuse. Außerdem werden die in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen produzierten Späne in der Späneschleuse aufgefangen und stehen im Anschluss für weitere Analysen zu Verfügung. In **Abbildung 23** sind die Auslegung anhand einer technischen Zeichnung sowie der experimentelle Versuchsaufbau auf der konventionellen Tiefbohrmaschine der Firma TBT vom Typ ML-200 dargestellt.

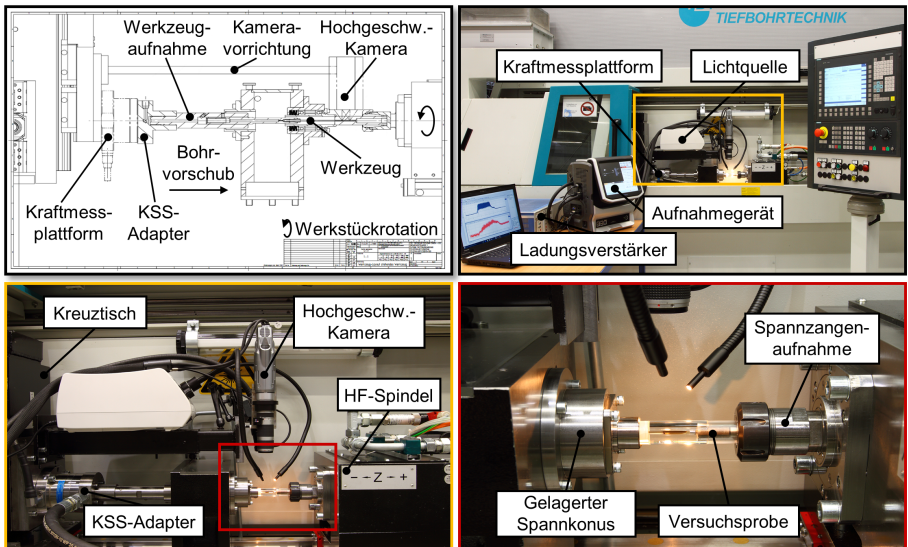


Abbildung 23: Auslegung und experimenteller Aufbau der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse

Die Hochgeschwindigkeitskamera ist in dem experimentellen Versuchsaufbau orthogonal zu den rotierenden Acrylglaträgern zwischen Spannkonus in der Späneschleuse und Spannzangenaufnahme in der Hochfrequenzspindel angebracht. Zur Kopplung der Vorschubbewegung der Versuchswerkzeuge mit dem Fokus des Kameraobjektives bzw. der Aufnahme ist die Hochgeschwindigkeitskamera über eine spezielle, voreinstellbare Vorrichtung mit dem Kreuztisch verbunden. Der zu analysierende Bereich am jeweiligen Versuchswerkzeug lässt sich über eine Feinjustierung der Hochgeschwindigkeitskamera und des Anstellwinkels der Werkzeuge in der Spannzange präzise einstellen. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Spannbildung und -abfuhr über die Spanfläche im Fokus der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen, wodurch die Spanfläche der Werkzeuge orthogonal zur Hochgeschwindigkeitskamera angestellt wird. Die Ausleuchtung der Wirkstelle sowie der unter verschiedenen Winkeln angeordneten Funktionsflächen an den Versuchswerkzeugen erfolgt über mehrere mit Schwannenhälsen und Magnetstativen ausgerichtete Lichtquellen.

abweichender Bohrungsdurchmesser resultiert in einer schlechten Führung der Einlippen- und Wendeltiefbohrer sowie, im Falle eines Untermaßes, dem Aufbohren von Acrylglas. Entstehende Acrylglasfäden und -späne können dabei zu einer negativen Beeinträchtigung der Visualisierung führen und zudem die Spanbildung und den Spanabtransport der Werkstoffproben beeinflussen. Um die Maßhaltigkeit der zentrischen Bohrung und eine hohe Güte und Transparenz der Bohrungswand aus Acrylglas sicherzustellen, ist die Fertigung mithilfe von Einlippentiefbohrern eines identischen Durchmessers unabdingbar. Hierzu werden die Acrylglasstangen zuerst mit einem konventionellen Pilotbohrer vorgebohrt. Im Anschluss wird das Einlippentiefbohren mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 37,7$ m/min und einem Vorschub von $f = 10$ μm unter wasserbasierter Emulsion mit einer Konzentration von $c = 8$ % auf Basis eines Mineralölkonzentrates angewendet. Die Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 37,7$ m/min ergibt sich dabei durch Einstellung der maximalen Spindeldrehzahl von $n = 6000$ min^{-1} . Um das Einfädeln der Versuchswerkzeuge zu erleichtern, wird der Bohrungseintritt mit einem NC-Anbohrer zusätzlich angesenkt. Im Anschluss werden die Acrylglasstangen erneut umgespannt und auf das Endmaß $l = 120$ mm plangedreht. Im letzten Bearbeitungsschritt erfolgt die Erzeugung einer zentrischen Grundbohrung mit einem Durchmesser von $D = 10,0$ mm und einer Tiefe von $l_1 = 75$ mm sowie eines M12-Gewindes zur Spannung der Werkstoffproben.

Die Werkstoffproben aus dem bainitischen Stahl 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 werden aus dem identischen Stangen- und Scheibenmaterial, welches auch in den Einsatzversuchen zum Einsatz kommt, mit einem Durchmesser von $D_a = 9,9$ mm herausgerodiert. Im Anschluss werden die Werkstoffproben auf der CNC-gesteuerten Drehmaschine plangedreht und mit einem Absatz im Durchmesser $D_a = 1,98$ mm sowie einer Länge von $l = 4,0$ mm versehen. Die Absätze unter Nennmaß der eingesetzten Werkzeuge mit einem Durchmesser von $d = 2,0$ mm verhindern das Entstehen einer Hülse, wodurch die Aufnahme der Spanbildungsvorgänge an den Schneiden versperrt werden würde. Auf den Absatz folgt ein konischer Übergang, über den die Werkstoffproben in den Acrylglasträgern gespannt und zentriert werden. Der Außenkonus an den Werkstoffproben ist dabei auf den Spitzenwinkel von $\sigma = 140^\circ$ des eingesetzten Wendelbohrers zur Fertigung der konischen Grundbohrung mit einem Durchmesser von $D = 10$ mm abgestimmt. Die auserodierten Werkstoffproben mit einer Gesamtlänge von $l = 40$ mm können mehrmals nachgesetzt und wiederverwendet werden. Die Bearbeitung der Werkstoffproben erfolgt beidseitig, wodurch sich der Aufwand zur Probenvorbereitung und -wiederaufbereitung reduzieren lässt.

Die Spannschraube wird aus einer herkömmlichen Innensechskant-Madenschraube der Größe M12 hergestellt. Die Spannschraube wird auf der dem Außensechskant gegenüber liegenden Seite entsprechend modifiziert und mit der Negativkontur der Werkstoffproben versehen, sodass die Werkstoffproben auch von dieser Seite über die gesamte Fläche gespannt werden. Abschließend erfolgt zur Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen der Zusammenbau der Versuchsproben bzw. die kraftschlüssige Fixierung der jeweiligen Werkstoffprobe aus 20MnCrMo7 oder Inconel 718 durch das Einschrauben der Spannschraube in das vorbereitete Innengewinde am Ende der Acrylglasträger.

5.4 Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen

Zur Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen wird die zusammengebaute Versuchsprobe zunächst in der Spannzangenaufnahme gespannt und die Hochfrequenzspindel soweit in Richtung Späneschleuse verfahren, bis die Versuchsprobe am gelagerten Konus anliegt. Im Anschluss wird das stehende Versuchswerkzeug in die Führungsbohrung im Acrylglaträger eingefädelt und dessen Ausrichtung im Zusammenspiel mit der Hochgeschwindigkeitskamera vorgenommen. Da in der vorliegenden Arbeit die Spanbildungsvorgänge im Fokus der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen stehen, erfolgt die Ausrichtung der Spanfläche senkrecht zur Hochgeschwindigkeitskamera. In den Untersuchungen zum Wendeltiefbohren orientiert sich diese Ausrichtung an der Lage der primären Hauptschneide. In zukünftigen Forschungsarbeiten können weitere Ausrichtungen, wie z. B. orthogonal zur Rundschliffase zur Erfassung der Spankrümmungswinkel oder auf die Kontaktelemente am Werkzeugumfang zur Analyse der Kühlschmierstoffbenetzung, appliziert werden und weitere, wichtige Informationen zur gezielten Verbesserung des Einsatzverhaltens von Tiefbohrwerkzeugen liefern. Die Ausleuchtung der verschiedenen Funktionsflächen an den Einlippen- und Wendeltiefbohrern geschieht mithilfe mehrerer Kaltlichtquellen. Vor dem Beginn der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen werden die entsprechenden Prozessparameter eingestellt und die Messkette konfiguriert. Die Aufnahme der Spanbildungsvorgänge erfolgt dabei mit einer Hochgeschwindigkeitskamera der Firma KEYENCE vom Typ VW-9000 in einer Bildrate von 10 000 Bildern pro Sekunde mit einer 30-fachen Vergrößerung. Die Belichtungsrate der Wirkstelle liegt bei $1/20\,000$ s. Wegen der hohen Datenmengen ist die Auflösung auf 320×240 Pixel begrenzt. In der vorliegenden Arbeit werden die Videoaufnahmen der Spanbildungsvorgänge durch Bildsequenzen mit Aufnahmen zu sechs bis acht Zeitpunkten repräsentiert. **Abbildung 25** veranschaulicht die Eingriffsbedingungen in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren mit einem Durchmesser von $d = 2,0$ mm aus der Perspektive der Hochgeschwindigkeitskamera.

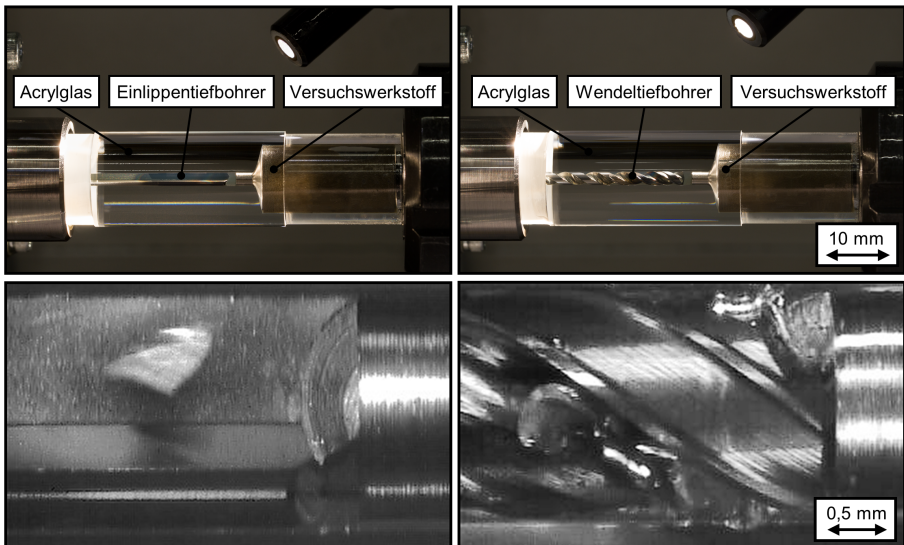


Abbildung 25: Wirkstellennahe Analyse der Spanbildung mittels Hochgeschwindigkeitsmikroskopie

Die Werkstückproben aus dem bainitischen Stahl 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 werden in den Untersuchungen über eine Tiefe von etwa 3 mm gebohrt und dabei sämtliche Eingriffsphasen vom Anschnitt bis hin zum stationären Bohrprozess mit komplettem Schneideneingriff aufgenommen. Darüber hinaus können Erkenntnisse über den Spanablauf entlang des Spanraumes gewonnen werden. Durch die geringen Vorschübe pro Umdrehung beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern kann innerhalb jeder Analyse eine Vielzahl von Spanbildungsvorgängen visuell ausgewertet werden. Jeder einzelne Versuch enthält somit in sich eine statistische Absicherung, wodurch keine Wiederholversuche erforderlich sind.

Die Verwendung von Tiefbohröl mit innerer Zuführung bedingt in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen eine vorteilhafte Tribologie zwischen Versuchswerkzeugen und Oberfläche der Acrylglasbohrung sowie Spänen und Acrylglas. Hierdurch werden ein temperaturbedingtes Aufschmelzen bei hohen Drehzahlen und die Entstehung von störenden Kratzern auf der Acrylglasoberfläche reduziert. Jedoch kommt es bei der Ausleuchtung der Wirkstelle mittels Kaltlicht und einer gleichzeitigen Einstellung eines, für das Einlippentiefbohren mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 2,0$ mm standardmäßig empfohlenen Kühlschmierstoffdruckes von $p_{KSS} = 120$ bar zu starken Verwirbelungen und Turbulenzen im Tiefbohröl. Die Sichtbarkeit ist infolge der Lichtbrechung an den Strömungsturbulenzen stark eingeschränkt. Zur Vermeidung der lichtbrechenden Ölverwirbelungen und Turbulenzen werden daraufhin Untersuchungen zur Reduzierung des Kühlschmierstoffdruckes durchgeführt. **Abbildung 26** stellt den Einfluss des Kühlschmierstoffdruckes auf die resultierende Sichtbarkeit in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen unter Kaltlicht und die Spanformung dar. Die Versuche zur Gegenüberstellung der Spanformung erfolgen exemplarisch in Vollmaterial aus dem bainitischen Stahl 20MnCrMo7 über einen Bohrweg von jeweils $l_f = 2,5$ m unter Verwendung von standardisierten Einlippentiefbohrern mit Einstellwinkeln an der Außen- und Innenschneide von $K_1 = 50^\circ$ und $K_2 = 120^\circ$ sowie einer AlTiN-Beschichtung. Die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70$ m/min und der Vorschub $f = 20$ μ m werden dabei konstant gehalten.

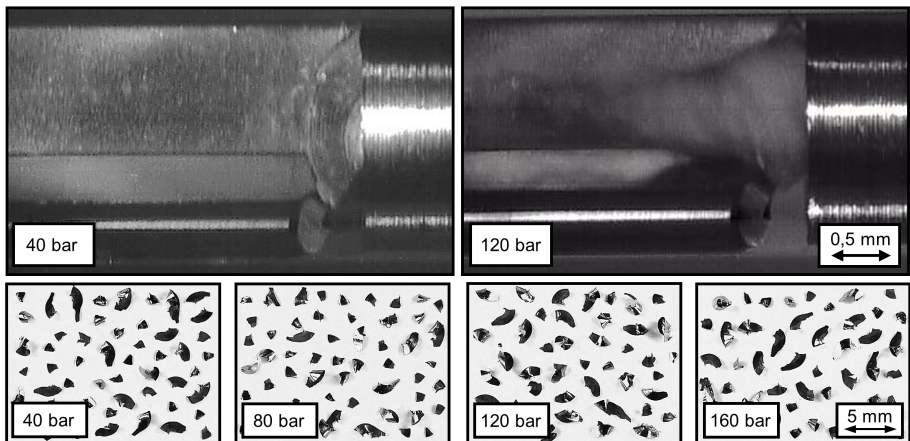


Abbildung 26: Einfluss des Kühlschmierstoffdruckes auf die Spanformung und die resultierende Sichtbarkeit der Spanbildungsvorgänge unter Kaltlicht

Die lichtbrechenden Ölturbulenzen lassen sich dabei durch eine Reduzierung des Kühlschmierstoffdruckes von $p_{KSS} = 120$ bar auf $p_{KSS} = 40$ bar nahezu vollständig eliminieren. In der Gegenüberstellung der resultierenden Spanformen in Abhängigkeit des gewählten Kühlschmierstoffdruckes von $p_{KSS} = 40, 80, 120$ und 160 bar sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Bei allen Kühlschmierstoff-

drücken entstehen Kombinationen aus Bröckelspänen und gekrümmten Faltspänen. Unterschiede ergeben sich dabei lediglich in der Geschwindigkeit des Spanabtransportes. Die Geschwindigkeit der entlang der Spansicke abzuführenden Späne ist dabei proportional zum Volumenstrom des Kühlschmierstoffes, welcher bei Einsatz eines standardisierten Einlippentiefbohrers mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 2,0 \text{ mm}$ etwa $\dot{V} = 0,8 \text{ l/min}$ bei einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{\text{KSS}} = 40 \text{ bar}$ gegenüber $\dot{V} = 2,0 \text{ l/min}$ bei einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{\text{KSS}} = 120 \text{ bar}$ beträgt.

Darüber hinaus ist ein experimenteller Aufbau zur Durchführung der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen unter hohen Kühlschmierstoffdrücken entwickelt worden. Hierbei kommen spezifische Laserdioden anstelle der Kaltlichtquellen zur Ausleuchtung der Wirkstelle zum Einsatz. Um vorab die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung zu identifizieren, bei der der verwendete Kühlschmierstoff am wenigsten Licht absorbiert bzw. am meisten Licht transmittiert, wird mittels eines Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers der Fa. BRUKER vom Typ VERTEX 80V ein Transmissionspektrum aufgezeichnet. **Abbildung 27** zeigt den Einsatz der spezifischen Laserdioden, das aufgenommene Transmissionsspektrum und die resultierende Sichtbarkeit in den Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen bei einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{\text{KSS}} = 120 \text{ bar}$.

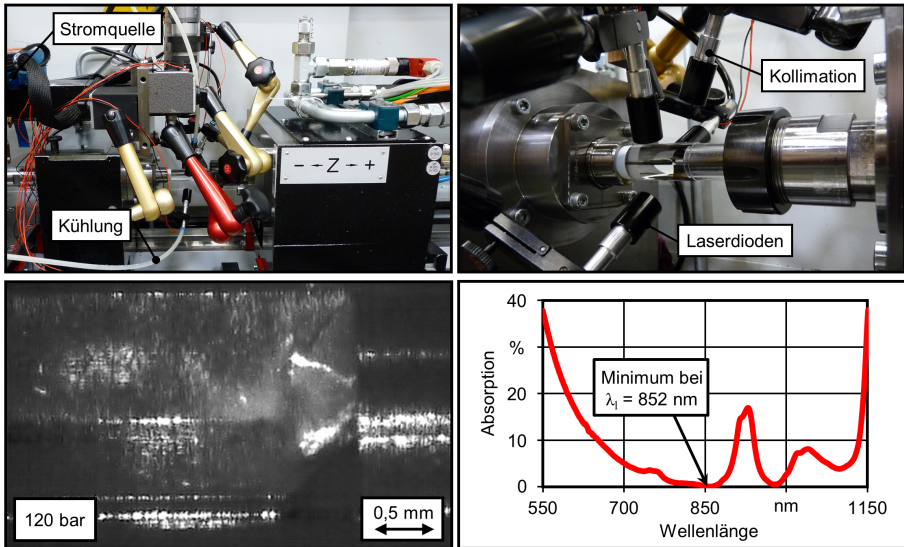


Abbildung 27: Einsatz spezifischer Laserdioden zur Filterung der lichtbrechenden Ölverwirbelungen

Das absolute Absorptionsminimum für das zugeführte paraffinische Mineralöl liegt bei einer Wellenlänge von $\lambda_1 = 852 \text{ nm}$. Durch die Verwendung von fünf gekühlten und kollimierten Laserdioden mit einer Wellenlänge von $\lambda_1 = 852 \text{ nm}$ und einer optischen Leistung von jeweils $P_o = 100 \text{ mW}$ kann eine verbesserte Sichtbarkeit der Spanbildungsvorgänge bei hohen Kühlschmierstoffdrücken realisiert werden. Nichtsdestoweniger charakterisiert die Bildsequenzen der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen unter Einsatz der Laserdioden ein hohes Bildrauschen infolge auftretender Interferenzeffekte, weshalb der innovative Ansatz weiterer Optimierungen zur Steigerung der Qualität der Aufnahmen bedarf. In den folgenden Kapiteln sind daher aufgrund der hervorragenden Sichtbarkeit und Qualität der Bildsequenzen sämtliche Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren mit kleinsten Durchmessern unter Ausleuchtung der Wirkstelle mittels Kaltlicht und Einstellung eines reduzierten Kühlschmierstoffdruckes von $p_{\text{KSS}} = 40 \text{ bar}$ produziert worden.

6 Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7

Bainitische Stähle rücken durch ihre hervorragenden Materialeigenschaften und die kosten- und energieeffiziente Herstellung zunehmend in den Fokus der Automobilindustrie. Einige Komponenten aus dem Antriebsstrang erfordern dabei innerhalb der Fertigungskette eine Tiefbohrbearbeitung. Im folgenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Prozessanalyse für das Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf einen Werkzeugdurchmesser von $d = 2,0$ mm und orientieren sich somit direkt an anwendungsbezogenen Dimensionen, wie z. B. den Zulaufbohrungen in Injektoren aus der Automobilindustrie. Die Versuche umfassen den Einsatz unterschiedlicher Ausführungen des Schneidenschliffes und verschiedener Werkzeugbeschichtungen. Unter Verwendung eines Standardanschliffes werden zunächst prozessgünstige Schnittdaten identifiziert. Darüber hinaus wird der Einfluss des Kühlschmierstoffes diskutiert und ein Verfahrensvergleich zum Einlippen- und Wendeltiefbohren durchgeführt. Zur Bewertung der unterschiedlichen Einflussfaktoren stehen die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung, der Werkzeugverschleiß und die Bohrungsqualität im Mittelpunkt der Analysen.

6.1 Vorversuche zur Identifikation prozessgünstiger Schnittdaten

Zu Beginn der Untersuchungen zum Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 steht die Identifikation einer prozessgünstigen Kombination aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub im Fokus. Die Variation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs sowie die Wahl des Kühlschmierstoffdruckes erfolgen in Anlehnung an die Empfehlungen der VDI-Richtlinie 3208 Tiefbohren mit Einlippenbohrern [VDI3208]. Eine wichtige Grundlage für die Prozessauslegung und -gestaltung bilden die mechanischen Werkzeugbelastungen. **Abbildung 28** zeigt die erfassten Vorschubkräfte und Bohrmomente für die dreistufige Variation der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60, 70, 80$ m/min und des Vorschubs $f = 15, 20, 25$ μm beim Tiefbohren von 20MnCrMo7. Die aufgetragenen Messwerte werden über einen Bohrweg von $l_f = 2500$ mm gemittelt. Eine Ausnahme bildet die Kombination mit der höchsten Produktivität aus $v_c = 80$ m/min und $f = 25$ μm , bei der bereits nach einem Bohrweg von $L_f = 2040$ mm ein Werkzeugbruch aufgetreten ist.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	variiert	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> $v_c = 60$ m/min <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> $v_c = 70$ m/min <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></div> $v_c = 80$ m/min </div>
Werkzeug:	ELB \varnothing 2 mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 60$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar	Bohrweg:	$l_f = 2500$ mm	

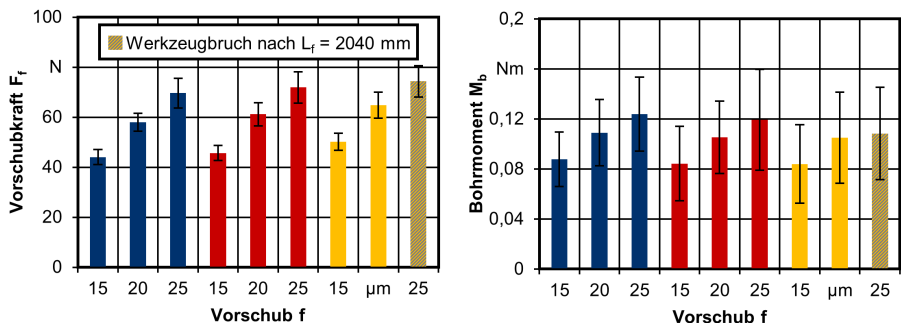


Abbildung 28: Mechanische Werkzeugbelastungen beim Tiefbohren von 20MnCrMo7 in Abhängigkeit der Schnittdaten

In den Versuchen kommen Einlippentiefbohrer mit einem Standardanschliff mit Einstellwinkeln an der Außen- und Innenschneide von $K_1 = 50^\circ$ und $K_2 = 120^\circ$ sowie einer AlTiN-Beschichtung zum Einsatz. Die Vorschubkräfte und Bohrmomente steigen dabei mit zunehmendem Bohrvorschub. Die steigenden mechanischen Werkzeugbelastungen gehen mit einer Vergrößerung des Spannungsquerschnittes und einem höheren Formänderungswiderstand bei der Spanabnahme einher. Mit Blick auf die Schnittgeschwindigkeit ergeben sich zwei unterschiedliche Tendenzen. Einerseits steigt die Vorschubkraft mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit infolge der höheren Vorschubgeschwindigkeit sowie des höheren Zeitspanvolumens sowie der damit verstärkten Reibvorgänge zwischen Span, Werkzeug und Bohrungsgrund. Andererseits resultiert mit steigender Schnittgeschwindigkeit eine Entwicklung zu geringeren Bohrmomenten. Eine Erklärung dafür liefert die höhere Wärmegenerierung in der Wirkzone und die damit verbundene Materialentfestigung. Zudem liegen mit zunehmender Drehzahl eine verbesserte Kühlschmierstoffversorgung und somit günstigere Reibbedingungen in der Kontaktzone zwischen Werkzeugumfang und Bohrungswand vor [Hei12].

Einen entscheidenden Einfluss auf die Prozesssicherheit beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern übt die Spanbildung aus. Eine günstige Spanform bildet die Voraussetzung für einen sicheren und produktiven Tiefbohrprozess. In **Abbildung 29** sind die erzeugten Spanformen beim Tiefbohren von 20MnCrMo7 in Abhängigkeit der Schnittdaten dargestellt.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	variiert	
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_1 = 60$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar	Bohrweg:	$l_1 = 2500$ mm	

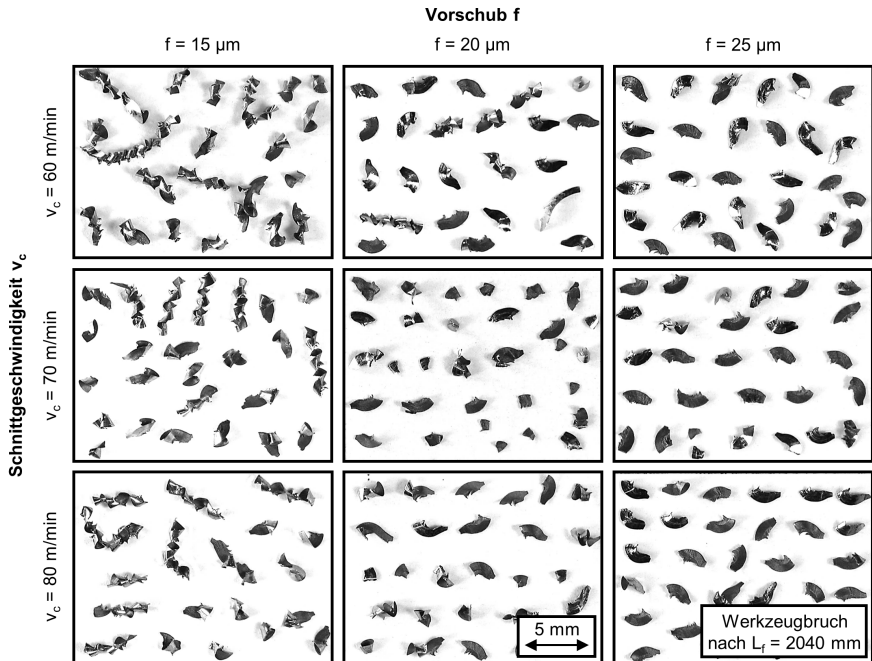


Abbildung 29: Spanformung in Abhängigkeit der Schnittdaten

Bei einem geringen Vorschub von $f = 15 \mu\text{m}$ bilden sich unabhängig von der Wahl der Schnittgeschwindigkeit längere Späne aus, die zum Teil stark verformt sind und mehrere Wendungen aufweisen. Die geringen Spanungsquerschnitte begünstigen dabei die hohe Verformbarkeit der Späne. Eine Erhöhung des Vorschubes resultiert schließlich in einer Vergrößerung der Spandicken und des Spanungsquerschnittes. Die erhöhte Steifigkeit führt zu einem günstigeren Bruchverhalten der Späne während der Faltung über den Sickenrücken und die Übergangskante sowie dem Anlaufen gegen den zuvor erzeugten Bohrungsgrund. Darüber hinaus wirken die höheren Vorschubgeschwindigkeiten der axialen Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit entgegen. Dies geht mit einer Reduzierung der Temperaturen in der Verformungsvorlaufzone einher, wodurch das Verformungsvermögen bei der Spanabnahme zusätzlich sinkt. Bei Einstellung von Vorschüben $f = 20 \mu\text{m}$ oder $f = 25 \mu\text{m}$ entstehen somit deutlich kürzere und homogener geformte Späne. Die überwiegenden, gekrümmten Faltspäne bieten eine hinreichend große Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff und sind daher gut abzutransportieren.

Die mechanischen Werkzeugbelastungen und die Spanbildung stehen beim Tiefbohren in direktem Zusammenhang mit dem resultierenden Werkzeugverschleiß. **Abbildung 30** zeigt den Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Schnittdaten anhand von energiedispersiven Röntgenanalysen.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	variiert	EDX-Analyse ■ W ■ Fe ■ Al
Werkzeug:	ELB \varnothing 2 mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_1 = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{\text{KSS}} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 2500 \text{ mm}$	

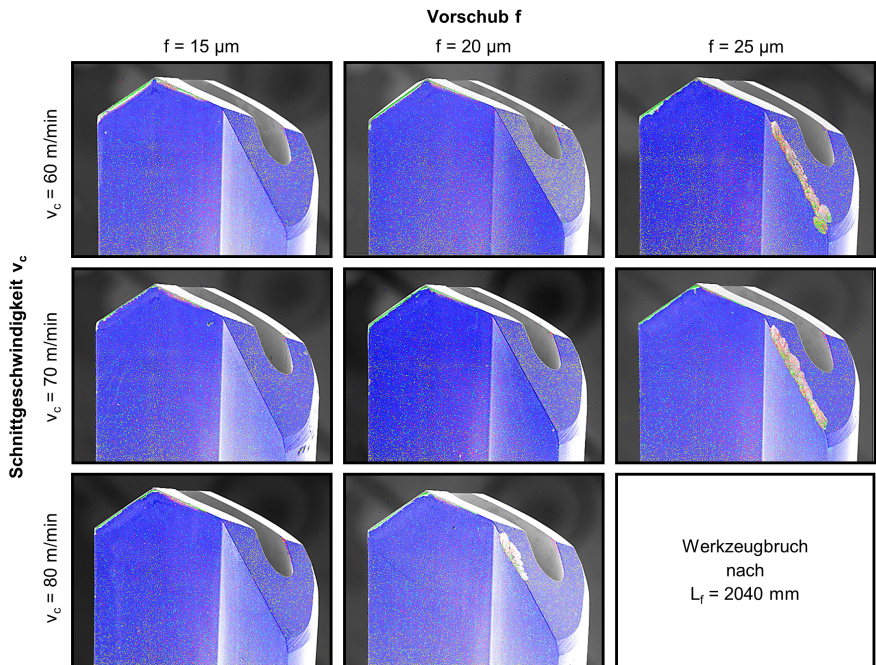


Abbildung 30: Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Schnittdaten

Trotz der hohen Werkstoffhärte sind bei den gewählten Schnittdaten keine Ausbrüche an den Schneidenecken und Schneidenspitzen aufgetreten. Alle Werkzeuge weisen adhäsive Materialanhaftungen und eine Aufbauschneidenbildung an den Schneidkanten auf, die aufgrund des Schnitt-

geschwindigkeitsgradienten im Bereich der Außenschneide überwiegen. An der Innenschneide ist die Beschichtung an den Schneidkanten abgetragen. Die geringen Schnittgeschwindigkeiten wirken in diesem Bereich der Entwicklung von adhäsiven Materialanhaftungen entgegen. Im Bereich der Übergangskante vom Sickenrücken zur Ölraumfläche ist es bei einigen Kombinationen aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub zu Hartmetallausbrüchen gekommen, deren Entstehung im Folgenden näher erläutert wird. Dazu sind in **Abbildung 31** eine repräsentative rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines bei höheren Vorschüben produzierten Spanes und Skizzen zur schematischen Entstehung der Hartmetallausbrüche an der Übergangskante dargestellt. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt einen gekrümmten Faltspan. Die Spanbildung erfolgt über die gesamte Schneidenbreite entlang der Außen- und Innenschneide. Auf der Spanoberseite sind die Kontur der Schneide und die Segmentierung in Form der Scherbänder zu erkennen.

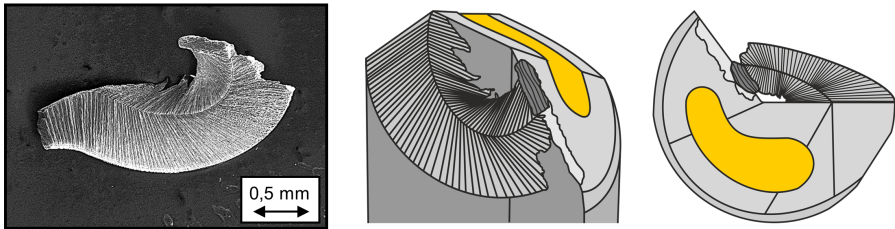


Abbildung 31: Entstehung von Ausbrüchen an der Übergangskante zwischen Sickenrücken und Ölraumfläche

Die Wahl des höchsten Vorschubes von $f = 25 \mu\text{m}$ unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit oder einer hohen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 80 \text{ m/min}$ in Kombination mit Vorschüben von $f = 20 \dots 25 \mu\text{m}$ führt beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 zur Entstehung von Hartmetallausbrüchen an der Übergangskante. Durch die hohen Ablaufgeschwindigkeiten laufen die biegesteifen Späne gegen die Übergangskante und führen nach einer Ermüdung des Hartmetalls zu großflächigen Ausbrüchen. Nachfolgende Späne können sich zwischen der ausgebrochenen Übergangskante und dem Bohrungsgrund verklemmen, was die Prozesssicherheit reduziert. Die Ausbrüche an der Übergangskante begründen das vorzeitige Werkzeugversagen bei der Kombination aus $v_c = 80 \text{ m/min}$ und $f = 25 \mu\text{m}$, bei der die Späne mit der höchsten Ablaufgeschwindigkeit und Biegesteifigkeit entstehen. Die höchste Produktivität bei gleichzeitig günstigem Spanablauf ohne Entstehung von Ausbrüchen an der Übergangskante bietet die Wahl einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70 \text{ m/min}$ und eines Vorschubes $f = 20 \mu\text{m}$.

Die Erfüllung der Qualitätsansprüche besitzt im Produktionsprozess höchste Priorität. Die Bohrungsqualität steht dabei oftmals in direktem Zusammenhang mit der Funktionalität und Sicherheit der zu bearbeitenden Komponenten. Bei der Fertigung von Tiefbohrungen kommt diesbezüglich den Maß- und Formtoleranzen sowie der Oberflächenqualität eine hohe Bedeutung zu. **Abbildung 32** zeigt zunächst den Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub auf die erzielten Maß- und Formtoleranzen.

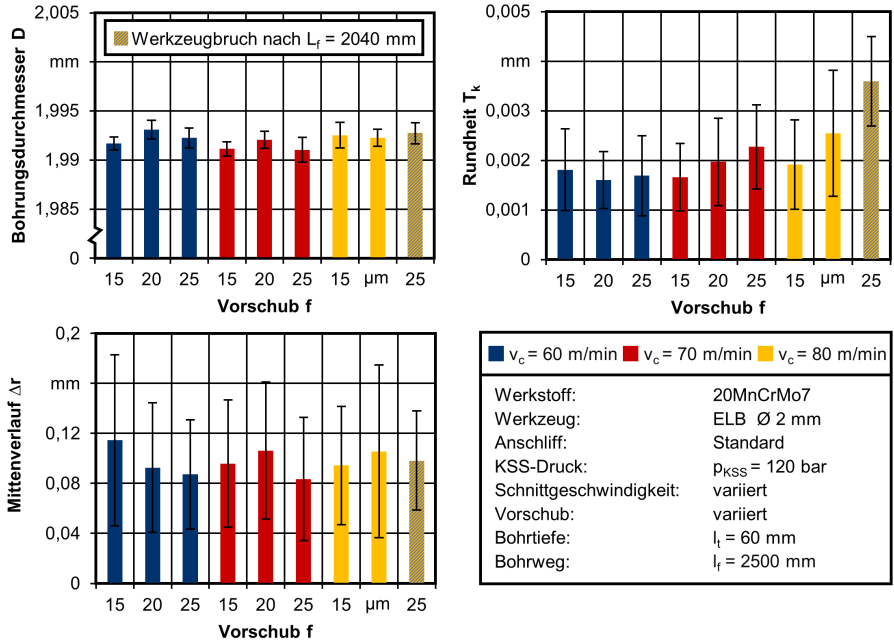


Abbildung 32: Einfluss der Schnittdaten auf die Maß- und Formtoleranzen

Die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen sowie der Mittenverlauf der Tiefbohrungen bzw. die Konzentrität zwischen dem Bohrungseintritt und -austritt werden mithilfe der 3D-Koordinaten-Messtechnik ermittelt. Im Hinblick auf die Durchmessergerauigkeit ergeben sich für alle Schnittdatenkombinationen Austrittsbohrungen unter Nennmaß. Dies ist charakteristisch für die Verwendung der Umfangsform G mit einer Führungsleiste am Werkzeugumfang. Die Einlippentiefbohrer werden dabei beginnend ab einem Startwinkel von 45° relativ zur Schneidenecke über einen Winkel von 125° am Werkzeugumfang abgestützt. Aufgrund der freigeschliffenen Öltasche und der fehlenden Abstützung gegenüber der Schneidenecke entstehen Bohrungsdurchmesser mit geringem Untermaß. Die gemessenen Differenzen im Bohrungsdurchmesser zwischen den unterschiedlichen Parameterkombinationen sind insgesamt sehr gering und liegen alle innerhalb der ISO-Toleranz IT7. Ein deutlicher Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs zeigt sich in den Rundheitsabweichungen. Die zunehmenden Radialkräfte führen zu einem Anstieg der Rundheitsabweichungen mit steigender Vorschubgeschwindigkeit. Der Mittenverlauf der Tiefbohrungen mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_t/D = 30$ weist eine starke Abhängigkeit vom Vorschub auf. Mit steigendem Vorschub resultiert tendenziell ein geringerer Mittenverlauf. Eine Begründung liefert die verbesserte Stabilität und kraftschlüssige Führung des Bohrkopfes an den Führungsleisten aufgrund der wachsenden Schnitt- und Passivkräfte. Darüber hinaus wird infolge der geringeren Bearbeitungszeiten weniger Wärme in den

Werkstoff eingebracht, wodurch eine geringere Nachgiebigkeit der Bohrungswand und eine bessere Abstützung der Führungsleiste vorliegen.


Ein weiteres Qualitätskriterium liefert die Oberflächenqualität der Tiefbohrungen. Zur Bewertung der Oberflächengüte werden die gemittelte Rautiefe und der arithmetische Mittenrauwert taktil gemessen (**Abbildung 33**).



Abbildung 33: Einfluss der Schnittdaten auf die Oberflächenqualität

Die höheren Rauheitswerte mit steigendem Vorschub stehen in Korrelation mit der Spanbildung. Die biegesteiferen Späne infolge höherer Spanungs- und Spandicken führen im Abtransport zu einer stärkeren Beschädigung der Oberflächentopographie in Form von Riefen und Kratzern. Die höhere kinematische Rauheit wird hingegen durch die größeren Führungsleistennormalkräfte und die stärkere Einglättung der Vorschubrillen kompensiert. Die erzielten Oberflächengüten mit gemittelten Rautiefen $Rz \leq 0,4$ µm und arithmetischen Mittenrauwerten $Ra \leq 0,05$ µm ist als sehr hoch zu bewerten.

Zur Überprüfung einer Produktivitätssteigerung wird der Einsatz von Sonderanschliffen überprüft. Im Rahmen dessen wird das Einsatzverhalten des Hochleistungsanschliffes SA2 mit einer dritten Teilschneide senkrecht zur Vorschubrichtung untersucht. Die dritte Teilschneide begünstigt eine höhere Verschleißbeständigkeit und eine Verkürzung der Spanbreite. Die Einstellwinkel an der Außen- und Innenschneide sind mit $K_1 = 50^\circ$ und $K_2 = 120^\circ$ identisch zum Standardanschliff. Um Hartmetallausbrüche und eine geringe Prozessstabilität unter Berücksichtigung höherer Zeitspanvolumina zu vermeiden, weist der Sonderanschliff SA2 zusätzlich eine Fase an der Übergangkante auf. **Abbildung 34** und **Abbildung 35** zeigen die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung und den Werkzeugverschleiß beim Einsatz des optimierten Einlippentiefbohrers.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 60$ m/min	 SA2
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2$ mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	SA2	Bohrtiefe:	$l_f = 60$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar	Bohrweg:	$l_f = 1250$ mm	

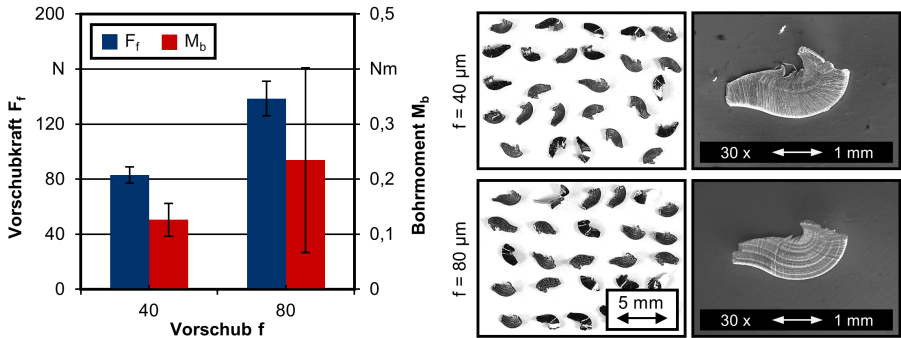


Abbildung 34: Mechanische Werkzeugbelastungen und Spanbildung beim Einsatz des Sonderanschliffes SA2

Die Vorschubsteigerung führt zu einem deutlichen Anstieg der Vorschubkräfte und Bohrmomente. Die große Standardabweichung im Bohrmoment bei Einstellung eines Vorschubes von $f = 80 \mu\text{m}$ deutet auf einen instabilen Prozess hin. Die resultierende Spanform ist dabei auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten prozessgünstig. Es entstehen bei beiden Vorschüben kurz gebrochene, gekrümmte Faltspäne. Die Versuche unter Verwendung des Sonderanschliffes SA2 werden aufgrund des starken Werkzeugverschleißes nach einem Bohrweg von $l_f = 1250$ mm abgebrochen.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 60$ m/min	EDX-Analyse ■ W ■ Fe ■ Al
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2$ mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	SA2	Bohrtiefe:	$l_f = 60$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar	Bohrweg:	$l_f = 1250$ mm	

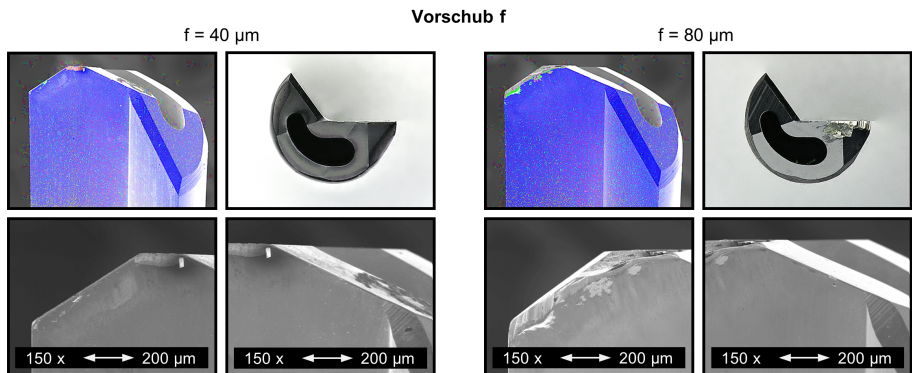


Abbildung 35: Werkzeugverschleiß beim Einsatz des Sonderanschliffes SA2

Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt zu großflächigen Ausbrüchen im Bereich der dritten Teilschneide und der Außenschneide. Die hohen Materialfestigkeiten von $R_m = 1260$ MPa des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 bedingen bei den gewählten Vorschubwerten ein Überschreiten der zulässigen mechanischen Werkzeugbelastungen und ermöglichen daher keine weitere Produktivitätssteigerung.

6.2 Einsatzversuche unter Variation des Schneidenschliffes

Die vorangegangenen Untersuchungen zur Identifikation geeigneter Schnittdaten belegen, dass das Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 nur in einem engen Prozessfenster prozesssicher und produktiv möglich ist. Bei Wahl einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 70$ m/min und eines Vorschubes von $f = 20$ μm lässt sich die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitig vorteilhafter Spanbildung erzielen. In den folgenden Untersuchungen zur Variation des Schneidenschliffes beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7 werden folglich diese Schnittdaten zur Gegenüberstellung des Einsatzverhaltens unterschiedlicher Anschniffe herangezogen. Die Variation umfasst neben dem Standardanschliff, die Sonderanschniffe SA1 und SA2. Der Sonderanschliff SA1 ist charakterisiert durch einen Radiusanschliff, wogegen der Sonderanschliff SA2 die Besonderheit einer dritten Teilschneide aufweist. Alle Werkzeuge liegen mit einer AlTiN-Beschichtung vor. In **Abbildung 36** sind die Verläufe und Mittelwerte der mechanischen Werkzeugbelastungen über einen Bohrweg von $l_f = 10$ 000 mm für alle Anschniffe zusammengefasst.

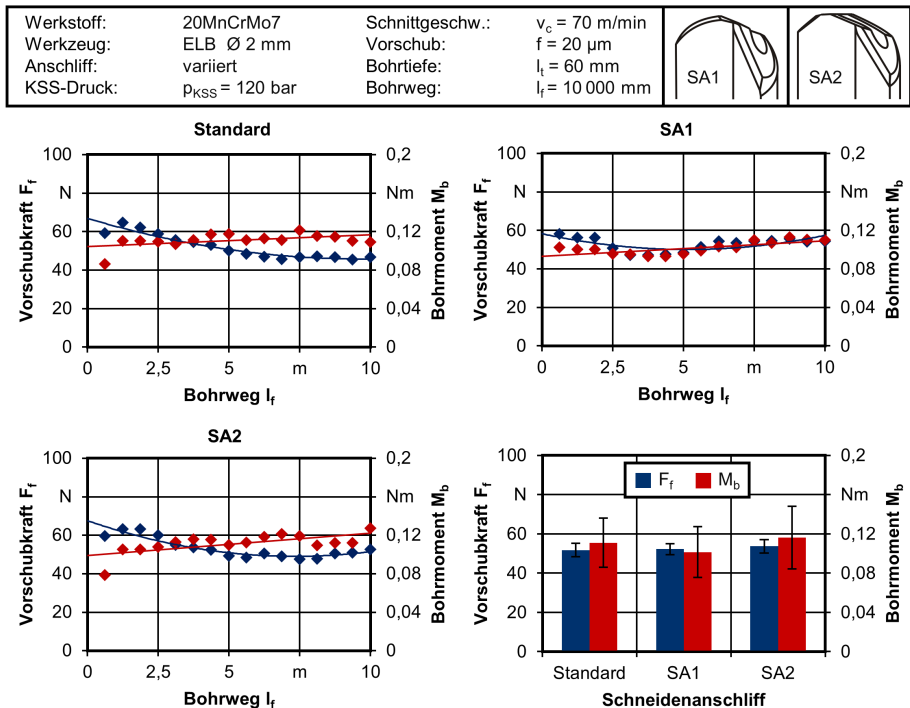


Abbildung 36: Mechanische Werkzeugbelastungen bei Variation des Schneidenschliffes

Die Mittelwerte der Vorschubkraft und des Bohrmomentes weichen unter Berücksichtigung der Standardabweichung nur geringfügig voneinander ab. Gleichwohl bedingt die Verwendung des Sonderanschliffes SA2 durch die orthogonal zur Vorschubrichtung wirkende, dritte Teilschneide die größte Vorschubkraft. Das geringste Bohrmoment bei Einsatz des Sonderanschliffes SA1 resultiert aus der geringen Spandickenstauchung entlang der konvex gekrümmten Außenschneide und dem gleichmäßigen Übergang zur Rundschliffphase. Die scharfe Schneidenecke des Standardanschliffes und des Sonderanschliffes SA2 ist

dagegen weniger verschleißbeständig und führt mit fortlaufendem Einsatz zu einem stärkeren Anstieg im Reibmoment. Bei allen drei Werkzeuganschliffen stellt sich dabei ein zunächst regressiv abfallender Verlauf der Vorschubkraft ein, wogegen das Bohrmoment mit zunehmendem Werkzeugverschleiß kontinuierlich über den Bohrweg ansteigt. Der geometrisch ähnliche Standardanschliff und der Sonderanschliff SA2 weisen eine nahezu identische Entwicklung der mechanischen Werkzeugbelastungen über den Bohrweg auf. Beide Anschniffe zeigen zudem ein Einlaufverhalten in Form geringer mechanischer Werkzeugbelastungen bis zu einem Bohrweg von $l_f = 1200$ mm. Im Gegensatz dazu steigen die Vorschubkräfte beim Radiusanschliff SA1 nach einem Bohrweg von $l_f = 5000$ mm wieder an.

Die Entwicklung der mechanischen Werkzeugbelastungen steht in direktem Zusammenhang mit der resultierenden Spanbildung. Bei Einsatz aller drei Werkzeuganschniffe tritt eine signifikante Veränderung der Spanbildung mit zunehmendem Bohrweg ein. Der Standardanschliff und der Sonderanschliff SA2 produzieren im Neuzustand kurz geformte Bröckelspäne. Mit dem Bohrweg wächst die Länge der Späne. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm entstehen stark verformte, ziehharmonika-förmige Späne, welche die Prozesssicherheit verringern und leicht zwischen Bohrungswand und Werkzeugsicke verklebten können. Die breite, radiusförmig ausgeführte Außenschneide des Anschniffes SA1 führt zu stark gewendelten Spänen, die nach einem Bohrweg von $l_f = 2500$ mm eine Entwicklung zu langen Bandspänen zeigen. Im weiteren Einsatz bilden sich schließlich lange Wendelspäne, die aufgrund ihres Querschnittes zwischen Bohrungswand und Sicke reiben und den Vorschubkraftanstieg beim Radiusanschliff SA1 nach $l_f = 5000$ mm erklären. In **Abbildung 37** sind die Spanformen für alle drei Werkzeuganschniffe über den Bohrweg dargestellt.

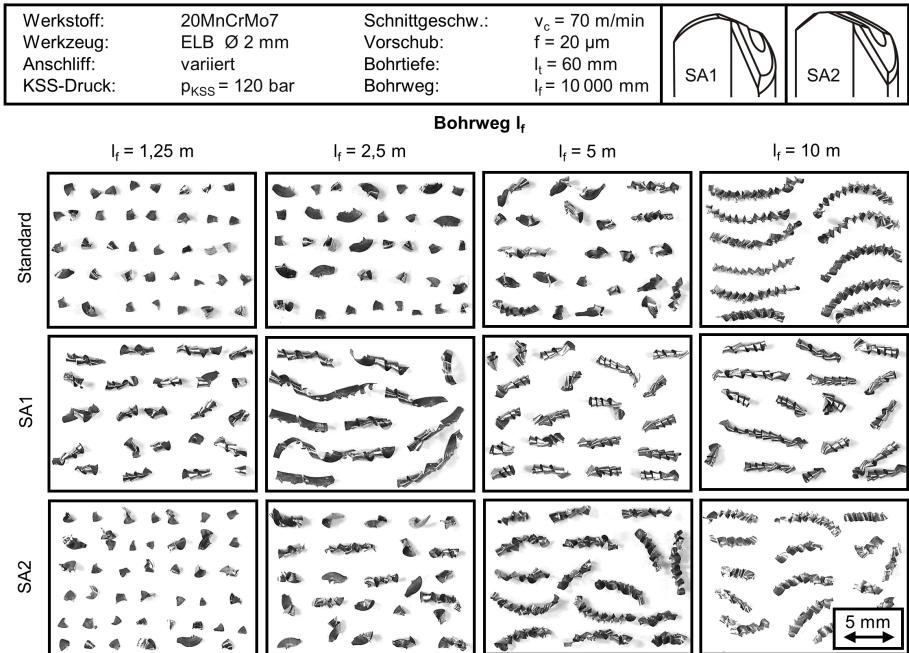



Abbildung 37: Spanformung bei Variation des Schneidenschniffes

Der Einsatz der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse ermöglicht es, die Spanformung an der Schneide sowie den Spanabtransport zu visualisieren und zu verstehen. Die Hochgeschwindigkeits-

Spanbildungsanalysen erfolgen mit stehendem Werkzeug und rotierendem Werkstück. Die Spanfläche des Einlippentiefbohrers liegt dabei orthogonal zur Betrachtungsrichtung. **Abbildung 38** zeigt Bildsequenzen der durchgeführten Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen für die drei eingesetzten Schneidenschliffe in 30-facher Vergrößerung. Die repräsentative Spanbildung wird durch eine Bildsequenz von jeweils acht Zeitpunkten veranschaulicht.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	
Anschliff:	variiert	Bildrate:	10 000 fps	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 40 \text{ bar}$	Vergrößerung:	30-fach	

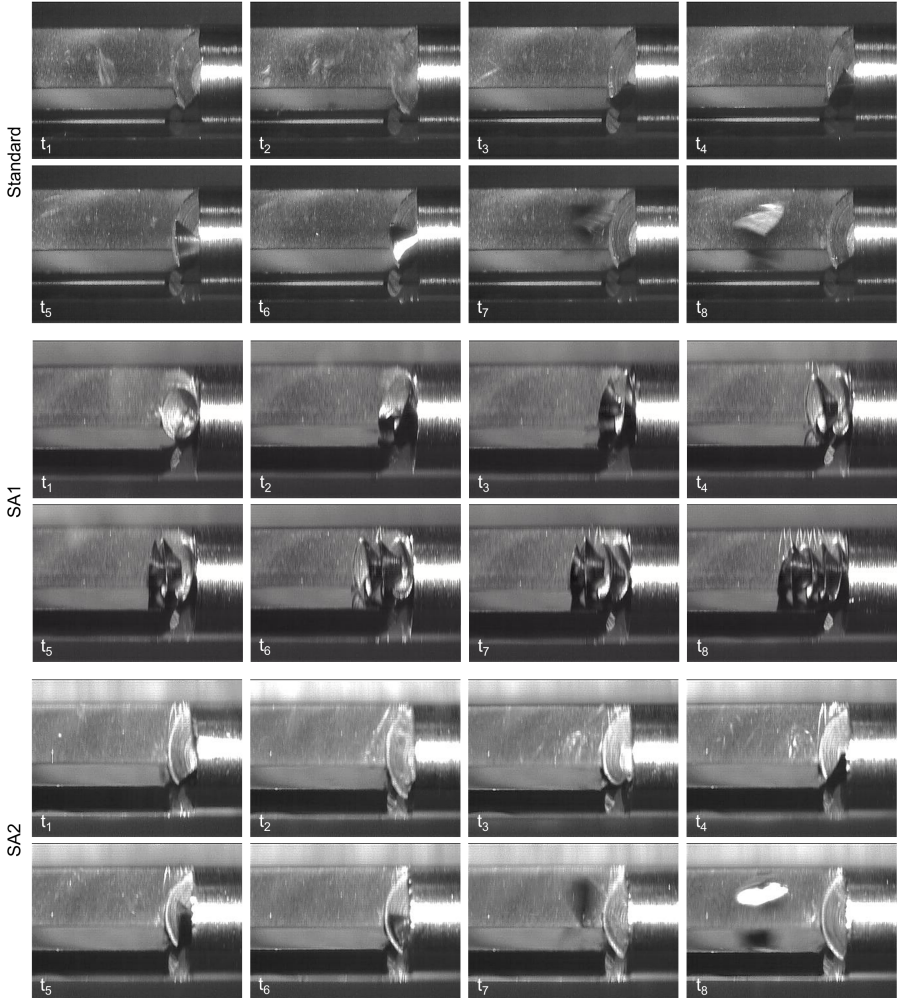


Abbildung 38: Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen für unterschiedliche Schneidenschliffe beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7

Die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen belegen, dass die Spanbildung beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern über die gesamte Schneidenbreite erfolgt. Unter Verwendung des Standardanschliffes im unverschlissenen Zustand bildet sich der Span an der Innen- und Außenschneide und krümmt sich infolge des Schnittgeschwindigkeitsgradienten über den Werkzeugradius unmittelbar hinter der Schneide in Richtung Werkzeugzentrum. Auf Höhe der Bohrungsmittelachse ist die Spanablaufrichtung senkrecht zur Vorschubrichtung (t_1). Die Kontur der Schneide sowie die Spur der Schneidenspitze sind auf der Spanoberseite abgebildet. Der Span läuft über den Sickenrücken und die Übergangskante in Richtung des zuvor erzeugten Bohrungsgrundes (t_2). Beim Anlaufen gegen den Grund der rotierenden Werkstoffprobe knickt der Span oberhalb der Übergangskante ein und bricht durch den nachschiebenden Materialfluss (t_3 - t_7). Die kurz gebrochenen Bröckelspäne lassen sich störungsfrei entlang der Werkzeugsicke abführen und gewähren eine hohe Prozessstabilität (t_8). Der Sonderanschliff SA1 zeigt dagegen ein anderes Spanbildungsverhalten (vgl. Abbildung 37). Der Radiusanschliff führt zu einer hohen Schneidenbreite und geringeren Spanungsdicken im Bereich der Außenschneide, wodurch der Span eine geringere Steifigkeit aufweist und sich stärker verformen lässt. Der überwiegend entlang der radiusförmigen Außenschneide entstehende Span krümmt sich ebenfalls in Richtung Werkzeugzentrum. Beim Kontakt mit dem Sickingrund rollt sich der Span direkt auf und es kommt zu keiner Berührung mit dem Bohrungsgrund. Die nachfolgenden Wendungen weisen einen großen Radius auf. Die Werkzeugsicke wird nahezu vollständig vom Querschnitt des Spanes ausgefüllt. Die Bildsequenzen der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen verdeutlichen, dass die Wendespäne des Anschliffes SA1 zwischen Bohrungswand und Werkzeugsicke reiben. Die scharfkantigen Späne verkleben sich zum Teil und hinterlassen Kratzer auf der Bohrungswand aus Acrylglas. Der Sonderanschliff SA2 weist aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit der Schneidengestalt eine hohe Übereinstimmung mit der Spanbildung des Standardanschliffes auf. Infolge der kürzeren Innenschneide wird dem über die Außenschneide abfließenden Material ein geringerer Widerstand entgegengebracht, und die Späne werden noch stärker in Richtung Bohrerzentrum gekrümmt. Die kurz gebrochenen Bröckelspäne lassen sich dabei prozesssicher abführen.

Eine Erklärung für die signifikante Veränderung der Spanbildung mit zunehmendem Bohrweg zeigt sich bei einer Gegenüberstellung mit der Verschleißentwicklung. In **Abbildung 39** sind die Spanbildung sowie rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, energiedispersive Röntgenspektroskopieanalysen (EDX-Analysen) und Höhenprofile der Spanfläche, erstellt mithilfe der konfokalen Weißlichtmikroskopie, eines Einlippentiefbohrers mit Standardanschliff im Neuzustand und für nachfolgende Verschleißzustände zusammengefasst. Im Neuzustand produziert das Werkzeug kurze Bröckelspäne und weist im Bereich der Schneidenkanten eine intakte Beschichtung auf. Mit zunehmender Einsatzzeit tritt eine Veränderung der Spanbildung zu stark verformten, zieharmonika-förmigen Spänen ein. Die Spanlänge steigt deutlich an. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm werden Spanlängen bis zu $l_{sp} = 10,1$ mm erzeugt. Eine Betrachtung des Werkzeugverschleißes liefert die Ursache für die Veränderung der Spanbildung über den Bohrweg. An der Werkzeugschneide kommt es zu einer signifikanten Aufbauschneidenbildung begünstigt durch die vorherrschenden Voraussetzungen in Form der Fähigkeit des Werkstoffes zur Kaltverfestigung, der stabilen, weitgehend stationären Spanbildung, der Stauzone im Stofffluss vor der Schneidkante und den ausreichend geringen Temperaturen in der Spanbildungszone, die eine Rekristallisation unterdrücken [Den11, Opi64]. Die energiedispersive Röntgenspektroskopie nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm zeigt die abrasiv abgetragene Werkzeugbeschichtung und Schneidkantenverrundung sowie die auf dem Hartmetallsubstrat adhäsiv gebildete Aufbauschneide mit einer Höhe von $h_a = 26$ μm . Die konfokalen Weißlichtanalysen verdeutlichen die Entwicklung der Aufbauschneidenbildung über die Einsatzzeit. Die Aufbauschneide wächst dabei über den Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm kontinuierlich an und ist nicht durch einen ständigen Auf- und Abbau charakterisiert.

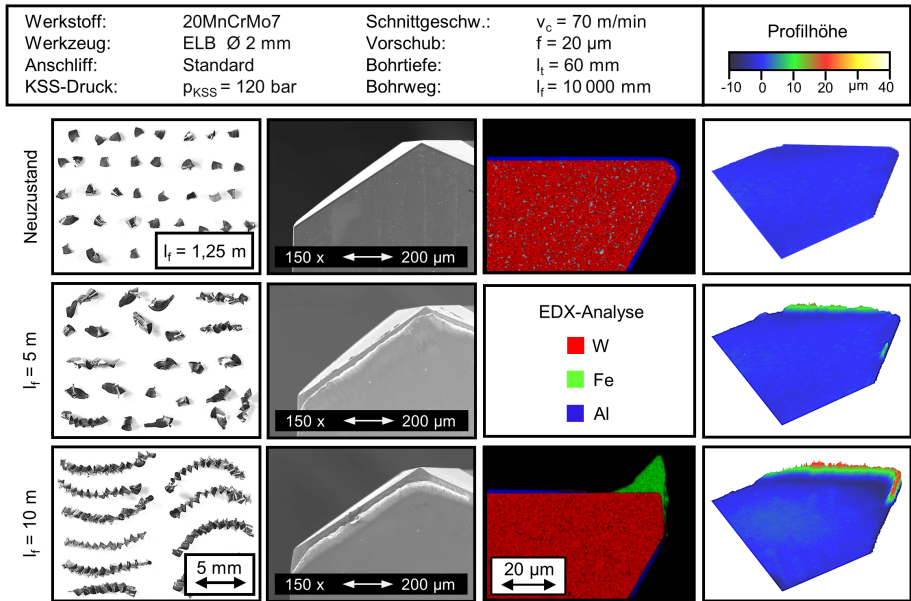


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Werkzeugverschleiß und Spanformung über den Bohrweg beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern

Die Aufbauschneidenbildung verändert die Schneidkeilgeometrie und somit die Eingriffsbedingungen beim Einlippentiefbohren (Abbildung 40). Im Neuzustand betrug die Schneidkantenverrundung gemessen an der Außen- und Innenschneide $r_\beta = 7,8$ µm. Die Spanbildung erfolgte bei einem Vorschub von $f = 20$ µm in der Schneidkantenverrundung und auf der Spanfläche unter einem für das Einlippentiefbohren charakteristischen nominellen Spanwinkel von $\gamma_{nom} = 0^\circ$. Insgesamt liegen somit effektive Spanwinkel von $\gamma_{eff} \leq 0^\circ$ vor. Mit zunehmendem Bohrweg verändert der abrasive und adhäsive Werkzeugverschleiß die Eingriffssituation an der Schneide. Mithilfe der konfokalen Weißlichtmikroskopie werden die digitalisierten Höhenprofile an verschiedenen Positionen entlang der Schneide ausgewertet und die gemittelten Spanwinkel bestimmt. Nach einem Bohrweg von $l_f = 5000$ mm resultiert ein positiver effektiver Spanwinkel von $\gamma_{eff} = 20^\circ$, der nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm bereits $\gamma_{eff} = 28^\circ$ beträgt.

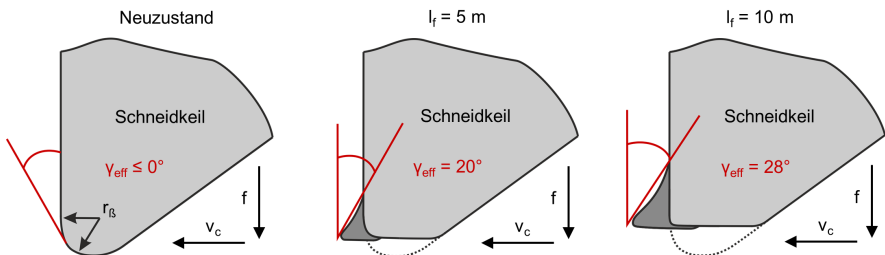



Abbildung 40: Veränderung der Eingriffsbedingungen durch eine Aufbauschneidenbildung beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern

Die abweichenden Eingriffsbedingungen liefern die Erklärung für den Verlauf der mechanischen Werkzeugbelastungen über den Bohrweg. Die Abnahme der Vorschubkräfte begründet sich durch die Entwicklung zu positiven Spanwinkeln durch die Aufbauschneidenbildung. Ähnliche Beobachtungen in Form fallender Prozesskräfte durch eine Aufbauschneidenbildung beim Drehen machten *Denkena* und *Tönshoff* sowie auch *Popov* und *Dugin* [Den11, Pop14]. Die im späteren Verlauf wieder ansteigende Charakteristik der Vorschubkraft und das stetig zunehmende Bohrmoment sind auf den Freiflächenverschleiß zurückzuführen. Durch den abrasiven Abtrag der Schneidkante bildet sich eine senkrecht zur Vorschubrichtung wirkende Fläche unter einem Freiwinkel von $\alpha = 0^\circ$, die starke Reibvorgänge zwischen Werkzeug und Bohrungsgrund hervorruft. Zur Veranschaulichung des Einflusses der Eingriffsbedingungen auf die Spanbildung zeigt **Abbildung 41** Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen des Einlippentiefbohrens von 20MnCrMo7 mit einem Standardanschliff im Neuzustand und nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm. Der Zustand des verschlissenen Einlippentiefbohrers wird in vorgelagerten Einsatzversuchen über einen Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm in Vollmaterial unter einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 120$ bar eingestellt.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70$ m/min	
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	$f = 20$ µm	
Anschliff:	Standard	Bildrate:	10 000 fps	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 40$ bar	Vergrößerung:	30-fach	

Spanformung (AlTiN) zu Prozessbeginn

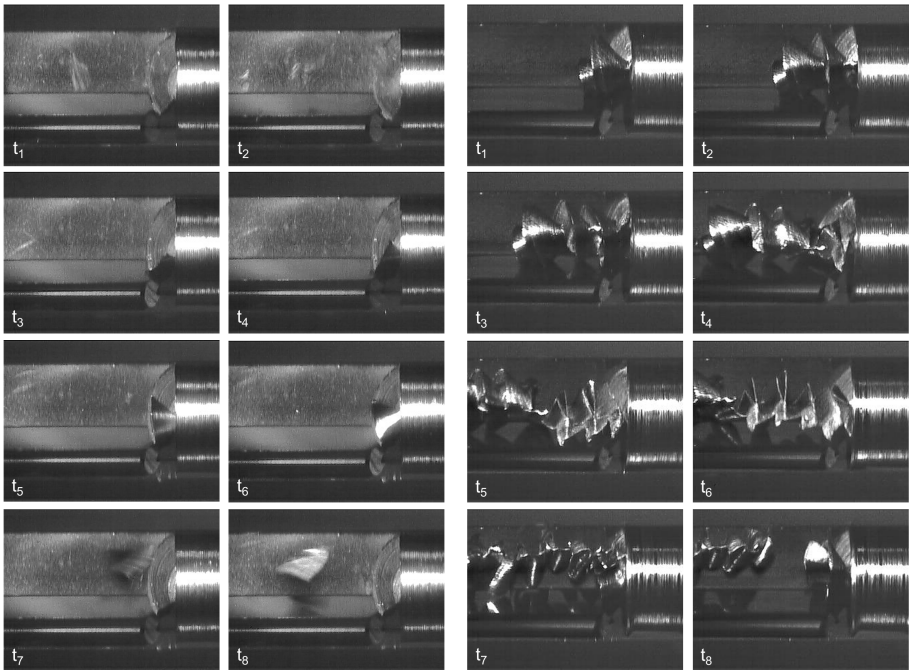
Spanformung (AlTiN) nach $l_f = 10\,000$ mm

Abbildung 41: Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen unter Variation des Werkzeugzustandes

Die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zeigen den signifikanten Einfluss des Verschleißzustandes auf die Spanformung beim Einlippentiefbohren. Im Werkzeugneuzustand liegen Spanwinkel von $\gamma_{\text{eff}} \leq 0^\circ$ vor, und es werden kurz gebrochene Bröckelspäne produziert. Im verschlissenen Zustand

stellen sich aufgrund der Aufbauschneidenbildung positive effektive Spanwinkel ein, und es liegt eine grundlegend veränderte Spanformung vor. Der Span krümmt sich dabei durch die höhere Fließgeschwindigkeit an der Außenschneide zunächst auch in Richtung Werkzeugzentrum. Im Gegensatz zur Spanformung im Neuzustand entstehen beim Kontakt des Spans mit dem Sickenrücken einige Wendungen, bevor der Span in eine aufgefaltete Ziehharmonika-Form übergeht. Hierbei wird der an der Schneide entstehende Fließspan immer wieder gegen die Übergangskante geschoben, knickt ein und bildet eine Faltenstruktur. Nach einer Vielzahl von ausgebildeten Knickstellen wird der Span durch den angreifenden Kühlschmierstoff abgetrennt. Zum Zwecke einer tiefergehenden Analyse der Spanbildungsmechanismen im Bereich der Werkzeugschneide werden die Späne im Anschluss eingebettet und präpariert. In **Abbildung 42** sind die ermittelten Spandicken und lichtmikroskopische Aufnahmen der Spanquerschliffe im Bereich der Schneidenmitte dargestellt. Die im Diagramm aufgetragenen Spandicken repräsentieren einen statistischen Mittelwert, gebildet aus mehreren vermessenen Spänen und einer Reihe von Messwerten entlang des jeweiligen Spanquerschliffes. Die Vermessung ermöglicht gleichzeitig eine Aussage über die Spandickenstauchung λ_s als Quotient aus Spandicke h_1 und Spannungsdicke h . Durch die Vermessung im Bereich der Schneidenmitte, bei der bei allen Anschliffen Einstellwinkel von etwa $K = 90^\circ$ vorliegen, wird die Spannungsdicke mit $h = f = 20 \mu\text{m}$ für die Berechnung der Spandickenstauchung als konstant angenommen.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	
Anschliff:	variiert	Bohrtiefe:	$l_f = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	

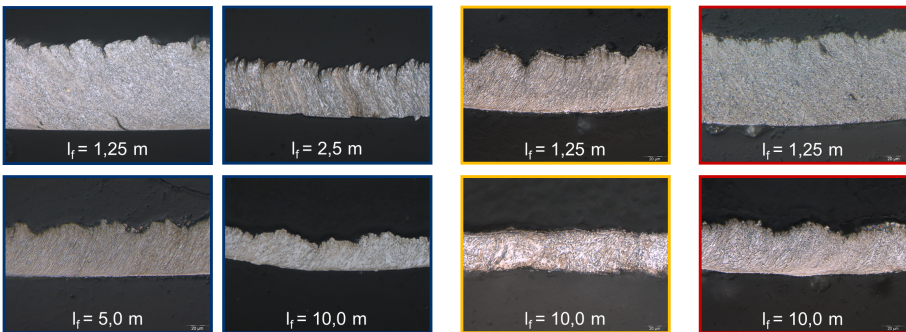
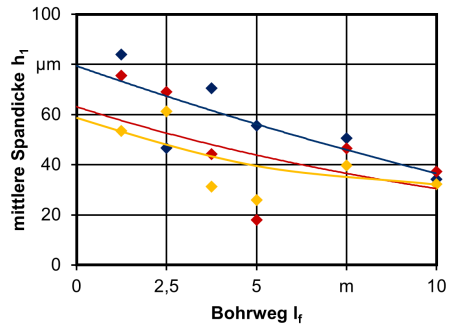
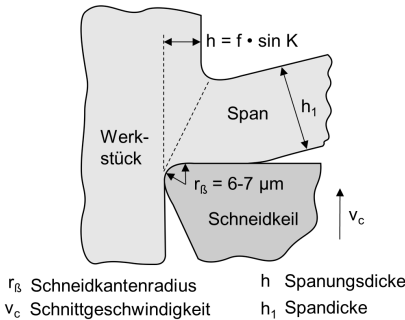


Abbildung 42: Entwicklung der Spandicke über den Bohrweg in Abhängigkeit des Werkzeugschliffes

Die Vermessung der mittleren Spandicken sowie auch die Aufnahmen der Spanquerschliffe zeigen für alle eingesetzten Anschliffe eine Abnahme der Spandicke und somit auch der Spandickenstauchung mit zunehmendem Bohrweg. Die Spandickenstauchung bei Einsatz des Standardanschliffes und des Sonderanschliffes SA2 sinkt von $\lambda_s = 4,2$ bzw. $\lambda_s = 3,8$ im Neuzustand bis zu einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm um mehr als die Hälfte auf $\lambda_s = 1,7$ bzw. $\lambda_s = 1,9$ und ist Ursache für die gravierende Veränderung in der Spanformung. Bei Verwendung des Sonderanschliffes SA1 fallen bereits zu Prozessbeginn längere gewendelte Späne durch eine geringere Spandickenstauchung von $\lambda_s = 2,7$ an. Die Kurve der Spandicke bzw. der Spandickenstauchung des Sonderanschliffes SA1 verläuft wesentlich flacher. Eine Aufbauschneidenbildung und somit auch inkonstante Eingriffsbedingungen lassen sich unabhängig vom Werkzeuganschliff feststellen. Die Spanbildung bei Einsatz der Sonderanschliffe SA1 und SA2 erfolgt nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm unter positiven effektiven Spanwinkeln von $\gamma_{\text{eff}} = 24^\circ$ bzw. $\gamma_{\text{eff}} = 31^\circ$. **Abbildung 43** zeigt eine Gegenüberstellung der Werkzeuge im verschlissenen Zustand.

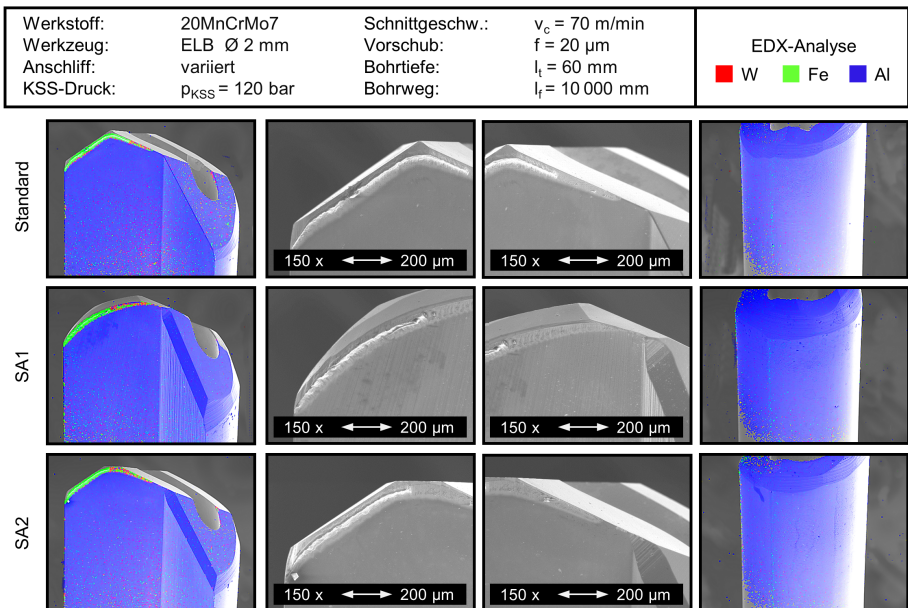


Abbildung 43: Werkzeugverschleiß bei Einsatz unterschiedlicher Schneidenanschliffe

Bei allen eingesetzten Werkzeugen zeigt sich neben der Aufbauschneidenbildung ein abrasiver Verschleiß an den Schneidkanten der Innen- und Außenschneide. Die Aufbauschneidenbildung tritt dabei vorwiegend im Bereich der Außenschneide, in dem eine Fließspanbildung vorliegt, auf. Im zentrumsnahen Bereich der Innenschneide bedingen die geringen Schnittgeschwindigkeiten eine Scherspannungsbildung, die einer Aufbauschneidenbildung entgegenwirkt. Beim Standardanschliff ist die Schneidenspitze abrasiv verrundet. Die dritte Teilschneide des Anschliffes SA2 erhöht in diesem Bereich die Verschleißbeständigkeit. An den Führungsleisten ist dagegen nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm weder in axialer noch in radialer Richtung ein quantifizierbarer Verschleiß aufgetreten. **Abbildung 44** zeigt ergänzend eine Auswertung des Freiflächenverschleißes. Im Rahmen dessen werden die mittlere Verschleißmarkenbreite als Mittelwert aus fünf Messwerten entlang der Schneiden sowie die maximale Verschleißmarkenbreite am Übergang zur Rundschliffase erfasst.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	◆ Standard
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	◆ SA1
Anschliff:	variiert	Bohrtiefe:	$l_f = 60 \text{ mm}$	◆ SA2
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	

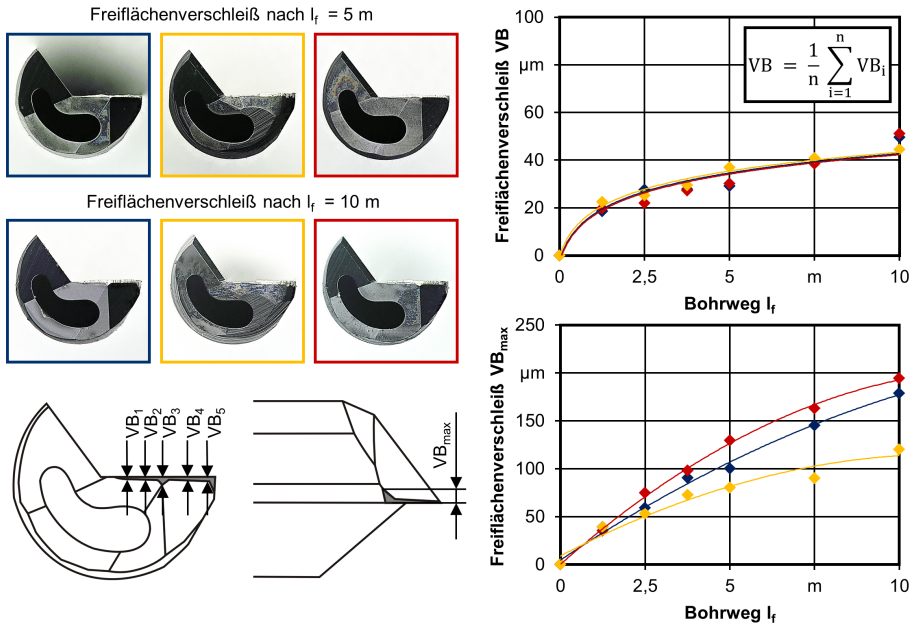


Abbildung 44: Freiflächenverschleiß bei Einsatz unterschiedlicher Schneidenanschliffe

Die Verläufe der mittleren Verschleißmarkenbreite, gemessen auf der Freifläche, liegen für die verschiedenen Schneidenanschliffe nah beieinander. Die an der Rundschliffase erfasste maximale Verschleißmarkenbreite weist dabei größere Differenzen zwischen den Schneidenanschliffen auf. Die geringste maximale Verschleißmarkenbreite bei Einsatz des Radiusanschliffes SA1 ergibt sich durch den stetigen Übergang zwischen Außenschneide und Rundschliffase. Demgegenüber bieten die scharfen Schneidenecken des Standardschliffes und des Sonderanschliffes SA2 eine deutlich größere Verschleißangriffsfläche und sind nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ stark verrundet. Die Verrundung der Schneidenecken ist in den rasterelektronenmikroskopischen Verschleißaufnahmen deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 43).

Durch eine Variation des Schneidenanschliffes kann beim Einlippentiefbohren gezielt Einfluss auf das Kräfteverhältnis am Bohrkopf und die Spanformung, die wiederum in direktem Zusammenhang mit den Qualitätskenngrößen stehen, genommen werden. In **Abbildung 45** sind die resultierenden Maß- und Formtoleranzen in Abhängigkeit der Schneidenanschliffe dargestellt. Zur Bestimmung der Mittelwerte wurden der Bohrungsaustrittsdurchmesser, die Rundheitsabweichung und der Mittverlauf aller erzeugten Bohrungen über einen Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ mithilfe der 3D-Koordinaten-Messtechnik erfasst.

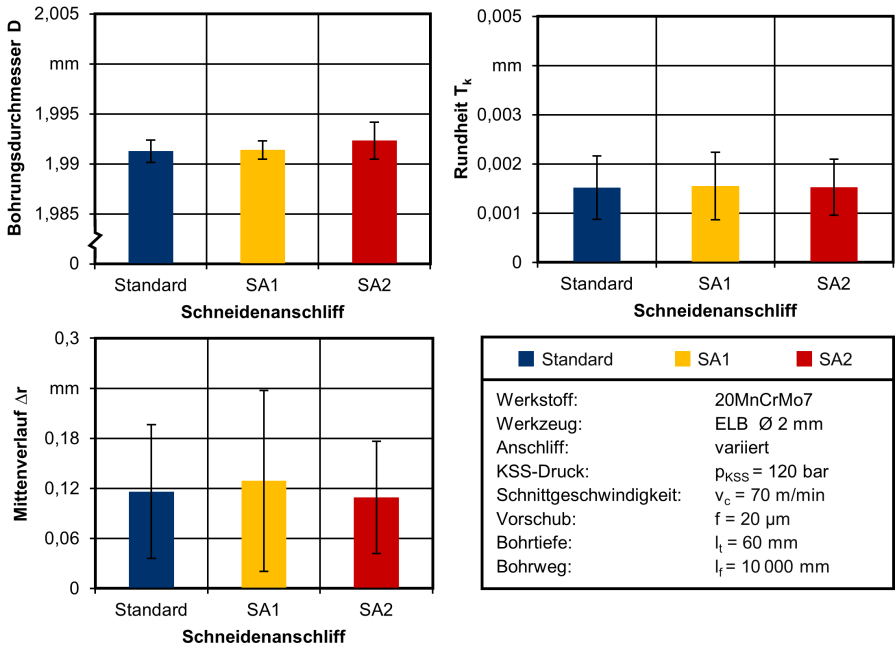


Abbildung 45: Einfluss des Schneidenschliffes auf die Maß- und Formtoleranzen

Im Hinblick auf den Durchmesser des Bohrungsaustritts lassen sich nur geringfügige Differenzen ausmachen, was auf eine einheitliche Umfangsform und einen vergleichbaren Führungsleistenrückversatz zurückzuführen ist. Der Bohrungsdurchmesser nimmt dabei über den Bohrweg aufgrund des abrasiven Werkzeugverschleißes am Übergang zwischen Außenschneide und Rundschliffphase geringfügig ab. Bezüglich der Rundheitsabweichung und des Mittenverlaufs entstehen bei Einsatz des Sonderanschliffs SA1 der größte Mittelwert und die höchste Standardabweichung. Die radiusförmige Außenschneide und die kleine Innenschneide unter einem gleichzeitig kleinen Einstellwinkel von $K_2 = 105^\circ$ führen zu einem stärkeren Ungleichgewicht zwischen den angreifenden Passivkräften an der Außenschneide (F_{PAS}) und Innenschneide (F_{PIS}) sowie an der Rundschliffphase (F_{PRSF}). Infolgedessen kommt es zu einer stärkeren radialen Abdrängung des Bohrkopfes (Abbildung 46). Das Kollektiv der Passivkräfte an der Außen- und Innenschneide sowie an der Rundschliffphase beim Standardanschliff und beim Sonderanschliff SA2 unterscheidet sich durch die abgestimmten Einstellwinkel hingegen nur geringfügig.

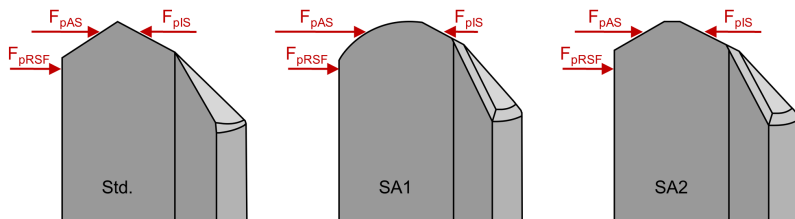


Abbildung 46: Angreifende Passivkräfte in Abhängigkeit des Schneidenschliffes

Des Weiteren wird der Einfluss des Schneidenschliffes auf die Oberflächenqualität betrachtet (**Abbildung 47**). Die höchste gemittelte Rautiefe und den höchsten arithmetischen Mittenrauwert produziert dabei der Sonderanschiff SA1. Gleichzeitig liegt beim Sonderanschiff SA1 die höchste Standardabweichung vor. Die gemittelte Rautiefe und der arithmetische Mittenrauwert beim Standardanschiff und Sonderanschiff SA2 sind hingegen nahezu identisch. Der Verlauf der Kennwerte korreliert mit den Vorschubkräften, wobei eine ähnliche Tendenz in den Schnittkräften zu erwarten ist. Dabei resultiert beim Einlippen-tiefbohren mit asymmetrischem Werkzeugaufbau aus den Schnitt- und Passivkräften eine Radialkraft. Die Radialkraft wird als Normalkraft über die Führungsleisten auf die Bohrungswand übertragen und begünstigt eine Glättung der Rauheitsspitzen. Die Oberflächenkennwerte zeigen durch die abnehmenden Kräfte aufgrund der zunehmenden Aufbauschneidenbildung zunächst eine Verschlechterung bis zu einem Bohrweg von etwa $l_f = 5000$ mm. Der verschleißbedingte Anstieg der Prozesskräfte führt im weiteren Einsatz wieder zu einer verbesserten Oberflächenqualität. Die hohe Oberflächenqualität geht einher mit dem extrem geringen Führungsleistenverschleiß. Insgesamt sind die erzielten Oberflächenkennwerte als sehr gut zu bewerten und vergleichbar mit gehobenen Oberflächen [Klo08].

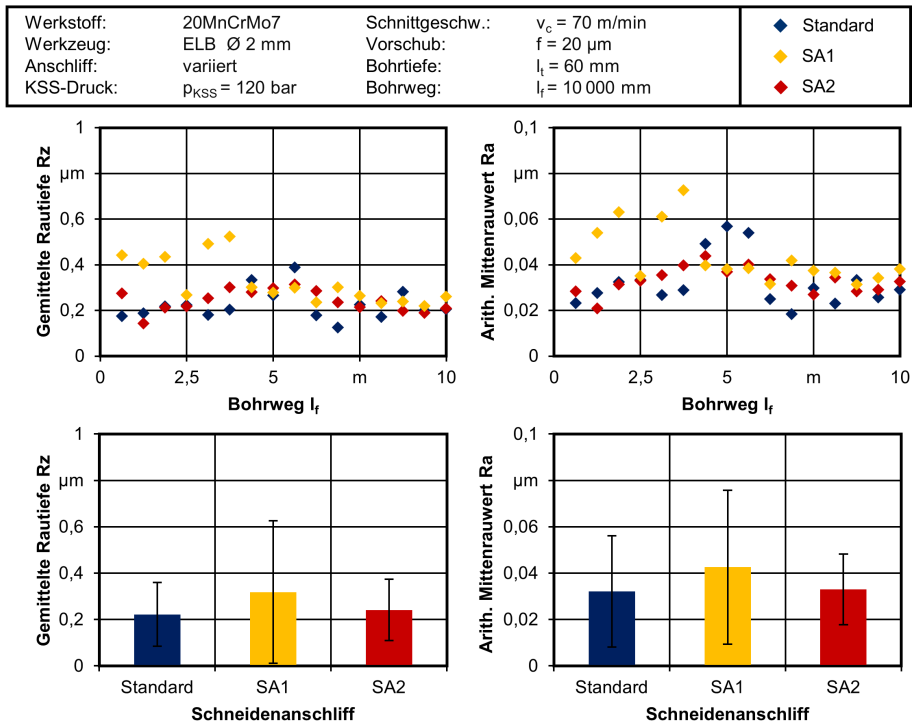


Abbildung 47: Einfluss des Schneidenschliffes auf die Oberflächenqualität

Zusammenfassend liefert der Sonderanschiff SA1 die vergleichsweise schlechtesten Ergebnisse hinsichtlich der Spanbildung und der Bohrungsqualität. Dennoch erzielt der Radiusanschiff SA1 eine ausreichende Prozessstabilität bei hoher Produktivität und ermöglicht die Erzeugung radiusförmiger Bohrungsgründe. Der Sonderanschiff SA2 zeigt ein nahezu identisches Einsatzverhalten verglichen mit dem Standardanschiff. Die dritte Teilschneide begünstigt dabei eine höhere Verschleißbeständigkeit im Bereich der Schneidenmitte.

6.3 Analyse des Einflusses der Werkzeugbeschichtung

Die folgenden Untersuchungen zur Analyse des Einflusses der Werkzeugbeschichtung leiten sich aus der zentralen Erkenntnis einer signifikanten Veränderung der Eingriffsbedingungen beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7 über den Bohrweg durch eine Aufbauschneidenbildung ab (siehe Kapitel 6.2). Zur Reduzierung der Aufbauschneidenbildung sehen die anschließenden Versuche eine Variation der Beschichtungszusammensetzung und der Schichtdicke vor. Im Rahmen dessen werden Einlippentiefbohrer mit Standardanschliff mit drei alternativen Bohrkopfbeschichtungen versehen. Neben der Standardschicht auf AlTiN-Basis kommen die Schichtzusammensetzungen AlTiN-TiSiN, AlTiN-TiN und TiN zum Einsatz. Außerdem wird die Schichtzusammensetzung AlTiN-TiSiN mit einer standardmäßig applizierten Schichtdicke von $s_d = 0,61 \mu\text{m}$ sowie auch mit einer vergrößerten Schichtdicke von $s_d = 2,73 \mu\text{m}$ abgeschieden, um den Einfluss der Schichtdicke zu analysieren. Alle Versuche erfolgen unter konstanten Prozessrandbedingungen mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70 \text{ m/min}$ und einem Vorschub $f = 20 \mu\text{m}$. Mit Ausnahme der Werkzeugbeschichtung TiN wird für alle Einlippentiefbohrer der festgelegte Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ erreicht. Beim TiN-beschichteten Einlippentiefbohrer ist das Standzeitende aufgrund eines Werkzeugbruches nach $L_f = 9360 \text{ mm}$ erreicht. In **Abbildung 48** sind die Mittelwerte und Entwicklungen der Vorschubkräfte und Bohrmomente für die fünf unterschiedlichen Werkzeugbeschichtungen gegenübergestellt.

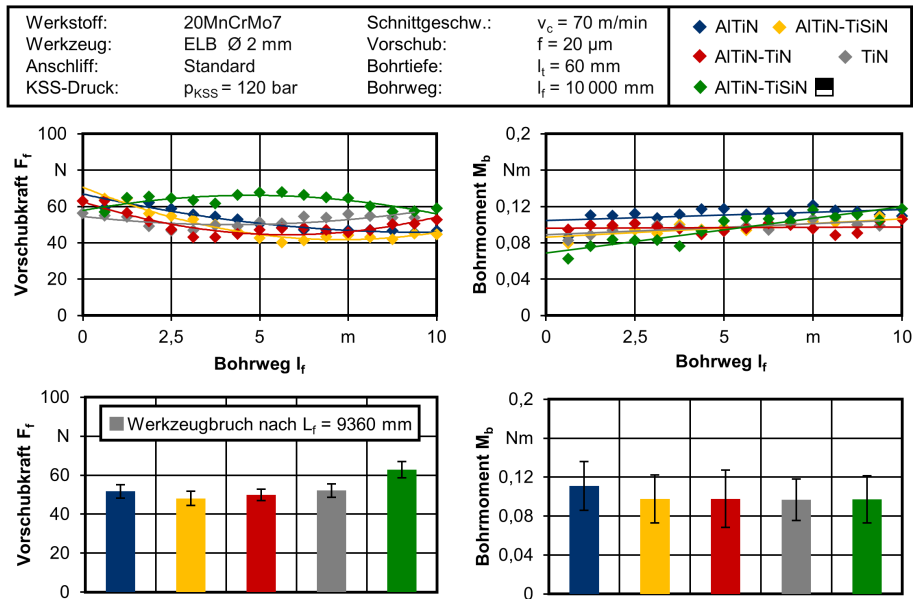


Abbildung 48: Mechanische Werkzeugbelastungen unter Variation der Werkzeugbeschichtung

Die Gegenüberstellung der Werkzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungszusammensetzungen zeigt lediglich geringe Unterschiede in den Vorschubkräften. Deutlich ist dagegen die Differenz zwischen den AlTiN-TiSiN-Schichten mit unterschiedlicher Schichtdicke, wobei die AlTiN-TiSiN-Schicht mit vergrößerter Schichtdicke einen deutlich größeren Mittelwert aufweist. Zudem weicht die Entwicklung der Vorschubkraft über den Bohrweg deutlich von den Verläufen der standardmäßig applizierten Dünnschichten mit geringerer Schichtdicke ab. Die Vorschubkraft der AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer ver-

größerten Schichtdicke von $s_d = 2,73 \mu\text{m}$ steigt bis zu einem Bohrweg von $l_f = 5400 \text{ mm}$ an und fällt erst im weiteren Verlauf der Verwendung wieder ab. Bei Einsatz des Einlippentiefbohrers mit TiN-Schicht ist hingegen ein stärkerer Anstieg der Vorschubkraft nach einem Bohrweg von $l_f = 5000 \text{ mm}$ im Vergleich zu den restlichen Dünnsschichten zu beobachten. Die Mittelwerte der gemessenen Bohrmomente zeigen aufgrund des einheitlichen Schneidenschliffes keine größeren Differenzen. Das leicht erhöhte Bohrmoment bei Verwendung der AlTiN-Referenzschicht lässt auf einen höheren Reibwert schließen. Der Verlauf der Vorschubkräfte geht unmittelbar mit der Spanformung einher. In **Abbildung 49** sind die Spanformen, gesammelt nach einem Bohrweg von $l_f = 1,25; 2,5; 5; 7,5$ und 10 m für die unterschiedlichen Werkzeugbeschichtungen gegenübergestellt.

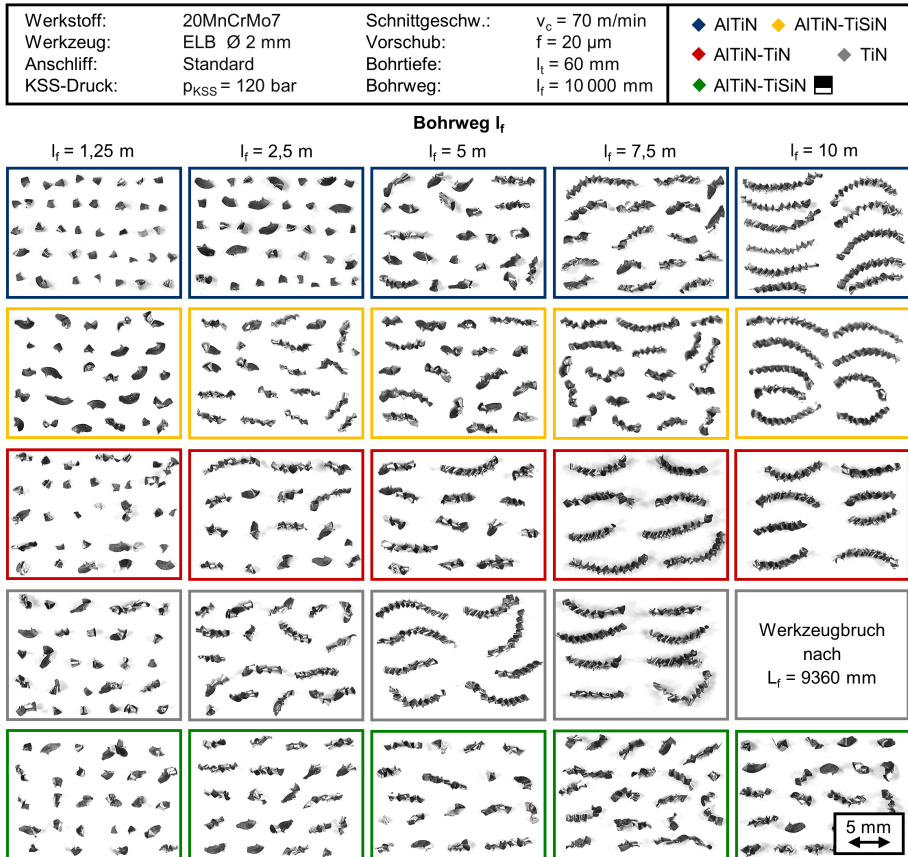


Abbildung 49: Einfluss der Beschichtungszusammensetzung und Schichtdicke auf die Spanformung

Bei allen Werkzeugbeschichtungen lässt sich eine Veränderung der Spanformung über den Bohrweg feststellen. Dabei fallen zunächst vorrangig kurz gebrochene Bröckelspäne in einer Länge von $l_{sp} = 0,7 \dots 1,1 \text{ mm}$ an, die nach kurzer Einsatzzeit in eine Ausbildung von gekrümmten Faltspänen übergehen. Im weiteren Einsatz kommt es zur Produktion von langen, zieharmonika-förmigen Spänen. Diese Entwicklung tritt bei den Schichten AITiN-TiN und TiN am schnellsten ein und führt zu einer eingeschränkten Prozessstabilität. Das vorzeitige Standzeitende der TiN-Schicht ist folglich auf ein

Verkleben der ungünstigen Spanformen zwischen Werkzeugsicke und Bohrungswand zurückzuführen. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm produzieren schließlich alle Dünnschichten mit geringerer Schichtdicke lange, ziehharmonika-förmige Späne. Eine Ausnahme bildet die AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer größeren Schichtdicke von $s_d = 2,73$ μm , bei der nach gleichem Bohrweg überwiegend stark verformte Faltspäne vorliegen. Die zeitliche Veränderung der Spanformung deckt sich mit den Verläufen der gemessenen Spandicke bzw. Spandickenstauchung (**Abbildung 50**). Zur statistischen Absicherung werden jeweils drei Späne an 15 verschiedenen Positionen der präparierten Querschliffe senkrecht zur Ablaufrichtung vermessen. Durch die Vermessung der Spandicke im Bereich der Schneidenspitze basiert die Angabe der Spandickenstauchung auf einer Spandicke von $h = f = 20$ μm .

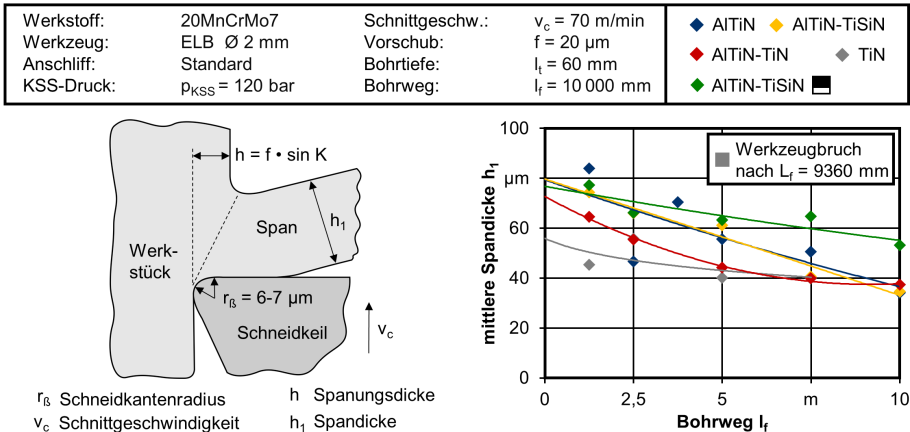



Abbildung 50: Resultierende Spandicken über den Bohrweg in Abhängigkeit der Werkzeugbeschichtung

Die Verläufe der gemessenen Spandicken der Werkzeugbeschichtungen AlTiN und AlTiN-TiSiN zeigen nur geringe Abweichungen. Die Spandickenstauchung der zu Prozessbeginn erzeugten Späne betrug $\lambda_s = 4,2$ bei Applikation der AlTiN-Schicht sowie $\lambda_s = 3,7$ bei Verwendung der AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer Schichtdicke von $s_d = 0,61$ μm . Im Vergleich dazu sind die Verläufe der gemessenen Spandicken der AlTiN-TiN und TiN-Beschichtungen bis zu einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm wesentlich flacher. Die deutlich geringeren Spandickenstauchungen der nach einem Bohrweg von $l_f = 1250$ mm gesammelten Späne von $\lambda_s = 3,2$ (AlTiN-TiN) bzw. $\lambda_s = 2,3$ (TiN) sind Ursache für die frühzeitige Veränderung in der Spanformung. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm liegt die Spandickenstauchung aller standardmäßig applizierten Dünnschichten schließlich unterhalb von $\lambda_s = 2,0$. Die geringste Abnahme in der Spandickenstauchung von zu Prozessbeginn $\lambda_s = 3,9$ auf $\lambda_s = 2,7$ nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm zeigt schließlich die AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer größeren Schichtdicke von $s_d = 2,73$ μm . Aufgrund des höheren Niveaus in der Spandickenstauchung über den gesamten Bohrweg wird die Produktion von langen, ziehharmonika-förmigen Spänen verhindert.

Zur Visualisierung des Einflusses der Schichtdicke auf die Spanformung werden zusätzlich entsprechende Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen durchgeführt. Der Verschleißzustand der Einlippentiefbohrer mit einer AlTiN-TiSiN-Schicht sowie unterschiedlicher Schichtdicke von $s_d = 0,61$ μm bzw. $s_d = 2,73$ μm wird im Vorfeld in Einsatzversuchen über einen Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm in Vollmaterial unter einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 120$ bar generiert. **Abbildung 51** zeigt die Bildsequenzen der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen unter Variation der Schichtdicke.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	$f = 20 \text{ µm}$	
Anschliff:	Standard	Bildrate:	10 000 fps	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 40 \text{ bar}$	Vergrößerung:	30-fach	

AlTiN-TiSiN ($s_d = 0,61 \text{ µm}$) nach $l_f = 10\,000 \text{ mm}$

AlTiN-TiSiN ($s_d = 2,73 \text{ µm}$) nach $l_f = 10\,000 \text{ mm}$

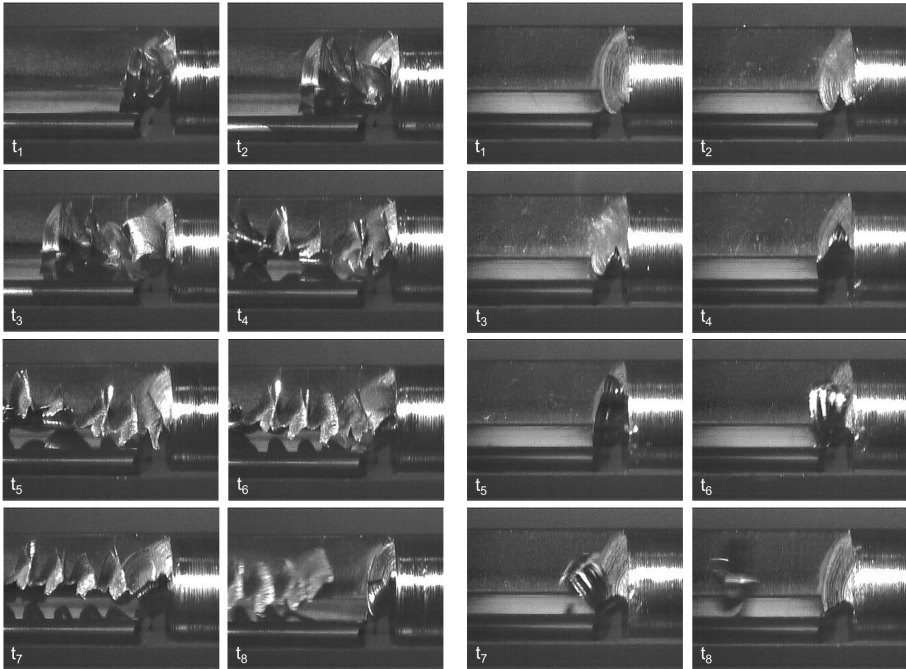


Abbildung 51: Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zur Analyse des Einflusses der Schichtdicke

Die In-Situ-Spanbildungsanalysen veranschaulichen den gravierenden, verschleißbedingten Unterschied in der Spanformung. Bei Applikation der AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer im Werkzeugneuzustand geringeren Schichtdicke von $s_d = 0,61 \text{ µm}$ entstehen zunächst einige Wendelungen. Anschließend geht der Span in eine aufgefaltete Ziehharmonika-Form über. Die Späne bilden sich in einer Länge von bis zu $l_{sp} = 10,1 \text{ mm}$ aus, bevor die Spantrennung im Bereich einer Faltstelle erfolgt. Durch die höhere Spandickenstauchung bei der AlTiN-TiSiN-Schicht mit einer vergrößerten Schichtdicke von $s_d = 2,73 \text{ µm}$ besitzen die Späne eine höhere Neigung zum Spanbruch und brechen deutlich früher. In den gezeigten Bildsequenzen kommt es zur Ausbildung eines kurzen, gekrümmten Faltspons, der auch in den Einsatzversuchen unter Verwendung der AlTiN-TiSiN-Schicht mit größerer Schichtdicke nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ in einer größeren Häufigkeit vorlag. Der Span krümmt sich zunächst in Richtung Sickenrücken, rollt sich ein und bricht schließlich beim Anlaufen an den Bohrungsgrund oder die Bohrungswand. Die geringere Spanlänge und der störungsfreiere Abtransport entlang der Werkzeugsicke gewähren eine höhere Prozesssicherheit. Die resultierende Spanformung des Einlippentiefbohrers mit AlTiN-TiSiN-Schicht und größerer Schichtdicke von $s_d = 2,73 \text{ µm}$ nach diesem Bohrweg ist dabei vergleichbar mit der Spanformung des Einlippentiefbohrers mit geringerer Schichtdicke von $s_d = 0,61 \text{ µm}$ nach einem deutlich kürzeren Bohrweg von $l_f = 2,5 \dots 5 \text{ m}$ (vgl. Abbildung 49).

Die Entwicklungen der mechanischen Werkzeugbelastungen und der Spanbildung korrelieren mit dem Verschleißverhalten der beschichteten Einlippentiefbohrer. In **Abbildung 52** ist der Werkzeugverschleiß anhand von rasterelektronenmikroskopischen Verschleißanalysen an der Außen- und Innenschneide und den Führungsleisten für die unterschiedlichen Werkzeugbeschichtungen gegenübergestellt. Zur genaueren Auswertung der Aufbauschneidenbildung im Bereich der Schneidkanten wird zudem die konfokale Weißlichtmikroskopie versuchsbegleitend eingesetzt und entsprechende Aufnahmen angefügt. Aufgrund des vorzeitigen Werkzeugbruches des TiN-beschichteten Einlippentiefbohrers sind für diese Werkzeugbeschichtung prozessbegleitende Analysen nach einen Bohrweg von $l_f = 5000$ mm dargestellt.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70$ m/min	EDX-Analyse		
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2$ mm	Vorschub:	$f = 20$ μ m	■ W	■ Fe	■ Al/Ti
Anschluss:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 60$ mm			
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar	Bohrweg:	variiert			
				$l_f = 5$ m	$l_f = 10$ m	

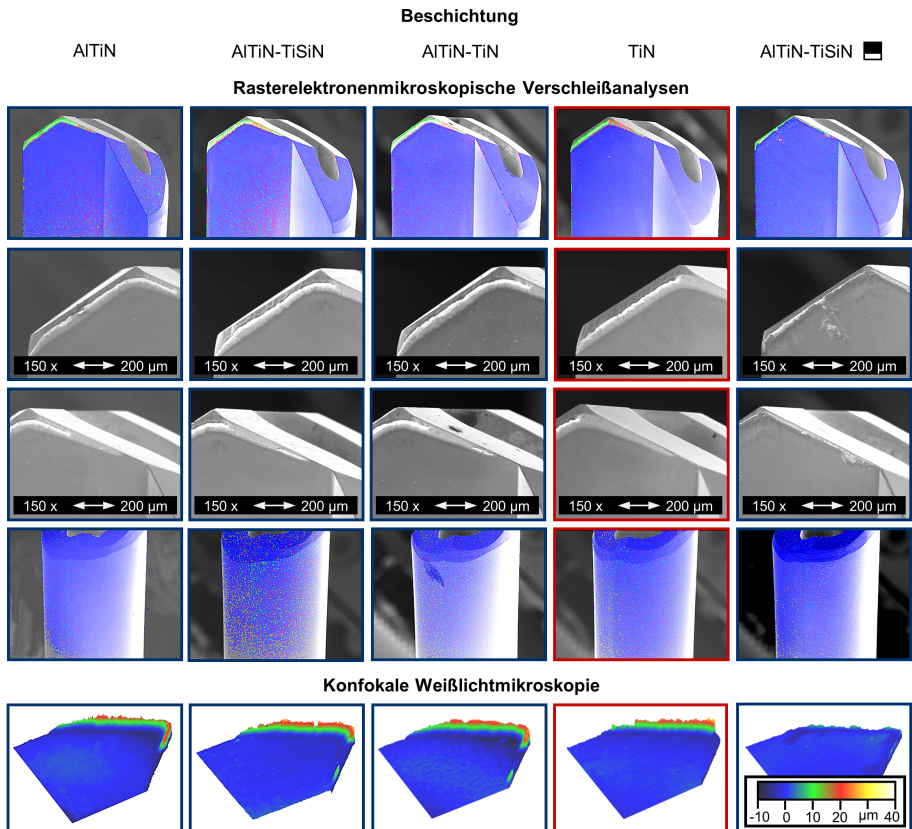


Abbildung 52: Einfluss der Beschichtungszusammensetzung und der Schichtdicke auf den Werkzeugverschleiß

An der Außen- und Innenschneide zeigt sich bei allen Einlippentiefbohrern unabhängig von der Werkzeugbeschichtung ein abrasiver und adhäsiver Werkzeugverschleiß. Die Schneidspitzen und Schneidenecken der mit einer standardmäßig applizierten Dünnschicht beschichteten Einlippentiefbohrer sind dabei verrundet. Darüber hinaus ist in den rasterelektronenmikroskopischen Detailaufnahmen der

Außen- und Innenschneide und in den konfokalen Weißlichtaufnahmen bei allen standardmäßig applizierten Dünnschichten eine Aufbauschneidenbildung mit einer gemittelten Höhe von $h_a = 25 \dots 26 \mu\text{m}$ erkennbar. Bei Einsatz des Einlippentiefbohrers mit TiN-Schicht liegt bereits nach einem Bohrweg von $l_f = 5000 \text{ mm}$ ein starker abrasiver Verschleiß an der Außen- und Innenschneide sowie eine prägnante Aufbauschneidenbildung vor. Dagegen gewährt eine höhere Schichtdicke dem Einlippentiefbohrer mit AlTiN-TiSiN-Schicht eine höhere Verschleißbeständigkeit über den Bohrweg, wodurch die Schneidkanten, Schneidenspitze und Schneidenecke einen deutlich geringeren abrasiven und adhäsiven Verschleiß aufweisen. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ beträgt die gemittelte Höhe der Aufbauschneide lediglich $h_a = 13 \mu\text{m}$ und somit etwa die Hälfte im Vergleich zur Verwendung einer standardmäßig applizierten Dünnschicht. Die reduzierte Aufbauschneidenbildung begünstigt eine prozessgünstige Spanform über den gesamten Einsatz und liefert die Erklärung für den abweichenden Verlauf und den höheren Mittelwert der Vorschubkraft. Die Schichtabplatzungen auf der Spanfläche des Einlippentiefbohrers mit größerer Schichtdicke sind Folge des zweistufigen PVD-Beschichtungsprozesses. Auf eine standardmäßig applizierte Dünnschicht wurde zur Einstellung der dickeren Schicht eine weitere Lage abgeschieden. Infolge der Mehrlagigkeit liegt schließlich eine verringerte Schichthaftung vor. Ein axialer oder radialer Führungsleistenverschleiß ist bei keiner Werkzeugbeschichtung zu detektieren. Zur weiteren Bewertung der Verschleißbeständigkeit der unterschiedlichen Werkzeugbeschichtungen wird der Freiflächenverschleiß in regelmäßigen Abständen dokumentiert (**Abbildung 53**).

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	◆ AlTiN	◆ AlTiN-TiSiN
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	◆ AlTiN-TiN	◆ TiN
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 60 \text{ mm}$	◆ TiN	◆ TiN
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	◆ AlTiN-TiSiN	■

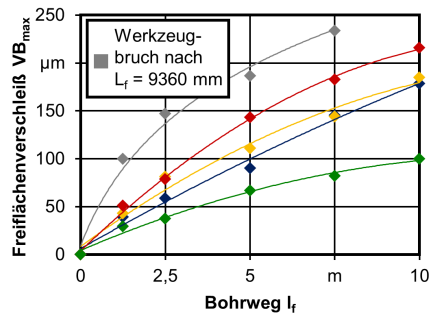
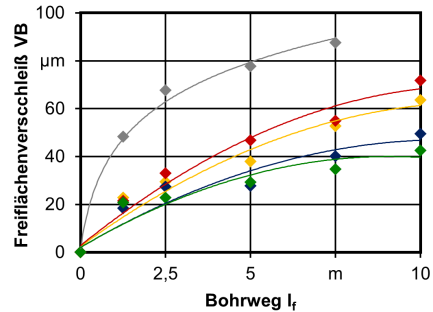
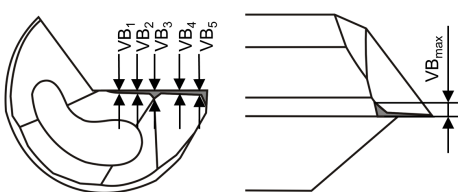
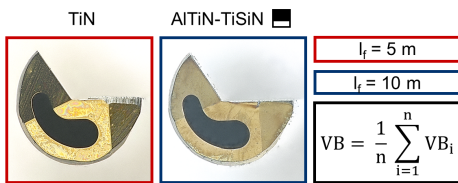
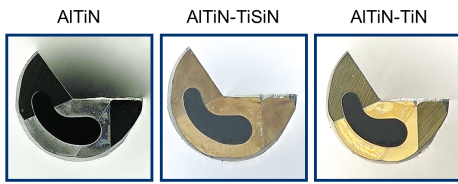


Abbildung 53: Einfluss der Beschichtungszusammensetzung und der Schichtdicke auf den Freiflächenverschleiß

Die gemessenen Verläufe der gemittelten und maximalen Verschleißmarkenbreite decken sich mit den Entwicklungen der mechanischen Werkzeugbelastungen über den Bohrweg in Abbildung 48. Der starke Freiflächenverschleiß und die zunehmende Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück erklären den markanten Anstieg in der Vorschubkraft der TiN-Schicht nach einem Bohrweg von $l_f = 2500$ mm. Ebenso lassen die Messungen der gemittelten und maximalen Verschleißmarkenbreite der AlTiN-, AlTiN-TiSiN- und AlTiN-TiN-Schichten auf die größere Zunahme in der Vorschubkraft der AlTiN-TiN-Schicht nach einem Bohrweg von $l_f = 8750$ mm rückschließen. Eine Erklärung für den höheren Freiflächenverschleiß der AlTiN-TiSiN-Schicht ($s_d = 0,61 \mu\text{m}$) gegenüber der Referenzschicht auf AlTiN-Basis ($s_d = 0,89 \mu\text{m}$) trotz höherer Schichthärte liefert die geringere Schichtdicke. Zudem stellten *Biermann et al.* in ihren Untersuchungen zum Einlippentiefbohren mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 5,0$ mm ebenfalls Vorteile im Verschleißschutz der AlTiN-Schicht verglichen mit der AlTiN-TiSiN-Schicht fest. Bei Verwendung einer AlTiN-TiSiN-Schicht waren beim Einlippentiefbohren des Vergütungsstahls 42CrMo4 mit einem reduzierten Schwefelgehalt nach einem Bohrweg von $l_f = 6000$ mm ein Ausbruch an der Schneidenecke, Beschichtungsabrieb im Bereich des Führungsleisteneinlaufes und -auslaufes sowie ein Anlaufen der Führungsleiste festzustellen. Der Einlipp Bohrer mit AlTiN-Schicht wies hingegen lediglich geringe Materialanhaftungen an der Schneidenecke auf [Bie13]. Die höhere Schichtdicke der AlTiN-TiSiN-Schicht ($s_d = 2,73 \mu\text{m}$) erhöht neben der Verschleißbeständigkeit der Spanfläche, die eine Reduzierung der Aufbauschneidenbildung begünstigt, auch die Verschleißbeständigkeit der Freiflächen und der Rundschliffase. Das günstigere Verschleißverhalten wird durch die geringste mittlere und maximale Verschleißmarkenbreite bestätigt. Die Verschleißbeständigkeit und der sich einstellende Werkzeugverschleiß beeinflussen unmittelbar die Bohrungsqualität. Diesbezüglich stellt **Abbildung 54** die erfassten Maß- und Formtoleranzen der beschichteten Einlippentiefbohrer gegenüber.

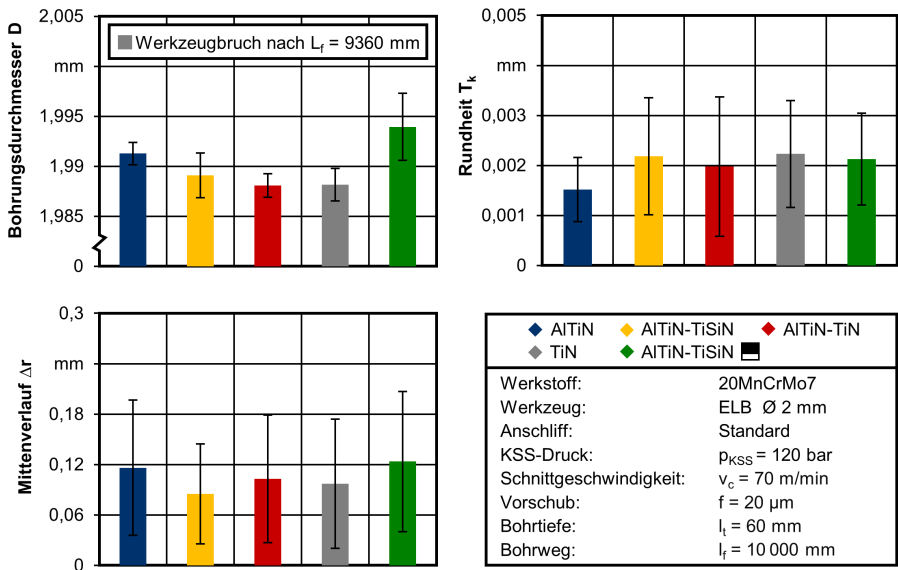


Abbildung 54: Maß- und Formtoleranzen in Abhängigkeit der Beschichtungszusammensetzung und Schichtdicke

Die Bohrungsdurchmesser auf der Austrittsseite korrelieren mit dem Verschleiß im Bereich der Schneidenecke bzw. der maximalen Verschleißmarkenbreite gemessen am Übergang von der Außenschneide zur Rundschliffase. Die geringste Abweichung vom Nenndurchmesser erzeugt die AlTiN-

TiSiN-Schicht mit der größeren Schichtdicke und der geringsten Verrundung der Schneidenecke. Die standardmäßig applizierten Dünnschichten resultieren schließlich in kleineren Bohrungsdurchmessern. Die geringste Rundheitsabweichung bei Einsatz der AlTiN-Schicht lässt ebenso wie das erhöhte Bohrmoment auf einen höheren Reibwert und ein dadurch verbessertes Stabilitätsverhalten der schwingungsanfälligen Werkzeuge mit großem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis schließen. Im Hinblick auf den Mittenverlauf ergeben sich trotz des einheitlichen Schneidenschliffes Unterschiede zwischen den Werkzeugbeschichtungen, bedingt durch die Unterschiede in der Entwicklung der mechanischen Werkzeugbelastungen und der Spanbildung über den Bohrweg. Des Weiteren ist der Einfluss der Werkzeugbeschichtung auf die Oberflächenqualität in **Abbildung 55** dargestellt.

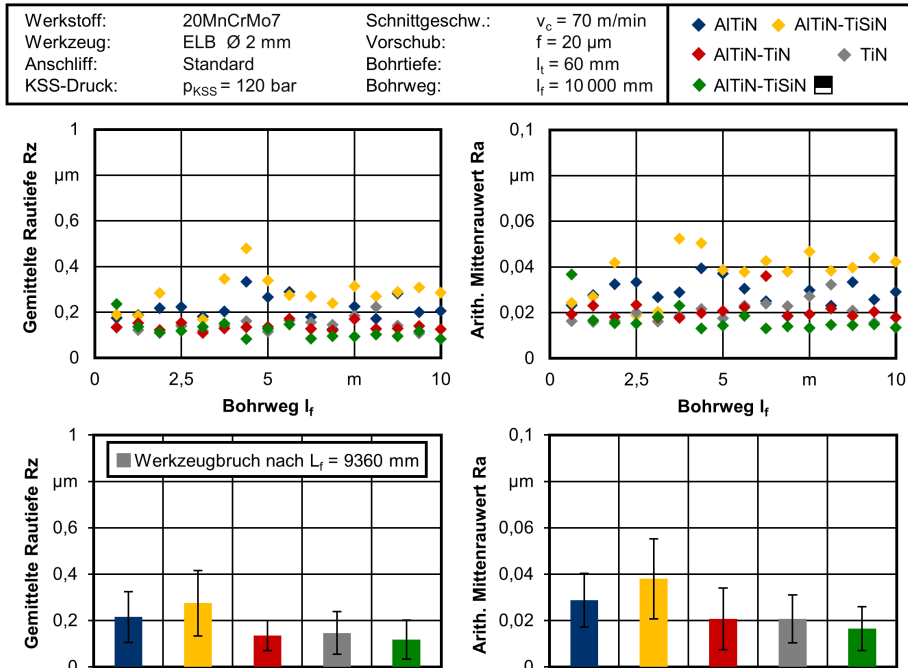


Abbildung 55: Oberflächenqualität in Abhängigkeit der Beschichtungszusammensetzung und Schichtdicke

Die, im Verhältnis gesehen, schlechteste Oberflächenqualität bei Einsatz der AlTiN-TiSiN-Schicht mit geringerer Schichtdicke ist auf die geringsten Prozesskräfte und den im Vergleich zur AlTiN-Schicht höheren Verschleiß der Schneidenecke zurückzuführen. Auffällig sind die hohen erzielten Oberflächenqualitäten bei Verwendung der Werkzeugbeschichtungen auf TiN-Basis. Eine Erklärung dafür liefert das günstige Reibverhalten dieser Schichtzusammensetzung. Untersuchungen von *Aihua et al.* zu Reib- und Verschleißigenschaften unterschiedlicher PVD-Beschichtungen auf Stickstoffbasis bestätigen die Vorteile im Reibverhalten von TiN-Schichten gegenüber TiAlN-, AlTiN- und CrAlN-Schichten [Aih12]. Die geringste gemittelte Rautiefe und der kleinste arithmetische Mittenrauwert ergeben sich bei Einsatz der AlTiN-TiSiN-Schicht mit vergrößerter Schichtdicke aufgrund der größeren Prozesskräfte. Folglich liegen höhere Radialkräfte vor, die als Führungsleistennormalkräfte auf die Bohrungswand übertragen werden und eine bessere Einebnung der Rauheitsspitzen zur Folge haben. Zudem begünstigt die Applikation einer vergrößerten Schichtdicke einen reduzierten Verschleiß an der Rundschliffase.

6.4 Analyse des Kühlschmierstoffeinflusses

Bei kaum einem anderen spanenden Bearbeitungsverfahren besitzt der Kühlschmierstoff eine größere Bedeutung als beim Tiefbohren. Der Kühlschmierstoff sorgt für die Kühlung, Schmierung und den Späneabtransport und beeinflusst somit maßgeblich die Produktivität und Prozessstabilität [Sch06, Zwi74]. Die Wahl des Basisöls und der Ölzusätze bzw. Additive gilt es, dabei optimal an die Bearbeitungsaufgabe anzupassen. Im Rahmen der Untersuchungen zum Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 wird der Einsatz eines mineralöl- und eines esterbasierten Schneidöls überprüft. Das verwendete paraffinische Mineralöl ist ein universell für alle Materialien einsetzbares Schneidöl und enthält Hochleistungsadditive in Form eines inaktiv gekapselten Schwefels, die erst bei Überschreiten der Reaktionstemperatur in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück ihre Wirkung entfalten. Dagegen ist das synthetische Esteröl aktiv mit fünf Volumenprozent Schwefel additiviert. Zur Realisierung der Untersuchungen zum Tiefbohren unter Esteröl wird ein externer Kühlkreislauf installiert. Die kinematische Viskosität beider Tiefbohröle beträgt $\nu = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$. Die Versuche erfolgen unter gleichbleibenden Randbedingungen, sodass konstante Schnittdaten von $v_c = 70 \text{ m/min}$ und $f = 20 \text{ }\mu\text{m}$ sowie ein konstanter Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 120 \text{ bar}$ eingestellt werden. Die eingesetzten Einlippenbohrer sind durch einen Standardanschluß und die Referenzbeschichtung AlTiN gekennzeichnet. **Abbildung 56** zeigt die mechanischen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> Mineralöl </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> Esteröl </div>
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	$f = 20 \text{ }\mu\text{m}$	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_l = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10000 \text{ mm}$	

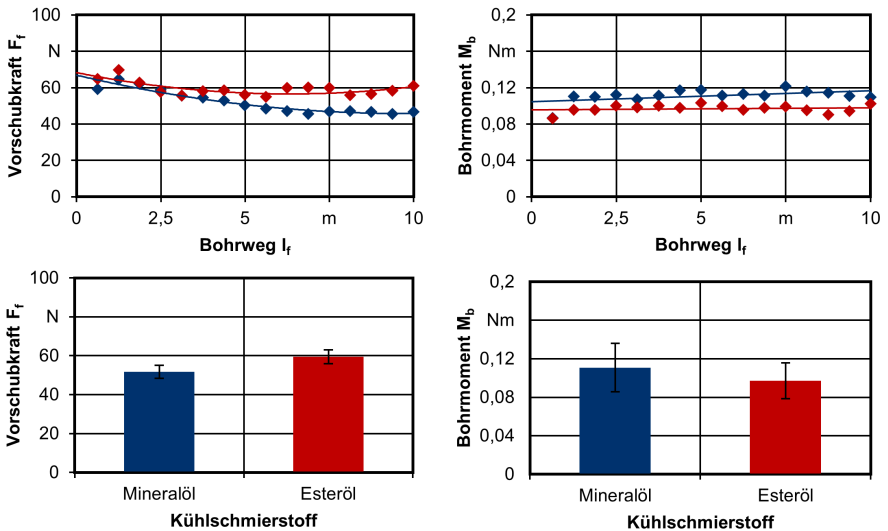


Abbildung 56: Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die mechanischen Werkzeugbelastungen beim Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7

Bei Betrachtung des Einflusses des Kühlschmierstoffes auf die Vorschubkraft sind dabei bis zu einem Bohrweg von $l_f = 2500 \text{ mm}$ nur geringe Unterschiede festzustellen. Über den folgenden Bohrweg fällt die Vorschubkraft beim Esteröl jedoch deutlich weniger ab und die Verläufe divergieren. Unter Verwendung

des Esteröls resultiert somit insgesamt eine höhere mittlere Vorschubkraft. Demgegenüber steht ein kontinuierlich geringeres Bohrmoment infolge des verbesserten Schmier- und Reibverhaltens zwischen Werkzeug und Bohrungswand. Die hervorragende Schmierwirkung beruht dabei auf der hohen Polarität des Esteröls [Fre09, Mec13]. Die Ursache für die abweichende Entwicklung in den Vorschubkräften liefert die Analyse der Spanbildung. Zu diesem Zweck sind in **Abbildung 57** die Spanformen beim Einlippentiefbohren unter Mineral- und Esteröl für unterschiedliche Bohrwege gegenübergestellt.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> ■ Mineralöl ■ Esteröl </div>
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_t = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	

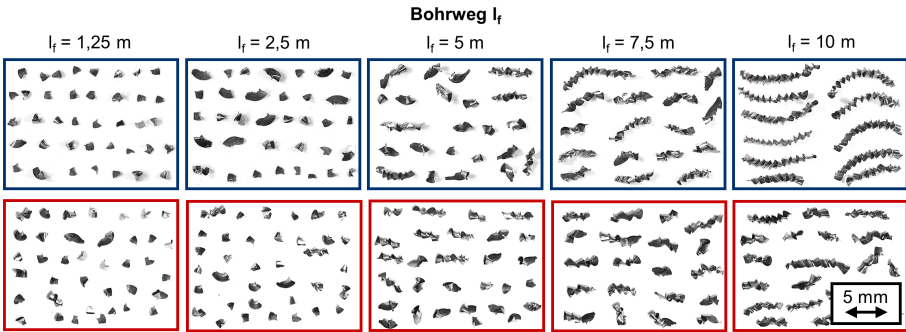


Abbildung 57: Spanbildung in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Bis zu einem Bohrweg von $l_f = 2500 \text{ mm}$ fallen unter Verwendung beider Tiefbohrerle überwiegend kurze Bröckelspäne und vereinzelt gekrümmte Faltspäne an. Im weiteren Einsatz liegt beim Einlippentiefbohren unter Mineralöl eine starke Tendenz zur Ausbildung von ziehharmonika-förmigen Spänen vor. Dagegen sind die erzeugten Späne beim Einlippentiefbohren unter Esteröl unregelmäßig geformt und liegen nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ in kürzerer Spanlänge als beim Mineralöl vor. Die Beobachtungen in der Spanformung sind konform mit den Messungen der Spandicken bzw. der Spandickenstauchung über den Bohrweg (**Abbildung 58**).

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> ■ Mineralöl ■ Esteröl </div>
Werkzeug:	ELB Ø 2 mm	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_t = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	

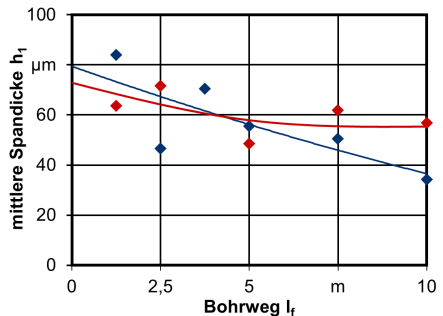
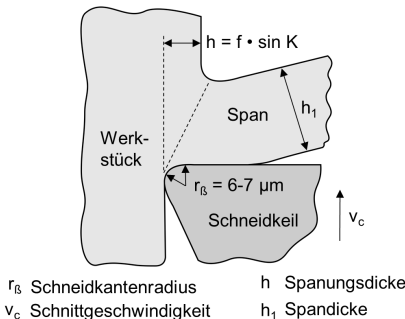


Abbildung 58: Resultierende Spandicken über den Bohrweg in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Zu Prozessbeginn liegen die angenäherten Verläufe der erfassten Spandicken für das Mineral- und Esteröl dicht beieinander. Diese Tendenz ändert sich schließlich nach einem Bohrweg von $l_f = 5000$ mm, und die Verläufe der Spandicken divergieren. Im Folgenden führt das Einlippentiefbohren unter Esteröl zu größeren Spandicken. Die Unterschiede in der Spanformung nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm gehen einher mit dem Verhältnis der vorliegenden Spandickenstauchung von $\lambda_s = 1,7$ bei Einsatz des Mineralöls bzw. $\lambda_s = 2,8$ bei Einsatz des Esteröls. Die festgestellten Unterschiede in der Spanbildung basieren wiederum auf dem vom gewählten Tiefbohröl abhängigen Werkzeugverschleiß. **Abbildung 59** fasst rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, energiedispersive Röntgenspektroskopien und konfokale Weißlichtanalysen für beide Tiefbohröle zusammen.

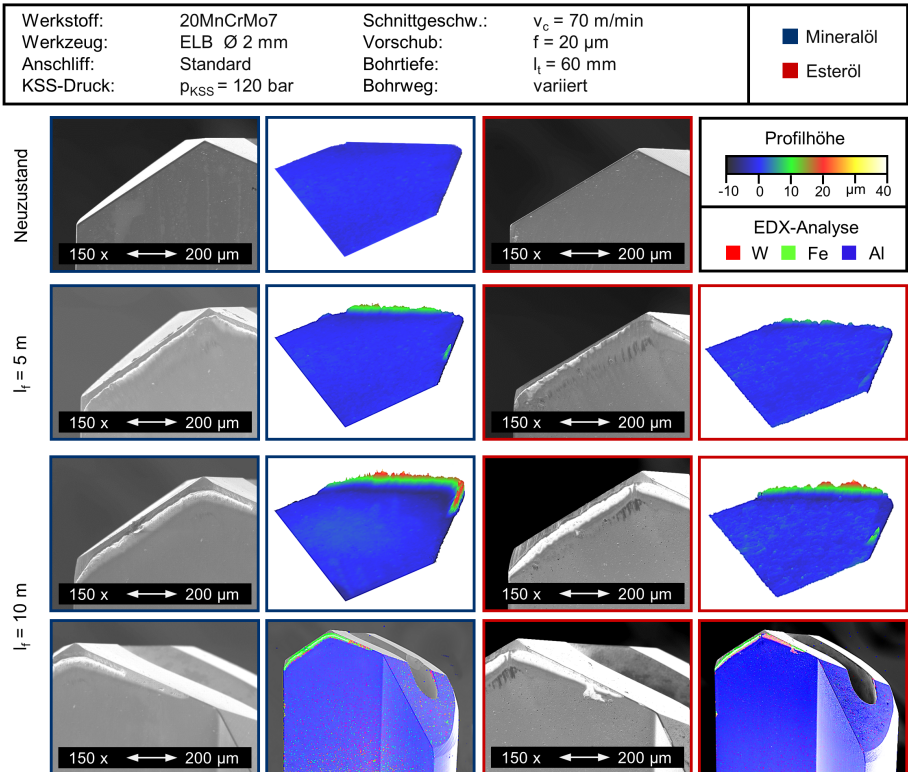


Abbildung 59: Werkzeugverschleiß bei Verwendung eines Mineral- und Esteröls

In der Gegenüberstellung zeigt sich unabhängig von der Auswahl des Tiefbohröls ein abrasiver Materialabtrag an der Schneidenspitze, Schneidenecke und an den Schneidkanten. Das Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Aufbauschneidenbildung. In den Bereichen vor der Schneidkante, in denen die AlTiN-Dünnschicht abrasiv abgetragen wurde, tritt beim Einlippentiefbohren unter Verwendung des Esteröls infolge des hervorragenden Schmiervermögens eine verringerte Aufbauschneidenbildung ein. An der Innenschneide sind weite Teile der entschichteten Bereiche auf der Spanfläche sogar gänzlich frei von adhäsiven Materialanhaftungen. Die Höhe der gemittelten Aufbauschneide, gemessen entlang der Außenschneide, nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm beträgt beim synthetischen Esteröl $h_a = 21$ µm gegenüber dem Mineralöl mit $h_a = 26$ µm. Die Reduzierung der Aufbauschneidenbildung wirkt der

fortschreitenden Veränderung der Eingriffsbedingungen entgegen. Zum Ende der Versuche liegt beim Einlippentiefbohren mit synthetischem Ester ein geringerer gemittelter effektiver Spanwinkel von $\gamma_{\text{eff}} = 26^\circ$ im Vergleich zum paraffinischen Mineralöl mit $\gamma_{\text{eff}} = 28^\circ$ vor, was die Ausbildung kürzerer Späne begünstigt. Die überlegene Schmierwirkung, basierend auf der polaren chemischen Struktur des Esteröls, zeigt sich auch in der Auswertung des Freiflächenverschleißes (**Abbildung 60**). Die Kurven der gemessenen mittleren wie auch der maximalen Verschleißmarkenbreite beim Einlippentiefbohren unter synthetischem Esteröl verlaufen dabei unterhalb der Charakteristik des paraffinischen Mineralöls, wengleich die Differenzen gering sind.

Werkstoff:	20MnCrMo7	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> Mineralöl </div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px; margin-top: 5px;"></div> Esteröl
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 60 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{\text{KSS}} = 120 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	

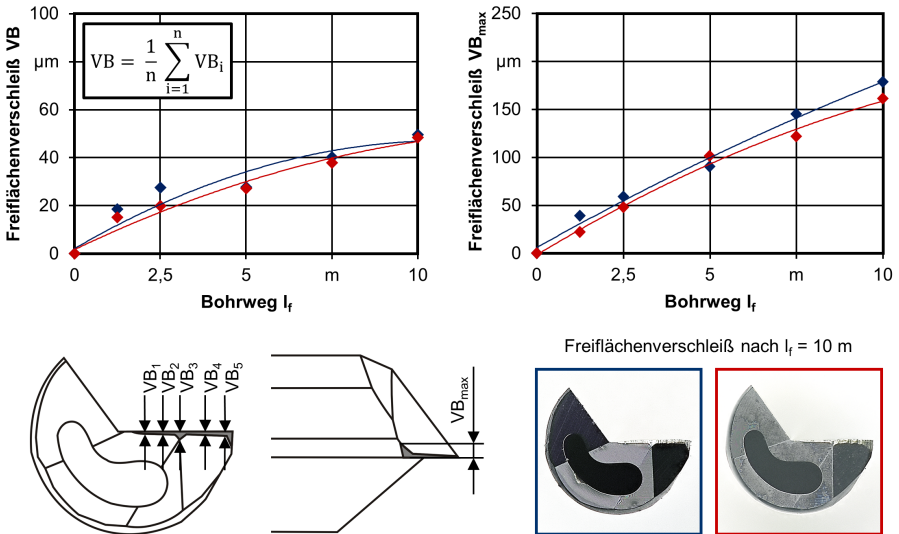


Abbildung 60: Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Darüber hinaus wird der Kühlschmierstoffeinfluss auf die Bohrungsqualität analysiert. Die Diagramme in **Abbildung 61** stellen die erzielten Maß- und Formgenauigkeiten und die Oberflächengüte für das Einlippentiefbohren unter Mineral- und Esteröl gegenüber. Infolge der geringfügig höheren maximalen Verschleißmarkenbreite im Bereich der Schneidenecke entsteht unter Verwendung des Mineralöls ein etwas kleinerer mittlerer Bohrungsdurchmesser auf der Austrittsseite. Bezüglich der Bohrungsrundheit und dem Mittenverlauf bedingt das Esteröl größere Formabweichungen, was auf die höheren Prozesskräfte zurückzuführen ist. Diesbezüglich wird von einer korrelierenden Entwicklung der Vorschub- und Schnittkräfte über den Bohrweg ausgegangen (vgl. Abbildung 56). Die angreifenden Radialkräfte führen beim Esteröl zu einer stärkeren Abdrängung des Bohrkopfes. Im Hinblick auf die Oberflächenqualität erlauben die Messungen des arithmetischen Mittenrauwertes beim Einlippentiefbohren unter Esteröl die Interpretation einer höheren Güte, wogegen die Differenzen in der gemittelten Rautiefe beider Tiefbohröle vernachlässigbar sind. Die Vorteile in der Oberflächenqualität beim Einlippentiefbohren unter Esteröl sind dabei durch das verbesserte Schmiervermögen, den geringeren Verschleiß an der Schneidenecke und die höheren Prozesskräfte, die eine stärkere Glättung der Rauheitsspitzen begünstigen, plausibel.

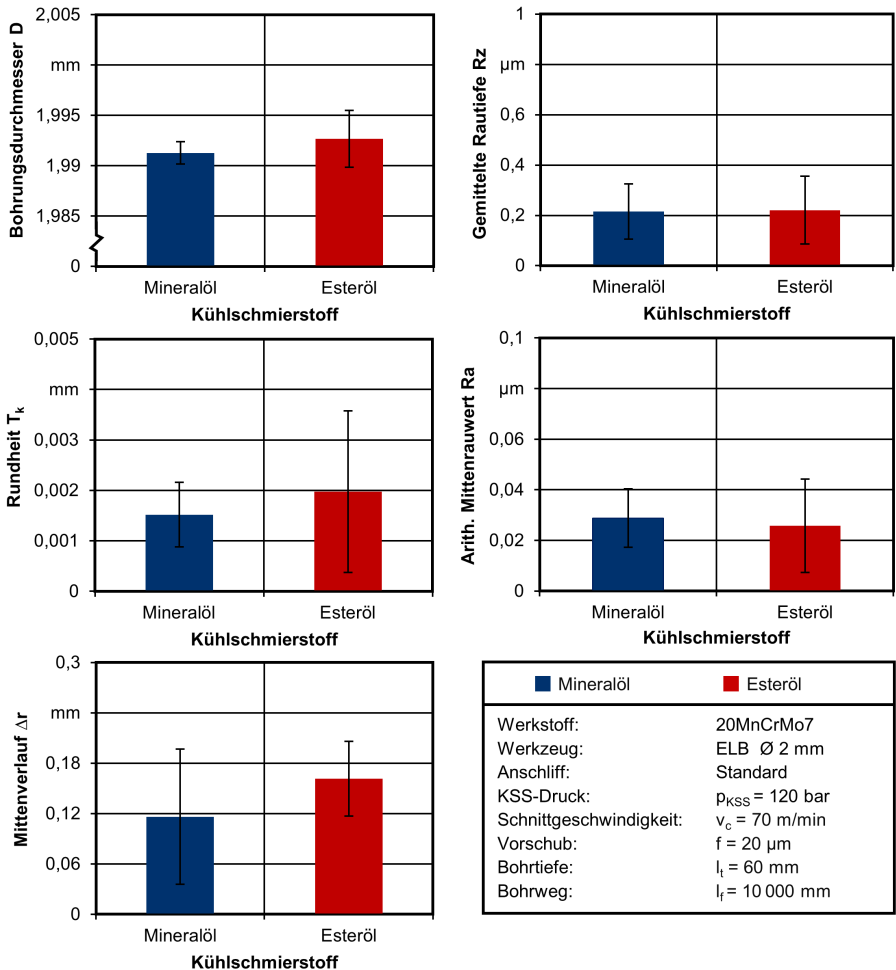


Abbildung 61: Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die Bohrungsqualität

Die gesammelten Erkenntnisse unterstreichen, dass der Auswahl des Tiefbohröls auch beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern eine entscheidende Rolle bei der Prozessgestaltung zukommt. Durch die Verwendung von synthetischen Estern lässt sich beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern eine Leistungssteigerung erzielen. Das hervorragende Schmiervermögen von Esterölen bewirkt einen reduzierten adhäsiven und abrasiven Werkzeugverschleiß. Insbesondere die geringere Neigung zur Aufbauschneidenbildung auf der Spanfläche entschleunigt die Entwicklung zu ungünstigen Spanformen und gewährt so eine höhere Prozesssicherheit über den gesamten Einsatz. Allerdings verlangt eine Umstellung des Tiefbohröls, bedingt durch die Unterschiede im Benetzungsverhalten und der Materialverträglichkeit, eine Anpassung des nachgelagerten Reinigungsprozesses der Bauteile sowie von einzelnen Komponenten, wie z. B. den Dichtungen der Bearbeitungsmaschine [Bel02].

6.5 Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte

Ergänzend zu den bislang vorgestellten Ergebnissen zum Einlippentiefbohren kommt in weiteren Untersuchungen das Wendeltiefbohren zur Anwendung. Zu Beginn der Versuche zum Wendeltiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 wird dabei die generelle Machbarkeit der Herstellung von Bohrungen mit einem Durchmesser von $D = 2,0$ mm und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l/D = 30$ mit kontinuierlicher Vorschubbewegung, d. h. ohne Entspannungshübe, überprüft. Die eingesetzten Wendeltiefbohrer WTB1 sind gekennzeichnet durch einen ausgespitzten 4-Flächenanschiff, einen Drallwinkel von $\varphi = 30^\circ$, eine Negativfase im Bereich der Schneidenecke und zwei Führungsfasen je Schneide am Werkzeugumfang. Als Beschichtung kommt eine speziell für die Bearbeitung manganhaltiger Stähle neu entwickelte TiAlN-TiSiN-Schicht zum Einsatz. Die Kopfbeschichtung liegt in einer Schichtdicke $s_d = 1,20$ μm und einer Mikrohärtigkeit $H_m = 4000$ HV vor. Die gewählten Schnittdaten in Form einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 80$ m/min und einem Vorschub von $f = 50$ μm basieren auf den Empfehlungen des Werkzeugherstellers. Zum Ziele eines ausreichenden Kühl- und Spüleffektes wird außerdem die Einstellung hoher Kühlschmierstoffdrücke für das Wendeltiefbohren mit kleinsten Durchmessern empfohlen. **Abbildung 62** zeigt die mechanischen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffdruckes.

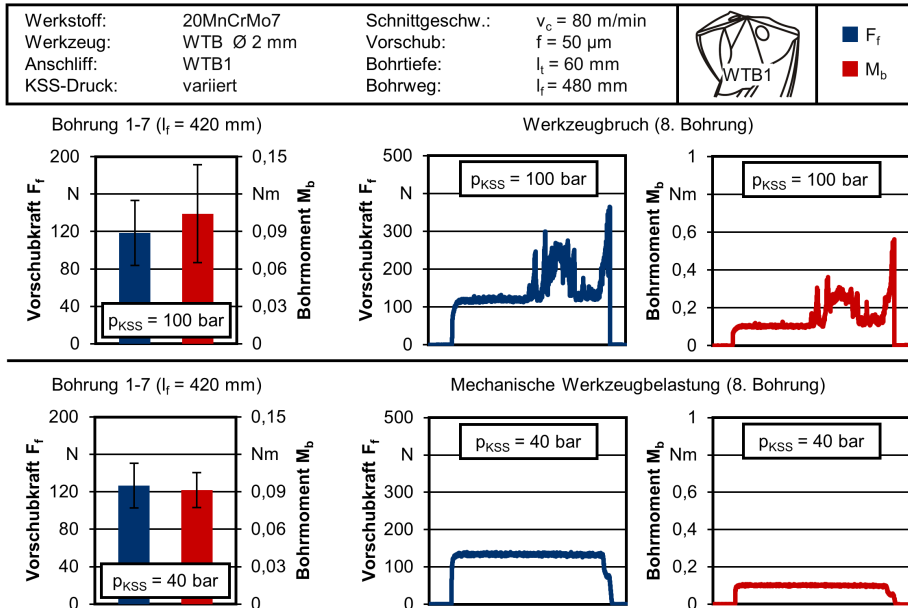


Abbildung 62: Einfluss des KSS-Druckes auf die mechanischen Werkzeugbelastungen beim Wendeltiefbohren von 20MnCrMo7

Zunächst wird das Wendeltiefbohren gemäß den empfohlenen Richtwerten mit einem hohen Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 100$ bar durchgeführt. Mit zunehmender Bohrtiefe nehmen dabei die Streuungen und Maximalwerte in den Vorschubkräften und Bohrmomenten deutlich zu. Die Einstellung hoher Drücke führt zu einer geringen Prozessstabilität und Werkzeugbrüchen nach einer geringen Anzahl von gefertigten Bohrungen. Eine Begründung für die Prozessstörungen liefern metallographische Analysen (**Abbildung 63**). Hierzu werden Quer- und Längsschliffe der vom Werkzeugbruch betroffenen

Bohrungen angefertigt. Die Einstellung hoher Kühlschmierstoffdrücke beim Wendeltiefbohren mit kleinsten Durchmessern führt zu einem Auf- bzw. Ineinanderschieben von Spänen sowie der Bildung von Spänestaus entlang der Spannuten. Die Spanabfuhr wird unterbrochen und die Werkzeuge scherten ab. Abhilfe zur Realisierung des Wendeltiefbohrrens von 20MnCrMo7 mit kontinuierlicher Vorschubbewegung liefert eine sukzessive Reduzierung des Kühlschmierstoffdruckes. Die Messschriebe des Wendeltiefbohrrens mit einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 40$ bar zeigen schließlich einen kontinuierlichen Verlauf der Vorschubkraft und des Bohrmoments über die gesamte Bohrtiefe. Die Größe und Form der erzeugten Späne bleibt bei der Verringerung des Kühlschmierstoffdruckes von $p_{KSS} = 100$ bar auf $p_{KSS} = 40$ bar unverändert. In beiden Fällen liegen eng gerollte Spanlocken vor. Die Untersuchungen belegen, dass die verbreiteten Empfehlungen höherer Kühlschmierstoffdrücke mit abnehmenden Werkzeugdurchmessern für das Wendeltiefbohren [Gue16, Mik16] nicht zielführend sind.

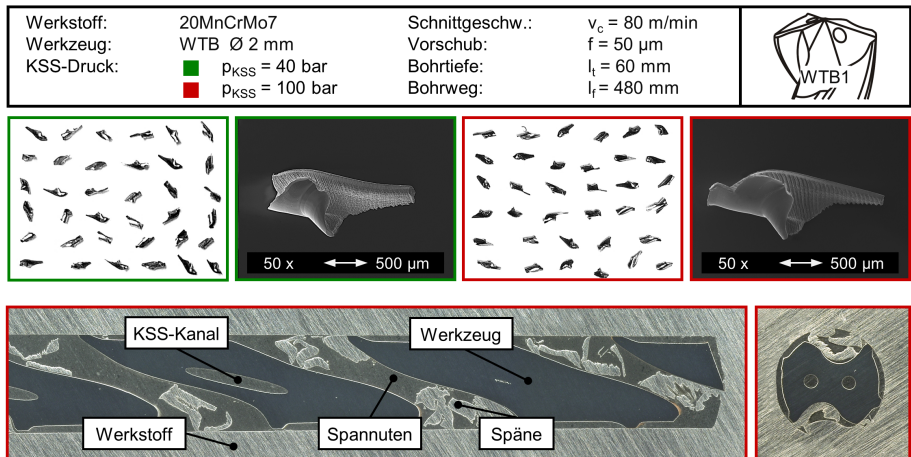



Abbildung 63: Einfluss des KSS-Druckes auf die Spanbildung und -abfuhr beim Wendeltiefbohren von 20MnCrMo7

Nach erfolgreicher Umsetzung des Wendeltiefbohrrens wird im nächsten Schritt ein Verfahrenvergleich zum Einlipp- und Wendeltiefbohren vorgenommen. Im Rahmen dessen wird das Standzeitverhalten beider Werkzeugkonzepte über einen Bohrweg von $l_r = 10\,000$ mm unter Verwendung von Mineralöl getestet. Das Einlippentiefbohren erfolgt mit dem Standardanschliff und der Referenzbeschichtung in der Zusammensetzung AlTiN. Darüber hinaus werden die bewährten Schnittdaten mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 70$ m/min und einem Vorschub von $f = 20$ μ m sowie ein Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 120$ bar für das Einlippentiefbohren herangezogen. Die Produktivität bzw. Vorschubgeschwindigkeit beim Wendeltiefbohren mit den Schnittdaten $v_c = 80$ m/min und $f = 50$ μ m liegt somit um fast 200 % höher. **Abbildung 64** zeigt eine Gegenüberstellung der mechanischen Werkzeugbelastungen für das Einlipp- und Wendeltiefbohren.

Werkstoff:	20MnCrMo7	ELB	WTB		
Werkzeug:	ELB/WTB Ø 2 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 70$ m/min		$v_c = 80$ m/min
Bohrtiefe:	$l_f = 60$ mm	Vorschub:	$f = 20$ μ m		$f = 50$ μ m
Bohrweg:	$l_f = 10\,000$ mm	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120$ bar		$p_{KSS} = 40$ bar

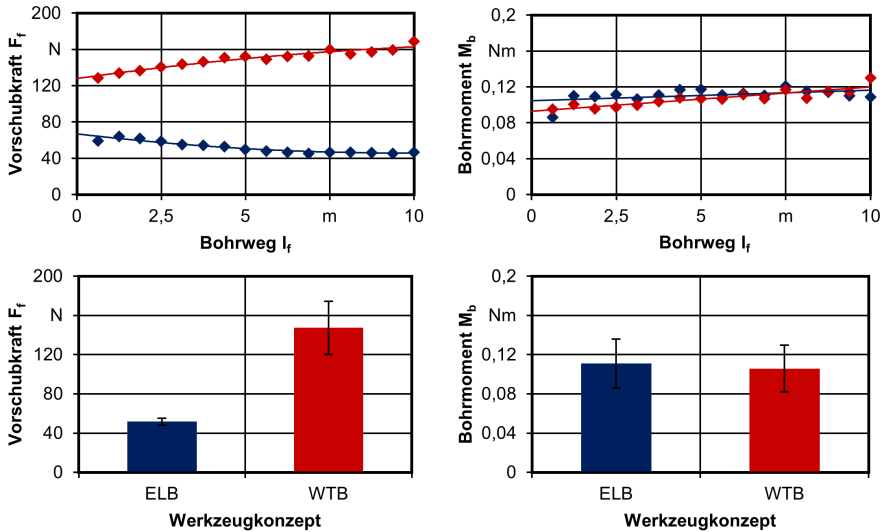


Abbildung 64: Mechanische Werkzeugbelastungen beim Einlippen- und Wendeltiefbohren von 20MnCrMo7

Gegenüber dem Einlippentiefbohren resultiert beim Wendeltiefbohren eine etwa dreifach höhere gemittelte Vorschubkraft. Die höhere gemittelte Vorschubkraft ist dabei zum einen auf die Produktivitätssteigerung um fast 200 % und den größeren Spanungsquerschnitt zurückzuführen. Zum anderen erklären sich die höheren Werkzeugbelastungen in Vorschubrichtung konzeptbedingt. Im Werkzeugzentrum des Wendeltiefbohrers liegen im Bereich der Querschnitte stark negative Spanwinkel vor. In Kombination mit der bis auf null fallenden Schnittgeschwindigkeit kommt es zu starken Materialquetschungen und Reibvorgängen. Im Gegensatz dazu sind die Innenschnitten der Einlippentiefbohrer über die Mittelachse des Werkzeuges geschliffen, wodurch auch im Werkzeugzentrum nominelle Spanwinkel von $\gamma_{nom} = 0^\circ$ resultieren. Eine gänzlich verschiedene Entwicklung zeigen zudem die Vorschubkräfte beider Werkzeugkonzepte über den Bohrweg. Während die Vorschubkraft beim Einlippentiefbohren von $F_f = 59,2$ N zu Prozessbeginn auf $F_f = 46,7$ N nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm abnimmt, steigt die Vorschubkraft beim Wendeltiefbohren verschleißbedingt von $F_f = 128,8$ N auf $F_f = 169,0$ N an. Geringere Unterschiede zeigen sich hingegen im mittleren Bohrmoment. Dabei führt das Wendeltiefbohren trotz des größeren Spanungsquerschnittes infolge des symmetrischen Werkzeugaufbaus und der positiven Spanwinkel im Bereich der primären und sekundären Hauptschnitte zu einem geringeren mittleren Bohrmoment. Beim Einlippentiefbohren mit asymmetrischem Aufbau setzt sich das Bohrmoment hingegen aus dem Schnittmoment und dem Reibmoment zusammen. Die aus Schnitt- und Passivkräften resultierende Radialkraft wird als Führungsleistennormalkraft auf die Bohrungswand übertragen und initiiert durch Umform- und Reibvorgänge einen rotatorischen Widerstand. Das Bohrmoment steigt bei beiden Werkzeugkonzepten über den Bohrweg linear an. Erst nach einem Bohrweg von $l_f = 8750$ mm liegen beim Wendeltiefbohren größere Bohrmomente gegenüber dem Einlippentiefbohren vor.

Im Folgenden wird die Spanbildung beider Werkzeugkonzepte miteinander verglichen. **Abbildung 65** zeigt die in regelmäßigen Abständen über den Bohrweg angefertigten Aufnahmen der produzierten Späne beim Wendel- und Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7.

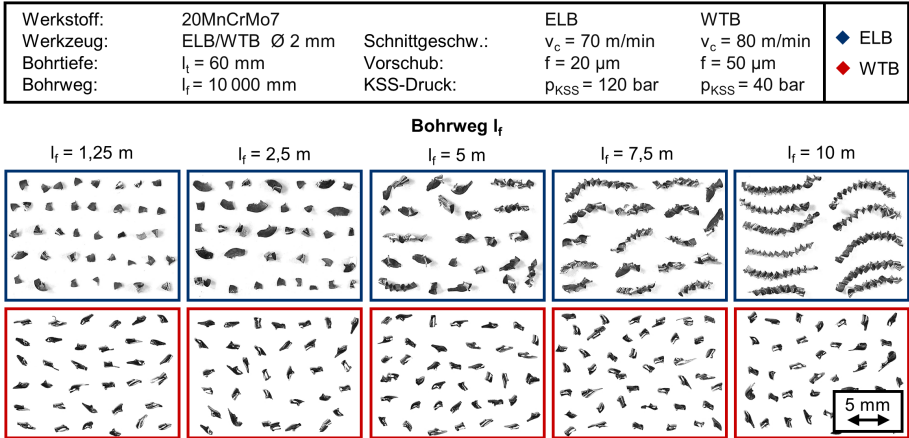


Abbildung 65: Spanbildung in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Entgegen der deutlichen Veränderung in der Spanformung beim Einlippentiefbohren von kurzen Bröckelspänen hin zu langen, ziehharmonika-förmigen Spänen ist beim Wendeltiefbohren keine Entwicklung in der Spanformung festzustellen. Durch die Wahl der eingestellten Schnittdaten in Verbindung mit der hohen Werkstoffhärte entstehen beim Wendeltiefbohren eng gerollte Spanlocken über den gesamten Bohrweg. Die kurz brechenden Späne mit einer Länge von $l_{sp} = 1,2 \dots 3,7$ mm lassen sich, gemäß den in Abbildung 62 gezeigten Messschrieben der Vorschubkraft und des Bohrmoments, bei einem Kühlschmierstoffdruck von $p_{KSS} = 40$ bar prozesssicher und störungsfrei aus der Bohrtiefe von $l_f = 60$ mm über die gewendelten Spannuten abführen. Neben der Spanformung wird die Spandicke bzw. Spandickenstauchung mittels metallographischer Präparation von Querschliffen der Späne analysiert. Zur Angabe des Quotienten aus Spandicke und Spanungsdicke, der Spandickenstauchung, beim Wendeltiefbohren erfolgt die Bestimmung der Spanungsdicke über den Spitzenwinkel $\sigma = 135^\circ$. Hierzu wird der trigonometrische Zusammenhang $h = f_z \cdot \sin(\sigma/2) \approx 23$ µm herangezogen. In **Abbildung 66** sind die statistisch erfassten Spandicken für beide Werkzeugkonzepte über den Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm gegeneinander aufgetragen.

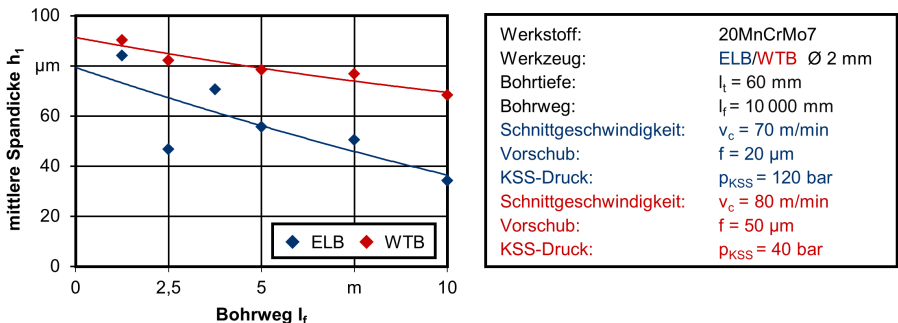


Abbildung 66: Resultierende Spandicken in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Die gemessenen Spandicken beim Wendeltiefbohren liegen über den gesamten Einsatz oberhalb der Spandicken des Einlippentiefbohrers. Auffällig ist dabei der wesentlich geringere Abfall in den Spandicken beim Wendeltiefbohren. Die Spandickenstauchung fällt lediglich von $\lambda_s = 3,9$ zu Prozessbeginn auf $\lambda_s = 3,0$ nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm, was die konstante Spannung beim Wendeltiefbohren erklärt. Beim Einlippentiefbohren hängt die gravierende Veränderung in der Spannung dagegen mit der stark sinkenden Spandickenstauchung von $\lambda_s = 4,2$ zu Prozessbeginn auf $\lambda_s = 1,7$ nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm zusammen. In **Abbildung 67** sind Bildsequenzen der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zur Visualisierung der Spanbildung im stationären Bohrprozess und Erweiterung des Prozessverständnisses für das Einlippen- und Wendeltiefbohren dargestellt. Beide Werkzeuge werden im Neuzustand eingesetzt.

Werkstoff:	20MnCrMo7		ELB	WTB
Werkzeug:	ELB/WTB $\varnothing 2$ mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 70$ m/min	$v_c = 80$ m/min
Bildrate:	10 000 fps	Vorschub:	$f = 20$ μ m	$f = 50$ μ m
Vergrößerung:	30-fach	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 40$ bar	$p_{KSS} = 40$ bar

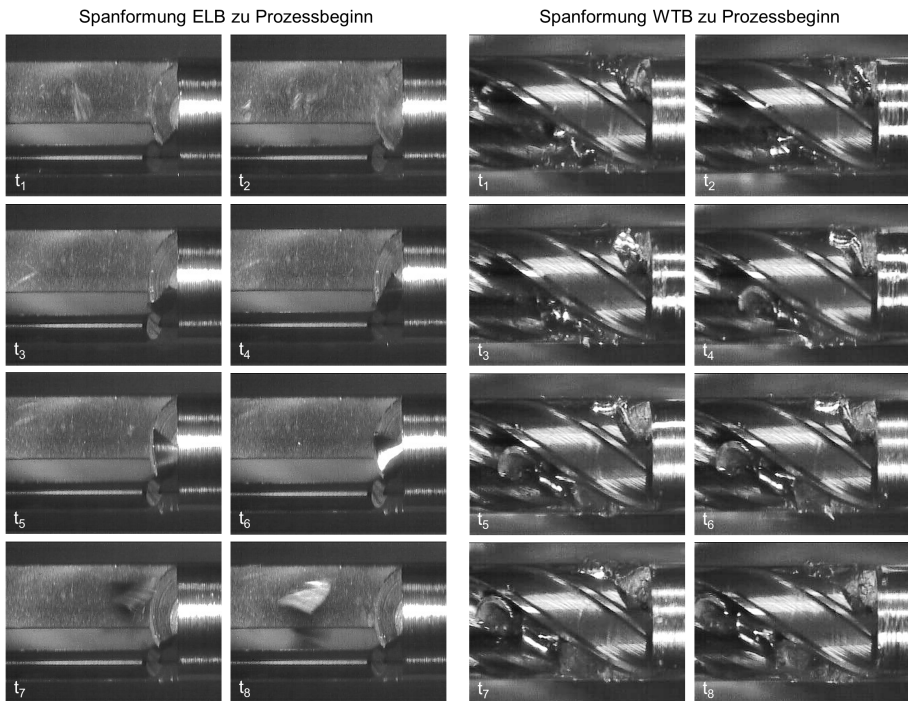


Abbildung 67: Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen für unterschiedliche Werkzeugkonzepte

Das Einlippentiefbohren erzeugt einen entlang der Außen- und Innenschneide ablaufenden Span, der sich Richtung Sickenrund und Übergangskante krümmt und beim Anlaufen an den Bohrungsgrund in Form eines kurzen Brückelspanes bricht. Der Abtransport der Brückelspäne über die gerade genutete Werkzeugsicke ist prozesssicher. Beim Wendeltiefbohren entstehen eng gerollte Spanlocken an der primären und sekundären Hauptschneide. Der Spanwinkel und der Radius des Spannutprofils bestimmen den Krümmungsradius des Spanes. Die Spantrennung erfolgt durch das von der Wendelung der Spannuten aufgezwungene Einrollen des Spanes. Die Späne werden rückstandsfrei von der Wirkstelle

über die Spannuten aus der Bohrung gespült. Beim Abtransport haben die scharfkantigen Späne allerdings Kontakt zur Bohrungswand und hinterlassen, wie in den Hochgeschwindigkeits-spanbildungsanalysen zu erkennen, zahlreiche Rillen und Kratzer auf der Acrylglassoberfläche. Die freigeschliffenen Flächen am Werkzeugumfang sind ausreichend mit Tiefbohröl geflutet. Die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse zum Wendeltiefbohren zeigt jedoch vereinzelt in den Öltaschen zwischen der ersten und zweiten Führungsfase entgegen der Vorschubrichtung ablaufende Luftblasen.

Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugverschleißaufnahmen für beide Werkzeugkonzepte ist in **Abbildung 68** dargestellt. Neben energiedispersiven Röntgenspektroskopien und rasterelektronenmikroskopischen Analysen sind exemplarische lichtmikroskopische Bilder vom Verschleiß am Führungsleistenlauf beim Einlippentiefbohren und an der zweiten Führungsfase beim Wendeltiefbohren gezeigt.

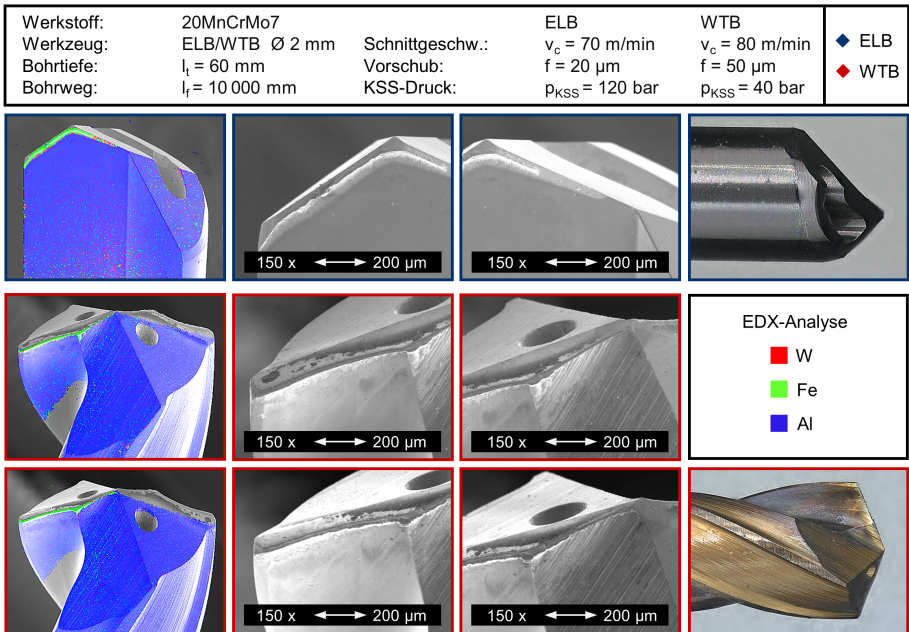



Abbildung 68: Werkzeugverschleiß beim Einlippen- und Wendeltiefbohren von 20MnCrMo7

Trotz der höheren Vorschubgeschwindigkeit und den höheren Vorschubkräften stellt sich beim Wendeltiefbohren ein deutlich geringerer Werkzeugverschleiß ein. Die Schneidkanten der primären und sekundären Hauptschneide und die Querschneide weisen nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm nur einen geringen abrasiven Materialabtrag auf. Die Schneidenecken zeigen ebenso eine vergleichsweise geringe Verrundung. Analog zum Einlippentiefbohren ist dabei auch an den Schneidkanten des Wendeltiefbohrers eine Aufbauschneidenbildung zu erkennen. Dennoch ist die Aufbauschneidenbildung beim Wendeltiefbohren in der Höhe und Breite stark reduziert und bildet sich vorrangig an der primären Hauptschneide aus. Durch die geringe Intensität der Aufbauschneidenbildung und die konzeptbedingt bereits im unverschlissenen Zustand vorliegenden positiven nominellen Spanwinkel im Bereich der primären und sekundären Hauptschneide werden die Eingriffsbedingungen und die Spanbildung mit zunehmendem Bohrweg im Gegensatz zum Einlippentiefbohren nicht merklich beeinflusst. An den

Kontaktelementen am Werkzeugumfang ist in den Versuchen zum Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 bei keinem Werkzeugkonzept ein Verschleiß festzustellen. Die dominante Verschleißbeständigkeit des Wendeltiefbohrers wird begünstigt durch die Spezifikationen der Werkzeugbeschichtung. Die speziell für die Bearbeitung manganhaltiger Stähle geeignete Beschichtung in der Zusammensetzung TiAlN-TiSiN kennzeichnet eine Schichtdicke von $s_d = 1,20 \mu\text{m}$ und eine Mikrohärtigkeit von $H_m = 4000 \text{ HV}$. Demgegenüber sind die im Rahmen des Verfahrensvergleichs eingesetzten Einlippentiefbohrer mit einer AlTiN-Beschichtung mit einer Schichtdicke von $s_d = 0,89 \mu\text{m}$ und einer Mikrohärtigkeit $H_m = 2500 \text{ HV}$ versehen. Die Zusammensetzung, Schichtdicke sowie Mikrohärtigkeit weichen somit erheblich voneinander ab. Die Vorteile in der Verschleißbeständigkeit der Kopfbeschichtung des Wendeltiefbohrers lassen sich auch in den versuchsbegleitenden Messungen des Freiflächenverschleißes nachweisen (**Abbildung 69**). Die Messungen der mittleren Verschleißmarkenbreite erfolgen beim Wendeltiefbohren an jeweils fünf Positionen verteilt über die zwei gegenüberliegenden primären und sekundären Hauptschneiden. Die maximale Verschleißmarkenbreite wird am Übergang der primären Hauptschneiden zur ersten Führungsfase bestimmt.

Werkstoff:	20MnCrMo7	ELB	WTB	
Werkzeug:	ELB/WTB $\varnothing 2 \text{ mm}$	Schnittgeschw.:	$v_c = 70 \text{ m/min}$ $v_c = 80 \text{ m/min}$	
Bohrtiefe:	$l_f = 60 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 20 \mu\text{m}$ $f = 50 \mu\text{m}$	
Bohrweg:	$l_f = 10\,000 \text{ mm}$	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 120 \text{ bar}$ $p_{KSS} = 40 \text{ bar}$	

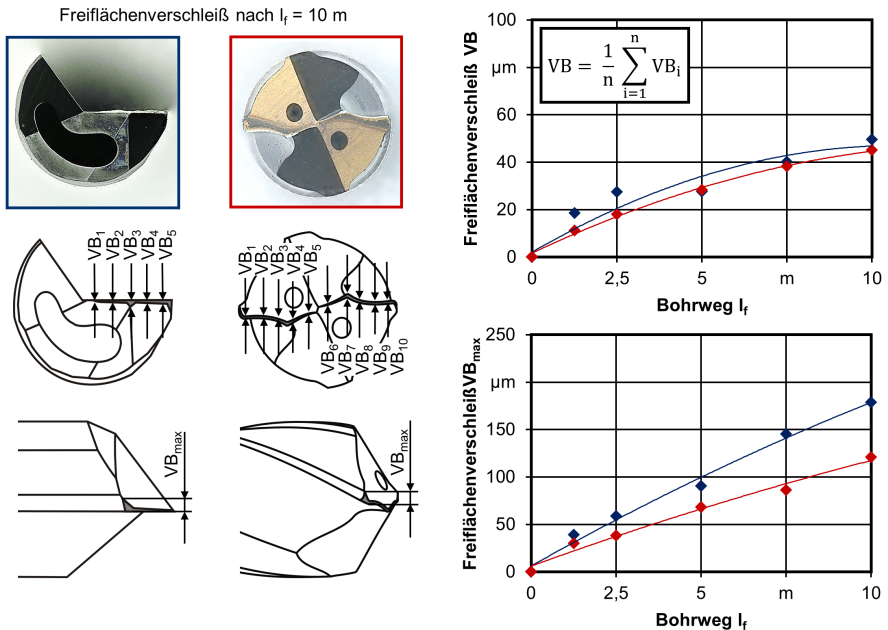


Abbildung 69: Freiflächenverschleiß beim Einlipp- und Wendeltiefbohren von 20MnCrMo7

Die mittlere und maximale Verschleißmarkenbreite sind beim Wendeltiefbohren, bedingt durch die verschleißbeständige Werkzeugbeschichtung, trotz der deutlich höheren Axialkräfte geringer als beim Einlippentiefbohren. Die Negativfase im Bereich der Schneidenecke begünstigt zusätzlich eine höhere Stabilität und die Ausbildung geringer maximaler Verschleißmarkenbreiten. Darüber hinaus steht die Entwicklung des Freiflächenverschleißes beim Wendeltiefbohren in unmittelbarem Zusammenhang mit

den resultierenden mechanischen Werkzeugbelastungen (vgl. Abbildung 64). Der Anstieg der Vorschubkraft und des Bohrmomentes mit fortschreitendem Einsatz ist auf den linear zunehmenden Freiflächenverschleiß zurückzuführen.

Weiterhin werden verschiedene Qualitätsmerkmale beim Einsatz des Einlippen- und Wendeltiefbohrers verglichen. In **Abbildung 70** sind die resultierenden Maß- und Formtoleranzen für beide Werkzeugkonzepte gegenübergestellt. Die Vermessung der Bohrungsaustrittsdurchmesser, der Rundheitsabweichungen der Bohrungen an der Austrittsseite und der Konzentrizität von Bohrungseintritt und -austritt erfolgen mithilfe der 3D-Koordinaten-Messtechnik.

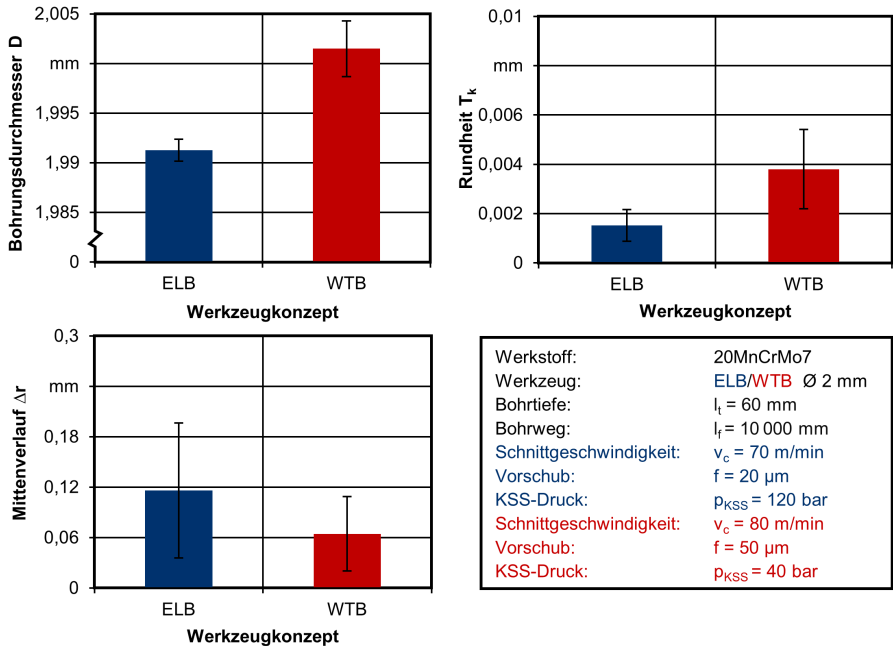


Abbildung 70: Einfluss des Werkzeugkonzeptes auf die Maß- und Formtoleranzen

Im Hinblick auf den Bohrungsdurchmesser lässt sich durch das Wendeltiefbohren eine höhere Genauigkeit in der ISO-Toleranzklasse IT4 erzielen. Mögliche Gründe für das geringe Übermaß im Bohrungsdurchmesser liefern eine leichte Taumelbewegung des Werkzeuges um die eigene Achse durch den Spindelrundlauffehler oder eine Schneidenhöhdifferenz. Die eingesetzten, asymmetrischen Einlippentiefbohrer mit der Umfangsform G erzeugen hingegen aufgrund des Freischliffs gegenüber der Schneidenecke Bohrungsdurchmesser unter Nennmaß in der ISO-Toleranzklasse IT7. Eine umgekehrte Tendenz zeigt sich in den erzielten Abweichungen von der Kreisformtreue. Der asymmetrische und über die Führungsleiste selbstgeführte Einlippentiefbohrer erreicht eine Rundheitsgenauigkeit in der ISO-Toleranz IT3, wogegen der symmetrische Wendeltiefbohrer aufgrund einer Pendelbewegung nur eine Kreisformtreue in der ISO-Toleranz IT5 produziert. Darüber hinaus können fertigungsbedingte Asymmetrien sowie ein inhomogener Schneidenschleiß beim Wendeltiefbohren ein starkes Verlaufen des Werkzeuges initiieren. In den durchgeführten Untersuchungen wird die insgesamt hohe Bohrungsgüte beim Wendeltiefbohren durch die gute Abstimmung der Winkel an den Schneiden, der Querschneidlänge sowie der Anzahl und Lage der Führungsfasen begünstigt. Die zwei Stützfasen je Schneide sorgen

für eine deutlich breitere Stützfläche am Werkzeugumfang und führen zu guter radialer Zentrierung des Bohrkopfes [Tsc07]. Des Weiteren resultiert der geringere Mittenerlauf bei Einsatz des symmetrischen Wendelbohrers aus der höheren Werkzeugeigensteifigkeit und dem kurzen Spanbruch über den gesamten Bohrweg. Einen geringeren Mittenerlauf beim Wendeltiefbohren gegenüber dem Einlippentiefbohren konnte auch *Wittkop* für die Bearbeitung von nichtrostenden Stählen feststellen [Wit07]. Ein weiteres Qualitätsmerkmal stellt die Oberflächengüte dar. **Abbildung 71** zeigt die erzielten gemittelten Rautiefen und arithmetischen Mittenerauwerte für beide Tiefbohrverfahren.

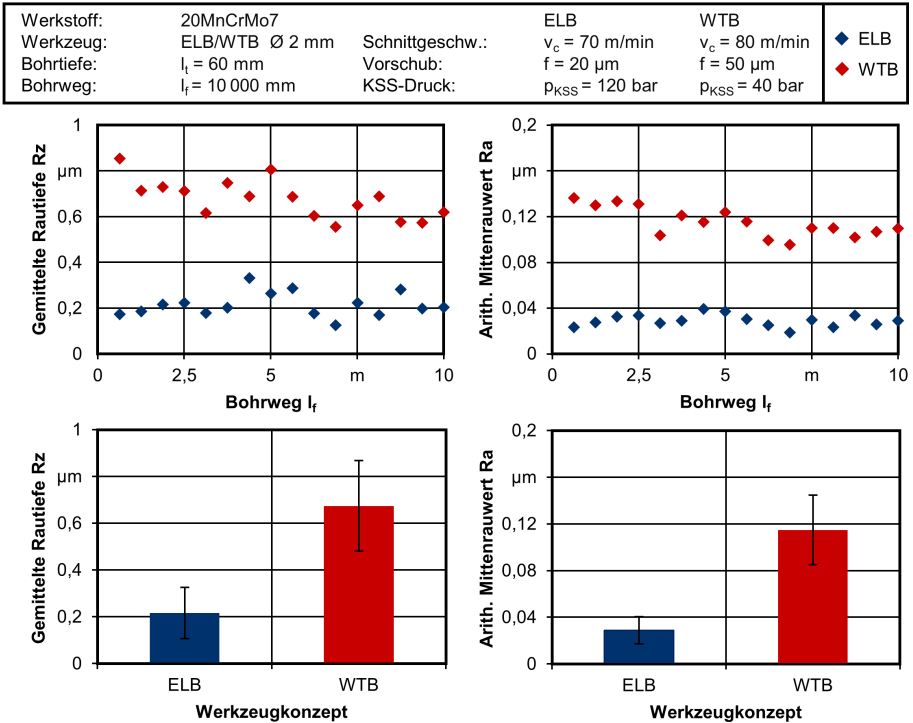


Abbildung 71: Einfluss des Werkzeugkonzeptes auf die Oberflächenqualität



Durch den asymmetrischen Werkzeugaufbau der Einlippentiefbohrer resultiert aus den Schnitt- und Passivkräften eine Radialkraft, die wiederum als Führungsleistennormalkraft auf die Bohrungswand übertragen wird. Der innere Kraftfluss fördert die Glättung der Rauheitsspitzen und die Fertigung hoher Oberflächenqualitäten. Der sehr geringe axiale und radiale Führungsleistenschleiß bildet dabei die Voraussetzung für die Erzielung kontinuierlicher Kennwerte über den gesamten Bohrweg. Das Wendeltiefbohren fertigt durch den Kontakt der Späne mit der Bohrungswand während der Abfuhr entlang der gewendelten Spannuten allgemein geringere Oberflächengüten. Die verschleißbedingte Zunahme von Asymmetrien führt zu einem Ungleichgewicht der Passivkräfte an den gegenüberliegenden Hauptschneiden. Der höhere Druck auf die Führungsfasen am Werkzeugumfang begünstigt ähnlich wie beim asymmetrischen Einlippentiefbohren eine Glättung des Oberflächenprofils und eine fallende Charakteristik der Oberflächengüte über den betrachteten Bohrweg.

7 Tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718

Das Tiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern stellt aufgrund der prozess- und werkstoffseitigen Charakteristika eine besondere Herausforderung dar. Das folgende Kapitel umfasst zum Ziele einer erfolgreichen Prozessgestaltung detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Schnittdaten, der Werkzeuggestalt und des Kühlschmierstoffes auf das Einsatzverhalten beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Außerdem wird die Realisierung des Wendeltiefbohrens mit kontinuierlicher Vorschubbewegung ohne Entspannungsübungen überprüft und ein Verfahrensvergleich zum Einlippen- und Wendeltiefbohren durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgen exemplarisch für einen Werkzeugdurchmesser von $d = 1,3 \text{ mm}$ und ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_t/D = 30$. Zur Bewertung der unterschiedlichen Einflussfaktoren werden die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Spanbildung, der Werkzeugverschleiß und die Bohrungsqualität analysiert.

7.1 Vorversuche zur Identifikation prozessgünstiger Schnittdaten

Zu Beginn der Untersuchungen zum Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 wird die generelle Machbarkeit überprüft und prozessgünstige Schnittdaten bestimmt. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik zur Kurz- und Tiefbohrbearbeitung von Inconel 718 erfolgt eine Variation der Schnittgeschwindigkeit mit $v_c = 20, 30 \text{ m/min}$ und des Vorschubs mit $f = 3, 5, 7 \mu\text{m}$. Die Wahl einer Schnittgeschwindigkeit $v_c > 30 \text{ m/min}$ führte in vorherigen Untersuchungen zu einer signifikanten Verringerung der Werkzeugstandzeiten aufgrund einer überhöhten thermischen Beanspruchung [Aru00, Eck08, Eck15, Wes07]. Die eingesetzten Einlippentiefbohrer mit Standardanschiff ($K_1 = 50^\circ$ und $K_2 = 120^\circ$) sind alle mit der Referenzschicht in der Zusammensetzung AlTiN teilbeschichtet bzw. stirnseitig blank. Der Kühlschmierstoffdruck wird in allen Versuchen zum Einlippentiefbohren mit $p_{KSS} = 170 \text{ bar}$ konstant gehalten. In **Abbildung 72** sind die auftretenden mechanischen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit der Schnittdaten dargestellt. Die Mittelwerte der Vorschubkraft und des Bohrmomentes werden mittels Erzeugung von fünf Bohrungen mit reduzierter Bohrtiefe von $l_t = 15 \text{ mm}$ bestimmt. Zur Anbohrführung dient eine Pilotbohrung mit einer Tiefe von $l_{t,PB} = 4 \text{ mm}$.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	variiert		
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	variiert		
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_t = 15 \text{ mm}$		
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 75 \text{ mm}$		

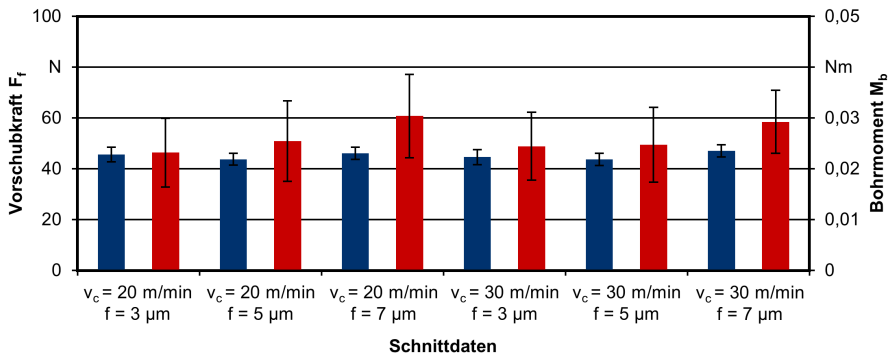



Abbildung 72: Mechanische Werkzeugbelastungen beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 in Abhängigkeit der Schnittdaten [Bie15d, Kirs15]

Bei den gemessenen Vorschubkräften sind insgesamt nur geringe Differenzen festzustellen. Die eingestellten Schnittdaten führten zu Vorschubkräften zwischen $F_f = 43 \dots 48 \text{ N}$. Eine stärkere Abhängigkeit von der gewählten Schnittgeschwindigkeit und dem Vorschub zeigt dagegen das Bohrmoment. Dabei führt einerseits ein steigender Vorschub, bedingt durch die Vergrößerung des Spanungsquerschnittes, zu einem deutlichen Anstieg in den Mittelwerten und der Standardabweichung. Andererseits ist eine fallende Tendenz des Bohrmomentes bei höheren Bohrvorschüben mit steigender Schnittgeschwindigkeit festzustellen. Eine Erklärung dafür liefern steigende Prozesstemperaturen in der Wirkzone. Bei der Zerspaltung von Inconel 718 kommt es aufgrund der hohen dynamischen Scherfestigkeit in Kombination mit der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit zu einer hohen Wärmeerzeugung. Beim Tiefbohren führt die geschlossene Wirkzone obendrein zu einer schlechten Abfuhr der entstehenden Wärme. Durch den Wärmestau vor der Schneidkante steigen die Prozesstemperaturen in der Scherzone oberhalb der kritischen Erweichungstemperatur, und der Werkstoff verliert an Festigkeit. Zudem nehmen die Spanstauchung und damit auch die Umformarbeit bei der plastischen Verformung von Inconel 718 mit steigender Schnittgeschwindigkeit ab [Hof02]. Die Mittelwerte der Bohrmomente liegen dabei zwischen $M_b = 0,023 \dots 0,031 \text{ Nm}$. Der Anstieg in den Standardabweichungen der Bohrmomente bei Einstellung größerer Vorschubwerte korreliert mit der deutlichen Zunahme in der Spanlänge, die ein Verklemmen der Späne zwischen Werkzeugsicke und Bohrungswand und eine eingeschränkte Prozessstabilität nach sich ziehen (**Abbildung 73**). Die ausgeprägte Materialzähigkeit und die hohe Bruchdehnung von Inconel 718 wirken dabei einem Spanbruch entgegen. Bei Verwendung des Standardanschliffes bildet sich das Profil der Schneide auf der Spanoberseite und -unterseite ab, und es entstehen ziehharmonika-förmige Späne mit einer Länge von bis zu $l_{sp} = 4,9 \text{ mm}$ und $l_{sp} = 7,1 \text{ mm}$ bei einem Vorschub von $f = 5 \mu\text{m}$ bzw. $f = 7 \mu\text{m}$. Die kürzesten Späne mit einer maximalen Länge von $l_{sp} = 2,5 \text{ mm}$ entstehen bei Einstellung eines Vorschubes von $f = 3 \mu\text{m}$. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses aus Spanndicke zu Schneidkantenradius erfolgt die Spanbildung im Bereich der Schneidkantenverrundung, und es entstehen stark verformte und gequetschte Späne. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Spanformung ist vernachlässigbar [Bie15d].

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	variiert	
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 15 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 75 \text{ mm}$	

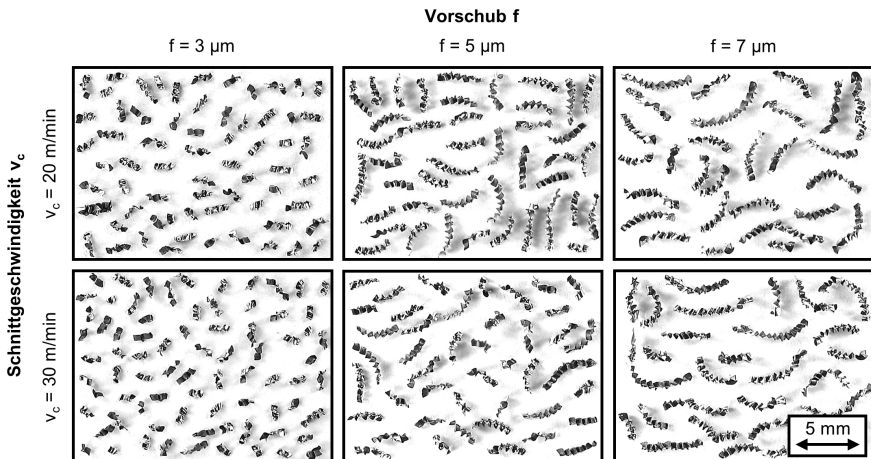
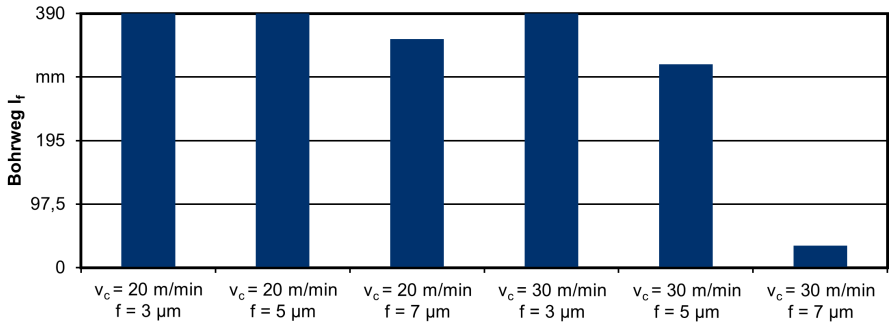


Abbildung 73: Einfluss der Schnittdaten auf die Spanformung [Bie15d, Kirs15]

Des Weiteren wird in Standzeitversuchen das Einsatz- und Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Schnittdaten analysiert. Als Zielsetzung der Versuche wird zunächst die Fertigung von zehn Bohrungen mit einer Bohrtiefe von $l_f = 39$ mm bzw. das Erreichen eines Bohrweges von $l_f = 390$ mm definiert. Die Prozessführung erfolgt im Gegensatz zu den Versuchen zur Ermittlung der mechanischen Belastungen und der Spanformung, bei denen die Führung mittels Pilotbohrungen einen Kraftnebenschluss zwischen Werkstück und Peripherie umgeht, unter Verwendung von Anbohrbuchsen in der ISO-Toleranz G6. **Abbildung 74** zeigt die realisierten Bohr- bzw. Standwege sowie den Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Schnittdaten anhand einer rasterelektronenmikroskopischen Verschleißanalyse.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	variiert		EDX-Analyse ■ W ■ Fe ■ Al
Werkzeug:	ELB $\varnothing 1,3$ mm	Vorschub:	variiert		
Anschlussf:	Standard	Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm		
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	Bohrweg:	variiert		



Rasterelektronenmikroskopische Verschleißanalyse nach $l_f = 390$ mm

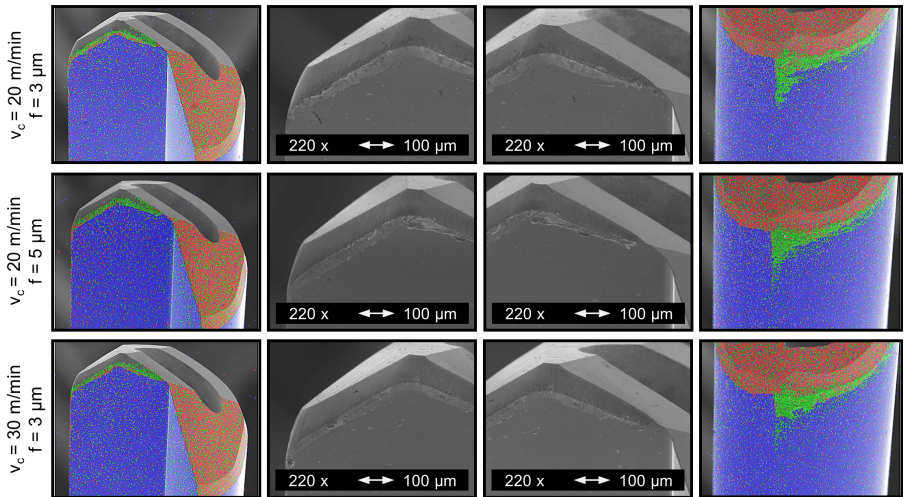


Abbildung 74: Erzielte Bohr- bzw. Standwege und resultierender Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Schnittdaten [Kirs15]

Die schwierigen Bedingungen beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern in Form hoher mechanischer Werkzeugbelastungen und einem schlechten Spanbruch führen beim Einsatz

des Standardanschliffes und Einstellung der drei Kombinationen aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub mit hoher Produktivität zu einem vorzeitigen Werkzeugversagen. Bei der höchsten Produktivität aus $v_c = 30$ m/min und $f = 7$ μ m kommt es bereits in der ersten Bohrung nach einer Bohrtiefe von $l_f = 34$ mm zum Werkzeugbruch. Der Werkzeugverschleiß nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm bei den Kombinationen der Schnittdaten aus $v_c = 20$ m/min und $f = 3$ μ m, $v_c = 20$ m/min und $f = 5$ μ m sowie $v_c = 30$ m/min und $f = 3$ μ m ist gekennzeichnet durch einen starken abrasiven Materialabtrag und eine massive Verrundung der Schneidkanten an der Außen- und Innenschneide, der Schneidenspitze und der Schneidenecke. Zudem zeigen die eingesetzten Werkzeuge einen starken axialen und radialen Verschleiß am Führungsleistenauflauf. In diesem Bereich ist die Werkzeugbeschichtung abrasiv abgetragen, und auf dem freiliegenden Hartmetall bilden sich großflächige adhäsive Materialanhaftungen. Die Verschleißanalysen belegen, dass Werkzeugbeschichtungen bei der Tiefbohrbearbeitung von Nickelbasislegierungen im Vergleich zur Stahlbearbeitung ein geringeres Potenzial bieten. Die hochfesten intermetallischen Phasen und harten Ausscheidungen, wie z. B. MC- und $M_{23}C_6$ -Karbide, sind der Grund für einen unmittelbaren Abtrag der Beschichtung [Che03, Oze11, Zhu13].

7.2 Einsatzversuche unter Variation des Schneidenanschliffes

Zur gezielten Beeinflussung der Spanformung und Erhöhung der Stabilität der Werkzeugschneide erfolgt im weiteren Vorgehen eine Anpassung der Werkzeuggestalt. Diesbezüglich wird das Einsatzverhalten von drei Sonderanschliffen analysiert. Die drei Sonderanschliffe SA2, SA3 und SA4 sind gegenüber dem Standardanschliff, der eine sehr verschleißanfällige Schneidenspitze aufweist, durch ein flacheres Schneidenprofil mit einer dritten Teilschneide unter einem Einstellwinkel von $K_3 = 90^\circ$ gekennzeichnet. Die Einstellwinkel an der Außen- und Innenschneide variieren zwischen $K_1 = 50^\circ \dots 70^\circ$ und $K_2 = 105^\circ \dots 120^\circ$. Die Sonderanschliffe werden dabei ebenfalls mit Teilbeschichtung eingesetzt. Als Zielsetzung der Werkzeugoptimierung wird das prozesssichere und produktive Tiefbohren mit einer hohen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 30$ m/min und einem mittleren Vorschub von $f = 5$ μ m über einen Bohrweg von $l_f = 780$ mm angestrebt. In **Abbildung 75** sind die mechanischen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit des Schneidenanschliffes gezeigt. Die Erfassung der Vorschubkräfte und Bohrmomente erfolgt zunächst unter Verwendung einer Pilotbohrung, wogegen in den anschließenden Analysen Bohrbuchsen zur Anbohrführung dienen.

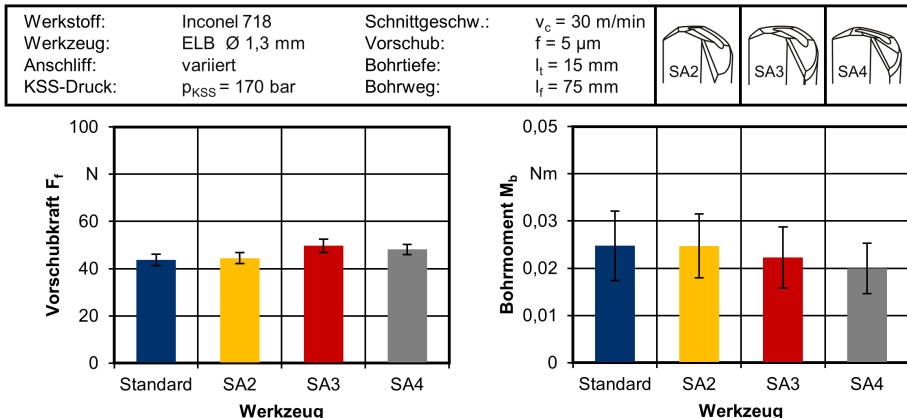





Abbildung 75: Mechanische Werkzeugbelastungen unter Variation des Schneidenanschliffes

Mit zunehmendem Einstellwinkel an der Außenschneide und abnehmendem Einstellwinkel an der Innenschneide, d. h. mit flacher werdendem Anschlag, steigen die Vorschubkräfte aufgrund der geometrischen Lage der Schneidkanten zur Bohrungsachse. Bei Einsatz des Sonderanschliffes SA4 mit extrem flachem Schneidenanschliff und Einstellwinkeln von $K_1 = 70^\circ$, $K_2 = 105^\circ$ und $K_3 = 90^\circ$ liegen alle Schneidkanten nahezu senkrecht zur Vorschubrichtung. Die leicht erhöhte Vorschubkraft bei Einsatz des Sonderanschliffes SA3 mit Einstellwinkeln von $K_1 = 60^\circ$, $K_2 = 110^\circ$ und $K_3 = 90^\circ$ begründet sich durch die unvorteilhafte Spanformung. Im Abtransport kommt es verstärkt zu Reibvorgängen zwischen Span, Werkzeugsicke und Bohrungswand. Eine gegensätzliche Entwicklung ergibt sich in den resultierenden Bohrmomenten, die sich aus den Schnitt- und Reibmomenten zusammensetzen. Eine Erklärung dafür liefern zum einen die mit flacherem Anschlag abnehmenden Schnittmomente. Die Schnittkraft ist dabei über der Schneidenbreite proportional, verhält sich jedoch über den Spannungsdicken degressiv [Klo08]. Zum anderen bedingt ein flacherer Anschlag eine Verringerung der resultierenden Radialkraft, die wiederum zu einer reduzierten Führungsleistennormalkraft führt. Die geringere Reibung zwischen Führungsleiste und Bohrungswand zieht schließlich ein geringeres Reibmoment nach sich. Die Unterschiede zwischen dem Standardanschliff und dem Sonderanschliff SA2 sind bedingt durch die konstanten Einstellwinkel an der Außen- und Innenschneide von $K_1 = 50^\circ$ bzw. $K_2 = 120^\circ$ minimal.

Darüber hinaus fasst **Abbildung 76** die Entwicklung der Spanformung in den Einsatzversuchen über einen Bohrweg von $l_f = 780$ mm für die unterschiedlichen Schneidenanschliffe zusammen.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	
Anschliff:	variiert	Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	

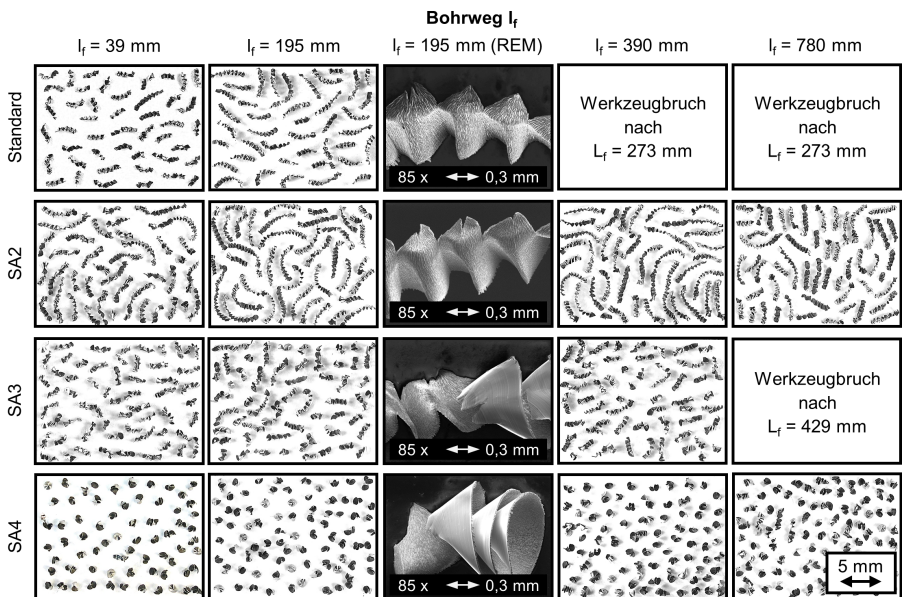


Abbildung 76: Einfluss des Schneidenanschliffes auf die Spanformung

Bei Einsatz des Standardanschliffes führt die Kombination aus langen unvorteilhaften Spanformen und einem starken abrasiven Schneidenverschleiß zu einem Werkzeugbruch nach einem Standweg von

$L_f = 273$ mm. Nach einem Bohrweg $l_f = 195$ mm erzeugt der Standardanschliff Späne mit einer maximalen Länge von $l_{sp} = 6,1$ mm. Eine genauere Betrachtung der Spanformung mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie verdeutlicht, dass der Span über die gesamte Schneidenbreite abläuft und sich das Profil der Schneide an der Spanoberseite und -unterseite abbildet. Die Spur der Schneidenspitze des Standardanschliffes ist dabei deutlich zu erkennen. Die nur geringen Unterschiede im Schneidenschliff des Sonderanschliffes SA2 führen auf der einen Seite zu einer hohen Übereinstimmung in der Spanform, haben auf der anderen Seite jedoch eine positive Auswirkung auf das Standzeitverhalten. Beim Sonderanschliff SA2 entstehen analog zum Standardanschliff ziehharmonika-förmige Späne, deren Länge nach einem Bohrweg von $l_f = 780$ mm bis zu $l_{sp} = 5,3$ mm beträgt. Die dritte Teilschneide zwischen Außen- und Innenschneide, die dem starken abrasiven Verschleiß weniger Angriffsfläche bietet und dem Werkzeug eine höhere Schneidenstabilität verleiht, zeigt sich in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen auf der Spanoberseite und -unterseite. Ein vorzeitiges Werkzeugversagen nach einem Standweg von $L_f = 429$ mm infolge einer prozessungünstigen Spanformung liegt bei Einsatz des Sonderanschliffes SA3 vor. Bei diesem Anschliff resultieren unregelmäßige Übergangsformen aus Wendelspan und ziehharmonika-förmigem Span, die eine hohe Gefahr des Verhakens und Verklemmens mit sich bringen. Eine optimierte Spanformung durch modifizierte Einstellwinkel und einen geänderten Spitzenabstand begünstigt der Einsatz des Schneidenschliffes SA4. Durch den flachen Schneidenschliff und die geringe Länge der Innenschneide erfährt der Span, im Vergleich zum Standardanschliff, bei dem der Spanfluss über die Innenschneide eine Wendelung unterdrückt, während der Krümmung in Richtung Sickenrücken wenig Widerstand aus dem Bohrerzentrum, und es entstehen eng gewendelte Späne (**Abbildung 77**).

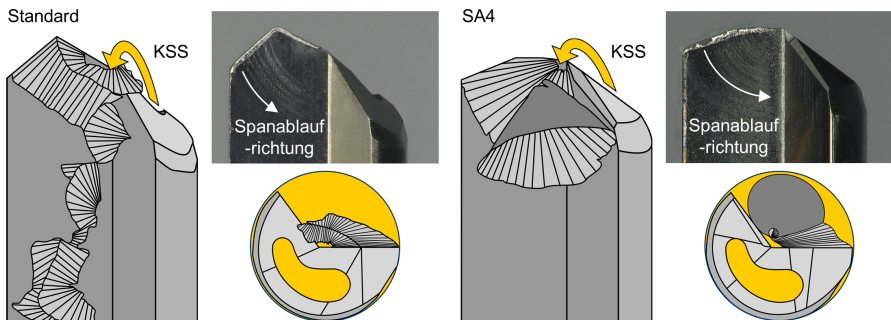


Abbildung 77: Schematische Spanbildung unter Verwendung des Standardanschliffes und des Sonderanschliffes SA4 [Bie15c]

Durch die Abflachung wird neben einer höheren Schneidenstabilität auch eine Verringerung der Spanbreite erzielt. Der infolge der starken Krümmung großflächige Spanquerschnitt bietet eine große Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff. Dies begünstigt die Entstehung kurzer Späne über den gesamten Bohrweg von $l_f = 780$ mm mit einer maximalen Spanlänge von $l_{sp,max} = 1,7$ mm und einen störungsfreien Abtransport entlang der Werkzeugsicke. Einen Beweis dafür liefert die geringere Standardabweichung im Bohrmoment bei Einsatz des Sonderanschliffes SA4. Zur tiefergehenden Analyse der Spanformung wurden für alle Schneidenschliffe Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen durchgeführt (**Abbildung 78**). Beim Standardanschliff fließt das Material aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten zunächst in Richtung Werkzeugzentrum und trifft auf die Übergangskante zum Ölraum. Infolge der hohen Werkstoffzähigkeit und der geringen Spandicke wird der Span nicht gebrochen, sondern durch das nachfließende Material aufgefalt. Im Bereich des an der Innenschneide abgescherten Materials reißt der Span bedingt durch die geringen lokalen Schnittgeschwindigkeiten und die vorliegende Scherspannung


ein. Das Schneidenprofil bildet sich dachförmig in den Spänen ab. Nach einigen Faltvorgängen und der Ausbildung von 6 bis 14 dachförmigen Spänsegmenten reißt der Span ab. Eine ähnliche Abfolge in der Spanformung zeigen die Bildsequenzen der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse von SA2.



Abbildung 78: Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen für unterschiedliche Schneidenschliffe für das Einlippentiefbohren von Inconel 718

Beim Sonderanschiff SA3 entsteht durch die Anpassung der Einstellwinkel eine unregelmäßige Kombination aus Falt- und Wendelspänen. Eine weitere Reduzierung der Schneidenhöhe und Modifikation der

Teilschneidenlängen beim Sonderanschliff SA4 resultiert schließlich in einer starken Krümmung und Wendelung der ablaufenden Späne orthogonal zur Vorschubrichtung. Die verringerte Gesamtschneidenbreite begünstigt dabei die Entstehung von kurzen und prozessgünstigen Spänen, deren Spantrennung entlang der Scherbänder nach zwei bis fünf Wendelungen erfolgt. Die Ölturbulenzen zum Zeitpunkt t_5 entstehen hinter dem Span durch die Druckunterschiede im Kühlschmierstoff, hervorgerufen durch die große Kühlschmierstoffangriffsfläche. Trotz erheblicher Unterschiede in den resultierenden Spanformen und -längen liegt die Spanstauchung aller Anschliffe zwischen $\lambda_s = 4,1 \dots 4,9$. Den Einfluss des Werkzeugzustandes auf die Spanformung zeigt **Abbildung 79**. Hierzu werden Hochgeschwindigkeits-spanbildungsanalysen unter Einsatz des Sonderanschliffs SA4 im Neuzustand und im verschlissenen Zustand nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm durchgeführt.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	 SA4
Werkzeug:	ELB $\varnothing 2,0$ mm	Vorschub:	$f = 5$ μ m	
Anschliff:	SA4	Bildrate:	10 000 fps	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 40$ bar	Vergrößerung:	30-fach	

Spanformung SA4 zu Prozessbeginn

Spanformung SA4 nach $l_f = 390$ mm

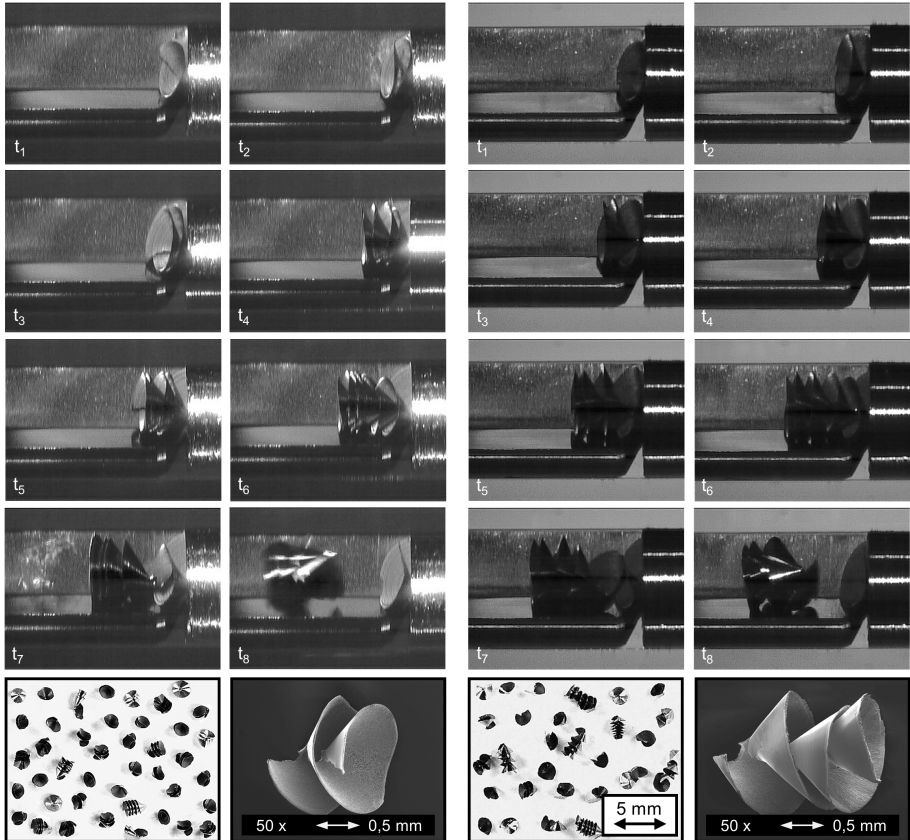
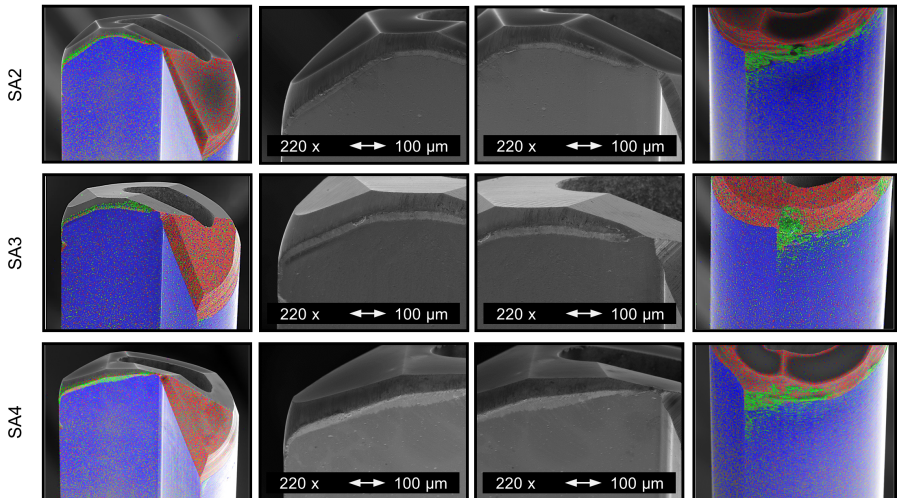


Abbildung 79: Hochgeschwindigkeits-spanbildungsanalysen unter Variation des Werkzeugzustands

Die Bildsequenzen veranschaulichen, dass der Verschleißzustand des Sonderanschliffes SA4 keine signifikante Veränderung in der Spanformung hervorruft (vgl. auch Abbildung 76). Der Span läuft auch nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm mit einer starken Krümmung in Richtung Bohrerzentrum und wird beim Kontakt mit dem Sickenrücken aufgewendelt. Ein genauerer Vergleich in Form licht- und rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen verdeutlicht dabei, dass die Späne des verschlissenen Werkzeuges tendenziell eine höhere Anzahl an Wendungen aufweisen, die darüber hinaus weiter auseinanderliegen. Diese Entwicklung geht mit einer nachgewiesenen Erhöhung der Spandickenstauchung von $\lambda_s = 4,8$ zu Prozessbeginn auf $\lambda_s = 7,8$ nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm einher und folgt aus den veränderten Eingrißbedingungen. Die verschleißbedingte Verrundung der Schneidkanten führt dabei zu einem starken Anstieg der negativen effektiven Spanwinkel (**Abbildung 80**).

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	EDX-Analyse ■ W ■ Fe ■ Al
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	
Anschliff:	variiert	Bohrtiefe:	$l_t = 39$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	Bohrweg:	variiert	

Rasterelektronenmikroskopische Verschleißanalyse nach $l_f = 390$ mm



Rasterelektronenmikroskopische Verschleißanalyse nach $l_f = 780$ mm

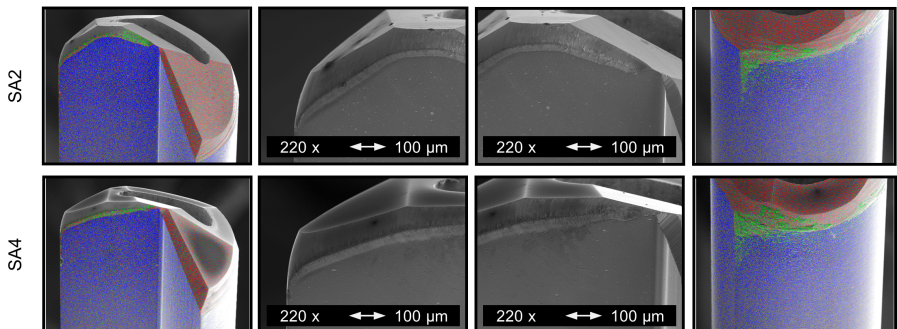


Abbildung 80: Resultierender Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit des Schneidanschliffes

Neben der versuchsbegleitenden Dokumentation des Werkzeugverschleißes mittels Lichtmikroskopie werden rasterelektronenmikroskopische Analysen nach Fertigung der 10. und 20. Bohrung mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l_f/D = 30$ durchgeführt. Einen starken abrasiven Materialabtrag an den drei Teilschneiden nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm durch die harten Karbid- und Nitrid-Ausscheidungen sowie die hochfesten intermetallischen Phasen in der Mikrostruktur der Nickelbasislegierung weisen alle Sonderanschliffe auf. Die durch Mikrofurchen entstandenen Spuren in Rotationsrichtung auf den Schneidkanten sind in den rasterelektronenmikroskopischen Detailaufnahmen der Außen- und Innenschneiden zu erkennen. Der Abrasivverschleiß an den Schneidkanten und der Schneidecke nimmt bei den Sonderanschliffen SA2 und SA4 bis zu einem Bohrweg von $l_f = 780$ mm weiter zu. Mit flacherem Anschliff weisen die Sonderanschliffe dabei eine höhere Stabilität und eine geringere Verschleißangriffsfläche auf. Spontane Hartmetallausbrüche oder Schichtabplatzungen treten nicht auf. Darüber hinaus sind in den energiedispersiven Röntgenspektroskopien bei allen Sonderanschliffen adhäsive Materialanhaftungen am Führungsleistenauslauf, auf der unbeschichteten axialen Einlauffase zwischen Führungsleiste und Freifläche sowie auf der Spanfläche unterhalb der abrasiv verrundeten Schneidkanten zu detektieren. Der Materialabtrag an den Schneidkanten steht in direktem Zusammenhang mit der degressiven Zunahme des Freiflächenverschleißes. In **Abbildung 81** sind die versuchsbegleitenden, lichtmikroskopischen Analysen und Messungen der mittleren und maximalen Verschleißmarkenbreite für die Variation des Schneidenanschliffes zusammengefasst.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	
Werkzeug:	ELB $\varnothing 1,3$ mm	Vorschub:	$f = 5$ μ m	
Anschliff:	variiert	Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	

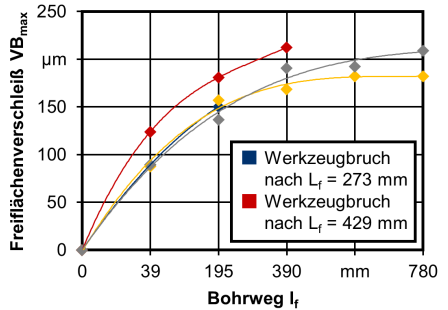
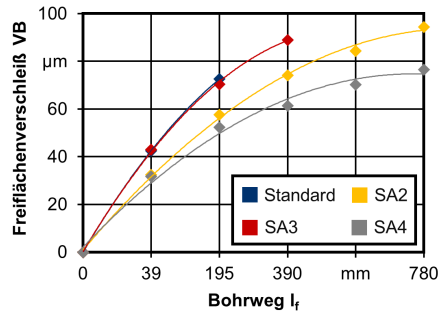
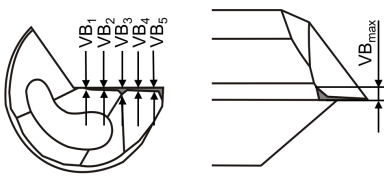
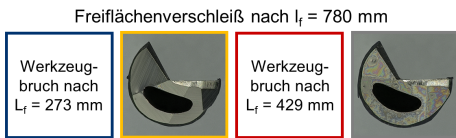
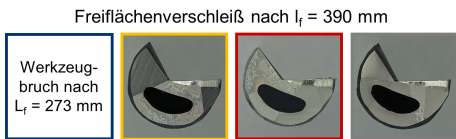
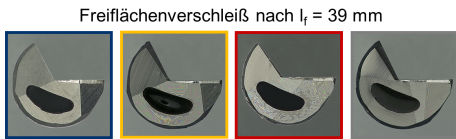


Abbildung 81: Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit des Schneidenanschliffes

Der Vergleich des Freiflächenverschleißes deckt sich mit dem Standzeitverhalten. Beim Standardanschliff und dem Sonderanschliff SA3, deren Einsatz zu einem vorzeitigen Werkzeugbruch nach $L_f = 273$ mm bzw. $L_f = 429$ mm führt, werden die höchsten Verschleißmarkenbreiten bestimmt. Das günstigste Verschleißverhalten hinsichtlich der gemittelten Verschleißmarkenbreite ergibt der Einsatz des Sonderanschliffes SA4 bedingt durch die Abflachung und Stabilitätserhöhung der Werkzeugschneide.

Der Einfluss des Schneidenschliffes auf die Maß- und Formtoleranzen ist in **Abbildung 82** dargestellt. Im Rahmen dessen werden die Durchmesser- und Rundheitstoleranzen am Bohrungsaustritt und der Mittenverlauf vermessen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen berücksichtigen die Auswertung aller Bohrungen bis zu einem Bohrweg von $l_f = 780$ mm (SA2 und SA4) bzw. bis zum Werkzeugversagen (Standardanschliff und SA3).

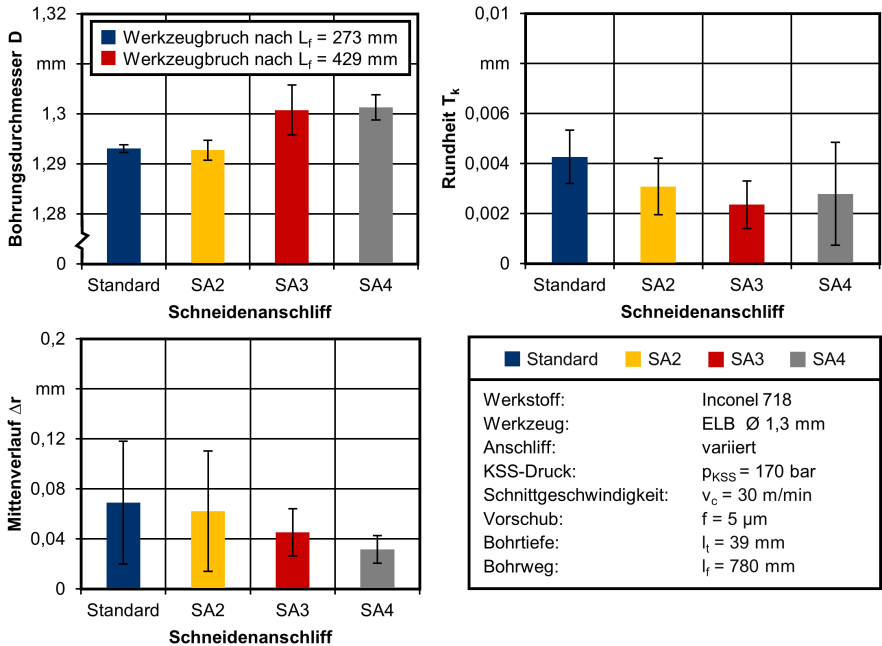


Abbildung 82: Einfluss des Schneidenschliffes auf die Maß- und Formtoleranzen

Im Hinblick auf die resultierenden Bohrungsaustrittsdurchmesser und den Mittenverlauf zeigen sich gegenläufige Verhältnisse mit flacher werdendem Schneidenschliff bzw. größeren Einstellwinkeln an der Außenschneide und kleineren Einstellwinkeln an der Innenschneide. Eine Erklärung für die Entwicklung zu Bohrungsdurchmessern nahe dem Nennmaß und einem reduzierten Mittenverlauf liegt in dem variierenden Führungsleistenrückversatz (FLR) der Werkzeuge. Der Abstand zwischen Schneidenspitze und axialem Führungsleisteneinlauf beim Sonderanschliff SA4 ($K_1 = 70^\circ$, $K_2 = 105^\circ$) von $FLR_{SA4} = 0,61$ mm ist im Vergleich zum Standardanschliff ($K_1 = 50^\circ$, $K_2 = 120^\circ$) mit $FLR_{SA4} = 0,86$ mm deutlich kleiner (**Abbildung 83**). Der Führungsleistenrückversatz nimmt in der Anbohrphase sowie im stationären Bohrprozess unter Axiallast signifikanten Einfluss auf die Verkippung des Bohrkopfes über die unterhalb der Schneide gelegene Führungsleiste am Werkzeugrückfen [Stü83]. Zudem sind die angreifenden Passivkräfte bei großen Einstellwinkeln an der Außenschneide und kleineren Einstellwinkeln an der Innenschneide geringer. Eine reduzierte Durchbiegung des Werkzeuges führt zu geringeren

Abweichungen im Bohrungsdurchmesser und einem verringerten Mittenerlauf. Der erzielte mittlere Bohrungsdurchmesser unter Verwendung des Standardanschliffes liegt innerhalb der ISO-Toleranz IT7, wogegen der eingesetzte Sonderanschliff SA4 Genauigkeiten innerhalb der ISO-Toleranz IT4 erreicht.

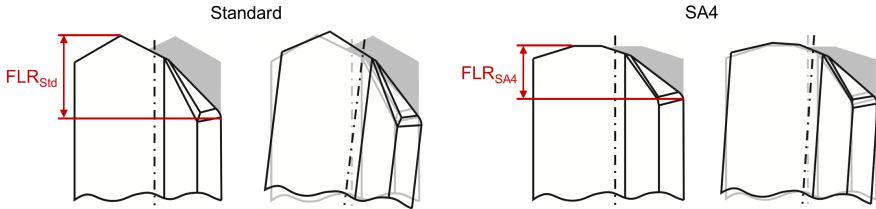


Abbildung 83: Verhältnis zwischen Führungsleistenrückversatz (FLR) und Bohrkopfverkipfung

Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch den geringeren Führungsleistenrückversatz bei Einsatz des Sonderanschliffes SA4, insofern Nachschleifzyklen in der industriellen Anwendung vorgesehen sind. Beim stirnseitigen Nachschleifen wird die Schneidenecke bei konstanter Konizität weniger axial zurückgesetzt, und es lassen sich häufigere Nachschleifzyklen mit geringeren Abweichungen im Bohrungsdurchmesser erzielen. Hinsichtlich der Rundheit sind unter Einsatz aller Einlippentiefbohrer unabhängig vom Schneidenanschliff Genauigkeiten innerhalb der ISO-Toleranz IT6 erzielt worden. Der erhöhte Mittelwert in der Kreisformtreue des Standardanschliffes resultiert aus dem unmittelbar voranschreitenden Verschleiß der Schneidenspitze vor dem vorzeitigen Werkzeugversagen. Des Weiteren sind in **Abbildung 84** die erzielten Oberflächenqualitäten für die unterschiedlichen Schneidenanschliffe gegeneinander aufgetragen.

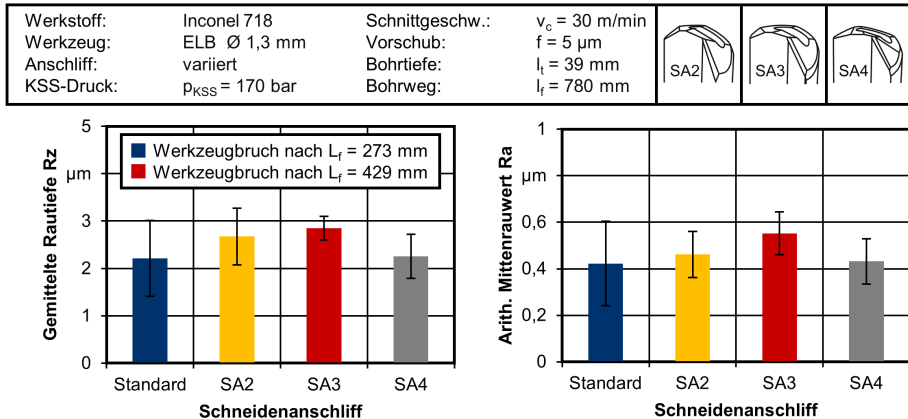


Abbildung 84: Einfluss des Schneidenanschliffes auf die Oberflächenqualität

Die erzielbare Oberflächengüte beim Einlippentiefbohren von schwer zerspanbaren Nickelbasislegierungen ist generell durch den ausgeprägten abrasiven und adhäsiven Verschleiß der Führungsleiste und der Rundschliffase limitiert. Aufgrund der Selbstführung und Abstützung des Bohrkopfes im stationären Bohrprozess an der Bohrungswand spiegelt sich der Verschleißzustand der Führungsleiste unmittelbar in der resultierenden Oberflächengüte wider. Die Mittelwerte der gemittelten Rautiefe und des arithmetischen Mittenrauwertes liegen für die unterschiedlichen Schneidenanschliffe zwischen Rz = 2 ... 3 µm und Ra = 0,4 ... 0,6 µm. Aus der unvorteilhaften Spanbildung in Form einer Kombination aus Kalt- und Wendespan resultieren etwas schlechtere Kennwerte beim Sonderanschliff SA3.

7.3 Analyse des Kühlschmierstoffeinflusses

Im Rahmen weiterer Untersuchungen wird das Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 unter Variation des Kühlschmierstoffes betrachtet. Aufgrund des hohen thermomechanischen Belastungskollektives auf die Werkzeugschneiden und Kontaktelemente am Werkzeugumfang existieren beim Tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 besondere Anforderungen an die Kühl- und Schmierwirkung des ausgewählten Hilfsstoffes. In den Versuchen wird daher neben dem Einsatzverhalten eines paraffinbasierten Mineralöls die Leistung eines aktiv geschwefelten, synthetischen Esteröls, das durch seine polare chemische Struktur ein besseres Schmiervermögen kennzeichnet, getestet. Beide Kühlschmierstoffe besitzen eine kinematische Viskosität von $\nu = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ und werden mit einem Druck von $p_{\text{KSS}} = 170 \text{ bar}$ und einem Volumenstrom von etwa $\dot{V} = 0,7 \text{ l/min}$ durch den Kühlschmierstoffkanal zur Wirkstelle befördert. Bei der Gegenüberstellung kommt die optimierte Schneidengestalt SA4 unter konstanten Schnittdaten von $v_c = 30 \text{ m/min}$ und $f = 5 \text{ }\mu\text{m}$ zum Einsatz. **Abbildung 85** zeigt den Kühlschmierstoffeinfluss auf die mechanischen Werkzeugbelastungen.

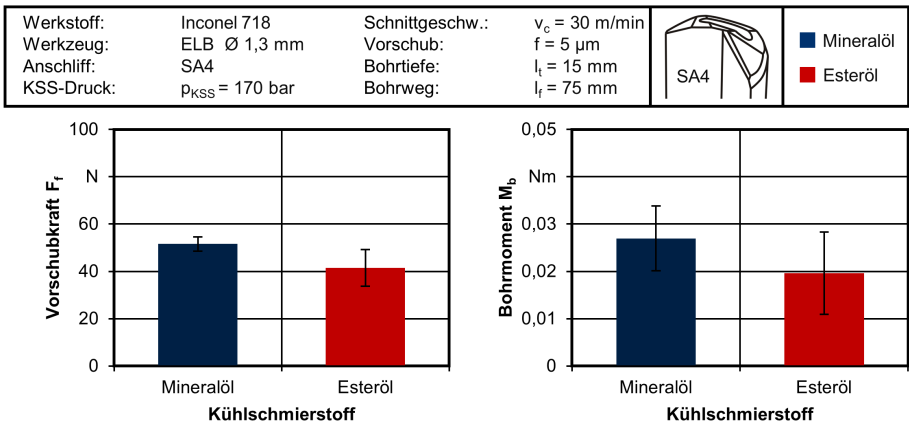



Abbildung 85: Mechanische Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Die infolge der hohen Polarität und Aktivschwefelung des Esteröls verbesserte Schmierwirkung bewirkt eine Reduzierung der mechanischen Werkzeugbelastungen. Die gemittelte Vorschubkraft ist unter Einsatz des Esteröls mit $F_f = 42 \text{ N}$ deutlich geringer als unter Mineralöl mit $F_f = 52 \text{ N}$. Die geringere Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück begünstigt auch eine Reduzierung des gemittelten Bohrmomentes um etwa 25 % von $M_b = 0,027 \text{ Nm}$ auf $M_b = 0,020 \text{ Nm}$. Bei der Gesamtbetrachtung sind allerdings die größeren Standardabweichungen beim Einsatz des Esteröls zu berücksichtigen.

In einem weiteren Schritt wird der Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die Spanbildung analysiert. Hierzu werden in den Einsatzversuchen in regelmäßigen Intervallen des Bohrweges erzeugte Späne fotografiert, um gleichzeitig einen möglichen Zusammenhang mit der Verschleißentwicklung in Abhängigkeit des eingesetzten Kühlschmierstoffes herzustellen. Im Hinblick auf die Spanformung ist dagegen kein Einfluss des Tiefbohröls auszumachen. Über den gesamten Bohrweg von $l_r = 780 \text{ mm}$ werden unter Verwendung des Mineralöls und des Esteröls stark gewendelte Späne mit einer geringen Anzahl von Wendungen und einer Länge von $l_{\text{sp}} = 0,7 \dots 1,7 \text{ mm}$ erzeugt (**Abbildung 86**). Die Späne lassen sich in beiden Versuchen prozesssicher und störungsfrei entlang der Werkzeugsicke aus der Bohrung abtransportieren. Auf den Einsatz der Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse wird an dieser Stelle aufgrund der hohen Übereinstimmung in den fotografischen Aufnahmen der Spanformung verzichtet.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30 \text{ m/min}$		<ul style="list-style-type: none"> ■ Mineralöl ■ Esteröl
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	$f = 5 \mu\text{m}$		
Anschliff:	SA4	Bohrtiefe:	$l_f = 39 \text{ mm}$		
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 780 \text{ mm}$		

Bohrweg l_f

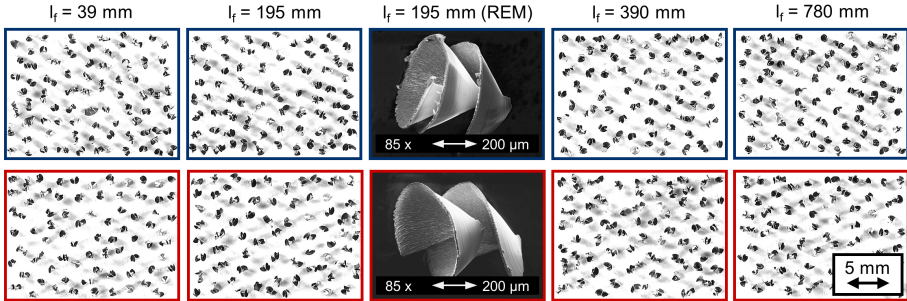


Abbildung 86: Spanformung in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Weiterhin erfolgt eine Analyse des Einflusses des Kühlschmierstoffes auf den Werkzeugverschleiß. In **Abbildung 87** sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und energiedispersive Röntgenspektroskopien der unter Mineral- und Esteröl eingesetzten Werkzeuge nach einem Bohrweg von $l_f = 780 \text{ mm}$ gegenübergestellt. Unter Verwendung beider Tiefbohrhölle stellt sich ein starker abrasiver Schneidkantenverschleiß und eine deutliche Verrundung der Schneidenecke ein. Darüber hinaus kommt es unabhängig vom Kühlschmierstoff zu Materialanhaftungen auf der Spanfläche. Hierbei ist beim unter Esteröl eingesetzten Werkzeug eine größere Anhaftung eines abgelaufenen Spans im Bereich der Schneidenecke zu erkennen. Vorteile im Verschleißverhalten zeigt die Verwendung des aktiv geschwefelten Esteröls jedoch in der direkten Gegenüberstellung der energiedispersiven Röntgenspektroskopien der Führungsleisten. Die hervorragende Schmierfähigkeit resultiert in einer Reduzierung der Reibung und einem geringeren Adhäsivverschleiß am Führungsleistenauslauf in axialer und radialer Richtung. Zudem treten im Gegensatz zum Einsatz unter Mineralöl keine Aufschmierungen an der axialen Einlauffase auf Höhe des Führungsleisteneinlaufs und des Übergangs zum Sickenrücken auf.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30 \text{ m/min}$	EDX-Analyse <ul style="list-style-type: none"> ■ W ■ Fe ■ Al
Werkzeug:	ELB Ø 1,3 mm	Vorschub:	$f = 5 \mu\text{m}$	
Anschliff:	SA4	Bohrtiefe:	$l_f = 39 \text{ mm}$	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$	Bohrweg:	$l_f = 780 \text{ mm}$	

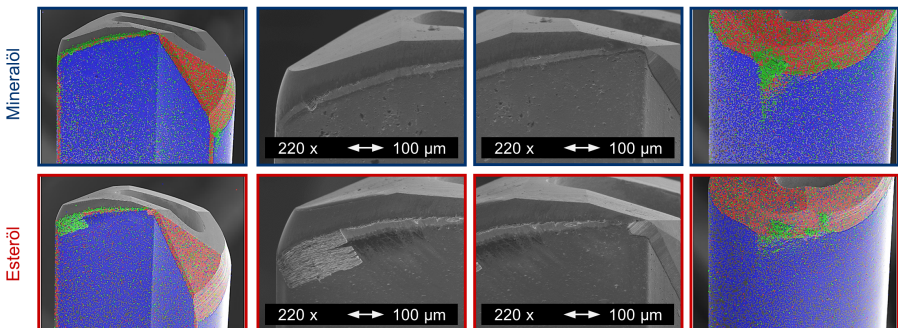



Abbildung 87: Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Der verminderte adhäsive Werkzeugverschleiß wird dabei neben dem verbesserten Schmiervermögen auch durch eine höhere Wärmeabfuhr, die bei der Zerspanung der Nickelbasislegierung Inconel 718 aufgrund der extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit und der daraus resultierenden hohen thermischen Belastungen an den Kontaktelementen von besonderer Bedeutung ist, begünstigt. Diesbezüglich besitzen hochdruckstabile synthetische Esteröle ein ausgezeichnetes Luftabscheidungsvermögen und nehmen im Vergleich zu Mineralölen deutlich weniger Luft auf. Der Lufteintrag ist insbesondere beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern bedingt durch hohe Kühlschmierstoffdrücke und Spindeldrehzahlen von großer Relevanz. Die eingeschlossene Luft im Tiefbohröl resultiert in einer wesentlichen Verschlechterung der Kühlwirkung [Fre09, Mec13]. Ferner enthält das eingesetzte paraffinische Mineralöl passive Hochleistungsadditive in Form inaktiver Schwefelverbindungen, die ihre volle Schmierwirkung erst bei Überschreiten einer thermomechanischen Grenzbelastung entfalten. Hingegen liegt bei Verwendung des aktiv geschwefelten Esteröls eine hohe Schmierwirkung auch bei geringeren Druckbelastungen und lokalen Temperaturen in der Kontaktzone zwischen Führungsleiste und Bohrungswand sowie Rundschliffase und Bohrungswand vor.

Ergänzend wird die Entwicklung des Freiflächenverschleißes in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes über den Bohrweg bestimmt. **Abbildung 88** zeigt die Verläufe der mittleren und maximalen Verschleißmarkenbreite über den Bohrweg von $l_f = 780$ mm. Die gemessenen Verschleißmarkenbreiten liegen beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit einem Esteröl unterhalb der Charakteristik des Mineralöls. Die Unterschiede in der mittleren und maximalen Verschleißmarkenbreite sind dennoch marginal, was sich mit der homogenen abrasiven Verrundung der Schneidkanten beider Werkzeuge deckt.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	
Werkzeug:	ELB \varnothing 1,3 mm	Vorschub:	$f = 5$ μ m	
Anschliff:	SA4	Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	
KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	

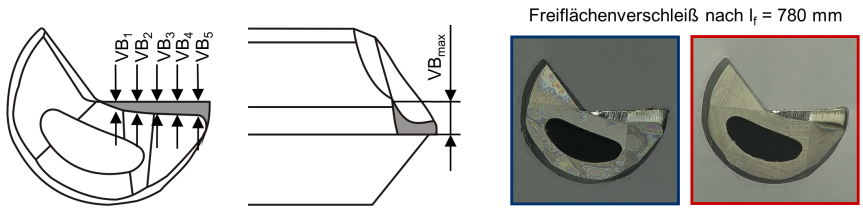
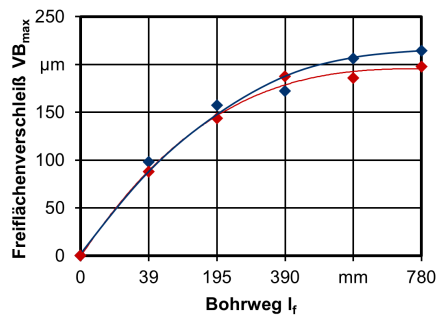
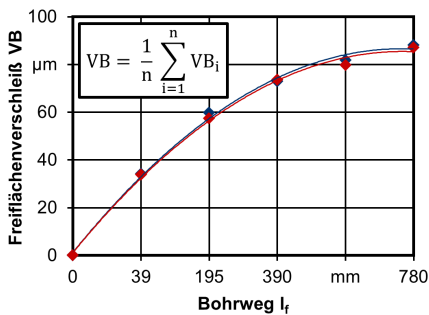


Abbildung 88: Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes

Des Weiteren wird der Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die Bohrungsqualität hinsichtlich der Maß- und Formtoleranzen sowie der Oberflächengüte ausgewertet. In **Abbildung 89** sind die Mittelwerte des Bohrungsaustrittsdurchmessers, der Kreisformtreue und des Mittenverlaufs für das Einlippentiefbohren unter Verwendung des Mineral- und Esteröls gegeneinander aufgetragen.

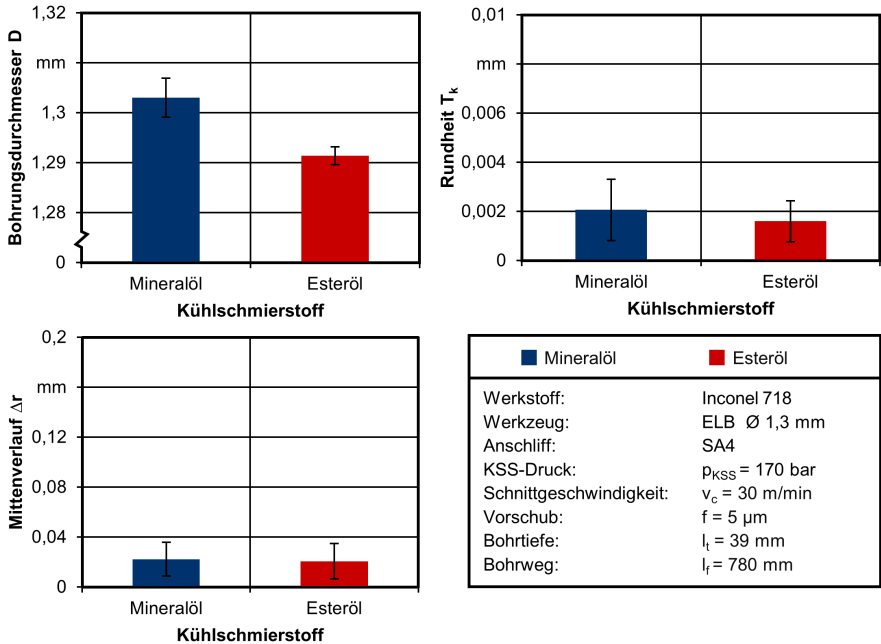


Abbildung 89: Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die Maß- und Formtoleranzen

Unter Verwendung des Esteröls wird ein geringerer gemittelter Bohrungsaustrittsdurchmesser in der ISO-Toleranz IT7 produziert. Der mittlere Durchmesser beim Einlippentiefbohren mit Mineralöl liegt dagegen über dem Nennmaß in der ISO-Toleranz IT5. Eine Erklärung für die Durchmesserdiffenz liefert eine genaue Betrachtung des Werkzeugverschleißes. **Abbildung 90** erklärt den Zusammenhang zwischen adhäsiven Materialaufschmierungen am Werkzeugumfang und den resultierenden Maßtoleranzen.

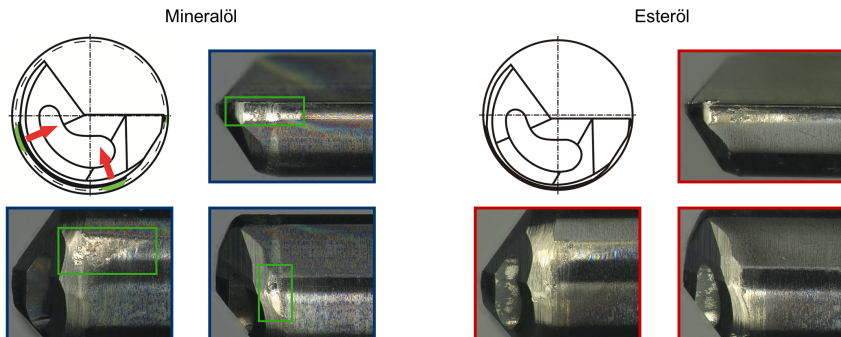



Abbildung 90: Zusammenhang zwischen Materialaufschmierungen und den resultierenden Maßtoleranzen

Die lichtmikroskopischen Verschleißaufnahmen verdeutlichen, dass es beim Einlippentiefbohren mit Mineralöl zu deutlich stärkeren adhäsiven Materialanhaftungen am Führungsleisteneinlauf und -auslauf sowie an der Rundschliffase kommt. In diesen exponierten Bereichen treten im Anbohrvorgang und im stationären Bohrprozess die höchsten Belastungen auf. Im Anbohrvorgang wird aufgrund des Übermaßes der Anbohrbuchse zuerst eine etwas kleinere Bohrung gegenüber dem Werkzeugdurchmesser erzeugt. Die rückversetzten Führungsleisten müssen sich anschließend in die kleinere Bohrung hineinzwängen, woraus hohe Druckbelastungen auf die Einlauffase der Führungsleiste und die Rundschliffase resultieren [Zwi74]. Die massiven Aufschmierungen beim Einlippentiefbohren mit Mineralöl drücken das Werkzeug aus der Mitte. Infolgedessen hat die Schneidenecke einen größeren Flugkreis, und das Werkzeug erzeugt einen größeren Bohrungsdurchmesser. Beim Einlippentiefbohren mit Esteröl haben sich hingegen nur geringe Aufschmierungen gebildet. Der Einlippenbohrer wird in die freigeschliffene Öltasche gegenüber der Schneidenecke gedrückt und produziert, charakteristisch für den Einsatz von Werkzeugen mit der Umfangform G, Bohrungen unter Nennmaß. Die verringerten Anhaftungen beim Einlippentiefbohren mit Esteröl begünstigen zudem eine leicht verbesserte Kreisformtreue in der ISO-Toleranz IT3 gegenüber dem Tiefbohren unter Mineralöl mit Rundheitsgenauigkeiten in der ISO-Toleranz IT4. Auf den Mittenverlauf übt die Wahl des Kühlschmierstoffes dagegen kaum einen Einfluss aus. Durch den Einsatz des angepassten Sonderanschliffes SA4 können unter Verwendung des Mineral- und Esteröls sehr geringe Mittenverläufe erzielt werden. Im weiteren Verlauf der Analyse wurde die Oberflächenqualität ausgewertet. **Abbildung 91** gibt einen Überblick über die Entwicklung der Messwerte über den gesamten Bohrweg und entsprechende Mittelwerte in Abhängigkeit des Kühlschmierstoffes.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	$v_c = 30 \text{ m/min}$		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="color: blue;">■</div> Mineralöl </div> <div style="color: red;">■</div> Esteröl
------------	-------------	-----------------	--------------------------	---	---

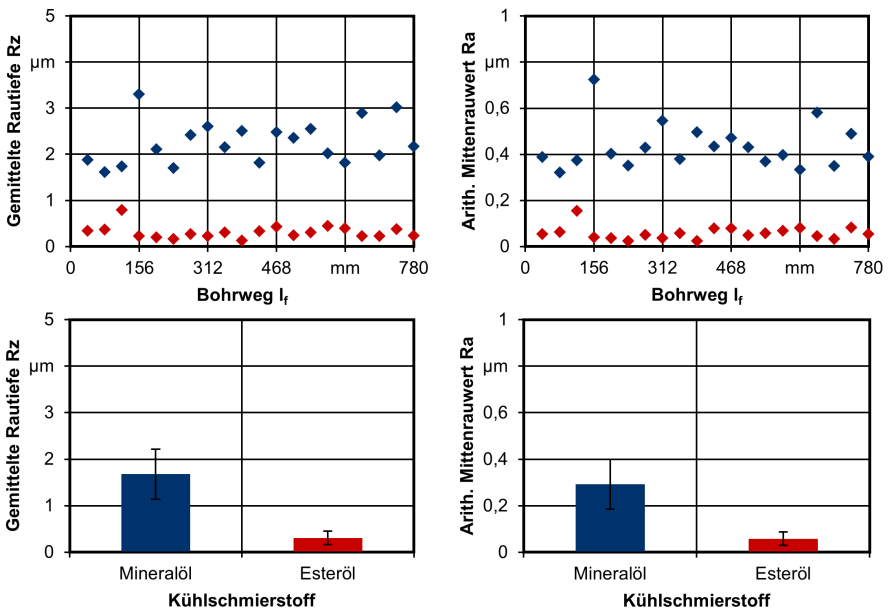


Abbildung 91: Einfluss des Kühlschmierstoffes auf die Oberflächenqualität

Das überlegene Schmier- und Kühlvermögen und die damit einhergehende Reduzierung der adhäsiven Materialaufschmierungen beim Einlippentiefbohren unter Verwendung des Esteröls führen zu einer deutlichen Steigerung der erzielbaren Oberflächengüte. Die gemittelte Rautiefe und der arithmetische Mittenrauwert sind mit $R_z = 0,31 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,06 \mu\text{m}$ um etwa den Faktor 5 geringer gegenüber den Kennwerten beim Einlippentiefbohren mit Mineralöl ($R_z = 1,68 \mu\text{m}$, $R_a = 0,29 \mu\text{m}$). Die erzeugten Oberflächengüten sind unter Verwendung beider Tiefbohrer über den Bohrweg von $l_f = 780 \text{ mm}$ nahezu konstant. Lediglich beim Einlippentiefbohren mit Mineralöl deutet sich eine leichte Verschlechterung der gemittelten Rautiefe mit zunehmendem Bohrweg an. Eine Begründung für die konstante Qualität liefert das Wechselspiel aus Verschleiß und mechanischen Werkzeugbelastungen. Der fortschreitende abrasive und adhäsive Verschleiß der Führungsleisten und der Rundschliffase ziehen eine Verschlechterung der Oberflächengüte nach sich. Demgegenüber steigen jedoch, bedingt durch die zunehmende abrasive Verwindung der Schneidkanten, die Prozesskräfte, die höhere Führungsleistennormalkräfte und eine stärkere Einglättung von unebenen Profildbereichen auf der Bohrungswand nach sich ziehen.

7.4 Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte

Die abschließenden Untersuchungen zum Tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern umfassen einen Verfahrensvergleich zum Einlippen- und Wendeltiefbohren. Neben einem Einlippenbohrer mit modifizierter Schneidengestalt (Sonderanschiff SA4) kommen Wendeltiefbohrer mit 4-Flächenanschliff und Negativfase zur Stabilisierung der Schneidenecke zum Einsatz. Um eine gute Abstützung der Wendeltiefbohrer im Kopfbereich auch bei hohen mechanischen Werkzeugbelastungen zu gewährleisten, sind die Werkzeuge mit zwei Führungsfasen je Schneide versehen. Zudem kennzeichnet die Wendeltiefbohrer ein Spitzenwinkel von $\sigma = 140^\circ$ und ein Seitenspanwinkel bzw. Drallwinkel der Spannuten von $\gamma_s = \varphi = 25^\circ$. In einem ersten Schritt wird der Einfluss der Zustelltiefe auf die Spannung beim Wendeltiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 untersucht. Dabei wird sukzessive die Zustelltiefe der Entspanzyklen ($z = 0,5; 1; 2; 4; 8$ und 39 mm) erhöht (**Abbildung 92**).

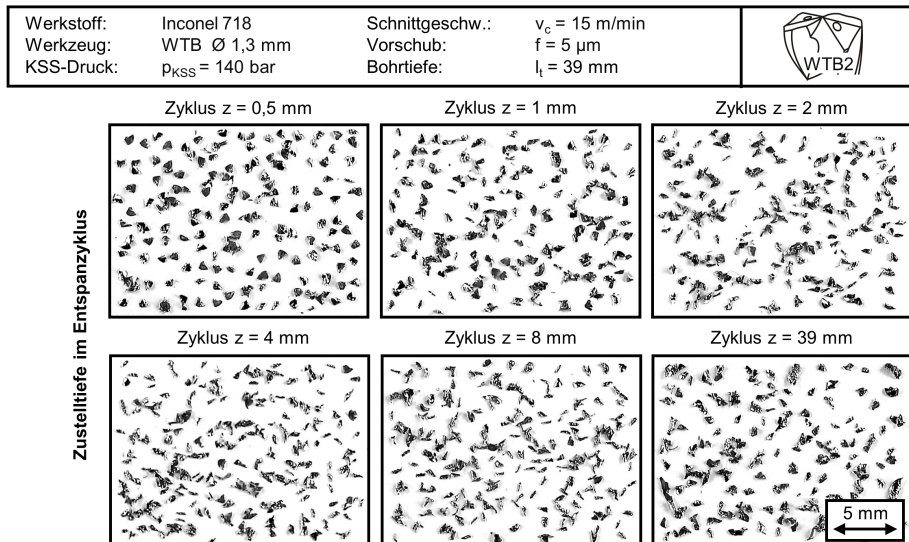

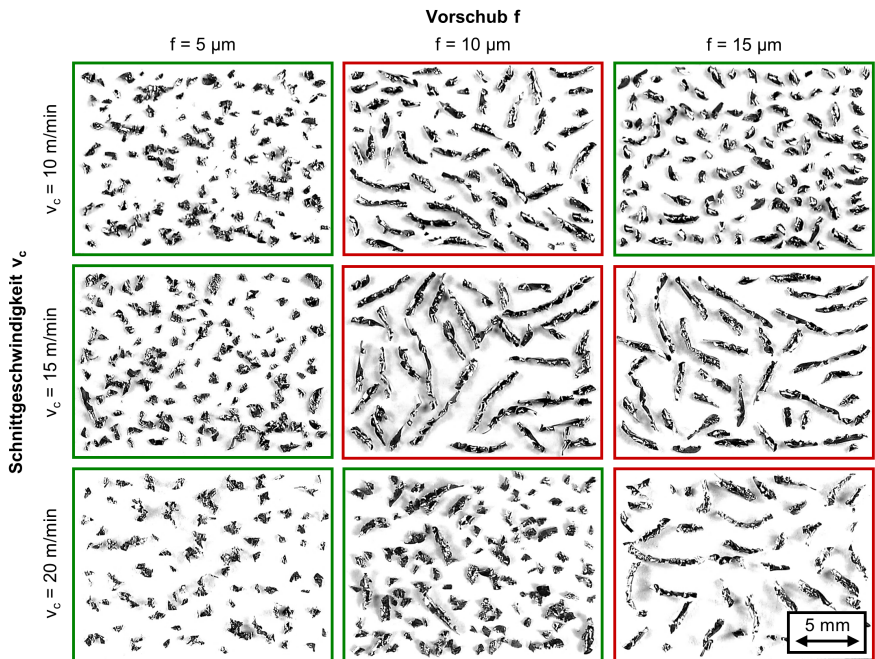


Abbildung 92: Einfluss der Zustelltiefe im Entspanzyklus auf die Spannung beim Wendeltiefbohren [Bie14c]

Das Wendeltiefbohren unter Variation der Zustelltiefe erfolgt, basierend auf den Empfehlungen des Werkzeugherstellers, mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 15$ m/min und einem Vorschub $f = 5$ μm . Der Kühlschmierstoffdruck wird in den Untersuchungen zum Wendeltiefbohren von Inconel 718 mit $p_{\text{KSS}} = 140$ bar konstant gehalten. Bei Betrachtung der Spanformen für die Variation der Zustelltiefen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Auch beim Wendeltiefbohren mit konstanter Vorschubbewegung ohne Entspannen entstehen kurze Bröckelspäne mit einer mittleren Spanlänge von $l_{\text{sp}} = 1,4$ mm, die sich über die gesamte Bohrtiefe von $l_t = 39$ mm sicher abführen ließen. Zudem liegt keine kritische thermische Werkzeugbelastung vor. Das Wendeltiefbohren von Inconel 718 verlangt somit keine Einbindung von unproduktiven Nebenzeiten, um die Späne zu brechen und abzutransportieren [Bie14c].

Im Anschluss werden die optimalen Schnittdaten für das Wendeltiefbohren von Inconel 718 bestimmt, wozu die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub im Bereich von $v_c = 10 \dots 20$ m/min und $f = 5 \dots 15$ μm dreistufig variiert wurden. Alle Versuche verfolgen die Realisierung eines festgelegten Bohrweges von $l_t = 780$ mm, was einer Bearbeitung von 20 Bohrungen entsprach. Zur Führung der Wendeltiefbohrer im Anbohrvorgang werden in einem vorgeschalteten Bearbeitungsschritt Pilotbohrungen erzeugt. In **Abbildung 93** ist die Korrelation zwischen Spanformung und Bohrweg dargestellt.

Werkstoff:	Inconel 718	Schnittgeschw.:	variiert	
Werkzeug:	WTB \varnothing 1,3 mm	Vorschub:	variiert	
Anschliff:	WTB2	Bohrtiefe:	$l_t = 39$ mm	
KSS-Druck:	$p_{\text{KSS}} = 140$ bar	Bohrweg:	variiert	



■ Bohrweg von $l_t = 780$ mm wurde erreicht

■ Vorzeitiges Werkzeugversagen

Abbildung 93: Korrelation zwischen Spanformung und Bohrweg in Abhängigkeit der Schnittdaten beim Wendeltiefbohren [Bie14c, Bie16]

Es zeigt sich, dass die Entstehung kurzer Späne das notwendige Kriterium für ein prozesssicheres Wendeltiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern ist. Bei Entstehung längerer Fließspäne kommt es bereits nach einem kurzen Bohrweg zu Spanklemmern, die ein unmittelbares Werkzeugversagen zur Folge haben. Unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit bei der Verwendung eines geringen Vorschubes von $f = 5 \mu\text{m}$ sowie der Kombination aus einem mittleren Vorschub von $f = 10 \mu\text{m}$ und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20 \text{ m/min}$ entstehen kurze Späne, und der festgelegte Bohrweg von $l_f = 780 \text{ mm}$ wird erreicht. Zudem liegen bei der Kombination aus $v_c = 10 \text{ m/min}$ und $f = 15 \mu\text{m}$ ein günstiges Spanbildungsverhalten vor [Biel4c, Biel6].

Nach Abschluss der Vorversuche zum Wendeltiefbohren erfolgt der Verfahrensvergleich zum Einlippentiefbohren. Zur Gegenüberstellung werden für das Wendeltiefbohren zwei verschiedene Schnittdaten, die zu einem identischen Produktivität bzw. Vorschubgeschwindigkeit zum Einlippentiefbohren ($v_f = 36,7 \text{ mm/min}$) und zum anderen die maximale Produktivität ($v_f = 48,9 \text{ mm/min}$) liefern, herangezogen. Das Einlippentiefbohren unter Einsatz des Sonderanschliffes SA4 wird mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 30 \text{ m/min}$ und einem Vorschub $f = 5 \mu\text{m}$ ($v_f = 36,7 \text{ mm/min}$) durchgeführt.

Abbildung 94 gibt einen Überblick über die erfassten mechanischen Werkzeugbelastungen.

Werkstoff:	Inconel 718		ELB	WTB	◆ ELB ◆ WTB ◆ WTB	
Werkzeug:	ELB/WTB $\varnothing 1,3 \text{ mm}$		Schnittgeschw.:	$v_c = 30 \text{ m/min}$		$v_c = 10/20 \text{ m/min}$
Bohrtiefe:	$l_f = 39 \text{ mm}$		Vorschub:	$f = 5 \mu\text{m}$		$f = 15/10 \mu\text{m}$
Bohrweg:	$l_f = 780 \text{ mm}$		KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$		$p_{KSS} = 140 \text{ bar}$

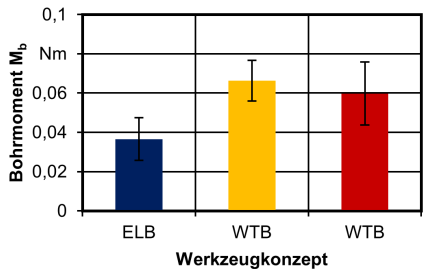
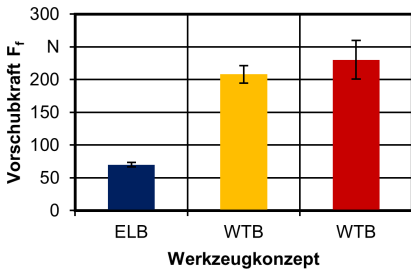
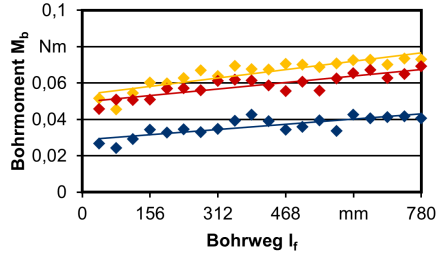
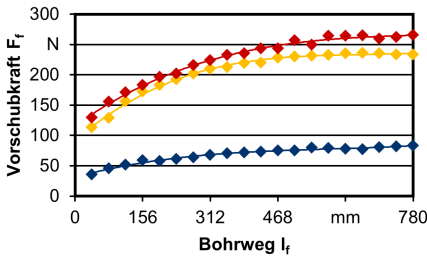


Abbildung 94: Mechanische Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Die Vorschubkräfte und Bohrmomente sind beim Wendeltiefbohren konzeptbedingt deutlich höher als beim Einlippentiefbohren. Im Werkzeugzentrum kommt es aufgrund der geringen lokalen Schnittgeschwindigkeiten und der negativen Spanwinkel an der Querschneide zu starken Quetsch- und Reibvorgängen. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit beim Wendeltiefbohren führt dabei zu einem Anstieg der Vorschubkraft. Durch die Verdopplung der Schnittgeschwindigkeit und die Reduzierung des Vorschubes pro Umdrehung werden gleichzeitig das Fließspanungsverhalten und die Größe des Zerspanungsquerschnittes verändert, wodurch das resultierende Bohrmoment geringer ausfällt. Die

Vorschubkräfte nehmen unter Anwendung beider Tiefbohrverfahren degressiv um etwa 100 % zu. Eine Erklärung für diese Entwicklungen liefern die Messungen der Schneidkantenverrundungen. **Abbildung 95** zeigt die Verläufe der gemessenen Schneidkantenradien sowie Aufnahmen der Schneidkantengestalt im Neuzustand und im verschlissenen Zustand. Durch den starken Abrasivverschleiß, bedingt durch die hohe Werkstofffestigkeit und die harten Karbid- und Nitrid-Ausscheidungen im Gefüge, nehmen die Schneidkantenradien von $r_b = 6 \dots 8 \mu\text{m}$ im Neuzustand auf $r_b = 19 \dots 28 \mu\text{m}$ und somit auch das Verhältnis aus Schneidkantenradius zu Spanungsdicke über den Bohrweg von $l_f = 780 \text{ mm}$ signifikant zu. Infolgedessen erfolgt die Spanbildung vollständig im Bereich der Schneidkantenverrundung, und es kommt verstärkt zum Ploughing-Effekt. Eine Zunahme der Schnitt- und Vorschubkräfte mit steigendem Verhältnis aus Schneidkantenverrundung zu Spanungsdicke konnte auch von *Klocke et al.* und *Risse* in ihren Untersuchungen zu Skalierungseffekten des Werkzeugdurchmessers beim Mikrowendelbohren von Stahl beobachtet werden [Klo09, Ris06]. Die geringere abrasive Verrundung beim Einlippentiefbohren unter Einsatz des Sonderanschliffes SA4 resultiert dabei aus der höheren Kantenstabilität durch den größeren Keilwinkel und die deutlich geringeren mechanischen Werkzeugbelastungen.

Werkstoff:	Inconel 718	ELB	WTB	◆ ELB
Werkzeug:	ELB/WTB $\varnothing 1,3 \text{ mm}$	Schnittgeschw.:	$v_c = 30 \text{ m/min}$	◆ WTB
Bohrtiefe:	$l_t = 39 \text{ mm}$	Vorschub:	$f = 5 \mu\text{m}$	◆ WTB
Bohrweg:	$l_f = 780 \text{ mm}$	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170 \text{ bar}$	◆ WTB
			$v_c = 10/20 \text{ m/min}$	
			$f = 15/10 \mu\text{m}$	
			$p_{KSS} = 140 \text{ bar}$	

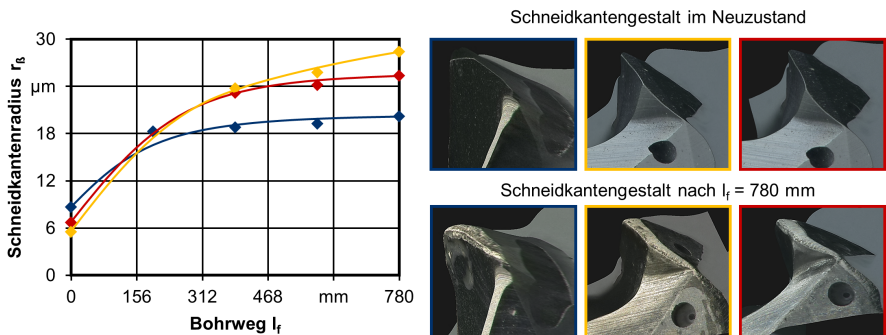


Abbildung 95: Entwicklung der Schneidkantenradien mit zunehmendem Bohrweg in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Zusätzlich werden in den Untersuchungen die erzeugten Späne in regelmäßigen Abständen gesammelt und die Entwicklung der Spanformung festgehalten (**Abbildung 96**). Die Verwendung des Sonderanschliffes SA4 beim Einlippentiefbohren begünstigt eine homogene Spanformung. Über den gesamten Bohrweg werden hierbei kurze Späne, charakterisiert durch wenige Wendungen und eine maximale Spanlänge von $l_{sp,max} = 2,0 \text{ mm}$, produziert. Beim Wendeltiefbohren mit den eingestellten Schnittdaten $v_c = 10 \text{ m/min}$ und $f = 15 \mu\text{m}$ entstehen zunächst dickere Spanlocken, die mit fortschreitendem Verschleiß in stark gequetschte und längere Spanformen ($l_{sp,max} = 3,7 \text{ mm}$) übergehen. Beim Wendeltiefbohren mit höherer Produktivität ($v_c = 20 \text{ m/min}$ und $f = 10 \mu\text{m}$) sind zu Beginn des Versuches ebenso überwiegend kurze Spanlocken angefallen. Ab einem Bohrweg von $l_f = 390 \text{ mm}$ bilden sich jedoch in Folge des zunehmenden Verhältnisses aus Schneidkantenverrundung zu Spanungsdicke vermehrt Späne mit einer Länge von bis zu $l_{sp,max} = 9,6 \text{ mm}$, die die Prozesssicherheit enorm einschränken und sich in einer erhöhten Standardabweichung im Bohrmoment widerspiegeln. Die durchgeführten Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalysen zum Wendeltiefbohren von Inconel 718 liefern keine verwertbaren Ergebnisse. Durch die fehlende Werkzeugrotation zum Zwecke des Spanabtransportes kommt es bereits vor Erreichen des stationären Bohrprozesses zu einem Zusetzen der Spannuten.

Werkstoff:	Inconel 718	ELB	WTB	◆ ELB	
Werkzeug:	ELB/WTB Ø 1,3 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	$v_c = 10/20$ m/min	◆ WTB
Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	$f = 15/10$ µm	◆ WTB
Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	$p_{KSS} = 140$ bar	◆ WTB

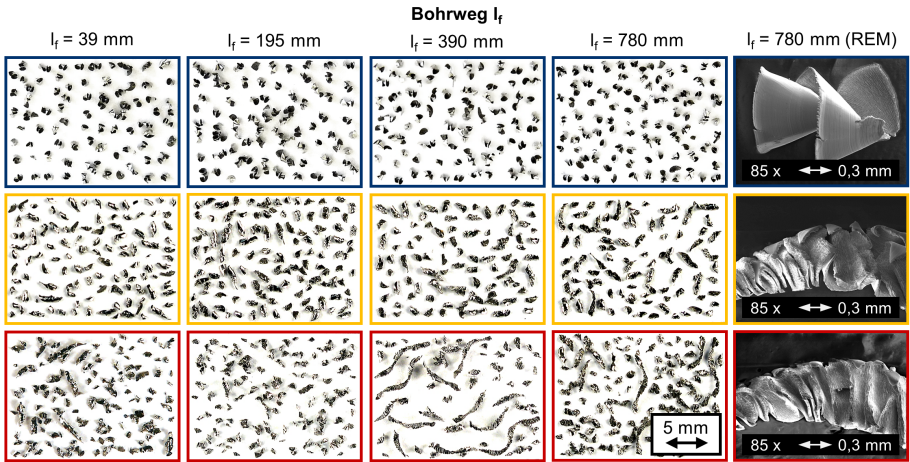


Abbildung 96: Entwicklung der Spanformung über den Bohrweg in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Des Weiteren ist in **Abbildung 97** der Werkzeugverschleiß für die fokussierten Untersuchungen zu beiden Tiefbohrverfahren anhand rasterelektronen- und lichtmikroskopischer Analysen gegenübergestellt.

Werkstoff:	Inconel 718	ELB	WTB	EDX	
Werkzeug:	ELB/WTB Ø 1,3 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	$v_c = 10/20$ m/min	■ W
Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	$f = 15/10$ µm	■ Fe
Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	$p_{KSS} = 140$ bar	■ Al

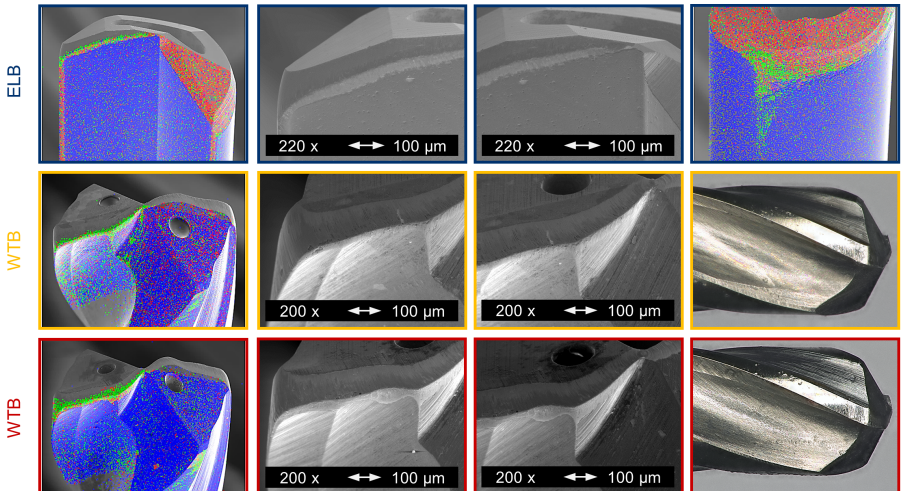


Abbildung 97: Resultierender Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Bei Anwendung beider mechanischen Tiefbohrverfahren ist ein starker abrasiver und adhäsiver Werkzeugverschleiß zu beobachten. Hartmetallausrüche sind bei keinem Werkzeug festzustellen. Die scharfen Schneidkanten der drei Teilschneiden beim Einlippentiefbohren wie auch der primären und sekundären Hauptschneide sowie der Querschneide beim Wendeltiefbohren sind durch einen massiven Abrasivverschleiß stark verrundet. Die Werkzeugbeschichtung ist in diesen Bereichen komplett abgetragen. Der Hartmetallabtrag nimmt über den Werkzeugradius zur Schneidenecke hin zu. Mithilfe der hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopie lassen sich zudem die Spuren bzw. Furchen der Hartphasen in Rotationsrichtung erkennen. Unterhalb der abrasiven Verrundungen lagern sich entlang der kompletten Schneidenbreite adhäsive Materialanhaftungen ab. Beim Einlippentiefbohren kommt es zudem am Führungsleistenauflauf zu einem ausgeprägten dreieckförmigen, axialen und radialen Führungsleistenverschleiß. Des Weiteren erstreckt sich ein abrasiver und adhäsiver Verschleiß über die gesamte Breite der Rundschliffphase. Beim Wendeltiefbohren unterliegen alle vier Führungsfasen einem abrasiven und adhäsiven Verschleiß. Als Ergänzung zeigt **Abbildung 98** die dokumentierten Entwicklungen des Freiflächenverschleißes für die Versuche zum Einlippen- und Wendeltiefbohren. Die degressiven Verläufe der mittleren Verschleißmarkenbreite beider Werkzeugkonzepte beschreiben dabei den gleichmäßig voranschreitenden Abrasivverschleiß. Bedingt durch die höheren mechanischen Werkzeugbelastungen kommt es beim Wendeltiefbohren zu einem größeren Hartmetallabtrag an den Schneidkanten und einem stärkeren Freiflächenverschleiß. Außerdem wird in den lichtmikroskopischen Freiflächenaufnahmen der Wendeltiefbohrer nach einem Bohrweg von $l_f = 780$ mm eine Ungleichmäßigkeit im Verschleiß der Hauptschneiden deutlich.

Werkstoff:	Inconel 718	ELB	WTB	◆ ELB	
Werkzeug:	ELB/WTB Ø 1,3 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	$v_c = 10/20$ m/min	◆ WTB
Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	$f = 15/10$ µm	◆ WTB
Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	$p_{KSS} = 140$ bar	◆ WTB

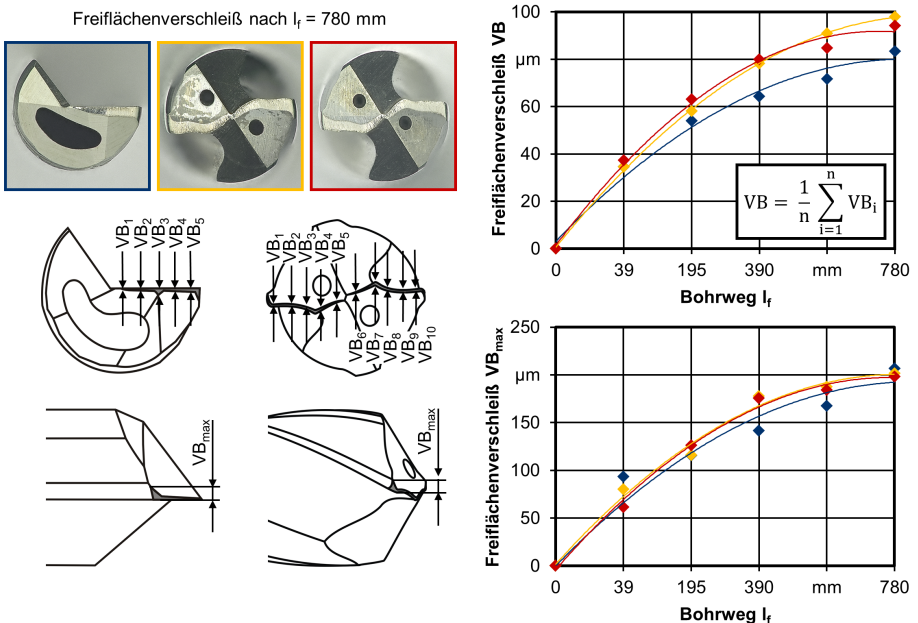


Abbildung 98: Resultierender Freiflächenverschleiß in Abhängigkeit des Werkzeugkonzeptes

Im Anschluss wird der Einfluss des Werkzeugkonzeptes auf die Bohrungsqualität betrachtet. Diesbezüglich stehen die Maß- und Formtoleranzen sowie die Oberflächenqualität im Fokus der Analysen. In **Abbildung 99** sind die erzeugten Bohrungsdurchmesser, die Kreisformtreue und der Mittenverlauf für die Versuche zum Einlippen- und Wendeltiefbohren gezeigt.

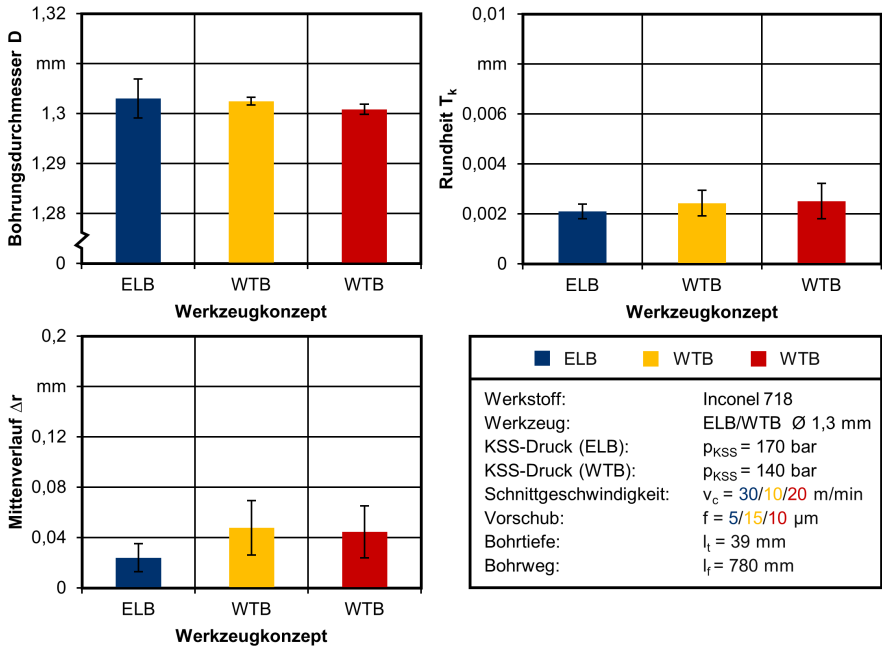


Abbildung 99: Einfluss des Werkzeugkonzeptes auf die Maß- und Formtoleranzen

In allen Versuchen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren werden sehr geringe Durchmesserabweichungen und eine hohe Kreisformtreue innerhalb der ISO-Toleranz IT4 erzielt. Die Versuche zum Wendeltiefbohren zeichnen sich dabei durch eine kleinere Streuung der Bohrungsdurchmesser aus. Hingegen erzielt das Einlippentiefbohren, begünstigt durch die Selbstführung des Bohrkopfes in der Bohrung, eine verbesserte Rundheit sowie deutliche Vorteile im Mittenverlauf. Die größere Konzentrität zwischen dem Bohrungseintritt und -austritt beim Einsatz der Wendeltiefbohrer resultiert aus den höheren Prozesskräften sowie dem ungleichmäßigen Verschleiß und der Asymmetrie der Hauptschneiden. Des Weiteren erzielt das Einlippentiefbohren Qualitätsvorteile in der gemittelten Rautiefe und dem arithmetischen Mittenrauwert (**Abbildung 100**). Der asymmetrische Werkzeugaufbau initiiert Führungsleistennormalkräfte, die eine Einebnung der Vorschubrillen und Unebenheiten auf der Bohroberfläche bewirken. Zum anderen weisen die Werkzeugkonzepte unterschiedliche Kühlschmierstoffvolumenströme und Beschichtungen auf. Die Fertigung höherer Oberflächengüten bei Verwendung einer AlTiN-Beschichtung, die beim Einlippentiefbohren zum Einsatz kommt, gegenüber Schichten auf AlCrN-Basis, die auf den Wendeltiefbohrern appliziert wird, konnten auch *Ucun et al.* in ihren Untersuchungen zum Einfluss der Werkzeugbeschichtung auf die Oberflächenqualität für die Mikrobearbeitung von Inconel 718 feststellen und führten dies auf die geringere Affinität zu chemischen Wechselwirkungen mit dem Werkstückmaterial zurück [Ucu14]. Eine Steigerung der Produktivität führt beim Wendeltiefbohren aufgrund des größeren Zeitspannvolumens und der größeren Spanlängen zu einer Verschlechterung der gemittelten Rautiefe und des arithmetischen Mittenrauwertes.

Werkstoff:	Inconel 718	ELB	WTB	◆ ELB	
Werkzeug:	ELB/WTB Ø 1,3 mm	Schnittgeschw.:	$v_c = 30$ m/min	$v_c = 10/20$ m/min	◆ WTB
Bohrtiefe:	$l_f = 39$ mm	Vorschub:	$f = 5$ µm	$f = 15/10$ µm	◆ WTB
Bohrweg:	$l_f = 780$ mm	KSS-Druck:	$p_{KSS} = 170$ bar	$p_{KSS} = 140$ bar	◆ WTB

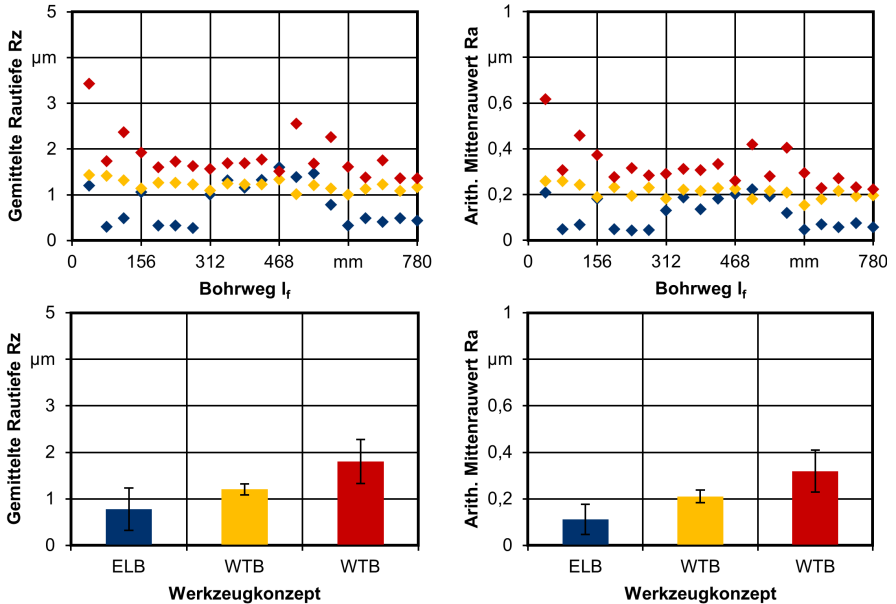


Abbildung 100: Einfluss des Werkzeugkonzeptes auf die Oberflächenqualität

In **Abbildung 101** sind abschließend die Oberflächentopographien der Bohrungswand nach einem Bohrweg von $l_f = 780$ mm für beide Werkzeugkonzepte dargestellt. In den mikroskopischen Aufnahmen finden sich die unterschiedlichen Profiltypen von tiefgebohrten Oberflächen wieder [Fuß86].

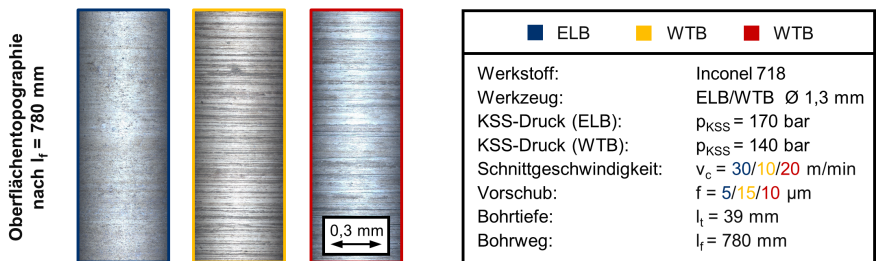


Abbildung 101: Bohrungstopographien unter Variation des Werkzeugkonzeptes

Die resultierende Oberflächentopographie beim Einlippentiefbohren ist durch die auftretenden Radialkräfte und die Einebnung der Rauheitsspitzen überwiegend geschlossen. Dagegen führt das Wendeltiefbohren zu teilweise geschlossenen und offenen Profilvereichen. Die Entstehung dieser Profilvereiche ist auf die Tatsache, dass die Spanntuten im Bohrprozess nicht rückstandsfrei freigespült werden, zurückzuführen. Die in den Nuten verbleibenden Späne furchen während der Werkzeugrotation beim Tiefbohren in Vorschubrichtung und des anschließenden Rückzuges die Bohrungswand.

8 Prozessgestaltung für das Tiefbohren von bainitischen Stählen und Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern

Das abschließende Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der wichtigsten Prozesskenngrößen zum Tiefbohren des betrachteten bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718. Basierend auf diesen Charakteristika werden Hinweise und Empfehlungen für eine optimale Prozessgestaltung von Tiefbohrprozessen hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe mit kleinsten Durchmessern formuliert. Diesbezüglich wird auf die Wahl der Schnittdaten, der Werkzeuggestalt und des Kühlschmierstoffes beim Einlippentiefbohren sowie auf die Vor- und Nachteile des Wendeltiefbohrens eingegangen.

8.1 Gegenüberstellung von charakteristischen Prozesskenngrößen

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Ergebnisse belegen den signifikanten Einfluss des zu zerspanenden Werkstoffes auf die charakteristischen Prozesskenngrößen beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern. Der bainitische Stahl 20MnCrMo7 und die Nickelbasislegierung Inconel 718 zeigen ein grundlegend unterschiedliches Zerspanverhalten (siehe Kapitel 6 und 7). In **Abbildung 102** sind die Unterschiede hinsichtlich des resultierenden Werkzeugverschleißes, der mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanbildung, der Oberflächenqualität sowie der erzielbaren Produktivität für einen beschichteten Einlippentiefbohrer (AlTiN; $s_d = 0,89 \mu\text{m}$) mit einem Werkzeugdurchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ und einem konventionellen Standardanschliff ($K_1 = 50^\circ$, $K_2 = 120^\circ$) gegenübergestellt. Das Einlippentiefbohren von 20MnCrMo7 und Inconel 718 erfolgt mit einer Schnittgeschwindigkeit und einem Vorschub von $v_c = 70 \text{ m/min}$ und $f = 20 \mu\text{m}$ bzw. $v_c = 30 \text{ m/min}$ und $f = 5 \mu\text{m}$. Der eingestellte Kühlschmierstoffdruck beträgt $p_{KSS} = 120 \text{ bar}$ bzw. $p_{KSS} = 140 \text{ bar}$. Beim Einlippentiefbohren der im Fokus stehenden Werkstoffe lässt sich dabei eine grundlegend unterschiedliche Intensität und Relevanz der Verschleißmechanismen feststellen. Infolge unterschiedlicher Verschleißerscheinungsformen liegen beim Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern abweichende Eingriffsbedingungen, welche in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung der Prozesskenngrößen stehen, über den jeweiligen Bohrweg vor.

Das Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 wird dominiert durch einen adhäsiven Werkzeugverschleiß auf der Spanfläche. Im Bereich der Schneidkanten bildet sich auf dem abrasiv freigelegten Hartmetall eine keilförmige Aufbauschneide. Die Aufbauschneidenbildung nimmt dabei bedingt durch den Schnittgeschwindigkeitsgradienten von der Schneidenecke zum Werkzeugzentrum hin ab. Der Abrasivverschleiß an den Schneidkanten besitzt trotz der hohen Materialfestigkeit und der harten Titanitrid- und Titankarbonitrid-Ausscheidungen von 20MnCrMo7 einen untergeordneten Einfluss auf das Einsatzverhalten. Die energiedispersiven Röntgenspektroskopien zeigen präparierte Querschliffe der Außenschneide im Neuzustand und im verschlissenen Zustand. Durch die zunehmende Aufbauschneidenbildung verändern sich die Spanwinkel beim Einlippentiefbohren von effektiven Spanwinkeln $\gamma_{\text{eff}} \leq 0^\circ$ zu effektiven Spanwinkeln $\gamma_{\text{eff}} > 0^\circ$. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ beträgt die Höhe der Aufbauschneide $h_a = 26 \mu\text{m}$, wodurch sich ein effektiver Spanwinkel von $\gamma_{\text{eff}} = 28^\circ$ einstellt. Infolgedessen fällt die Vorschubkraft von $F_f = 59,2 \text{ N}$ im Neuzustand regressiv über den Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ um etwa 20 % auf $F_f = 46,7 \text{ N}$ ab. Der allmählich fortschreitende Freiflächenverschleiß wirkt einem weiteren Abfall der Vorschubkraft entgegen. Nach dem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ wird eine mittlere Verschleißmarkenbreite von $VB = 49 \mu\text{m}$ auf der Freifläche entlang der Außen- und Innenschneide gemessen. Die Führungsleisten und die Rundschliffase unterliegen beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern hingegen keinem quanti-

fizierbaren, adhäsiven und abrasiven Verschleiß. Auch nach einer längeren Einsatzzeit weisen die Kontaktelemente am Werkzeugumfang eine intakte Werkzeugbeschichtung und keine adhäsiven Materialanhaftungen auf.

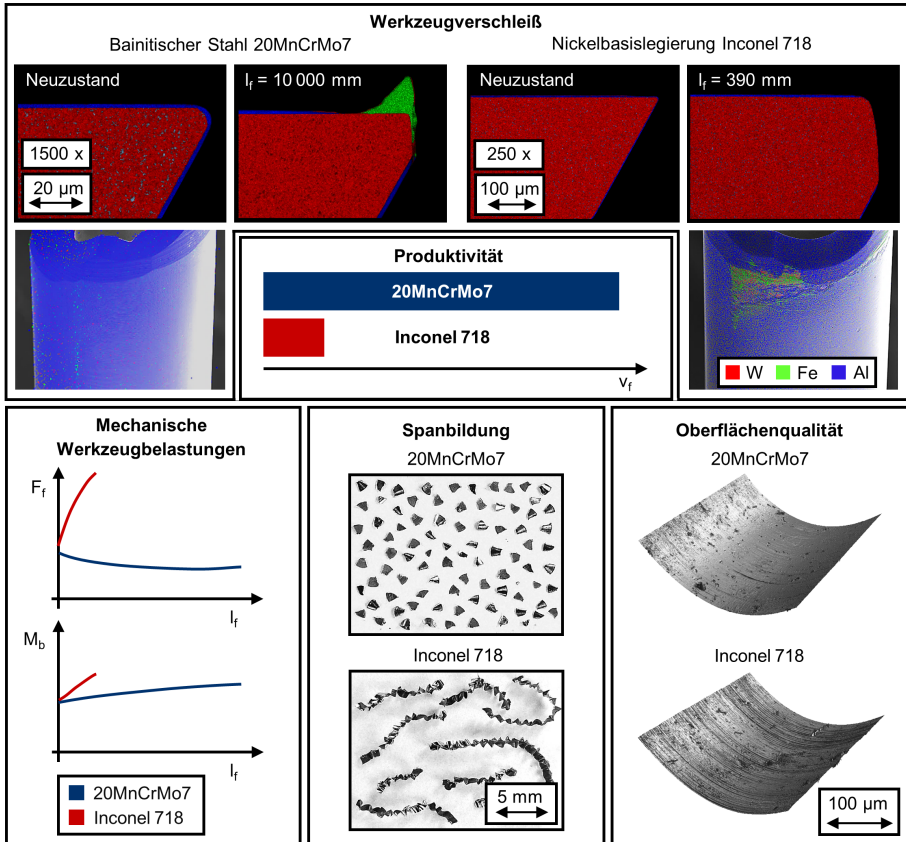


Abbildung 102: Zielgrößen bei Einsatz eines Einlippentiefbohrers mit Standardanschiff (Werkzeugdurchmesser $d = 2$ mm) in Abhängigkeit des Versuchswerkstoffes

Ein gänzlich anderes Verschleißbild und eine andere Entwicklung in den mechanischen Werkzeugbelastungen ergeben sich beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Die hohe Materialfestigkeit in Kombination mit den harten Karbid- und Nitrid-Ausscheidungen führen zu einem massiven und bestimmenden Abrasivverschleiß. Infolgedessen werden die dünnen Werkzeugbeschichtungen unmittelbar abgetragen, und es kommt zu einem kontinuierlich fortschreitenden Hartmetallabtrag an den Schneidkanten, den Führungsleisten und der Rundschliffase. Die abrasiv freigelegten und zerklüfteten Bereiche bieten zudem eine vorbestimmte Angriffsfläche für adhäsive Materialanhaftungen. Die mittlere Verschleißmarkenbreite beträgt nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm bereits $VB = 120$ µm. Hartmetallausbrüche an den Schneidkanten, der Schneidenecke und -spitze treten hingegen nicht auf. Die rasterelektronenmikroskopischen Analysen zeigen den abrasiven und adhäsiven Verschleiß der Wirkelemente und die Zunahme des Schneidkantenradius an der Außenschneide von $r_B = 6,2$ µm im Neuzustand auf $r_B = 23,8$ µm bereits nach einem Bohrweg von $l_f = 390$ mm. Die

signifikante Zunahme der Verrundung führt zu stark negativen Spanwinkeln und daraufhin zu steigenden Quetsch- und Reibvorgängen im Bereich der Schneidkante. Darüber hinaus nimmt, bedingt durch den abrasiven Verschleiß der Kontaktelemente, die Reibung zwischen Freifläche und Bohrungsgrund sowie Rundschliffase und Führungsleiste mit der Bohrungswand stetig zu. Folglich steigt die Vorschubkraft von $F_f = 74,6 \text{ N}$ im Neuzustand über den Bohrweg von $l_f = 390 \text{ mm}$ um etwa 125 % auf $F_f = 169,5 \text{ N}$. Die hohe Neigung der Nickelbasislegierung zur Kaltverfestigung trägt zu dem rasanten Anstieg in den Axialkräften bei. Die Entwicklung der mechanischen Werkzeugbelastungen in Korrelation mit dem abrasiven Verschleiß bestimmt beim Tiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern primär die Werkzeugstandzeit.

Der erzielbaren Produktivität beim Tiefbohren von Nickelbasislegierungen und bainitischen Stählen sind durch die Zerspanungscharakteristika Grenzen gesetzt. Die hohen mechanischen Werkzeugbelastungen begrenzen die erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern. Die realisierbare Produktivität unter gleichzeitiger Berücksichtigung deutlich kürzerer Werkzeugstandzeiten ist im Vergleich zur erzielbaren Produktivität beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern deutlich geringer. Beim Einlippentiefbohren von bainitischen Stählen wird die Produktivität hingegen durch den Widerstand des Hartmetalls gegen Ausbrüche begrenzt. Bei Einstellung gesteigerter Vorschubgeschwindigkeiten werden die Grenzwerte der mechanischen Beanspruchbarkeit überschritten, und es entstehen großflächige Hartmetallausbrüche an den Schneidkanten. Durch den Einsatz von symmetrischen Wendeltiefbohrern lassen sich bei der Fertigung von Tiefbohrungen mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen von $l/D = 30$ für beide Werkstoffe Produktivitätssteigerungen erzielen. Das Wendeltiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 besitzt dabei durch den besseren Spanbruch ein wesentlich größeres Potenzial als das Wendeltiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Die Produktivitätssteigerungen gehen jedoch gegenüber dem Einlippentiefbohren mit einer reduzierten Oberflächenqualität einher. Beim Wendeltiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 liegen obendrein ein größerer Mittenverlauf und eine geringere Prozessstabilität vor.

Die Materialeigenschaften, bestehend aus hoher Festigkeit und mittlerer Duktilität, verleihen dem bainitischen Stahl 20MnCrMo7 insgesamt ein gutes Spanbruchverhalten. Bei Einsatz eines Werkzeuges im Neuzustand liegen beim Einlippentiefbohren mit kleinsten Durchmessern effektive Spanwinkel von $\gamma_{\text{eff}} \leq 0^\circ$ und eine Spandickenstauchung von $\lambda_s = 4,2$ vor. Folglich entstehen kurze Bröckelspäne mit einer maximalen Spanlänge von $l_{\text{sp}} = 1,1 \text{ mm}$, die sich prozesssicher und rückstandsfrei abführen lassen. Die inkonstanten Eingriffsbedingungen über den Bohrweg führen dagegen zu einer abfallenden Spandickenstauchung und einer ungünstigen Spanformung. Mit zunehmender Aufbauschnittenbildung und positiveren Spanwinkeln entstehen lange ziehharmonika-förmige Späne, die die Prozesssicherheit mit zunehmender Einsatzzeit einschränken. Nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000 \text{ mm}$ liegen die ziehharmonika-förmigen Späne mit einer deutlich reduzierten Spandickenstauchung von $\lambda_s = 1,7$ und einer Länge von bis zu $l_{\text{sp}} = 10,1 \text{ mm}$ vor. Die Spanbildung stellt beim Tiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern somit ein maßgebendes Kriterium für die realisierbaren Werkzeugstandzeiten dar. Im Gegensatz dazu zieht die hohe Duktilität der Nickelbasislegierung Inconel 718 insgesamt ein ungünstiges Spanbildungsverhalten nach sich. Der schlechte Spanbruch ist dabei ein weiterer Grund für die stark limitierte Produktivität beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern. Die Späne entstehen über die gesamte Schneidenbreite, und die Kontur der Schneide bildet sich direkt auf der Spanoberseite und -unterseite ab. Bei Einsatz eines Standardanschliffes entstehen bereits zu Prozessbeginn lange und stark verformte Späne mit einer maximalen Spanlänge von $l_{\text{sp}} = 14,9 \text{ mm}$. Die Spandickenstauchung im Neuzustand beträgt dabei $\lambda_s = 4,6$. Der Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Spanformung ist trotz weiter ansteigender Spandickenstauchung bis auf $\lambda_s = 7,8$ nach $l_f = 390 \text{ mm}$ infolge der negativeren Spanwinkel und den

zunehmenden Quetsch- und Reibvorgängen im Gegensatz zum Einlippentiefbohren bainitischer Stähle mit kleinsten Durchmessern vernachlässigbar.

Im Hinblick auf die Bohrungsqualität lassen sich durch Anwendung des Einlippentiefbohrers für beide Werkstoffe geringe gemittelte Maß- und Formtoleranzen über den jeweiligen Bohrweg erzielen. Das Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 führte zu einem Bohrungsdurchmesser am Austritt von $D = 1,991$ mm, in der Rundheitsabweichung von $T_k = 0,0015$ mm und im Mittenverlauf von $\Delta r = 0,12$ mm. Demgegenüber stehen Bohrungsaustrittsdurchmesser von $D = 1,994$ mm, in der Rundheitsabweichung von $T_k = 0,0026$ mm und im Mittenverlauf von $\Delta r = 0,14$ mm beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Durch die einheitliche Verwendung von Einlippentiefbohrern mit der Umfangsform G, die gegenüber der Schneidenecke eine freigeschliffene Öltasche aufweisen und somit infolge der Radialkräfte eine leichte Verschiebung des Bohrkopfes über Mitte zulassen, wurden in beiden Fällen Bohrungsdurchmesser unter Nennmaß produziert. Der Mittenverlauf steigt mit der Materialfestigkeit und den angreifenden Schnitt- und Passivkräften am Bohrkopf. Eine größere Differenz besteht jedoch in den realisierbaren Oberflächenqualitäten. Die Oberflächengüte korreliert dabei unmittelbar mit dem Verschleiß der Führungsleiste und der Rundschliffase, die im stationären Tiefbohrprozess kontinuierlich in Kontakt mit der Bohrungswand sind. Die intakte und reibungsmindernde Beschichtung auf den Kontaktelementen beim Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 begünstigt die Erzielung einer gemittelten Rautiefe von $R_z = 0,22$ μm und eines arithmetischen Mittenrauwertes von $R_a = 0,025$ μm . Durch den sehr geringen Verschleiß der Führungsleiste und der Rundschliffase nach einem Bohrweg von $l_f = 10\,000$ mm können auch im weiteren Einsatz hohe Oberflächengüten erzeugt werden. Dagegen führt der massive Abrasivverschleiß gepaart mit adhäsiven Materialaufschmierungen beim Einlippentiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 bereits nach einem kurzen Bohrweg zu einer stark verschlissenen Führungsleiste und Rundschliffase. Der Verschleißzustand der Kontaktelemente spiegelt sich in zerklüfteten und offenen Profilbereichen auf der Bohrungswand wider. Die erzielbare Oberflächengüte, charakterisiert durch eine gemittelte Rautiefe von $R_z = 1,51$ μm und einen arithmetischen Mittenrauwert von $R_a = 0,23$ μm , ist somit deutlich geringer.

8.2 Empfehlungen für günstige Werkzeug- und Prozessparameter

Die beschriebenen Prozesskenngrößen in der direkten Gegenüberstellung des Einlippentiefbohrers des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit einem Werkzeugdurchmesser $d = 2,0$ mm zeigen für beide Werkstoffe eine anspruchsvolle Bearbeitung auf. Aus den stark voneinander abweichenden Herausforderungen insbesondere mit Blick auf den Werkzeugverschleiß und die Spanbildung leiten sich dezidierte Anforderungen an eine optimale Prozessgestaltung ab. In **Abbildung 103** ist die Bedeutung verschiedener Werkzeug- und Prozessparameter für ein effizientes Tiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen mit kleinsten Werkzeugdurchmessern gegenübergestellt.

Der Wahl der Schnittdaten kommt beim Einlippentiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen eine hohe Bedeutung zu. Für das Einlippentiefbohren hochfester bainitischer Stähle mit Werkzeugdurchmessern von $d = 1 \dots 2$ mm empfehlen sich mittlere Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 65 \dots 75$ m/min und Vorschübe pro Umdrehung von $f = 7 \dots 25$ μm . Bei Einstellung höherer Vorschubwerte besteht die Gefahr großflächiger Ausbrüche an den Schneidkanten und einem frühzeitigen Werkzeugbruch. Dagegen gilt es, kleinere Vorschubwerte zu vermeiden, da sonst die Spanabnahme vollständig im Bereich der Schneidkantenverrundung erfolgt und die mechanischen Werkzeugbelastungen durch erhöhte Quetsch- und Reibvorgänge zusätzlich verstärkt werden. Der Schneidengestalt kommt beim Einlippentiefbohren bainitischer Stähle mit kleinsten Durchmessern eine geringere Bedeutung zu. Die Verwendung von

schleiftechnisch aufwendigeren Sonderanschliffen bringt keine Vorteile im Einsatzverhalten, weshalb sich der Einsatz eines konventionellen, industriell weit verbreiteten Standardanschliffs mit Einstellwinkeln an der Außen- und Innenschneide von $K_1 = 50^\circ$ bzw. $K_2 = 120^\circ$ empfiehlt. Bedingt durch die Materialeigenschaften, bestehend aus hoher Festigkeit und mittlerer Duktilität, liegt unabhängig von der Schneidengestalt zu Prozessbeginn ein prozessgünstiges Spanbildungsverhalten vor. Im Schleifprozess der Einlippentiefbohrer sollte dagegen das Anbringen einer Schutzfase an der Übergangskante zwischen Ölraum und Sickingrund zur Vermeidung von Hartmetallausbrüchen und einer Reduzierung der Prozessstabilität bei höheren Vorschub- und Spanablaufgeschwindigkeiten berücksichtigt werden. Eine hohe Bedeutung beim Einlippentiefbohren bainitischer Stähle mit kleinsten Durchmessern besitzt vor allem die applizierte Werkzeugbeschichtung. Um einem schnellen Schichtabtrag und einer anschließenden Aufbauschneidenbildung auf dem freigelegten Hartmetall entgegenzuwirken, gilt es, eine Beschichtung mit einer hohen Verschleißbeständigkeit einzusetzen. Titanitrid-Schichten stellen aufgrund der unzureichenden Schichthärte dabei keine Alternative zu verbreiteten Hartstoffbeschichtungen auf AlTiN- oder TiAlN-Basis dar. Die Beschichtung sollte eine Schichthärte $H_m > 3000$ HV aufweisen. Darüber hinaus lässt sich eine verschleißbedingte Veränderung der Eingriffsbedingungen und somit auch die Entwicklung zu ungünstigen, stabilitätsmindernden Spanformen durch die Verwendung von Dünnenschichten mit vergrößerter Schichtdicke von $s_d = 2 \dots 4 \mu\text{m}$ hinauszögern. In einer Anpassung der Vorschubstrategie oder des Kühlschmierstoffdruckes sowie dem Einsatz eines Axialpulsators können weitere Möglichkeiten zur fortwährenden Gewährleistung einer ausreichenden Prozessstabilität bei großen Bohrwegen liegen.

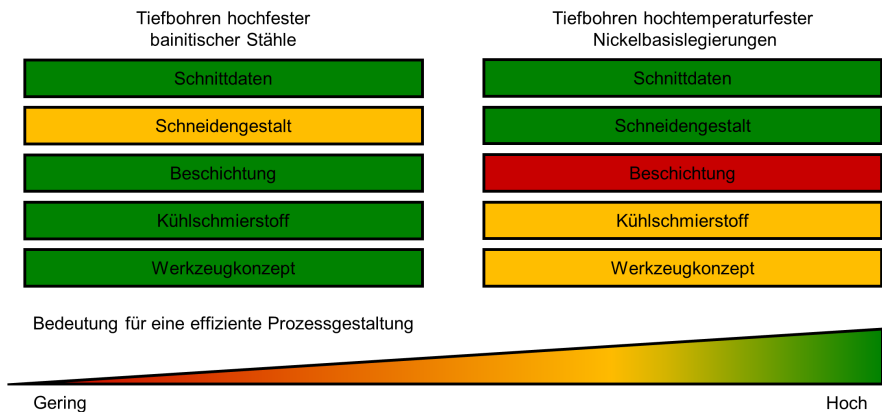


Abbildung 103: Bedeutung verschiedener Werkzeug- und Prozessparameter für eine effiziente Prozessgestaltung

Die Auswahl des Kühlschmierstoffes hinsichtlich des Basisöles und des Kühlschmierstoffdruckes besitzt beim Einlippentiefbohren von bainitischen Stählen mit kleinsten Durchmessern ebenfalls eine hohe Bedeutung. Durch das gute Spanbruchverhalten und die prozessgünstige Spanformung lassen sich die Späne zu Prozessbeginn auch bei reduzierten Kühlschmierstoffdrücken rückstandsfrei entlang der gerade genuteten Werkzeugsicke abführen. Mit Blick auf die Auswahl des Basisöles weisen synthetische Esteröle gegenüber paraffinischen Mineralölen eine höhere Schmierwirkung auf. Infolgedessen liegt bei Einsatz eines synthetischen Esteröles eine geringere Aufbauschneidenbildung vor, und es kommt erst nach einem längeren Bohrweg zur Ausbildung von ungünstigen Spanformen. Der Einsatz von synthetischen Esterölen bringt zudem durch die biologische Abbaubarkeit einen wichtigen ökologischen Vorteil mit sich. Die Gewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen begünstigt eine Schonung bestehender Umweltressourcen und die Reduzierung von CO₂-Emissionen gegenüber der Herstellung herkömmlich

fossilisierter Mineralöle. Darüber hinaus gewährt die Verwendung von synthetischen Esterölen einen höheren Gesundheitsschutz der Mitarbeiter bedingt durch eine verbesserte Hautverträglichkeit, eine niedrigere Neigung zur Dampf- und Nebelbildung sowie eine geringere Brand- und Explosionsgefahr durch wesentlich höhere Flammpunkte [Fre09, Mec13]. Bei geringeren Anforderungen an die Bohrungsqualität kann das Wendeltiefbohren mit gesteigerten Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen trotz höherer Werkzeugkosten eine Möglichkeit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bieten. Die Produktivität bzw. die Vorschubgeschwindigkeit können um etwa 200 % gesteigert werden, wogegen die erzielbaren Oberflächenqualitäten geringer sind. Bei Einsatz des Wendeltiefbohrers im Durchmesserbereich $d = 2 \text{ mm}$ gilt es, dabei zwingend einen reduzierten Kühlschmierstoffdruck von $p_{\text{KSS}} = 40 \text{ bar}$ zu verwenden. Verbreitete Werkzeugherstellerempfehlungen einer Einstellung von Kühlschmierstoffdrücken $p_{\text{KSS}} \geq 60 \text{ bar}$ beim Wendeltiefbohren mit kleinsten Durchmessern [Gue16, Mik16] verursachen ein Aufschieben der Späne in den gewendelten Spannuten. In der Folge entstehen Spänestaus, und es resultieren frühzeitige Werkzeugbrüche. Des Weiteren existiert durch die charakteristischen Eingriffsbedingungen und das abweichende mechanische Belastungskollektiv beim Wendeltiefbohren die Problematik einer verschleißbedingten Veränderung der Spanformung nicht. Es kann eine konstante Spanformung und somit eine hohe Prozessstabilität über einen größeren Bohrweg gewährleistet werden.

Beim Einlippentiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Werkzeugdurchmessern von $d = 1 \dots 2 \text{ mm}$ gilt es zum einen, der Auswahl der Schnittdaten ein besonderes Augenmerk zu widmen. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die sich daraus ergebende hohe thermische Schneidbeanspruchung sind die einstellbaren Schnittgeschwindigkeiten bzw. Drehzahlen stark limitiert. Es empfehlen sich daher Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 25 \dots 35 \text{ m/min}$. Zudem sind auch die realisierbaren Vorschubwerte mit $f = 3 \dots 10 \text{ } \mu\text{m}$ durch die hohe Materialfestigkeit stark begrenzt. Die Wahl von Vorschubwerten im Bereich der Schneidkantenverrundung oder sogar darunter lassen sich beim Tiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern nicht umgehen. Zum anderen besitzt die Schneidengestalt der Einlippentiefbohrer eine sehr große Relevanz. Da die hohe Zähigkeit der Nickelbasislegierungen einen Spanbruch unterbindet, ist eine angepasste Schneidengestalt besonders wichtig, um den Span vorteilhaft zu formen. Zum Zwecke einer zuverlässigen Spanntrennung und Initiierung kurzer Spanlängen muss der Span eine große Angriffsfläche für den Kühlschmierstoff aufweisen. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine hinreichende Prozesssicherheit beim Tiefbohren von kostenintensiven Bauteilen aus hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen, bei denen die Bohrungsbearbeitung häufig am Ende der Wertschöpfungskette durchgeführt wird. Darüber hinaus gilt es, durch eine angepasste Schneidengestalt auch die Stabilität der Schneidkanten zu steigern und die Angriffsfläche für den massiven Abrasivverschleiß, resultierend aus den hochfesten intermetallischen Phasen und den harten Karbid- und Nitrid-Ausscheidungen, einzudämmen. Die exponierte Schneidenspitze eines Standardanschliffes wird beim Tiefbohren hochtemperaturfester Nickelbasislegierungen unmittelbar abgetragen. Daher sind flache Werkzeuganschliffe mit einem großen Einstellwinkel an der Außenschneide, einer dritten Teilschneide orthogonal zur Vorschubrichtung und einem kleinen Einstellwinkel an der Innenschneide vorzuziehen. Ein günstiges Einsatzverhalten beim Einlippentiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern liefert die Kombination aus Einstellwinkeln von $K_1 = 70^\circ$, $K_2 = 105^\circ$ und $K_3 = 90^\circ$. Die Breite der dritten Teilschneide beträgt bei dieser Ausführung 17 % des Werkzeugdurchmessers. Zudem ist die Außenschneide mit einer Breite von 27 % größer ausgeführt als die Innenschneide mit 14 % des Werkzeugdurchmessers. Zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit ist auch die Verwendung eines Hartmetallsubstrates mit hoher Mikrohärtigkeit von großer Wichtigkeit. Dagegen besitzen Werkzeugbeschichtungen beim Tiefbohren von Nickelbasislegierungen eine untergeordnete Bedeutung. Aufgrund des starken abrasiven Werkzeugverschleißes in Kombination mit den hohen mechanischen Werkzeugbelastungen werden die Werkzeugbeschichtungen mit Schichtdicken von wenigen Mikrometern unmittelbar abgetragen. Zur Unterstützung der

Spanntrennung, zur Wärmeabfuhr sowie zur Reduzierung der Reibung und adhäsiven Materialanhaftungen an den Kontaktelementen sind hohe Kühlschmierstoffdrücke und -volumenströme für das Einlippentiefbohren von hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern unabdingbar. Diesbezüglich sollte periphereseitig eine Hochdruckpumpe die Bereitstellung von Kühlschmierstoffdrücken von $p_{KSS} = 140 \dots 200$ bar garantieren. Die Auswahl des Basisöles, d. h. die Verwendung von paraffinischen Mineralölen oder synthetischen Esterölen, hat dabei keinen signifikanten Einfluss auf das dominante und standzeitlimitierende abrasive Verschleißverhalten. Allerdings lassen sich unter Verwendung von synthetischen Esterölen, begünstigt durch die höhere Schmierwirkung und das ausgezeichnete Luftabscheidevermögen, die adhäsiven Materialanhaftungen reduzieren und höhere Oberflächengüten einstellen. Hinzu kommen die ökologischen Vorteile und die geringe toxikologische Wirkung von synthetischen Esterölen. Der Einsatz des Wendeltiefbohrens ermöglicht gegenüber dem Einlippentiefbohren eine Produktivitätssteigerung von etwa 35 %. Durch die deutlich ungünstigere Spanbildung insbesondere mit fortschreitendem Bohrweg und die geringeren Spanräume liegt im Vergleich zum Einlippentiefbohren mit angepasster Schneidengestalt jedoch eine eingeschränkte Prozessstabilität vor. Die zudem wesentlich geringeren Oberflächenqualitäten machen das Wendeltiefbohren von Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern insgesamt nur eingeschränkt konkurrenzfähig.

Abbildung 104 gibt zusammenfassend einen Überblick über Empfehlungen von zu wählenden Werkzeug- und Prozessparametern für das Einlippentiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen im Durchmesserbereich von $d = 1 \dots 2$ mm. Die angegebenen Empfehlungen zu den hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen beschränken sich auf Knetlegierungen der Zerspanbarkeitsgruppen 1 bis 4. Die Empfehlungen gilt es dabei, als Richtwerte zu verstehen. Im Einzelfall ist für eine optimale Prozessgestaltung jede Anwendung im Detail zu betrachten.

	Werkzeuggestalt	Schnittgeschwindigkeit	Vorschub pro Umdrehung	Kühlschmierstoffdruck
Hochfeste bainitische Stähle ($R_m = 1100 \dots 1300$ MPa)	$K_1 = 50^\circ, K_2 = 120^\circ$	$v_c = 65 \dots 75$ m/min	$f = 7 \dots 25$ μ m	$p_{KSS} = 100 \dots 160$ bar
Hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen* ($R_m = 1100 \dots 1450$ MPa)	$K_1 = 70^\circ, K_2 = 105^\circ, K_3 = 90^\circ$	$v_c = 25 \dots 35$ m/min	$f = 3 \dots 10$ μ m	$p_{KSS} = 140 \dots 200$ bar

Abbildung 104: Empfehlungen für das Einlippentiefbohren im Durchmesserbereich $d = 1 \dots 2$ mm

Weitere Voraussetzungen für ein optimales Bearbeitungsergebnis beim Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern sind maschinenseitig zu erfüllen. Dazu zählen eine hohe Maschinensteifigkeit, ein hoher Spindelrundlauf (≤ 10 μ m) und möglichst kleine Positionierfehler (≤ 5 μ m) bei einer sequentiellen Bearbeitung aus Pilotieren und Tiefbohren. Die Führungsgenauigkeit der Anbohrbuchse oder der Pilotbohrung sollten dabei ein geringes Übermaß innerhalb der ISO-Toleranz G6 aufweisen, um überhöhte mechanische Belastungen auf die Kleinstwerkzeuge mit eingeschränkter Steifigkeit sowie einen übermäßigen Verschleiß der Führungsleiste und der Rundschliffase beim Einzwängen des Werkzeuges im Anbohrvorgang zu vermeiden. Gleichzeitig bildet sich die Genauigkeit der Anbohrführung maßgeblich in dem Mittenverlauf der Tiefbohrwerkzeuge ab. Im Hinblick auf eine hinreichende Filterung von Partikeln im Kühlschmierstoff sollte eine Filtereinheit von 25 μ m oder besser garantiert sein. Bei Anwendung der Arbeitsweise des Tiefbohrens mit rotierendem Werkzeug und gegenläufig rotierendem Werkstück ist zudem auf einen hohen Rundlauf des zwischen den reitstock- und spindelseitigen Konen gespannten Werkstückes (≤ 10 μ m) zu achten.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diversen Industriezweigen nimmt der Bedarf an hochbelastbaren Werkstoffen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz von einzelnen Bauteilen oder ganzen Baugruppen stetig zu. In diesem Zusammenhang geraten hochfeste bainitische Stähle und hochtemperaturfeste Nickelbasislegierungen zunehmend in den Fokus unterschiedlicher Anwendungen. Bainitische Stähle bieten eine vorteilhafte Kombination der Materialeigenschaften aus hoher Festigkeit bei gleichzeitig guten Zähigkeitswerten und lassen sich gegenüber konventionellen Vergütungsstählen durch eine Einsparung der nachgelagerten Wärmebehandlung energie- und kosteneffizient herstellen. Nickelbasislegierungen hingegen zeichnen sich durch ein exzellentes Festigkeits-, Korrosions- und Oxidationsverhalten auch bei hohen Einsatztemperaturen aus und sind somit prädestiniert für Hochtemperaturanwendungen. Das Potenzial einer industriellen Verwendung lässt sich jedoch erst dann vollständig ausschöpfen, wenn eine stabile und produktive Bearbeitung gewährleistet ist. Unter dem Aspekt der besonders anspruchsvollen Zerspanbarkeit dieser modernen Werkstoffe ist eine ständige und individuelle Weiterentwicklung der Fertigungsprozesse und Werkzeuge unerlässlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zum Einlippen- und Wendeltiefbohren des hochfesten bainitischen Stahls 20MnCrMo7 und der hochtemperaturfesten Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern durchgeführt. Das mechanische Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern bringt dabei aufgrund der limitierten Werkzeugsteifigkeiten, den charakteristischen Eingriffsbedingungen an der Schneide und des schwierigen Spanabtransportes aus der geschlossenen Wirkzone spezielle Anforderungen an die Werkzeug- und Prozessauslegung mit sich. Um den werkstoff- und verfahrensspezifischen Herausforderungen beim Tiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern zu begegnen, erfolgte eine detaillierte Analyse des Einflusses der prozess- und werkzeugseitigen Eingangsgrößen aus Schnittdaten, Werkzeuggestalt, Kühlschmierstoff und Werkzeugkonzept. Die Bewertungsgrundlage bildeten die Zielgrößen aus mechanischen Werkzeugbelastungen, Spanbildung, Werkzeugverschleiß und Bohrungsqualität.

Für das Einlippentiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern wurden in einem ersten Schritt geeignete Schnittdaten identifiziert. Das Überschreiten eines Grenzwertes für die Vorschub- und Spanablaufgeschwindigkeit führte bei Einsatz von konventionellen Einlippentiefbohrern mit Standardanschiff zu Ausbrüchen an der Übergangskante zwischen Ölraum und Sickenrücken. Die großflächigen Ausbrüche verursachten ein Verklemmen der ablaufenden Späne und führten schließlich zu einer Reduzierung der Prozessstabilität sowie einem frühzeitigen Werkzeugversagen. Durch eine Variation des Schneidenschliffes ergaben sich keine signifikanten Vorteile im Einsatzverhalten. Eine Steigerung der Produktivität mithilfe von Hochleistungs-Einlippentiefbohrern ließ sich aufgrund von Hartmetallausbrüchen im Bereich der Schneidkanten bedingt durch die hohe Werkstoffhärte nicht erzielen. Das Verschleißverhalten in den Einsatzversuchen über einen längeren Bohrweg wurde dabei durch eine adhäsive Aufbauschneidenbildung auf der Spanfläche dominiert. Die kontinuierliche Aufbauschneidenbildung initiierte eine Veränderung der Eingriffsbedingungen zu positiven effektiven Spanwinkeln und korrelierte unmittelbar mit der zeitlichen Veränderung der Spanbildungsvorgänge. Während zu Prozessbeginn bzw. im Werkzeugneuzustand kurz gebrochene und gut abzutransportierende Späne entstanden, folgten aus der abnehmenden Spandickenstauchung geringere Spandicken und deutlich größere Spanlängen mit zunehmendem Bohrweg. Die langen, zieharmonika-förmigen Späne reduzierten die Prozesssicherheit und limitierten gleichzeitig die Werkzeugstandzeiten. Die abnehmende Spandickenstauchung spiegelte sich gleichzeitig in einem Abfall der Vorschubkräfte mit zunehmendem Bohrweg wieder. Die Schichtzusammensetzung und somit die Verschleißbeständigkeit der Beschichtung sowie die Schichtdicke zeigten dabei einen maßgeblichen Einfluss auf den einsetzenden Beginn und die

Größe der Aufbauschneidenbildung über den Bohrweg. Weiterhin konnte die Aufbauschneidenbildung durch die Verwendung eines synthetischen Esteröls anstelle eines paraffinischen Mineralöls reduziert werden. Das Wendeltiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinsten Durchmessern ermöglichte eine erhebliche Steigerung der Produktivität bei eingeschränkten Anforderungen an die Oberflächenqualität. Die generelle Machbarkeit des Wendeltiefbohrens mit gesteigertem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis erforderte dabei eine Anpassung des Kühlschmierstoffdruckes entgegen verbreiteter Empfehlungen von Werkzeugherstellern.

Die extrem geringe Wärmeleitfähigkeit und die ausgeprägte Warmfestigkeit erforderten beim Einlippen-tiefbohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern die Einstellung deutlich geringerer Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe. Der Einsatz von konventionellen Einlippen-tiefbohrern mit Standardanschiff unterlag dabei starken Restriktionen in der erzielbaren Produktivität. Den Hauptgrund dafür lieferte die unvorteilhafte Spannung infolge der hohen Duktilität. Eine Anpassung der Schneidengestalt ermöglichte die gezielte Beeinflussung der Spanformung. Die damit einhergehende Produktion von Spänen mit kurzen Spanlängen und einer großen Kühlschmierstoff-angriffsfläche schufen die Voraussetzungen für einen stabilen Tiefbohrprozess. Zudem begünstigte die Werkzeugoptimierung eine Erhöhung der Schneidkantenstabilität und eine Reduzierung der Verschleißangriffsfläche. Die hochfesten intermetallischen Phasen und die harten Karbid- und Nitrid-Ausscheidungen in der Mikrostruktur der Nickelbasislegierung waren dabei die Ursache für einen massiven Abrasivverschleiß an den Schneidkanten, der Führungsleiste und der Rundschliffase. Die Werkzeugbeschichtung mit einer Schichtdicke von wenigen Mikrometern wurde unmittelbar abgetragen. Die zunehmende abrasive Schneidkantenverrundung bewirkte einen degressiven Anstieg der Vorschubkräfte über den Bohrweg. Darüber hinaus bildeten sich an den Kontaktelementen am Werkzeugumfang auf dem abrasiv freigelegten Hartmetall adhäsive Materialaufschmierungen. Die Verwendung eines synthetischen Esteröls verringerte durch das hervorragende Schmiervermögen die Neigung zur Adhäsion und bot eine signifikante Verbesserung der Oberflächenqualität. Unter Anwendung des Wendeltiefbohrens mit kleinsten Durchmessern ließen sich unter Berücksichtigung einer reduzierten Bohrungsqualität höhere Vorschubgeschwindigkeiten realisieren. Aufgrund des schlechten Spanbruchverhaltens und den kleineren Spanräumen konnte jedoch im Vergleich zum Einlippen-tiefbohren keine vergleichbare Prozessstabilität gewährleistet werden.

Zusammenfassend dokumentiert die vorliegende Arbeit wichtige und bislang fehlende Erkenntnisse zum Einlippen- und Wendeltiefbohren hochfester und schwer zerspanbarer Werkstoffe mit kleinsten Durchmessern. Umfangreiche und detaillierte Untersuchungen stellen dazu den technologischen Zusammenhang zwischen verschiedenen Werkzeug- und Prozessparametern sowie den resultierenden Prozesskenngrößen her. Das mechanische Tiefbohren von hochfesten bainitischen Stählen und hochtemperaturfesten Nickelbasislegierungen mit kleinsten Durchmessern ist dabei als sehr anspruchsvoll einzustufen, wenngleich beide Werkstoffgruppen ein stark unterschiedliches Einsatzverhalten aufzeigen und sehr individuelle Herausforderungen mit sich bringen. Basierend auf diesen speziellen Anforderungen wurden mit dem Ziel einer produktiven und prozesssicheren Bearbeitung werkstoff- und verfahrensspezifische Lösungen erarbeitet und im Anschluss daran Empfehlungen für die industrielle Praxis abgeleitet. Die konzeptionelle Entwicklung und der Einsatz einer Methodik zur Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse ermöglichten dabei die Visualisierung der Spanbildungsmechanismen in der geschlossenen Wirkzone und trugen somit auch grundlegend zur Steigerung des Prozessverständnisses für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern bei. In zukünftigen Forschungsarbeiten lassen sich mit dieser Methodik auch die Kühlschmierstoffströmung, die Benetzung am Werkzeugumfang sowie weitere anwendungsorientierte Werkzeuglösungen für das Tiefbohren erforschen. Außerdem schafft die Hochgeschwindigkeitsspanbildungsanalyse eine hervorragende Grundlage für die Entwicklung einer belastbaren Simulation der Spanbildung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Kühlschmierstoff.

10 Literaturverzeichnis

- [Abe07] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J.; Tschannerl, M.: Tool length influence on wear behaviour of twisted carbide drills. *Production Engineering – Research and Development*, 1 (2007) 1, S. 51-56
- [Abe07b] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J.; Tschannerl, M.: Untersuchungen an langen VHM-Spiralbohrern. *wt Werkstatttechnik online*, 97 (2007) 1/2, S. 35-40
- [Abe08] Abele, E.; Tschannerl M.; Kulok, M.: Qualitätssteigerung beim Bohren mit VHM-Spiralbohrern unter Berücksichtigung radialer Schwingungen und Kräfte – Teil 1: Modellbildung sowie Identifikation von unrunder Bohrungen. *wt Werkstatttechnik online*, 98 (2008) 1/2, S. 53-59
- [Abe08b] Abele, E.; Tschannerl M.; Kulok, M.: Qualitätssteigerung beim Bohren mit VHM-Spiralbohrern unter Berücksichtigung radialer Schwingungen und Kräfte – Teil 2: Konstruktive Änderungen am Bohrer sowie technologische Maßnahmen zur besseren Formgenauigkeit. *wt Werkstatttechnik online*, 98 (2008) 1/2, S. 60-65
- [Abe08c] Abele, E.; Kulok, M.: Prozessanalyse und Bohrungsqualität beim Einbringen von Kreuzbohrungen. *wt Werkstatttechnik online*, 98 (2008) 1/2, S. 46-52
- [Abe14] Abele, E.; Schäfer, D.; Güth, S.; Bölling, C.: Gute Führung zahlt sich aus – Trendbericht: Bohrungsfeinbearbeitung im Motorenbau. *Werkstatt und Betrieb*, (2014) 12, S. 30-35
- [Aih12] Aihua, L.; Jianxin, D.; Haibing, C.; Yangyang, C.; Jun, Z.: Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PCD nitride coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31 (2012), S. 82-88
- [Alb60] Albrecht, P.: New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process – Part 1: The Ploughing Process in Metal Cutting. *ASME*, 1 (1960) 82, S. 348-358
- [Alt03] Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H. N.; Bissacco, G.: *Micro Engineering*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52 (2003) 2, S. 635-657
- [Aru00] Arunachalam, R. M.; Mannan, M. A.: Machinability of Nickel-Based High-Temperature Alloys. *Machining Science and Technology*, 4 (2000) 1, S. 127-168
- [Aru04] Arunachalam, R. M.; Mannan, M. A.; Spowage, A. C.: Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (2004), S. 1481-1491
- [Ast02] Astakhov, V. P.: The mechanisms of bell mouth formation in gundrilling when the drill rotates and the workpiece is stationary. Part 1: The first stage of drill entrance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (2002), S. 1135-1144
- [Ast14] Astakhov, V. P.: *Drills – Science and Technology of Advanced Operations*. CRC Press, 2014
- [Ati15] www.atimetals.com, abgerufen am 29.11.2015
- [Aur09] Aurich, J. C.; Dornfeld, D.; Arrazola, P. J.; Franke, V.; Leitz, L.; Min, S.: Burrs – Analysis, control and removal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 58 (2009), S. 519-542

- [Bag13] Baghlani, V.; Mehdubi, P.; Akbari, J.; Sohrabi, M.: Ultrasonic assisted deep drilling of Inconel 738 LC superalloy. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP, 6 (2013), S. 572-577
- [Bac03] Bach, F.-W.; Schäperkötter, M.; Weinert, K.; Koehler, W.; Opalla, D.: Spanwurzeluntersuchungen beim HPC-Bohren, VDI-Z Spezial, 3 (2003), S. 20-23
- [Bar08] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Springer-Verlag, 10. Auflage, Heidelberg, 2008
- [Bee14] Beer, N.: Drilling of Inconel 718 with geometry-modified twist drills. New Production Technologies in Aerospace Industry – 5th Machining Innovations Conference (MIC 2014), Procedia CIRP, 24 (2014), S. 49-55
- [Bee15] Beer, N.: Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2015
- [Bel02] Bell, T.: Vorsicht Wechselwirkung – Bei Kontakt mit Kühlschmierstoffen ist die Auswahl von Elastomeren und Kunststoffen meist sehr schwierig. Maschinenmarkt, 51/52 (2002), S. 36-42
- [Bha01] Bhadeshia, H. K. D. H.: Bainite in Steels – Transformation, Microstructure and Properties. Cambridge University Press, Second Edition, 2001
- [Bie10] Biermann, D.; Felderhoff, J. F.; Kullik, A.; Wenzelburger, J.: Großes Potenzial für HP-Einlippentiefbohrer. Werkstatt und Betrieb, 9 (2010), S. 60-64
- [Bie11] Biermann, D.; Heilmann, M.; Randecker, H.; Fees, A.: Minimalmengenschmierung beim Tiefbohren mit kleinen Durchmessern - Ein Verfahren wird trocken gelegt. Werkstatt und Betrieb, 144 (2011) 10, S. 68-71
- [Bie11b] Biermann, D.; Heilmann, M.; Kirschner, M.: Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Procedia Engineering, 19 (2011), S. 16-21
- [Bie12] Biermann, D.; Randecker, H.; Fees, A.; Heilmann, M.; Hartmann, H.: Verfahrensentwicklung für das Tiefbohren mit kleinen Durchmessern unter Verwendung einer Minimalmengenschmierung. Begleitband zum Fachgespräch „Zerspanen im modernen Produktionsprozess – 40 Jahre ISF“, 2012, S. 265-273
- [Bie12b] Biermann, D.; Wolf, M.; Aßmuth, R.: Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, Procedia CIRP 1 (2012), S. 172-177
- [Bie13] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Wolf, M.: Tiefbohren mit präparierten Einlippenbohrern. Werkstatt und Betrieb, 12 (2013), S. 62-66
- [Bie13b] Biermann, D.; Beer, N.: Führungsfaseneinfluss beim Bohren. Werkstatt und Betrieb, 5 (2013), S. 28-30
- [Bie13c] Biermann, D.; Beer, N.; Zhang, L. J.: Bohrbearbeitung der Superlegierung Inconel 718. wt Werkstatttechnik online, 103 (2013) 7/8, S. 637-642
- [Bie13d] Biermann, D.; Wolf, M.; Aßmuth, R.: Spanbildung beim Einlippenbohren mit präparierten Werkzeugen – Einfluss der Schneidkantengestalt auf das Spanbildungsverhalten beim Einlippenbohren von Vergütungs- und Duplexstählen. Diamant Hochleistungswerkzeuge, 5 (2013) 3, S. 44-49

- [Bie14] Biermann, D.; Kirschner, M.; Eberhardt, D.: A novel method for chip formation analyses in deep hole drilling with small diameters. *Production Engineering – Research and Developments*, 4 (2014) 8, S. 491-497
- [Bie14b] Biermann, D.; Aßmuth, R.; Tiffe, M.; Wolf, M.: Experimentelle und simulative Aspekte der Spanbildung beim Bohren austenitischen Stahls mit unterschiedlicher Schneidkantengestalt. *Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik*, (2014) 9, S. 92-95
- [Bie14c] Biermann, D.; Kirschner, M.: Tiefbohren von Nickelbasislegierungen. *Werkstatt und Betrieb*, 12 (2014), S. 56-59
- [Bie15] Biermann, D.; Iovkov, I.: Investigations on thermal workpiece distortion in MQL deep hole drilling of an aluminium cast alloy. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64 (2015) 1, S. 85-88
- [Bie15b] Biermann, D.; Holz, S.; Iovkov, I.: Prozesssicher in die Tiefe – Weiterentwicklung eines magnetorheologischen Schwingungsdämpfers für das Tiefbohren. *Innovation in der spanenden Fertigung*, 10 (2015), S. 68-71
- [Bie15c] Biermann, D.; Kirschner, M.: Prozessverständnis für das Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern steigern. *Unter Span*, 2 (2015), S. 22
- [Bie15d] Biermann, D.; Kirschner, M.: Experimental investigations on single-lip deep hole drilling of superalloy Inconel 718 with small diameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 20 (2015) 1, S. 332-339
- [Bie16] Biermann, D.; Kirschner, M.: Furação profunda de ligas à base de níquel. *Márquinas e Metais*, 52 (2016) 602, S. 14-19
- [Bom07] Bomont-Arzur, A.; Confente, M.; Bomont, O.; Schneider, E.; Lescahier, C.: Influence of material structure on deep hole machinability of super high strength steels: applications to crankshaft manufacturing. *International Journal Machining and Machinability of Materials*, 2 (2007) 2, S. 282-298
- [Buc71] Buck, G.: Spanformen beim Bohren mit Einlippenwerkzeugen. *Werkzeugmaschine International*, 1 (1971) 2, S. 39-44
- [Buc71b] Buck, G.: Spanformen beim Tiefbohren. *Industrie-Anzeiger*, 93 (1971) 91, S. 2277-2278
- [Bür11] Bürger, R.; Maier, H. J.; Niendorf, T.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. Vieweg und Teubner Verlag, 4. Auflage, Wiesbaden, 2011
- [Cao13] Cao, Y.; Reding, B.; Gao, M.: Rotating miniature and sector heat pipes for cooling gas turbine rotor blades and disks. *Heat Transfer Research*, 44 (2013) 1, S. 101-114
- [Cha15] Chaudhari, A.; Malarvizhi, S.; Soon Woon, K.; Senthil Kumar, A.; Rahman, M.: The effects of pilot hole geometry on tool-work engagement efficacy in deep hole drilling. *Journal of Manufacturing Processes*, 19 (2015), S. 135-141
- [Che03] Chen, Y. C.; Liao, Y. S.: Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003), S. 269-273
- [Cho98] Choudhury, I. A.; El-Baradie, M. A.: Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 77 (1998), S. 278-284
- [Dav70] Davenport, E. S.; Bain, E. C.: Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures. *Metallurgical Classics*, 1 (1970), S. 3503-3520

- [Dee09] Deeg, J.: Einlippenbohrer. Patentschrift, 2009, DE102009033508B4
- [Dee09b] Deeg, J.: Einlippen-Tieflochbohrer, Patentschrift, 2009, DE102009015278
- [Den11] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: Spanen – Grundlagen. Springer Verlag, 3. Auflage, Heidelberg, 2011
- [Dev06] Devillez, A.; Schneider, F.; Dominiak, S.; Dudzinski, D.; Larrouquere, D.: Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. *Wear*, 262 (2007), S. 931-942
- [DIN1412] DIN 1412: Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl – Anschliffformen. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [DIN1414] DIN 1414: Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl – Teil 1: Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [DIN4287] DIN EN ISO 4287: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [DIN5419] DIN ISO 5419: Spiralbohrer – Benennungen, Definitionen und Formen. Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [DIN10052] DIN EN 10052: Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen. Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [DIN10302] DIN EN 10302: Warmfeste Stähle, Nickel- und Cobaltlegierungen. Beuth Verlag, 2008
- [Dir15] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Luftverkehrsbericht 2014 – Daten und Kommentierungen des deutschen und weltweiten Luftverkehrs. Köln, 2015
- [Don03] Donachie, M. J.; Donachie, S. J.: Superalloys – A Technical Guide. ASM International, 2nd Edition, 2003
- [Eck08] Eckstein, M.: Überwachung und Regelung des Tieflochbohrens an höchstbelasteten Bauelementen der Fluggasturbine. In: Präzisions- und Tiefbohren aktuell. VDI-Berichte Nr. 2054, 2008, S. 35-46
- [Eck15] Eckstein, M.; Mankova, I.; Vrabel, M.; Beno, J.: Comparison of Sensors Signal Quality when Drilling Inconel 718. In: Proceedings of the 9th CIRP Conference in Intelligent Computation in Manufacturing Engineering 2014. Procedia CIRP, 33 (2015), S. 227-232
- [Egg14] Eggbauer, G.; Weber, A.; Lechleitner, J.; Buchmayr, B.: Charakterisierung bainitischer Gefügestände in Schmiedestählen. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 159 (2014) 5, S. 194-200
- [Ehn08] Ehninger, C.; Obwald, K.; Fleischer, L.; Schlipf, M.: Mikrobohrverfahren für den industriellen Einsatz. *wt Werkstattstechnik online*, 94 (2008) 6, S. 515-519
- [Eic96] Eichler, R.: Prozesssicherheit beim Einlippenbohren mit kleinsten Durchmessern. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [Eis14] Eisenmann, S.; Mair, M.; Hupfer, A.: Structural Analysis of a gas turbine disk containing heat pipes using finite element analysis. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014, AIAA-2014-3441

- [Eis15] Eisenmann, S.; Körner, R.; Hupfer, A.: Transient Simulation of a gas turbine disk incorporating heat pipes under structural aspects. In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. 15.-19. Juni 2015, Montreal, GT2015-42102
- [Eiss15] Eisseler, R.: Erhöhung der Produktivität beim Einlippentiefbohren unter schwierigen Bedingungen. In: Präzisions- und Tiefbohren aktuell. 2015, S. 41-52
- [Ell08] Ellermeier, A.: Methode zur Standwegprognose für lange Vollhartmetall-Spiralbohrer zum Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008
- [Elz03] Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Tschannerl, M.: Noch viel ungenutztes Potenzial beim Bohren. Werkstatt und Betrieb, 11 (2003), S. 55-57
- [End94] Enderle, K.-D.: Reduzierung des Mittenverlaufs beim Einlippen-Tiefbohren durch Kühlmittelpulsation. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [Eng11] Engineer, S.; Justinger, H.; Janßen, P.; Härtel, M.; Hampel, C.; Randelhoff, F.: Technological Properties of the New High Strength Bainitic Steel 20MnCrMo7. In: 3rd International Conference on Steel in Cars and Trucks SCT 2011. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2011
- [Eng14] Engineer, S.; Merkel, C.; Wiewers, B.: 20MnCrMo7 – Ein neuer hochfester Bainitischer Stahl, Produktbroschüre Edelstahlzieherei Mark EZM, 2014
- [Ezu03] Ezugwu, E. O.; Bonney, J.; Yamane, Y.: An overview of the machinability of aero-engine alloy. Journal of Materials Processing Technology, 134 (2003), S. 233-253
- [Ezu05] Ezugwu, E. O.: Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 (2005), S. 1353-1367
- [Fal14] Fallenstein, F.; Aurich, J. C.: CFD based investigation on internal cooling of twist drills. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting HPC 2014, Procedia CIRP, 14 (2014), S. 293-298
- [Fal15] Fallenstein, F.; Aurich, J. C.: Kühlkanalaustrittsbedingungen beim Bohren – Einfluss von Kühlkanalaustrittsposition und KSS-Menge auf den Verschleiß von VHM-Wendelbohrern. wt Werkstatttechnik online, 105 (2015) 7/8, S. 495-500
- [Far09] Farid, A. A.; Sharif, S.; Namazi, H.: Effect of Machining Parameters and Cutting Edge Geometry on Surface Integrity when Drilling and Hole Making in Inconel 718. International Journal of Materials and Manufacturing, 2 (2009) 1, S. 564-569
- [Fel11] Felderhoff, F.: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011
- [Fin77] Fink, P. G.: Zerspanungsuntersuchungen zur Verbesserung der Spanabführung, der Bohrungsqualität sowie der Wirtschaftlichkeit beim Tiefbohren mit Einlippen-Werkzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1977
- [Foe11] Föhl, C.: Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011
- [Fre09] Freiler, C.; Zitzlsberger, S.: Der Nebel lichtet sich – Kühlschmierstoffe: Besondere Anforderungen in der Medizintechnik. Medizin & Technik, 5 (2009), S. 58-59

- [Fuc15] Fuchslocher, G.: Feintuning für Kolben und Ventile – Hohlventile zur Reduzierung von CO₂. Automobil Produktion, 9 (2015), S. 71
- [Für10] Füreder, M. E.: Metallkundliche Charakterisierung von modernen niedriglegierten, bainitischen Stählen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2010
- [Fuß86] Fuß, H.: Aspekte zur Beeinflussung der Qualität von BTA-Tiefbohrungen. Dissertation, Universität Dortmund, 1986
- [Ger10] Gerloff, S.: Herausforderungen an die spanende Bearbeitung moderner Flugtriebwerkskomponenten. Zerspanen im modernen Produktionsprozess, Dortmund, 2010
- [Gerd10] Gerdemann, F. L. H.: Bainite in medium carbon steels. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2010
- [Gla10] Glaser, J.-D.: Einlippenbohren von hochwarmfesten, schwer zerspanbaren Nickelbasislegierungen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2010
- [Gra14] Grasmück, O.: Kryogene Kühlung für die Turbinenwerkstoffbearbeitung. VDI-Z Special Werkzeuge und Fertigungstechnik, (2014) 1, S. 34-36
- [Gra15] Grausam, I.: Tiefbohren mit Minimalmengenschmierung (MMS). In: Präzisions- und Tiefbohren aktuell. 2015, S. 161-168
- [Gri85] Griffiths, B. J.; Grieve, R. J.: The role of the burnishing pads in the mechanics of the deep drilling process. International Journal of Production Research, 23 (1985) 4, S. 647-655
- [Gri86] Griffiths, B. J.: The development of a quick-stop device for use in metal cutting hole manufacturing processes. International Journal of Machine Tool Design and Research, 26 (1986) 2, S. 191-203
- [Gue16] www.guehring.com, abgerufen am 27.04.2016
- [Hae04] Haenle, P.: Bohren von Kurbelwellenstahl mit MMS. VDI-Z Special Werkzeuge, (2004) 8, S. 30-31
- [Han12] Hans, H.: Bainitisches Härten von Common-Rail-Injektoren für moderne Dieselmotoren. Gaswärme International, 2 (2012), S. 35-40
- [Har13] Hartmann, H.; Biermann, D.; Wenzelburger, J.; Merkel, C.: Quo Vados Werkstoffforschung – Prozessgestaltung für das Hochleistungstiefbohren von bainitischen Stählen. Werkstoffe in der Fertigung, 4 (2013), S. 4-6
- [Har13b] Hartmann, H.: Prozessauslegung für die spanende Bearbeitung hochfester bainitischer Stähle. Zerspanen im modernen Produktionsprozess – Fachgespräche zwischen Industrie und Hochschule 2013, Begleitband zum Fachgespräch, 10. - 11. September 2013, Dortmund, S. 161-176
- [Har14] Hartmann, H.; Biermann, D.; Engineer, S.; Merkel, C.: Investigations on machining of high strength bainitic steels. Future trends in steel development, processing technologies and applications – SCT 2014, Braunschweig, S. 149-156
- [Har14b] Hartmann, H.; Biermann, D.: Gestaltung effizienter Zerspanprozesse für die Bearbeitung von Schmiedebauteilen aus höherfesten bainitischen Stählen. Schmiede Journal, 2 (2014), S. 42-44
- [Hau92] Hauger, R.: Untersuchung des Stabilitätsverhaltens von Einlippenbohrwerkzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1992

- [Hei12] Heilmann, M.: Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012
- [Hein06] Heinemann, R.; Hinduja, S.; Barrow, G.: The Performance of Small Diameter Twist Drills in Deep-Hole Drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128 (2006) 4, S. 884-892
- [Hein12] Heinemann, R.; Hinduja, S.: A new strategy for tool condition monitoring of small diameter twist drills in deep-hole drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 52 (2012), S. 69-76
- [Hein12b] Heinemann, R. K.: The effect of starting hole geometry on borehole quality and tool life of twist drills. *International Journal of Advanced Manufacturing*, (2012) 60, S. 519-526
- [Heis03] Heisel, U.; Rothmund, J.; Eisseler, R.; Kumanuvong, N.: Spanformbeeinflussung durch Schwingungseinkopplung beim Einlippenbohren. *Fertigungstechnik*, 98 (2003) 10, S. 486-489
- [Heis03b] Heisel, U.; Stortchak, M.; Eisseler, R.: Determination of Cutting Parameters in Deep Hole Drilling with Single-Fluted Gun Drills of Smallest Diameters. *Production Engineering*, 5 (2003) 1, S. 51-54
- [Heis05] Heisel, U.; Zhang, M.; Eisseler R.: Einlippentiefbohren unter HSC-Bedingungen. In: Tönshoff, H. K.; Hollmann, F.: *Hochgeschwindigkeitsspannen*. Wiley Verlag, Weinheim, 2005, S. 254-266
- [Heis08] Heisel, U.; Wallaschek, J.; Eisseler, R.; Potthast, C.: Ultrasonic deep hole drilling in electrolytic copper ECu 57. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57 (2008), S. 53-56
- [Heis08b] Heisel, U.; Sabou, F.: Prozessüberwachung beim Tiefbohren kleinster Durchmesser. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 2054, 2008, S. 19-34
- [Heis11] Heisel, U.; Schaal, M.; Sabou, F.: Bauteilsauberkeit beim Einlippentiefbohren. *Innovative Fertigung*, 106 (2011) 1-2, S. 36-40
- [Heis13] Heisel, U.; Stehle, T.; Eisseler, R.; Jakob, P.: Produktiver in die Tiefe – Höhere Prozessstabilität dank Dämpfung sowie längere Standzeiten in hochharten Stählen. *Werkstatt und Betrieb*, (2013) 12, S. 68-71
- [Heis13b] Heisel, U.; Eisseler, R.; Jakob, P.: Dämpfung beim Tiefbohren – Das leisten geklebte Fügstellen. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. 2013, S. 223-238
- [Hoc11] Hockauf, W.: Vom Standard-Bohren zum dynamischen Hochleistungs-Tieflochbohren in der Dieseleinspritzung. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 2142, 2011, S. 55-62
- [Hof02] Hoffmeister, H.-W.; Wessels, T.: Hochgeschwindigkeitszerspannung von Inconel 718: Schnittkräfte und Spanbildung bei hohen Zeitspannvolumina. *wt Werkstatttechnik online*, VDI-Z Special, 2 (2002), S. 35-38
- [Hofm06] Hofmann, H.; Mattissen, D.; Schaumann, T. W.: Advanced cold rolled steels for automotive applications. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37 (2006) 9, S. 716-723

- [Imr08] Imran, M.; Mativenga, P. T.; Kannan, S.; Novovic, D.: An experimental investigation of deep hole microdrilling capability for a nickel-based superalloy. *Journal of Engineering Manufacture*, 222 (2008), S. 1589-1596
- [Imr11] Imran, M.; Mativenga, P. T.; Gholinia, A.; Withers, P. J.: Evaluation of surface integrity in micro drilling process for nickel-based superalloy. *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 55 (2011), S. 465-476
- [Jen06] Jeniski, R. A.; Kennedy, R. L.: Nickel-base superalloy designed for aerospace. *Advanced Materials & Processes*, 2006, S. 19-22
- [Ket10] Ketter, L. C.: *The Gundrilling Handbook*. Campbell Viking Press, 4th Edition, North Haven, 2010
- [Keu12] Keul, C. A.: *Einstellung, Charakterisierung und Eigenschaften von bainitischen Mikrostrukturen in Schmiedestählen mit mittlerem Kohlenstoffgehalt*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2012
- [Kim09] Kim, D. W.; Lee, Y. S.; Park, M. S.; Chu, C. N.: Tool life improvement by peck drilling thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 49 (2009), S. 246-255
- [Kir13] Kirsanov, S. V.; Babaev, A. S.: Small-Diameter Hard-Alloy Bits for Gun Production. *Russian Engineering Research*, 33 (2013) 3, S. 170-171
- [Kirs15] Kirschner, M.: Prozessanalyse für das Tiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. 2015, S. 231-241
- [Kla08] Klaue, S.: Aufbau von Kühlschmierstoffen zum Tiefbohren. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 2054, S. 171-179
- [Kle06] Klein, W.: Zukunftsweisende Bearbeitungsstrategien für Automobilwellen – Weiterentwickeltes Einlippentiefbohrverfahren für Kurbel-, Nocken- und Getriebe- wellen. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 1897, 2006, S. 197-206
- [Klo07] Klocke, F.; Gerschwiler, K.; Abouridouane, M.: Size effects of the tool edge radius on specific cutting energy and chip formation in drilling. 2nd International conference on new forming technology, Bremen, 2007
- [Klo08] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 2008
- [Klo09] Klocke, F.; Gerschwiler, K.; Abouridouane, M.: Size effects of micro drilling in steel. *Production engineering – Research and Development*, 3 (2009), S. 69-72
- [Klo12] Klocke, F.: DFG-Abschlussbericht Entwicklung angepasster Prozessstrategien zum Einsatz von synthetischen Estern als Kühlschmierstoff beim Fertigen tiefer Bohrungen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2012
- [Klo14] Klocke, F.; Keitzel, G.; Veselovac, D.: Innovative sensor concept for chip transport monitoring of gun drilling processes. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting HPC 2014, *Procedia CIRP*, 14 (2014), S. 460-465
- [Koe04] Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation, Universität Dortmund, 2004

- [Koe08] Koehler, W.: Analysis of the High Performance Drilling Process: Influence of Shape and Profile of the Cutting Edge of Twist Drills. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130 (2008) 5, S. 1-7
- [Kre08] Krenzer, U.: Tieflochbohren mit Vollhartmetall-Wendelbohrern. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 2054, 2008, S. 99-106
- [Kue08] Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: *Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial, Ergebnisse des Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung*. Wuppertal, 2008
- [Kul07] Kulok, M.: *Beitrag zur Steigerung der Bohrungsqualität von Kreuzbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007
- [Kut13] Kuttkat, B.; Kroh, R.: Tieflochbohren – Schnell und prozesssicher in große Tiefen bohren. *Maschinenmarkt, Sonderausgabe EMO*, 2013, S. 72-75
- [Lan08] Langner, H.; Beyer, C.; Engineer, S.; Franke, A.; Hölzl, H.; Janßen, P.: A new high strength steel: 20MnCrMo7. In: *2nd International Conference on Steel in Cars and Trucks SCT 2008*. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2008
- [Lie05] Liedtke, D.: *Wärmebehandlung von Stahl – Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren*. Stahl-Informations-Zentrum, Merkblatt 450, 2005
- [Lin06] Lindemann, R.; Thamke, D.: Einsatz zweischneidiger, gewendelter Tiefbohrwerkzeuge bei der PKW-Kurbelwellenbearbeitung. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 1897, 2006, S. 75-91
- [Löb03] Löbbe, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, 2003
- [Lün91] Lünenburger, A.: *Zum Umwandlungs- und Verformungsverhalten bainitisch-austenitischer Siliziumstähle*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1991
- [Mec13] Meckel, G.: Ester basierende Schneidöle zum Tiefbohren. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. 2013, S. 181-193
- [Mer14] Merkel, C.; Engineer, S.: Hochfester bainitischer Stahl 20MnCrMo7 für Umformanwendungen. *Schmiede Journal*, (2014) 2, S. 38-41
- [Met06] Metzner, K.: Gerichtetes Einlippentiefbohren – Beeinflussung des Mittenverlaufs durch Kühlmittelpulsation. VDI-Berichte Nr. 1897, 2006, S. 225-230
- [Mey13] Meyer, R.; Kopton, P.: Steigerung der Produktivität bei der Zylinderkopfbearbeitung. In: *Begleitband zum Fachgespräch Zerspanen im modernen Produktionsprozess*. Dortmund, 10./11. September 2013, S. 21–36
- [Mik16] www.mikrontool.com, abgerufen am 27.04.2016
- [Mit13] Mitschele, K.: Erfahrungen beim Tieflochbohren von Durchmessern unter 1 mm. In: *Präzisions- und Tiefbohren*. 2013, S. 55-67
- [Mül01] Müller, P.: Bohrprozesse sicherer mit glatter Beschichtung. *Werkstatt und Betrieb*, 6 (2001), S. 50-53
- [Mül04] Müller, P.: Hohe Leistung für tiefe Bohrungen. *Werkstatt und Betrieb*, 6 (2004), S. 131-133
- [Mül06] Müller, P.: Hochleistungswendelbohrer für das Tiefbohren. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. VDI-Berichte Nr. 1897, 2006, S. 165-171

- [Müll08] Müller, S.: Einfluss des Schneidöls beim Tieflochbohren – In Anwendung mit Einlippentiefbohrer. VDI-Berichte Nr. 2054, 2008, S. 159-169
- [Oze11] Ozel, T.; Ulutan, D.: Machining induced integrity in titanium and nickel alloys – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51 (2011), S. 250-280
- [Oka10] Okasha, M. M.; Mativenga, P. T.; Driver, N.; Li, L.: Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 59 (2010), S. 199-202
- [Oka11] Okasha, M. M. M.: Combined Laser and Mechanical Microdrilling of Nickel-based Superalloy. PhD-Thesis, University of Manchester, 2011
- [Opi64] Opitz, H.: Die Aufbauschneidenbildung bei der spanabhebenden Bearbeitung. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, 1964
- [Pat01] Patel, S. J.; Smith, G. D.: The role of niobium in wrought superalloys. *Niobium, Science and Technology – Proceedings of the International Symposium Niobium 2001*, S. 1081-1108
- [Pee14] Peet, M. J.: Bainitic Steels and alloys for power plants. In: Shirzadi, A. and Jackson, S.: *Structural Alloys for Power Plants – Operational Challenges and High-temperature Materials*. Elsevier, Cambridge, 2014, S. 153-187
- [Per08] Perrot-Simonetta, M. T.; Resiak, B.; Confente, M.: New generation of High Strength Bainitic Steels (HSBS) for large forging and automotive components. *International Conference on New developments on metallurgy and applications of high strength steels*, Buenos Aires, 2008, S. 171-184
- [Pet03] Petuelli, G.; Heinemann, R.: Fast trocken in große Tiefen – HSC-Tieflochbohren mit Spiralbohrern und Minimalmengenschmieretechnik. *wt Werkstatttechnik online*, 93 (2003) 1/2, S. 97-101
- [Pfl76] Pfléghar, F.: Verbesserung der Bohrungsqualität beim Arbeiten mit Einlippen-Tiefbohrwerkzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1976
- [Pop14] Popov, A.; Dugin, A.: Study of reasons of increased active force using coolant with uncut thickness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2014) 70, S. 1555-1562
- [Rae12] Raedt H.-W.; Speckenheuer, U.; Vollrath, K.: Neue massivumgeformte Stähle – Energieeffiziente Lösungen für leistungsfähigere Bauteile. *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, 114 (2012) 3, S. 200-205
- [Ran03] Randecker, H.; Baumgärtner, H.: Einlippenbohrer und Verfahren zu dessen Herstellung. Patentschrift, 2003, DE10316116A1
- [Ran10] Randecker, H.: Tiefbohren – Schneidstoffeinsatz, Geometrien, Beschichtungen und Anwendungen. 9. Schmalkalder Werkzeugtagung, Schmalkalden 2010, Beitrag 17, S. 1-7
- [Ree06] Reed, R. C.: *The superalloys – Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2006
- [Ren07] Renhof, L.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Nickellegierung IN 718. Dissertation, Technische Universität München, 2007

- [Ric15] Richarz, S.: Herstellung und Einsatz von Wendeltiefbohrern zur Hartbearbeitung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2015
- [Ris06] Risse, K.: Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren von Wendelbohrern in Stahl. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006
- [Roe14] Roelofs, H.; Lembke, M.; Smolenicki, D.; Boos, J.; Kuster, F.: Continuously cooled bainitic steels with improved machinability. 1st European Steel Technology & Application Days, Paris, Band 1, 2014, S. 261-262
- [Sab14] Sabou, F.-V.: Prozesssicheres Tiefbohren mit Einlippenwerkzeugen kleinster Durchmesser. Dissertation, Universität Stuttgart, 2014
- [Sah03] Sahu, S. K.; Ozdoganlar O. B.; Devor, R. E.; Kapoor, S. G.: Effect of groove-type chip breakers on twist drill performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (2003), S. 617-627
- [Sak81] Sakuma, K.; Taguchi, K.; Katsuki, A.; Takeyama, H.: Self-Guiding Action of Deep-Hole-Drilling Tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 30 (1981) 1, S. 311-315
- [Sch06] Schubert, B.: Kühlschmierstoffe für das Tiefbohren – Trends und Praxiserfahrungen. *VDI-Berichte Nr. 1897*, 2006, S. 251-268
- [Sch08] Schur, S.: Mit axialem Pulsieren zu höherem Vorschub – Hochleistungs-Tiefbohren mit dem Axial-Pulsator. *Werkstatt und Betrieb*, (2008) 4, S. 2-4
- [Sch15] Schäfer, R.; van Basshuysen, R.: *Handbuch Verbrennungsmotor*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [Scha15] Schäfer, D.: Untersuchung von Torsionsratterschwingungen beim Einsatz überlanger Vollhartmetall-Spiralbohrer. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2015
- [Sha08] Sharman, A. R. C.; Amarasinghe, A.; Ridgway, K.: Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 200 (2008), S. 424-432
- [Shi11] Shinohara, Y.; Takeuchi, K.; Herrmann, O. E.; Laumen, H. J.: Common-Rail-Einspritzsystem mit 3000 bar. *Motorentechnische Zeitschrift MTZ*, 72 (2001) 1, S. 10-15
- [Sla97] Slama, C.; Servant, C.; Cizeron, G.: Aging of the Inconel 718 alloy between 500 and 750 °C. *Journal of Materials Research*, 12 (1997) 9, S. 2298-2316
- [Smo12] Smolenicki, D.; Boos, J.; Kuster, F.; Roelofs, H.; Olschewski, G.; Eglin, M.; Pigat, D.: Ein tiefer Blick ins Bohrloch – Tiefbohren in bainitischen Stahl. *Werkstatt und Betrieb*, 6 (2012), S. 56-58
- [Smo12b] Smolenicki, D.; Boos, J.; Kuster, F.; Wegener, K.: Analysis of the chip formation of bainitic steel in the drilling process. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, *Procedia CIRP*, 1 (2012), S. 683-684
- [Som02] Sommer, P.: Bainitisieren – Eine Maßnahme zur Einsatzoptimierung von hochfesten Bauteilen. *Der Wärmebehandlungsmarkt*, 1 (2002), S. 5-8

- [Spu70] Spur, G.: Untersuchungen an Spiralbohrern mit Ölkanälen beim Bohren von Vergütungsstahl. Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik der Technischen Hochschulen und Universitäten der Bundesrepublik Deutschland, Industrie-Anzeiger, 92 (1970) 100, S. 2417-2418
- [Ste97] Stein, J. M.; Dornfeld, D. A.: Burr Formation in Drilling Miniature Holes. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 46 (1997) 1, S. 63-66
- [Sto78] Stockert, R.: Beitrag zur optimalen Auslegung von Tiefbohrwerkzeugen. Dissertation, Universität Dortmund, 1978
- [Str73] Streicher, P.: Langschäftige Werkzeuge zum Tiefbohren – Ihre Problematik und deren Bewältigung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1973
- [Stü09] Stürenburg, B.: Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2009
- [Stü83] Stürenburg, H. O.: Zum Mittenverlauf beim Tiefbohren. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983
- [Ter11] Terwey, I.: Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011
- [Ter13] Terwey, I.; Bruchhaus, T.: Schneidstoffauswahl für die effiziente Tiefbohrbearbeitung. In: Präzisions- und Tiefbohren aktuell. 2013, S. 209-221
- [Tha99] Thamke, D.: Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens. Dissertation, Universität Dortmund, 1999
- [Tön00] Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Amor, R. B.; Hollmann, C.: Zerspanbarkeit von Schmiedestählen mit bainitischen Gefügebestandteilen. Schmiedejournal, 2 (2000), S. 20-21
- [Top01] Topf, E.: Tiefbohren Praxis – Bohren mit Einlippentiefbohrwerkzeugen. Toweko Verlag, Oberboihingen, 2001
- [Tsc07] Tschannerl, M.: Beitrag zur Qualitätssteigerung beim Bohren mit VHM-Spiralbohrern unter Berücksichtigung radialer Schwingungen und Kräfte. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007
- [Uba15] Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt 2015. Dessau-Roßlau, 2015
- [Ucu14] Ucu, I.; Aslantas, K.; Gökce, B.; Bedir, F.: Effect of tool coating materials on surface roughness in micromachining of Inconel 718 super alloy. Journal of Engineering Manufacture, 2014, S. 1-13
- [Val12] Valle, L. C. M.; Araujo, L. S.; Gabriel, S. B.; Dille, J.; de Almeida, L. H.: The effect of δ Phase on the Mechanical Properties of an Inconel 718 Superalloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 22 (2013) 5, S. 1512-1518
- [Vdi15] N.N.: Leichtbau mit Stahl. VDI-Nachrichten exklusiv, (2015) 35/36, S. 1-8
- [VDI2631] VDI-Richtlinie 2631- Blatt 3: Formprüfung – Eigenschaften und Auswahl von Filtern. Beuth-Verlag, Berlin, 2007
- [VDI3208] VDI-Richtlinie 3208: Tiefbohren mit Einlippenbohrern. Beuth-Verlag, Berlin, 2014
- [VDI3210] VDI-Richtlinie 3210: Tiefbohrverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 2006

- [VDI3211] VDI-Richtlinie 3211: Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. Beuth-Verlag, Berlin, 2015
- [VDI3397] VDI-Richtlinie 3397: Kühlschmierstoffe für spanende und umformende Fertigungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 2007
- [Vol09] Vollertsen, F.; Biermann, D.; Hansen, H. N.; Jawahir, I. S.; Kuzman, K.: Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 58 (2009), S. 566-587
- [Wei00] Weinert, K.; Löbbecke, H.; Webber, O.: Spanüberwachung sichert den Prozess – Tiefbohren mit Einlippenbohrern. *Technica*, 24 (2000), S. 16-21
- [Wei02] Weinert, K.; Koehler, W.; Opalla, D.: Schnittunterbrechung beim Bohren mit hohen Geschwindigkeiten. *wt Werkstatttechnik online*, 92 (2002) 4, S. 176-178
- [Wei06] Weinert, K.; Wittkop, S.; Felderhoff, F.: Weniger Werkzeugverschleiß beim Tiefbohren – Prozessverhalten und Bohrungsqualität beschichteter Werkzeuge beim Einlippentiefbohren. *Technica*, (2006) 9, S. 17-20
- [Wei07] Weinert, K.; Terwey, I.: Schneidkantenpräparation – Bestimmung der Schneidkantengestalt. *Industrielle Diamanten Rundschau*, 42 (2007) 1, S. 62-65
- [Wei11] Weinert, K.; Biermann, D.; Iovkov, I.; Kersting, M.: Adaptive Dämpfung von Ratterschwingungen beim Einlippentiefbohren. In: Hesselbach, J.: *Adaptronik für Werkzeugmaschinen*. Shaker Verlag, Aachen, 2011, S. 244-262
- [Wei07] Weißbach, W.: *Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Vieweg Verlag, 16. Auflage, 2007
- [Wes07] Wessels, T.: *Bohren in Titan- und Nickelbasislegierungen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2007
- [Wen15] Wenzelburger, J.: Einlippen-Tiefbohren von Medizinteilen in kleinsten Dimensionen auf Drehmaschinen. In: *Präzisions- und Tiefbohren aktuell*. 2015, S. 169-183
- [Wir10] Wirtz, G.: *Adaptive Axialkraftregelung für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2010
- [Wit05] Wittkop, S.: Einlippentiefbohren korrosionsbeständiger Stähle unter Einsatz von Werkzeugen mit unterschiedlichen Umfangsformen. In: Weinert, K.: *Spanende Fertigung – Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*. Vulkan Verlag, 4. Ausgabe, 2005, S. 392-402
- [Wit07] Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, 2007
- [Woo13] Woon, K. S.; Kanno, S.; Liu, K.: The influence of drill geometric accuracy on steady tool wear development and catastrophic tool failure in high aspect ratio gundrilling on Inconel-718. *International Journal of Abrasive Technology*, 6 (2013) 1, S. 1-15
- [Woo14] Woon, K. S.; Chaudhari, A.; Senthil Kumar, A.; Rahman, M.: The Effects of Tool Degradation on Hole Straightness in Deep Hole Gundrilling of Inconel-718. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting 2014, *Procedia CIRP*, 14 (2014), S. 593-598

- [Woo14b] Woon, K. S.; Chaudhari, A.; Rahman, M.; Wan, S.; Senthil Kumar, A.: The effects of tool edge radius on drill deflection and hole misalignment in deep hole gundrilling of Inconel-718. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63 (2014), S. 125-128
- [Zab12] Zabel, A.; Heilmann, M.: Deep Hole Drilling Using Tools with Small Diameters – Process Analysis and Process Desing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61 (2012) 1, S. 111-114
- [Zhu13] Zhu, D.; Xiaoming, Z.; Han, D.: Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 64 (2013), S. 60-77
- [Zwi74] Zwingmann, G.: Kühlschmierstoffe für das Tiefbohren. *Industrie-Anzeiger*, 90 (1974) 107/108, S. 2388-2391

Studentische Arbeiten

Die folgenden studentischen Arbeiten sind im Rahmen dieser Dissertation thematisch ausgelegt und betreut worden. Ausgewählte Ergebnisse dieser Arbeiten finden inhaltliche Verwendung. Allen Bearbeitern gilt an dieser Stelle mein besonderer Dank für Ihren Einsatz und Fleiß sowie Ihren Beitrag zum Gelingen dieser Dissertationsschrift.

Studienarbeit von Florian Husemeier, Technische Universität Dortmund, Oktober 2012

Thema: „Konzeption und Auslegung einer Hochgeschwindigkeitsbohrunterbrechsvorrichtung für das Tiefbohren mit kleinen Durchmessern“

Studienarbeit von Benjamin Naal, Technische Universität Dortmund, November 2013

Thema: „Untersuchungen zum Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit kleinen Durchmessern“

Studienarbeit von Daniel Eberhardt, Technische Universität Dortmund, Dezember 2013

Thema: „Analyse der Spanbildung mittels High Speed-Mikroskopie“

Bachelorarbeit von Daniel Eberhardt, Technische Universität Dortmund, März 2014

Thema: „Prozessauslegung für das Einlippen- und Wendeltiefbohren des bainitischen Stahls 20MnCrMo7 mit kleinen Durchmessern“

Studienarbeit von Nina Wilberg, Technische Universität Dortmund, Mai 2014

Thema: „Konzeption und Auslegung einer Hochgeschwindigkeitsbohrunterbrechsvorrichtung für das Tiefbohren mit kleinen Durchmessern“

Studienarbeit von Martin Brunner, Technische Universität Dortmund, September 2014

Thema: „Analyse des thermischen Belastungskollektivs beim Einlippentiefbohren mit kleinen Durchmessern“

Studienarbeit von Sebastian Berger, Technische Universität Dortmund, Januar 2015

Thema: „Analyse des Kühlschmierstoffeinflusses beim Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern“

Diplomarbeit von Daniel Klein, Technische Universität Dortmund, April 2015

Thema: „Simulative und experimentelle Analyse der thermischen Werkstückbelastung beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern unter Variation des Werkzeugkonzeptes“

Bachelorarbeit von Marc Mittelbach, Technische Universität Dortmund, Mai 2015

Thema: „Untersuchungen zum Wendel- und Einlippentiefbohren von Inconel 718 mit kleinsten Durchmessern“

Bachelorarbeit von Sebastian Berger, Technische Universität Dortmund, Januar 2016

Thema: „Einsatz der Hochgeschwindigkeitsmikroskopie zur Erweiterung des Prozessverständnisses beim Tiefbohren mit kleinsten Durchmessern“

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Marko Kirschner
Geburtsdatum/-ort: 03. April 1985 in Jever
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: Deutsch



Schulbildung

09/1991 – 06/1995 Schulbesuch, Paul-Sillus-Grundschule, Jever
07/1995 – 06/1997 Schulbesuch, Orientierungsstufe, Jever
08/1997 – 06/2004 Schulbesuch, Mariengymnasium, Jever

Wehrdienst

07/2004 – 03/2005 Grundwehrdienst, Instandsetzungs- und Elektronikstaffel,
Jagdbombengeschwader 38 „Friesland“, Jever

Studium

10/2005 – 04/2011 Diplomstudiengang Maschinenbau,
Vertiefungsrichtung Produktionstechnik,
Technische Universität Dortmund, Abschluss: Diplom-Ingenieur
03/2010 – 07/2010 Auslandsstudium, Tongji Universität Shanghai

Berufspraxis

2005 – 2010 Mehrwöchige Industriepraktika
Raiffeisen Technik Nord-West, Jever
AE Formen- und Werkzeugbau, Wilhelmshaven
Volkswagen AG, Wolfsburg
Schaeffler (China) Co. Ltd., Taicang
01/2008 – 12/2008 Studentische Hilfskraft, Lehrstuhl für Thermodynamik,
Technische Universität Dortmund
01/2009 – 10/2009 Studentische Hilfskraft, Institut für Spanende Fertigung,
Technische Universität Dortmund
08/2010 – 03/2011 Studentische Hilfskraft, Institut für Spanende Fertigung,
Technische Universität Dortmund
Seit 06/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Zerspanungstechnologie,
Institut für Spanende Fertigung, Technische Universität Dortmund

Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 978-3-8027-8760-9
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Mikrofinishen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4
- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenerlaufs*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8
- Band 83 Hartmann, H.: *Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0
- Band 81 Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8784-3
- Band 79 Steiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edelstahls X5CrNi18-10*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2
- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: *Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: *Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionschichten 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 Innengewinfertigung 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-Schälschleifen 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 Fräs Werkzeugen zur HSC-Bearbeitung*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1
- Band 45 Kahnis, P.: *Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4
- Band 44 Noyen, M.: *Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7

- Band 43 Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0
- Band 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- Band 41 Kress, J.: *Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6
- Band 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- Band 39 Webber, O.: *Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3
- Band 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von Ni-Ti*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9
- Band 36 Kötter, D.: *Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2
- Band 35 Hesterberg, S.: *Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle – Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5
- Band 34 Damm, P.: *Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8
- Band 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das 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 Fräswerkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-x
- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 18 Löbke, 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 Einschnelden-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 Einlippentiefbohrrens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, C.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1
- Band 2 Friedhoff, J.: *Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3
- Band 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5