

Konturieren kleiner Tiefbohrungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Timo Rinschede M.Sc.

aus Werne

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2024

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

2. Gutachter: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

Dortmund, 2024

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: 978-3-8027-8930-4

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann herzlich für die Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Gestaltungsfreiheit bei vielen unterschiedlichen Projekten und Aufgaben. Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher, Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Photonische Technologien (IFT) der Technischen Universität Wien, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Jan Dege für die Mitwirkung in der Prüfungskommission sowie apl. Prof. PD Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel für die Übernahme des Prüfungsausschussvorsitzes.

Diese Arbeit basiert auf Erkenntnissen, die im Rahmen des vom BMBF geförderten KMU-innovativ Verbundprojekts "Flexibles Innendrehen in beliebiger Bearbeitungstiefe (FLIBB)" entstanden sind, für dessen Förderung ich mich an dieser Stelle bedanken möchte. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank den Projektpartnern BGTB GmbH sowie Lühmann & Brockmann CNC-Technik GmbH für die fachliche Unterstützung und den guten persönlichen Austausch auch über das Projekt hinaus. Hierbei sind im Besonderen Herr Dr.-Ing. Maximilian Metzger und Herr Dr.-Ing. Moritz Fuß zu nennen, durch die ich den Weg zum Institut und zur Promotion gefunden habe. Darüber hinaus haben insbesondere Dr.-Ing. Hans Fuß, Dr.-Ing. Bernhard Buse, Rainer Brockmann und Matthias Kluin zum Gelingen dieses Projektes beigetragen.

Bei den Mitarbeitenden des Instituts, insbesondere der Abteilung Zerspanung, bedanke ich mich für die schöne gemeinsame Zeit sowie die stets unterstützende und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Meinem Bürokollegen Nils Felinks, der zu einem guten Freund geworden ist, danke ich für die fantastische Zusammenarbeit, seine selbstlose Unterstützung und die hervorragende, humoristische Unterhaltung auf der Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei unserem Techniker Michael Kater für die umfangreiche Unterstützung während der Institutszeit bedanken. Ebenso gilt mein Dank den studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Abschlussarbeitern für die gute Zusammenarbeit und ihren Beitrag zum Gelingen dieser Dissertation.

Im privaten Bereich danke ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung in allen Lebenslagen, insbesondere meinen Eltern, die mir den Bildungsweg ermöglicht und mich immer in meinem Handeln bestärkt haben. Von ganzem Herzen danke ich zudem meiner Freundin Alina für ihre Liebe, Geduld und ein immer offenes Ohr.

Danke für Eure Unterstützung!

Kurzzusammenfassung

In der Produktionstechnik weisen spanende Fertigungsverfahren weiterhin eine große Relevanz auf, um Komponenten aus verschiedensten Werkstoffen produktiv, präzise und funktionsgerecht herstellen zu können. Dabei konzentrieren sich die meisten Verfahren, insbesondere bei der Herstellung komplexer Konturen, auf die Außenbearbeitung der Bauteile. Die innenliegende Bearbeitung wird häufig durch Sonderverfahren oder Innendrehen in geringen Bearbeitungstiefen abgedeckt und ist in ihren Prozessmöglichkeiten begrenzt. Diese Grenzen werden unter anderem dann erreicht, wenn es gilt, Konturen in kleinen Bohrungen auch in großen Tiefen einzubringen. Um jedoch Leichtbau, Bauteilbelastbarkeit sowie Funktionalität konsequent Folge zu leisten, besitzt ebendieses Feld großes Potential.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Entwicklung, die Fertigung und der Einsatz eines neuartigen Werkzeugsystems zur Konturierung kleiner, tiefer Bohrungen vorgestellt. Dafür wurden zunächst Grundlagenuntersuchungen zum konventionellen Innendrehen durchgeführt, die die vergleichende Referenz des aktuellen Stands der Technik darstellen. Hiernach folgte die Entwicklung und Auslegung des Werkzeugsystems, welches durch einen neuen Ansatz eine Ausstellbewegung einer Schneidplatte auch in kleinen Durchmesserbereichen ermöglicht. Zudem liegt ein von der Bearbeitungstiefe unabhängiger, schwingungsvermeidender Aufbau vor, sodass auch Bohrungen mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von größer 100 konturiert werden können. In der ersten Entwicklungsstufe wurde ein stehendes Werkzeugsystem mit integrierter, ansteuerbarer Aktorik erarbeitet, wodurch es sich um eine vollwertige NC-Achse in einer Werkzeugmaschine handelt. Dieses System wurde darauffolgend gefertigt und auf einer BTA-Tiefbohrmaschine mechanisch und steuerungstechnisch implementiert. Einsatzversuche und technologische Untersuchungen konnten im Anschluss die Funktionsfähigkeit und Potentiale des entwickelten Systems aufzeigen. Dabei können konturtreue, komplexe Innenbearbeitungen prozesssicher realisiert und hohe Oberflächengüten der gefertigten Innenkonturen erreicht werden.

In einer zweiten Stufe wurde das Werkzeug zu einem rotationsfähigen System weiterentwickelt, bei welchem die Daten- und Energieübertragung zur Aktorik induktiv umgesetzt wird. Hierfür wurde die Antriebseinheit des Systems angepasst und ein neuer Regelkreis ausgelegt. Dadurch kann die Einheit als unabhängige, geregelte NC-Achse auf unterschiedlichen Werkzeugmaschinen mit variierenden Steuerungen betrieben werden. Nach der Fertigung des Werkzeugsystems wurde dieses auf einer Koordinaten-Tiefbohrmaschine implementiert, wobei auch hier komplexe Innenkonturen in Werkstücke aus verschiedenen Werkstoffen eingebracht werden konnten. In der Folge wird die Erweiterung der produktionstechnischen Möglichkeiten um die Innenkonturierung auf einem großen Anteil der Werkzeugmaschinen und auch außermittiger Bohrungen erzielt. Abschließend wird in der Arbeit die Herstellung komplexer Konturen mit konkretem Anwendungsbezug zur Prüfung der industriellen Einsatzfähigkeit des Werkzeugsystems vorgestellt.

Abstract

In production engineering, machining processes continue to be of great relevance for the productive, precise and functional manufacturing of components made of a wide range of materials. Most of these processes, especially when manufacturing complex contours, focus on the external machining of components. Internal machining is often covered by special processes or internal turning at low machining depths and is limited in its process capabilities. These limits are reached, for example, when contours have to be machined in small boreholes at great depths. However, this field has great potential for consistently achieving lightweight construction, component strength and functionality.

This scientific work presents the development, production and use of a new tool system for the contouring of small, deep boreholes. For this purpose, basic research was initially carried out on conventional internal turning, which represents the comparative reference of the current state of the art. This was followed by the development and design of the tool system, which, through a new approach, enables a cutting insert to be used for an extending movement even in small diameter ranges. In addition, the design is vibration-free and independent of the machining depth, so that holes with a length-to-diameter ratio of more than 100 can also be contoured. In the first development stage, a stationary tool system with integrated, controllable actuators was developed, which means that it is a fully functional NC axis in a machine tool. This system was then manufactured and implemented mechanically and in terms of control technology on a BTA deep hole drilling machine. Subsequent application tests and technological investigations were able to demonstrate the functionality and potential of the developed system. In this way, contour-true, complex internal machining can be realised in a process-safe manner and high surface qualities of the manufactured internal contours can be achieved.

In a second stage, the tool was developed into a rotatable system in which the data and energy transfer to the actuator is implemented inductively. In order to achieve this, the drive unit of the system was adapted and a new control circle was designed. This means that the unit can be operated as an independent, controlled NC axis on different machine tools with varying control systems. After the tool system had been manufactured, it was implemented on a coordinate deep hole drilling machine, where complex internal contours could also be introduced into workpieces made of different materials. As a result, the production possibilities have been expanded to include internal contouring on a large number of machine tools and also off-centre boreholes. Finally, the thesis presents the production of complex contours with a concrete application reference to test the industrial applicability of the tool system.

Inhalt

Abkürzungen	iii
Formelzeichen und Indizes	v
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Einsatzfelder und Anwendungsbeispiele.....	3
2.2 Grundlagen der Innenkonturierung.....	7
2.3 Verfahren zur Innenkonturierung.....	19
2.3.1 Innendrehen	19
2.3.2 Auskammerverfahren	22
2.3.3 Weitere Verfahren	26
3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	31
4 Experimentelle Randbedingungen.....	35
4.1 Versuchswerkstoffe.....	35
4.2 Werkzeugmaschinen.....	37
4.3 Werkzeuge	40
4.4 Mess- und Analysetechnik.....	42
5 Technologische Grundlagenuntersuchungen zur Innendrehbearbeitung	47
5.1 Einfluss der Schneidplattenform	48
5.2 Einfluss der Schnittparameter	51
5.3 Ergänzende Untersuchungen	59
6 Stehendes Werkzeugsystem zur Innenkonturierung.....	65
6.1 Anforderungsprofil und Werkzeugkonzept.....	65
6.2 Mechanische Auslegung des Werkzeugsystems	71
6.3 Simulationsgestützte Auslegung des Werkzeugkopfes.....	76
6.4 Antriebstechnische Integration auf einer Tiefbohrmaschine...	85
6.5 Experimentelle Einsatzversuche.....	88
6.5.1 Grundlagenversuche zum Funktionsprinzip	88
6.5.2 Einfluss der Schnittparameter	90
6.5.3 Fertigung unterschiedlicher Innenkonturen.....	97
6.6 Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen.....	102

7	Rotierendes Werkzeugsystem zur Innenkonturierung.....	105
7.1	Auslegung der Leistungs- und Datenübertragung	105
7.2	Konstruktive Anpassungen zum Einsatz auf einer Werkzeugmaschine.....	111
7.3	Experimentelle Einsatzversuche	114
8	Industrielle Einsatzmöglichkeiten	119
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
10	Literaturverzeichnis	131

Abkürzungen

AAE	Antriebs- und Anbindungseinheit
ADI	Analog Digital Interface
Al	Aluminium
BOZA	Bohrölzuführapparat
BTA	Boring and Trepanning Association
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CNC	Computerized Numerical Control
Cr	Chrom
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECM	Electrochemical Machining
ELB	Einlippenbohren
Fa.	Firma
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
HMI	Human Machine Interface
ISO	International Organization for Standardization
IT	ISO-Toleranz
KKV	Kurzkammerverfahren
KSS	Kühlschmierstoff
l/D	Länge-zu-Durchmesser Verhältnis

LKV	Langkammerverfahren
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
NC	Numerical Control
Ni	Nickel
PVD	Physical Vapour Deposition
QT	Quenched and Tempered
Si	Silizium
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Ti	Titan
TTL	Transistor-Transistor-Logik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
X	Hochlegierte Stähle

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s^2	Beschleunigung
a_p	mm	Schnitttiefe
A	mm^2	Spanungsquerschnitt
A_5	%	Bruchdehnung
A_{kSS}	mm^2	Zuleitungsquerschnitt
A_v	mm^3/min	Abtragsgeschwindigkeit
b	mm	Spanungsbreite
b_{Sp}	mm	Periodenbreite Span
c	mm	Axiale Verschiebung
d	mm	Werkzeugdurchmesser
d_a	mm	Außendurchmesser
D	mm	Bohrungsdurchmesser
D_1	mm	Kerndurchmesser
D_i	mm	Innendurchmesser
e	mm	Kantenlänge
f	mm	Vorschub
f_p	Hz	Abtastrate
f_{Schw}	Hz	Schwingungsfrequenz
F_a	N	Aktivkraft
F_c	N	Schnittkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_{max}	N	Maximalkraft
F_N	N	Führungsleisten-Normalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_{res}	N	Resultierende Kraft
F_T	N	Führungsleisten-Tangentialkraft
h	mm	Spanungsdicke
h'	mm	Spandicke
h_{ch}	mm	Mittlere Spandicke
H_m	HB	Härte
I	A	Stromstärke
l	mm	Länge

l_t	mm	Bohrtiefe
m	mm	Schrittweite
M_b	Nm	Bohrmoment
n	min ⁻¹	Drehzahl
n_s	-	Anzahl Schritte
p	bar	Druck
P	W	(Antriebs-)Leistung
P_{ges}	W	Gesamtleistung
P_{max}	W	Maximale Leistung
P_{\emptyset}	W	Durchschnittliche Leistung
P_{STO}	W	Leistung Safe Torque Off
r	mm	Auslenkung
r_k	mm	Kammertiefe
r_e	mm	Eckenradius
R	Ω	Messwiderstand
Ra	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
R_t	μm	Maximale Rautiefe
R_{th}	μm	Theoretische Rautiefe
Rz	μm	Gemittelte Rautiefe
s	mm	Hub
S	-	Sicherheit
t_h	min	Eingriffszeit
t_{max}	mm	Maximale Zustelltiefe
U	V	Spannung
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_{ch}	mm/s	Spanablaufgeschwindigkeit
v_e	m/min	Effektive Schnittgeschwindigkeit
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_{KSS}	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
VB_{max}	μm	Maximale Verschleißmarkenbreite
w	mm	Einstechbreite
y	mm	Radiale Ausstellung

α	°	Freiwinkel
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
η	mm ² /s	Dynamische Viskosität
K	°	Einstellwinkel
λ	W/(m*K)	Wärmeleitkoeffizient
$\sigma_{v.m.}$	MPa	Von-Mises-Vergleichsspannung
φ_a	°	Scherwinkel Außendrehen
φ_i	°	Scherwinkel Innendrehen
φ_\emptyset	°	Durchschnittlicher Gewindeprofilwinkel

1 Einleitung

Die steigenden Anforderungen an Bauteile hinsichtlich der verwendeten Materialien sowie der Bauteilgestalt ist eine den Maschinenbau bereits seit Dekaden prägende Entwicklung. Um diese Anforderungen zu erfüllen, bestehen dabei zahlreiche fertigungstechnische Möglichkeiten zur Erzeugung der äußeren Bauteilgestalt, die zum Teil nahezu beliebige Freiformkonturen ermöglichen. Hingegen beschränkt sich die Innenbearbeitung von Bauteilen neben dem konventionellen Bohren auf Innendrehprozesse in geringer Bearbeitungstiefe. Hochentwickelte Werkzeuge zum Innendrehen erlauben hierbei ein maximales Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis (l/D) von $l/D = 16$, darüber hinaus gehend verhindern Werkzeugschwingungen und -abdrängungen eine tiefere Innenbearbeitung. Gewichtsoptimierungen und gesteigerte Belastbarkeiten aus Effizienz- und Sicherheitsgründen erforderten jedoch in der Luft- und Raumfahrt die Konturierung von Bauteilen in großen Bearbeitungstiefen, woraus sich die Entwicklung der Auskamertechnologie motivierte. Diese Technologie verwendet dafür Werkzeuge, welche sich im Werkstück selbst abstützen und über einen inneren Verstellmechanismus ein Schneidelement zur gezielten Spanabnahme verfahren können. In dieser Weise werden beispielsweise Komponenten des Flugzeugfahrwerks innen bearbeitet, wobei die Technologie mittlerweile auch in weiteren Branchen Anwendung findet. Ein limitierender Faktor ergibt sich für diese Werkzeugsysteme durch ihre innenliegende Mechanik, die den Durchmesser der zu konturierenden Bohrung auf $D > 35$ mm begrenzt. Aus den Grenzen dieser beiden für die Innenbearbeitung vornehmlich relevanten Verfahren Innendrehen und Auskammern, ergibt sich ein Anwendungsfeld, für das kein produktives Verfahren vorliegt: Kleine Bohrungen ($D < 35$ mm) können in großen Tiefen ($l/D > 16$) nach dem Stand der Technik nicht wirtschaftlich bearbeitet werden.

Aus Gründen des Leichtbaus, der Bauteilbelastbarkeit und -lebensdauer sowie der Funktionalität, ergibt sich eine große Motivation, auch kleinere Tiefbohrungen ganzheitlich konturieren zu können. Konkrete Bauteile für diesen Anwendungsbereich finden sich im elektrischen Mobilitätssektor in Rotor- und Kurbelwellen, welche meist nur eine zylindrische, nicht belastungsgerechte Durchgangsbohrung aufweisen. Zur Übertragung von elektromagnetischen Wellen werden sogenannte Wellenleiter verwendet, bei denen eine definierte Innenkontur die Übertragungsleistung steigern

könnte. Die Rohstoffgewinnung in Form der Erdöl- und Gasexploration stellt einen dritten Bereich dar, in welchem Tiefbohrungen mit hohem L/D -Verhältnis Potential zur Konturierung aufzeigen. Weiterhin lassen sich auch vollständig neue Bauteile aufführen, die bisher nur konstruiert, aber bedingt durch die technischen Möglichkeiten, nicht gefertigt werden konnten.

Im Rahmen dieser Arbeit soll, durch die Entwicklung und den Einsatz eines neuartigen Werkzeugsystems zur Konturierung kleiner Tiefbohrungen, dieser Bedarf eines produktiven Verfahrens zur Innenbearbeitung gedeckt werden. Dafür erfolgen zunächst grundlagenorientierte Versuche zur Innendrehbearbeitung kleiner Bohrungen, um Prozesscharakteristika, Grenzen und geeignete Eingangsparameter für die noch folgende Werkzeugentwicklung zu erarbeiten. Die positiven Eigenschaften des Innendrehens sollen dabei mit denen der Auskammertechnologie vereint werden. In einer ersten Entwicklungsstufe wird ein stehendes Werkzeugsystem mit einem neuartigen Ansatz zur Ausstellbewegung eines Schneidelementes konstruiert, gefertigt und auf einer Tiefbohrmaschine implementiert. Auf die Einsatzversuche der ersten Stufe folgt die Weiterentwicklung zu einem rotierenden Werkzeugsystem mit induktiver Daten- und Leistungsübertragung zur Versorgung der integrierten Ausstellaktuatorik. Erste Innenkonturierungen kleiner Tiefbohrungen werden mit diesem System auf einer Koordinaten-Tiefbohrmaschine umgesetzt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Entwicklungen erweitern somit die produktionstechnischen Möglichkeiten und schließen eine bestehende Lücke in der Innenbearbeitung. Die Innenkonturierung wird dadurch zukünftig für Bohrungen nahezu beliebiger Tiefe ermöglicht, sodass leichtere, funktionalere und belastungsgesteigerte Bauteile hergestellt werden können.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Einsatzfelder und Anwendungsbeispiele

Prozess-, Werkzeug- und Werkstoffentwicklung nehmen fortwährend eine entscheidende Rolle in der Produktionstechnik ein, um steigende Bauteilanforderungen erfüllen zu können. In diesem Zusammenhang nimmt die Komplexität der zu bearbeitenden Werkstücke zu und es ist zunehmend entscheidend, erzeugte Bohrungen zu konturieren. Zugehörige Bauteile finden sich dabei in verschiedenen Branchen und erfüllen variierende Aufgaben. Mit den vorliegenden Verfahren (vgl. Kapitel 2.3) werden dabei insbesondere in geringen Bearbeitungstiefen sowie bei größeren Bohrungen auch in größeren Bearbeitungstiefen Innenkonturen eingebracht. Beispielfähig können als innenkonturierte Bauteile Druckluftadapter, Gewindeanschlüsse, Statorgehäuse von Elektromotoren, Flugzeuglandebeine, Hydraulikzylinder und Turbinenwellen genannt werden (**Abbildung 2.1**) [BGT24; FSB01; Sui17].

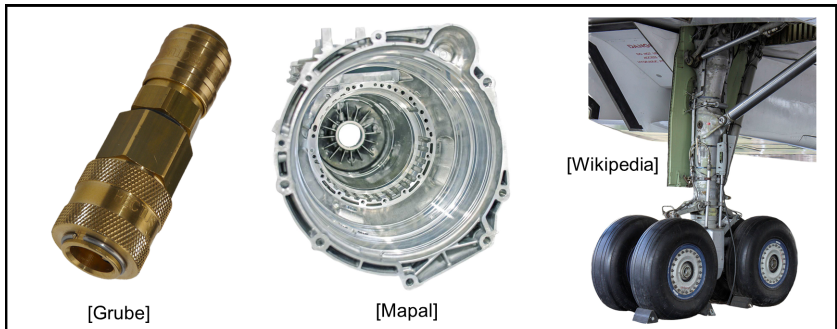


Abbildung 2.1: Beispiele für innenkonturierte Bauteile

Die vorliegende Arbeit adressiert durch die Neuentwicklung eines Werkzeugsystems Anwendungsbeispiele, für die zum aktuellen Zeitpunkt kein produktives Verfahren vorliegt, mit welchem eine Innenbearbeitung realisiert werden kann. Jedoch gibt es viele Bauteile, für die eine Innenkonturierung als sinnvoll erachtet werden kann, um diese leichter, funktionaler und belastbarer zu gestalten. Konkrete Anwendungsfelder für den Entwicklungsgegenstand finden sich im Mobilitätssektor, im Maschinenbau, in der

Luft- und Raumfahrttechnik und in der Lebensmittelindustrie. Spezifische Bauteile werden in **Abbildung 2.2** dargestellt und nachfolgend erläutert.

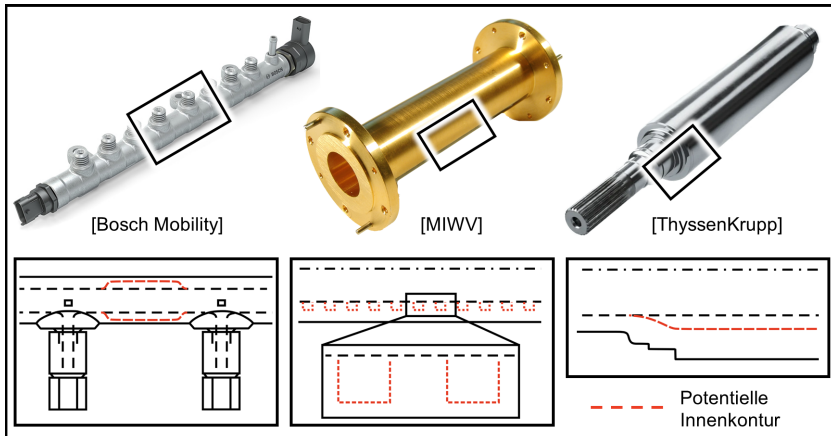


Abbildung 2.2: Potentielle Bauteile für Innenkonturierungen kleiner Tiefbohrungen

Common-Rail-Systeme finden im Bereich der Verbrennungsmotoren ihre Anwendung. Bei diesem System wird der Kraftstoff unter hohem Druck von einer Pumpe in ein Rohrleitungssystem befördert. An diese Rohrleitung sind einzelne Injektoren für die Kraftstoffeinspritzung angeschlossen, die derart alle von einer Leitung versorgt werden, woraus sich die Begrifflichkeit des Common-Rail ableitet. Charakteristisch ist in dieser Weise die Entkopplung von Druckerzeugung und Einspritzung, da das Rail den Kraftstoff unter hohem Druck in einem definierten Volumen speichert. Eingesetzte Drücke variieren je nach Anwendungsfall zwischen $p = 200 \dots 1800$ bar, vereinzelt können noch höhere Drücke benötigt werden. Der derzeitige Stand der Technik sieht für die Innenkontur eine zylindrische Bohrung mit definiertem Durchmesser vor. Dies erlaubt keine belastungsangepasste Gestalt, sodass auch in minder beanspruchten Bauteilbereichen eine nicht benötigte, hohe Wandstärke vorliegt. Eine zweite Charakteristik der Kontur ist der Fasenübergang von der zylindrischen Bohrung zur Injektorzuleitung. Dieser wird in das Bauteil eingebracht, um die durch die hohen Drücke einsetzende Kerbwirkung zu verringern sowie die Fluidodynamik zu verbessern.

Für die Herstellung der Fase wird das elektrochemische Abtragen eingesetzt, wobei es sich prozessbedingt um einen energie- und zeitintensiven Prozess handelt [ABF07; BK14; Rei10].

Die Möglichkeiten, welche sich durch den Einsatz von Auskammern ergeben können, setzen bei den zuvor beschriebenen Eigenschaften der bestehenden Rail-Innenkontur an. Durch ein Aufweiten des Innendurchmessers in Bereichen zwischen zwei Zuläufen kann das Bohrungsvolumen vergrößert werden. Hierdurch entsteht das Potential, das Rail kleiner und belastungsangepasster zu konstruieren. Auch die Fasenübergänge können durch die Auskammertechnologie, im idealen Fall im gleichen Prozessschritt, hergestellt werden. Dies bedeutet eine Zeit- und Energieersparnis und wirkt sich somit positiv auf die kostenoptimierte Produktion von Common Rails aus.

Als zweites Beispiel können Wellenleiter genannt werden, die dazu dienen, elektromagnetische Wellen zu führen, zu leiten oder zu begrenzen. Eine wichtige Art von Wellenleitern sind Hohlleiter, welche sich durch ihre runde oder rechteckige Innenkontur auszeichnen. Der Aufbau von Hohlleitern ermöglicht eine effiziente Führung von Wellen unterschiedlicher Frequenzen, insbesondere Mikrowellen. Dies geschieht durch die Verwendung einer metallischen Röhre, die in der Lage ist, die Wellen aufgrund der Leitungseigenschaften von Metall zu führen. Vorteile des Einsatzes von Hohlleitern sind die geringe Dämpfung, minimale Störungsanfälligkeit sowie die Fähigkeit zur Übertragung hoher Leistungen. Hohlleiter finden dabei unter anderem in der Mikrowellenkommunikation für Richtfunkverbindungen und Satellitenkommunikationssysteme Anwendung. Darüber hinaus werden sie im Bereich der Hochfrequenztechnologien in Schaltungen und Geräten eingesetzt, die eine präzise und leistungsfähige Signalübertragung erfordern. Auch in der Medizintechnik werden Hohlleiter eingesetzt, beispielsweise in bildgebenden Verfahren wie der Magnetresonanztomographie [Das01; Kue21].

Hohlleiter weisen gestalt- und materialbedingt Übertragungsverluste auf, da die Wellen kontinuierlich gedämpft werden, wobei diese Leitungsverluste mit steigender Frequenz zunehmen. Diese Charakteristik kann begrenzt werden, indem die Leiter eine spezifische Innenkontur mit Einstichen aufweisen, wobei Einstichbreite, -tiefe und -abstand an der verwendeten Wellenfrequenz orientiert werden [MKP⁺14].

Neben diesen Beispielen können Komponenten in der Antriebstechnik, vor allem für die Elektromobilität, innenkonturiert werden. Antriebswellen von elektrischen Fahrrädern weisen meist eine zylindrische Durchgangsbohrung auf. Somit verfügt eine belastungsgerechte Innenkonturierung dieser Bohrung über das Potential, das Bauteilgewicht zu reduzieren und Material einzusparen. Rotorwellen von Elektromotoren stellen für die beabsichtigte Bearbeitung eine weitere mögliche Komponente dar. Sie übertragen das elektrisch induzierte Drehmoment an das Getriebe und wandeln damit im Fahrzeug elektrische in kinetische Energie um. Ausgeführt werden Rotorwellen entweder als Voll- oder als Hohlwelle, wobei durch den Einsatz von Hohlwellen Gewichtseinsparungen und eine effiziente Kühlung realisiert werden können. Hohlwellen erfordern jedoch bisher einen mehrteiligen Aufbau, sodass durch eine innenkonturierte, einteilige Struktur Produktionszeit reduziert und Fügestellen eingespart werden könnten [HD19; Tek24; thy24]. Als weitere Anwendungsbeispiele können Innenkonturen für die Einbringung von Messdatensystemen und innenliegende Verschraubungen genannt werden. Ferner kann der Prozess des Rückwärtssenkens auch auf größere Bauteiltiefen übertragen werden, um einen Umspannvorgang des Werkstücks zu vermeiden.

2.2 Grundlagen der Innenkonturierung

Trennende Fertigungsverfahren bilden die Grundlage für die vorliegende Arbeit, da ein Großteil der Verfahren zur Innenkonturierung (s. Kapitel 2.3) sowie die in den Untersuchungen verwendeten Verfahren dieser Gruppe zugeordnet werden können. Nachfolgend sollen daher zunächst die Grundlagen der Zerspanung und im Anschluss die spezifischen Verfahren Drehen und Tiefbohren dargestellt werden.

Grundlagen der Zerspanung

Trennen umfasst nach DIN 8580 alle Fertigungsverfahren, bei denen die Formänderung durch eine Verminderung des Zusammenhaltens von Körnern bewirkt wird. Bei den Untergruppen des Spanens werden nach Definition Werkstoffschichten in Form von Spänen auf mechanischem Wege durch die Schneiden eines Werkzeuges von einem Werkstück abgetrennt [DIN8589-0; DIN8580]. In den weiteren Beschreibungen wird das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide fokussiert, bei dem Schneidanzahl, Schneidkeilgeometrie und Schneidenlage des Werkzeuges bestimmt sind. Allen spanenden Verfahren ist ein Schneidkeil gemein, bei dem es sich um einen durch die Spanfläche und die Freifläche gebildeten Keil handelt, an welchem durch eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück Späne entstehen [DIN6581]. Der grundsätzliche Aufbau eines Schneidkeils sowie relevante Größen der Zerspanungsgeometrie werden in **Abbildung 2.3** dargestellt.

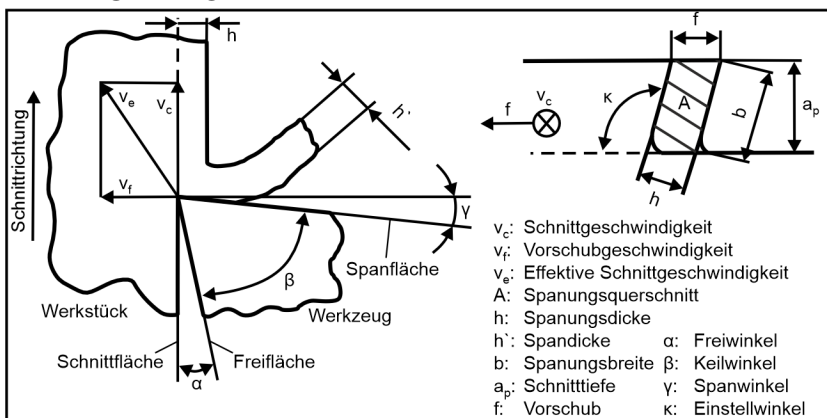


Abbildung 2.3: Relevante Größen der Eingriffssituation eines Schneidkeils nach [Klo18]

Die Werkzeuggestalt nimmt Einfluss auf den Spanbildungsprozess und die entstehende makro- sowie mikroskopische Werkstückgestalt. Bei der Bearbeitung läuft der sich bildende Span auf der Spanfläche ab, die Freifläche ist zur entstehenden Schnittfläche des Werkstücks gerichtet. Beide Flächen treffen sich in der Strecke, die als Schneide S bezeichnet wird. Die für den Prozess relevanten Zerspanungsgrößen teilen sich in die Schnitt- und Spanungsgrößen auf. Die Schnittgrößen umfassen beim Drehen den Vorschub f sowie die Schnitttiefe a_p und sind mittel- oder unmittelbar einstellbar. Aus diesen Schnittgrößen und dem Werkzeugeinstellwinkel κ ergeben sich die Spanungsgrößen Spanungsbreite b und Spanungsdicke h , die die Spanbildung entscheidend beeinflussen. Die Schneidkeilgeometrie und die Schnittgrößen bestimmen zudem, neben dem Werkstückstoff und der Schnittgeschwindigkeit, die auf das Werkzeug wirkende Zerspankraft. Diese lässt sich auf die Einzelkräfte Schnittkraft F_c , Vorschubkraft F_f und Passivkraft F_p aufteilen (**Abbildung 2.4a**) [DT11; Sch02; Tik09; Tsc02].

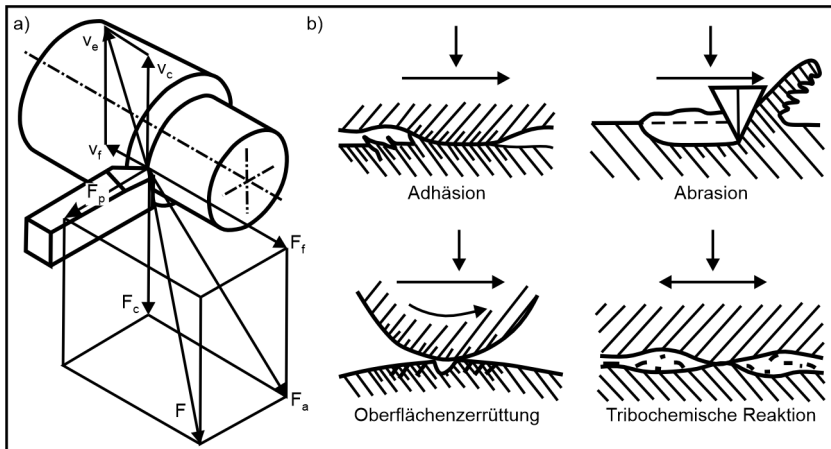


Abbildung 2.4: a) Komponenten der Zerspankraft nach [DIN6584];
b) Verschleißmechanismen nach [SHS14]

Die Zerspankraft entsteht durch Scherkräfte bei der Trennung des Spans vom Werkstück sowie durch Reibungskräfte zwischen Werkstück und Werkzeug an der Span- und den Freiflächen. Das Verständnis und die präzise Kenntnis der Zerspankraft ist von entscheidender Bedeutung für die Optimierung von Bearbeitungsprozessen. Dies wird unter anderem für die Schnittparameterwahl, Standzeiτοptimierungen des Werkzeugs und Verbesserungen der Werkstückqualität genutzt. In-situ-Messungen können

hierbei Prozessauffälligkeiten wie Werkzeugverschleiß und Schwingungen detektieren. Für die Ermittlung der Kraftkomponenten werden verschiedene Methoden angewendet. Zum einen können experimentelle Messungen mit entsprechender Technik wie z.B. Piezoelement-basierten Dynamometern während der Bearbeitung erfolgen. Zum anderen finden Simulationen, Modellierungen sowie analytische Berechnungen auf Basis theoretischer Annahmen und empirischer Daten Anwendung [BB21; HKU*14; TJJ*06].

Neben der mechanischen Belastung wird die Gesamtbelastung des Schneidteils durch die thermischen und chemischen Belastungen komplettiert. Ursache der thermischen Belastung ist die Umwandlung in Wärmeenergie an verschiedenen Quellen. Hierbei entsteht Wärme aufgrund von Scherung und Trennung des Materials sowie Reibung an Span- und Hauptfreifläche. Bei der konventionellen Stahlzerspanung wird der Großteil der Wärme (ca. 75-90 %) durch den Span abgeführt, kleinere Anteile werden durch das Werkzeug und das Werkstück aufgenommen. Jedoch kann sich diese Aufteilung in Abhängigkeit des Werkstoffes verschieben, da Werkstoffe mit geringer Wärmeleitfähigkeit einen höheren thermischen Energiefluss zum Schneidstoff und folglich eine höhere thermische Werkzeugbelastung bedingen. Weiterhin liegt bei der Zerspanung eine chemische Beanspruchung der Werkzeuge vor, weil hohe Temperaturen und Drücke zu Oxidation, Diffusion und Adhäsion führen können [Büc21; Kro54; Sch02]. Die aufgeführten Belastungen verursachen Werkzeugverschleiß, der sich in einem Schneidstoffabtrag und einer Veränderung der Schneidkeilgestalt darstellt. Die zugrundeliegenden Verschleißmechanismen werden in Abbildung 2.4b aufgezeigt und resultieren in verschiedenen Verschleißformen am Schneidteil. In Abhängigkeit des Werkstückmaterials, der Schnittparameter, des Kühlschmierstoffes und des Werkzeugs können in der Folge insbesondere Freiflächen-, Kolk- und Kerbverschleiß sowie Ausbrüche und Kambrisser auftreten [BG20-1; Sch02].

Um den genannten Anforderungen gerecht zu werden, müssen die eingesetzten Schneidstoffe verschiedene Eigenschaften aufweisen. Hauptgruppen der Schneidstoffe, die diese Anforderungen zu unterschiedlichen Teilen erfüllen, sind metallische Werkstoffe, Verbundschneidstoffe und keramische Schneidstoffe. In der vorliegenden Arbeit werden in den experimentellen Untersuchungen Hartmetall-Werkzeuge eingesetzt, die den Ver-

bundschneidstoffen zuzuordnen sind. Hartmetalle bestehen aus einer metallischen Bindephase sowie harten eingelagerten Karbiden und können über das Verhältnis und die Art der Metallkarbide und des Binders auf den Prozess angepasst werden. Je nach Auslegung kann eine hohe Zähigkeit oder eine hohe Härte eingestellt werden. Zusätzlich zum Grundwerkstoff der Schneiden ist es möglich, durch Beschichtungen die Werkzeugeigenschaften zu verändern. Mittels verschiedener Beschichtungsverfahren wie Chemical Vapor Deposition (CVD) oder Physical Vapor Deposition (PVD) werden dünne Schichten auf den Schneidwerkstoff aufgetragen, womit vormalig gegensätzliche Eigenschaften wie Zähigkeit und Verschleißbeständigkeit vereint werden können. Schichtverbundsysteme aus mehreren Schichtlagen können zu einer weiteren Kombination verschiedener Funktionen beitragen, sodass in der Folge Werkzeugverschleiß reduziert und die Standzeit erhöht werden können [HKU*14; Sch02; WDJ15].

Der der Zerspanung zugrundeliegende Spanbildungsprozess beeinflusst die Prozesssicherheit und die Güte des gefertigten Bauteils. Der grundlegende Vorgang der Spanentstehung bei einer Fließspanbildung sowie die Spanbildungsarten werden in **Abbildung 2.5** aufgezeigt und im Folgenden erläutert.

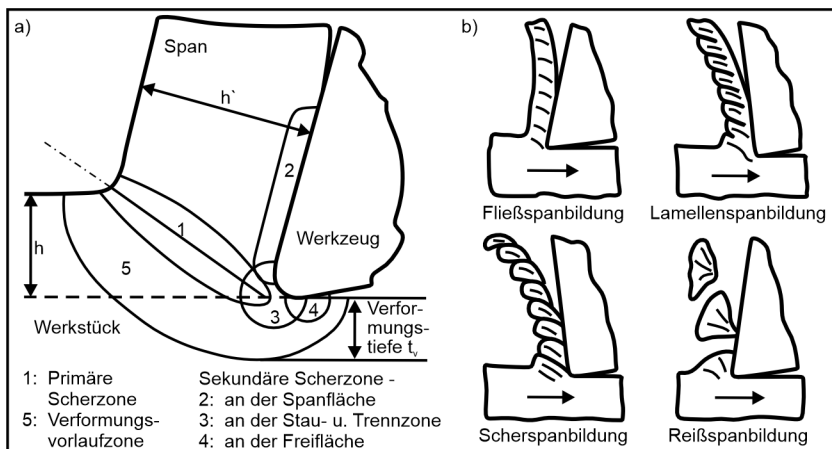


Abbildung 2.5: a) Scherzonenmodell nach [War74];
b) Spanbildungsarten nach [DT11]

Die Spanbildung beschreibt den mechanischen Trennvorgang, bei der das Werkzeug in das Werkstück eindringt und dieses elastisch und plastisch verformt, bis ein Fließen einsetzt. Der Stoffzusammenhalt wird aufgehoben, sodass Teile des Werkstoffes abgetrennt werden und über die Spanfläche gleiten, wodurch der Span ausgebildet wird. Die Scherung des Materials wird in der primären Scherzone vollzogen, während in den sekundären Scherzonen 2 und 4 eine plastische Verformung durch Reibvorgänge an der Span- und der Freifläche auftritt. Verformung sowie Werkstofftrennung unter Druckspannungen stellen die Vorgänge in der Scherzone 3 dar. Geringere plastische Verformungen treten in der Verformungsvorlaufzone auf und bedingen eine Beeinflussung der Werkstückrandzone [BG20-2; DT11; Sch02; War74].

In Abhängigkeit der Art der Entstehung sowie der Form und Größe, werden verschiedene Spanarten (Abbildung 2.5b) bzw. Spanformen unterschieden. Vor allem bei duktilen Werkstoffen, einem positiven Spanwinkel und geringen Spannungsdicken können Fließspäne auftreten, bei denen eine kontinuierliche Fließspanbildung ohne Trennung von Partikeln vorliegt. Bei Scherspänen findet hingegen eine Partikeltrennung statt, jedoch Verschweißen diese Partikel bedingt durch Reibungswärme beim Gleiten über die Spanfläche. Lamellenspäne bilden eine Zwischenform der Fließ- und Scherspäne. Bei der vierten Spanart, den Reißspänen, tritt nur eine geringe Verformung in der Scherzone auf und Partikel werden vollständig aus dem Werkstück gerissen. Dies ist insbesondere bei spröden Werkstoffen, großen Spannungsdicken und geringen Schnittgeschwindigkeiten zu beobachten. Beispiele für Spanformen sind Band-, Wendel-, Spiral-, Bruch- und Nadelspäne. Die Spanformen wirken sich unter anderem auf die Werkstückoberfläche, den Transport, das Spanvolumen und die Prozesssicherheit aus. Dies bedeutet, dass bei Spanprozessen bestimmte Formen erzielt und andere Formen vermieden werden sollten [DT11; Fri18; Klo18; Sch02].

Drehen

Beim Drehen handelt es sich um ein spanendes Fertigungsverfahren mit werkstückgebundener Drehachse, einer geschlossenen Schnittbewegung und einer beliebigen Vorschubbewegung. Bis auf vereinzelte Ausnahmen stellt im Allgemeinen das Werkstück die rotierende Komponente dar. Dieses Verfahren bildet eine Kernkomponente für die neuartige Werkzeugentwicklung in dieser Arbeit (vgl. Kapitel 6) und stellt auch das verwendete

Prinzip für verschiedene Verfahren zur Innenkonturierung (vgl. Kapitel 2.3) dar. Die bei der Bearbeitung verwendeten Drehmeißel können dabei einteilig aufgebaut sein oder über eine gelötete oder geschraubte Schneide verfügen. Häufige industrielle Verwendung finden insbesondere geschraubte Wendeschneidplatten (**Abbildung 2.6a**) auf entsprechenden Haltern, die über eine Werkzeugaufnahme in der Werkzeugmaschine eingespannt werden.

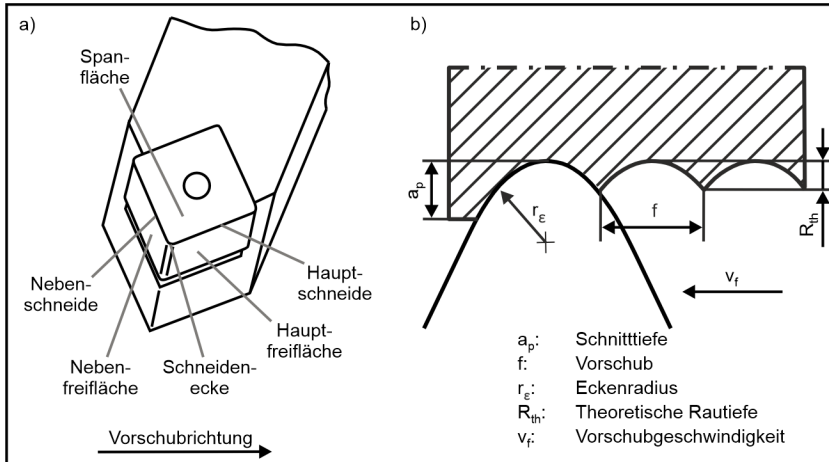


Abbildung 2.6: a) Aufbau eines Werkzeughalters;
b) Entstehung der theoretischen Rautiefe nach [PHL+08]

Die Hauptschneide weist in Vorschubrichtung und bewirkt die Scherung und Trennung des Spans, wohingegen die Nebenschneide für die Entstehung der Werkstückoberfläche von Bedeutung ist. Die Spanfläche kann über eine Spanleitstufe verfügen, mittels dieser eine Umlenkung des ablaufenden Spans realisiert werden kann. Resultierend kann die verstärkte Umformung einen Spanbruch bewirken [CL01]. Darüber hinaus verfügen die Schneiden meist über eine Schneidkantenverrundung, da gesinterte bzw. geschliffene Schneidkanten verschiedene Mikrodefekte aufweisen. Durch eine gezielte Kantenpräparation wird in der Folge eine definierte Kantenkontur erreicht, sodass die Schneidenstabilität erhöht und Oberflächenstruktur und -rauheit verbessert werden [Tik09]. Die zwischen Haupt- und Nebenschneide befindliche Schneidenecke besitzt in der Regel einen Eckenradius, welcher zusammen mit dem Vorschub die theoretische Rautiefe und damit die erreichbare Oberflächengüte bestimmt (Abbil-

dung 2.6b). Eine geringe Rauheit kann somit durch große Eckenradien erreicht werden, Konturanforderungen, Spanbildung und die Aufteilung der Zerspankraftkomponenten reduzieren jedoch in der Praxis häufig den maximal wählbaren Eckenradius [DT11; Sch02].

Bei der Drehbearbeitung können je nach Werkzeugmaschine, Prozess, Werkstoff und Werkzeug verschiedene Kühlschmierstoffkonzepte eingesetzt werden. In vielen Fällen werden Emulsionen verwendet, die durch den großen Wasseranteil über eine hohe Kühlwirkung verfügen. Dies begründet sich in der hohen Wärmeleitfähigkeit sowie -kapazität des Wassers, wodurch die Schneide gezielt gekühlt und die entstehende Wärme effektiv abtransportiert werden können [Wei99]. Höhere Schmierwirkungen weisen Öle auf, die die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück reduzieren können, sodass die Wärmeentstehung ursächlich minimiert wird. Beide Stoffe können bei Einsatz unter Hochdruck zu einem verbesserten Spanbruch beitragen, indem der Span verstärkt umgelenkt wird [KLE*10]. Auch eine Trockenbearbeitung ist möglich und vorwiegend bei konventionellen Leit- und Zugspindeldrehmaschinen vorzufinden. Weiterhin wird verstärkt das Konzept der Minimalmengenschmierung eingesetzt, das sich aufgrund ökonomischer und ökologischer Aspekte vorteilhaft zeigt und auch zum Teil zu einer verbesserten Bauteilqualität beitragen kann [WIS*04]. Weitere industriell nicht stark verbreitete Konzepte verwenden kryogene Medien wie Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid. Dies gestaltet sich in der Umsetzung aufwendiger, kann jedoch Vorteile hinsichtlich Werkzeugverschleiß, Oberflächengüte und Spanbruch aufweisen [HDJ01; Mac12].

Drehen gehört zu den wichtigsten Verfahren in der spanenden Fertigung, da hiermit ein Großteil der meist rotationssymmetrischen Werkstücke bearbeitet wird. Es weist eine breite Anwendbarkeit in verschiedenen Branchen und eine Vielfalt der herzustellenden Bauteile auf. So können Wellen und Achsen für den Maschinenbau, Zylinderstangen und Ventilgehäuse für die Hydraulik- und Pneumatikindustrie sowie spezielle Komponenten für die Elektronikbranche, wie Präzisionsbuchsen und Gewindebolzen, mittels Drehen hergestellt werden. Die Maßgenauigkeiten gedrehter Teile hängen vorwiegend vom Verfahren, vom Werkzeug und den Abmessungen sowie dem Material des Werkstücks ab. Als übliche Genauigkeiten lassen sich IT12 bis IT7 angeben, mit Sonderdrehverfahren lässt sich dies noch weiter optimieren. Hierzu gehören das Präzisions-, das Hochpräzisions- und das Ultrapräzisionsdrehen [Fri18].

Tiefbohren

Bohren ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, bei dem mit kreisförmiger Schnittbewegung rotationsymmetrische Vertiefungen erzeugt und bearbeitet werden können. Die Achse der zu erzeugenden Innenfläche stimmt hierbei mit der Drehachse des Werkzeugs überein. Werden Bohrungen mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von $l/D > 10$ hergestellt, so wird dies als Tiefbohren bezeichnet. Aufgrund verfahrensbedingter Vorteile bei Oberflächengüte und Genauigkeit der Bohrung, findet Tiefbohren jedoch bereits ab $l/D > 3$ Anwendung [BBH⁺18; DIN8589-2; VDI3210-1]. Eine Einteilung der gängigen Tiefbohrverfahren erfolgt in **Abbildung 2.7**.

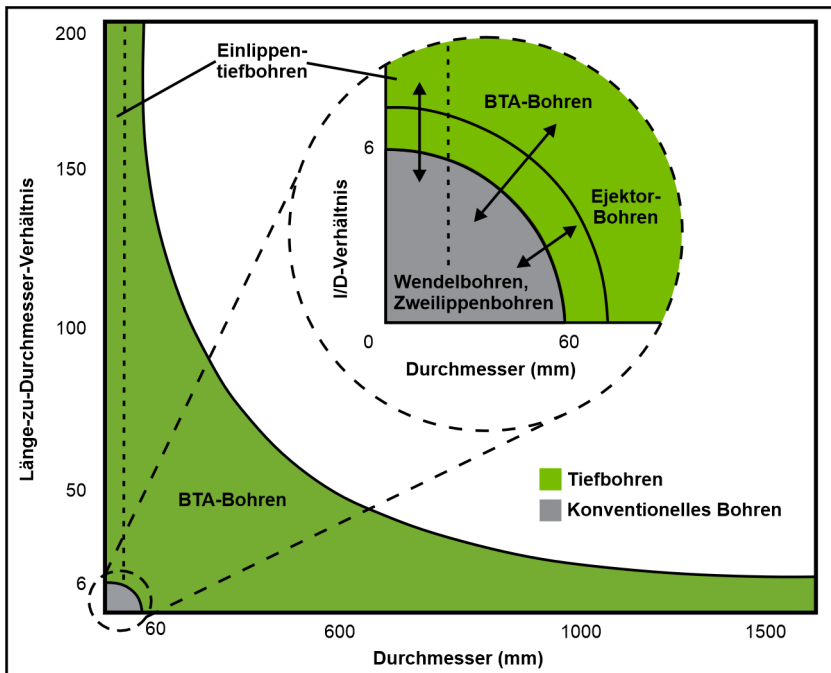


Abbildung 2.7: Einteilung der Tiefbohrverfahren nach [BBH⁺18]

Tiefbohren bildet in den meisten Fällen die Vorbereitung für eine angeschlossene Innenkonturierung von Bauteilen. Es stellt gleichzeitig auch das Basisprinzip für bestehende Verfahren zur tiefen Konturierung dieser Bohrungen dar (vgl. Kapitel 2.3). Die klassischen Tiefbohrverfahren zeichnen

sich durch einen asymmetrischen Werkzeugaufbau sowie einer Abstützung in der Bohrung aus und umfassen das Einlippen-, BTA- und Ejektortiefbohren. Der asymmetrische Aufbau bedingt radiale, sich nicht aufhebende Zerspanskräfte, die über Führungsleistenelemente auf die Bohrungswand übertragen werden. In dieser Weise kann sich das Werkzeug in der Bohrung abstützen und führen, wodurch die im Verhältnis zum Durchmesser hohen Bohrtiefen realisiert werden können [Cro74; Gri93; GG93; VDI3210-1]. Mittlerweile wird das Tiefbohren im begrenzten Durchmesserbereich bis $d < 10$ mm auch zunehmend mit symmetrisch aufgebauten Wendeltiefbohrern umgesetzt, wodurch höhere Schnittwerte und damit eine höhere Produktivität erreicht werden können [BF10a; BF10b; Fel12]. **Abbildung 2.8** stellt den schematischen Aufbau der Werkzeugköpfe von den einzelnen Tiefbohrverfahren dar.

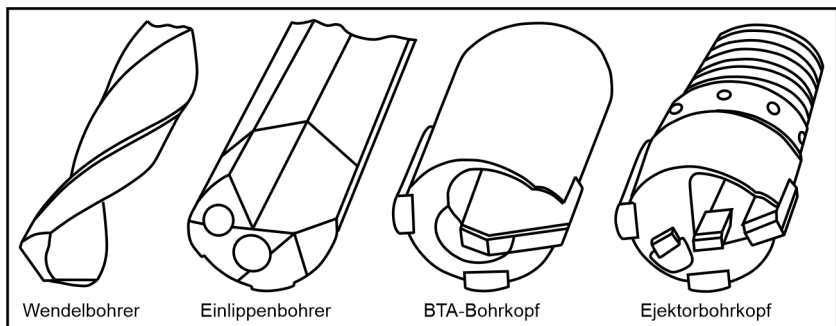


Abbildung 2.8: Aufbau von Tiefbohrwerkzeugen nach [VDI3210-1]

Einlippenbohrer weisen am Bohrkopf einen Aufbau mit einer Schneide, bestehend aus Außen- und Innenschneide, auf. Bei kleineren Durchmessern werden sowohl Bohrkopf als auch Werkzeugschaft aus Hartmetall gefertigt, aus Kosten- und Ressourcengründen nutzen Hersteller bei größeren Durchmessern einen Hartmetall-Bohrkopf, welcher über Stoff- oder Kraftschluss mit einem Stahlschaft verbunden wird. Über eine Einspannhülse erfolgt die Anbindung an die Werkzeugmaschine. Am Bohrkopfumfang befinden sich die Führungsleistenbereiche, die über einen geringeren Radius als den Bohrungsradius verfügen, sodass ein Linienkontakt zwischen Führungsleiste und Bohrungswand vorliegt. Es wurden verschiedene Anschlüsse der Schneide entwickelt, sodass eine prozess- und werkstoffspezifische Auswahl erfolgen kann, um z.B. höhere Vorschübe oder eine gezielte Oberflächenkonditionierung zu ermöglichen [VDI3208]. Die KSS-Zuführung wird

bei Einlippenbohrern innenliegend umgesetzt, der Kühlkanalaustritt am Bohrkopf ist hierbei in Nierenform oder zweigeteilt kreisförmig ausgeprägt [Ast14; VDI3208]. Die entstehenden Späne werden über die gerade Spannut abgeführt, wozu hohe Volumenströme und Drücke erforderlich sind. Hierbei entsteht ein Kontakt zwischen Span und Bohrungswand, sodass dies die Oberflächengüte negativ beeinträchtigen kann. Dieses Tiefbohrverfahren wird üblicherweise in einem Durchmesserbereich von $D = 0,8 \dots 40$ mm auf Tiefbohrmaschinen sowie Bearbeitungszentren eingesetzt [LW01; VDI3210-1]. Als KSS finden, auch in Abhängigkeit der Werkzeugmaschine und bauteilspezifischen weiteren Prozesse, nicht-wassermischbare Tiefbohröle auf Mineral- oder Esterölbasis oder wassermischbare Emulsionen Anwendung. Zu den Bauteilen, deren Produktion Einlippentiefbohrungen umfassen, gehören hydraulische Versorgungsbohrungen, Common Rails und verschiedenartige Ventile [Kir16; Löb03; Wit07].

Beim BTA-Bohren wird der Werkzeugkopf über ein ein- oder mehrgängiges Gewinde an ein Bohrrohr geschraubt. Der Aufbau des Werkzeugs kann ein- oder mehrschneidig umgesetzt werden, bei mehreren Schneiden und größeren Durchmessern findet sich in der Regel eine gegenüberliegende Anordnung der Schneiden, wodurch die entstehenden Radialkräfte reduziert werden. Sowohl die Schneidelemente als auch die Führungsleisten können geschraubt oder gelötet befestigt werden und sind somit als Verschleißelemente auch auswechselbar. BTA-Bohrköpfe verfügen meist über zwei oder drei Führungsleisten, wobei die ersten beiden Führungsleisten ca. 90° bis 180° hinter der Hauptschneide angeordnet sind und dem größten Verschleiß unterliegen. Die KSS-Zufuhr zum Werkzeugkopf erfolgt bei diesem Tiefbohrverfahren durch einen Ringraum zwischen Bohrrohr und Bohrungswand. Dies bedarf der Verwendung eines Bohrölauführapparats, welcher zum Werkstück und zum Bohrrohr abgedichtet werden muss. Der KSS, bei welchem es sich meist um ein Tiefbohröl handelt, und die Späne werden im Anschluss durch das Spanmaul des Werkzeugkopfes und das Bohrrohr abgeführt. Die eingesetzten Tiefbohrmaschinen zeichnen sich dabei insbesondere durch eine leistungsstarke KSS-Anlage zur Zuführung und Reinigung der Späne aus. Anwendung findet das BTA-Bohren in Durchmesserbereichen von $D = 6,3 \dots 180$ mm und Bohrungstiefen von $100 \times D$, beim Aufbohren sind Durchmesser bis $D = 1500$ mm erreichbar. Beispielhafte Bauteile sind Hydraulikzylinder, Flugzeuglandebeine und Getriebewellen [VDI3210-1; VDI3209-1; WL98].

Basierend auf dem Prinzip des BTA-Bohrens wurde das Ejektorbohren entwickelt, wobei der grundsätzliche Unterschied in der KSS-Zuführung liegt. Diese Verfahrensvariante umfasst ein Doppelrohr-System, sodass im Ringraum zwischen äußerem Bohrrohr und dem Innenrohr der KSS zur Wirkstelle geleitet werden kann. Der KSS-Austritt erfolgt am Bohrkopf über definierte Austrittsöffnungen und der Rückfluss mit den Spänen durch das Innenrohr. Dieser Rückfluss wird durch den Ejektoreffekt ermöglicht, indem ein Teil des KSS über Ejektordüsen direkt in das Innenrohr geführt wird und in dieser Weise einen Unterdruck erzeugt. Durch dieses Prinzip entfällt die Notwendigkeit einer Abdichtung zwischen Werkstück und Bohrbuchse, wodurch sich ein größeres Spektrum an Werkzeugmaschinen für die Anwendung eröffnet. Dazu gehören neben Drehmaschinen auch Bearbeitungszentren, sodass häufig eine Komplettbearbeitung des Bauteils durch das Ejektor-Prinzip realisiert werden kann. Klassische zu bearbeitende Komponenten für das Ejektorbohren sind Ventilführungen und Kurbelwellen [VDI3210-1; VDI3209-1].

Die Tiefbohrverfahren mit asymmetrischem Aufbau vereint das Prinzip der Führung und Abstützung in der Bohrung mittels Führungsleisten. Dieses Prinzip wird am Beispiel des Einlippenbohrers nachfolgend erläutert. Die radialen Anteile der Schnitt- und Passivkraft, die sich bei symmetrischen Bohrwerkzeugen aufheben, werden über die Führungsleisten an die Bohrungswand übertragen [Pfl76]. Hierbei wirken die Normalkräfte senkrecht auf die Bohrungswand, während die Reibung an den Führungsleisten tangentiale Kräfte erzeugt (**Abbildung 2.9**). Es sind unterschiedliche Anordnungen der Führungsleisten in Abhängigkeit des Werkstückstoffes und des Prozesses möglich [VDI3208]. Diese Anordnung wirkt sich bei der Bearbeitung auf das Verschleißverhalten, die Bohrungsrandzone sowie die Genauigkeit bei Rundheit, Durchmesser und Mittenverlauf aus [BHK11; Pfl76]. Die Führungsleisten sind dabei in der Werkzeugachse mit einem Führungsleisten-Rückstand hinter der Schneide angeordnet, welche bei der Zerspanung Vorschubrillen erzeugt. Angeschlossen zum Zerspanvorgang wird mittels der Führungsleisten eine Glättung und Einebnung der Bohrungswand durch plastische Verformung und somit eine höhere Oberflächengüte hervorgeföhrt [Fuß86; Gri75; GG85; HE91]. Dieses Glätten ist abhängig von den Führungsleisten, dem Vorschub, der Schnittgeschwindigkeit und dem Werkstoff [BFB87; GG85].

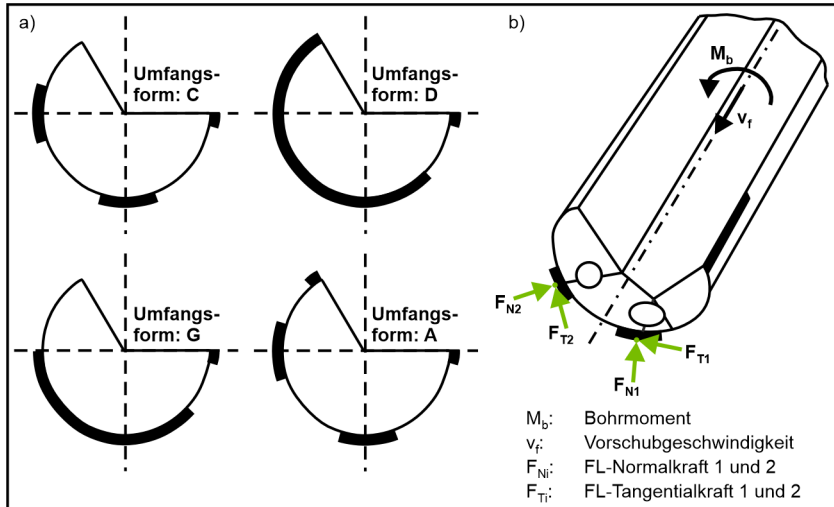


Abbildung 2.9: a) Führungsleistenanordnung nach [VDI3208]; b) Wirkende Kräfte an den Führungsleisten eines ELB nach [Nic23; Pfl76]

2.3 Verfahren zur Innenkonturierung

Es bestehen zur Innenkonturierung unterschiedliche Verfahren mit verschiedenen Anwendungsbereichen und Grenzen. Zwei elementare Kriterien zur Einordnung der Verfahren sind der Durchmesserbereich und das erreichbare l/D -Verhältnis. Eine Übersicht ausgewählter Prozesse wird in **Abbildung 2.10** aufgezeigt. Konturierungen im kleinen Durchmesserbereich werden dabei insbesondere durch das Innendrehen umgesetzt, während tiefe Bearbeitungen vor allem durch die Auskammertechnologie realisiert werden. Aus diesem Grund werden diese zwei Verfahren nachfolgend näher dargestellt, weitere potentielle Methoden werden im Anschluss zusammengefasst.

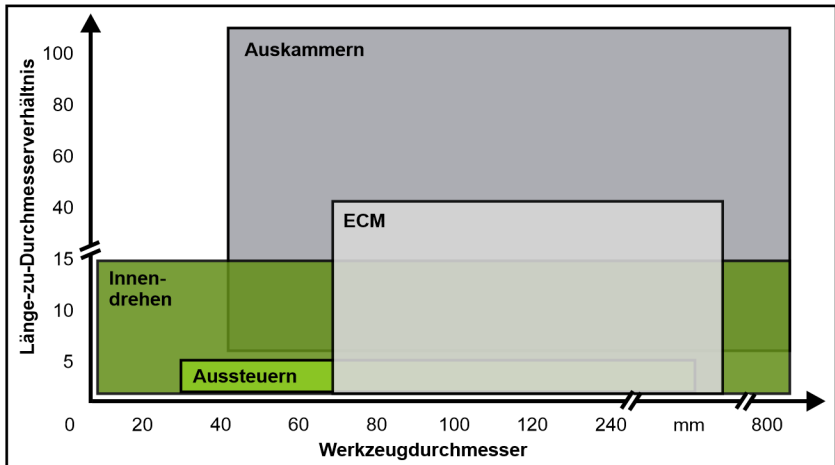


Abbildung 2.10: Einordnung der Verfahren zur Innenkonturierung

2.3.1 Innendrehen

Innendrehen umfasst die Drehbearbeitung aller innen liegenden Flächen, wobei Querbewegungen des Werkzeugs möglich sind [DIN8589-1]. Zu den klassischen Varianten des Innendrehens gehören hierbei Freistiche, Ausdrehen sowie Nuten und Einstiche. Das Verfahren des Innendrehens unterscheidet sich in verschiedenen Punkten zum Außendrehen und weist besondere Charakteristika bei der Werkzeugauslegung und der Prozessführung auf. Die Bohrstange muss zunächst die Auskraglänge aufweisen, um die Bearbeitungsstelle im Werkstück zu erreichen. Darüber hinaus definiert der geringste Durchmesser des Werkstücks die maximale äußere Gestalt

des Werkzeugs. Hieraus folgt bei tiefliegenden Bearbeitungsflächen ein hohes l/D -Verhältnis. Dies begünstigt die generelle Anfälligkeit für Schwingungen sowie Durchbiegungen aufgrund der radialen und tangentialen Kraftanteile, welche auf die Schneide wirken, wodurch in der Folge eine geringe Oberflächengüte sowie Maß- und Formabweichungen auftreten können [PHL⁺08; Sch02]. Insbesondere Ratterschwingungen können durch das Ausbrechen von Schneidkanten zu einer verkürzten Werkzeugstandzeit führen [FE13; TS14]. Diese Schwingungen werden dabei vor allem durch den Regenerativeneffekt hervorgerufen, welcher sich aus der Kombination aus Oberflächenwelligkeit und der momentanen relativen Schwingung zwischen Werkzeug und Werkstück ergibt [AW04]. Ferner können Ratterschwingungen, im Speziellen bei geringeren Schnittgeschwindigkeiten, durch Reiben der Freifläche an der Bauteiloberfläche auftreten [AEO08]. Die beschriebenen Aspekte begrenzen das erreichbare l/D -Verhältnis beim Innendrehen auf $l/D < 16$, beim Einstechen reduziert sich dies auf $l/D < 7$. Darüber hinaus erfordern die Prozesse häufig eine Anpassung der Schnittparameter, sodass die Wirtschaftlichkeit entscheidend gemindert wird.

Von besonderer Relevanz bei diesem Prozess ist die Kraftentstehung, welche durch die Spanungsform und das Werkzeug aktiv beeinflusst werden kann. Im Vergleich zum Außendrehen treten beim Innendrehen aufgrund der konkaven Innenfläche, die zu einer höheren Spanstauchung führt, höhere Kräfte auf. Resultierend aus dem größeren Scherwinkel ergibt sich eine höhere Schnittkraft, die in der Regel 20 % über der Schnittkraft einer vergleichbaren Außendrehbearbeitung liegt. Diese relative Differenz kann durch die Einflussparameter Durchmesser und Einstellwinkel variieren [HD67; Sch02].

Im Allgemeinen sollte die Radialkraft gering gehalten werden, um Abdrängungen und Schwingungen zu vermeiden. Dies kann erreicht werden, indem ein kleiner Eckenradius an der Werkzeugschneide gewählt wird, der eine axiale Kraftverteilung entlang des Halters bedingt. Darüber hinaus sollten Einstellwinkel unter 90° vermieden werden. Weiterhin sind positive Spanwinkel anzustreben, die zu einer geringeren Schnitt- und Passivkraftentstehung beitragen können. Diese Aspekte haben jedoch auch Einfluss auf die Oberflächengüte, die Werkzeugbelastbarkeit und die Spanbildung, sodass Zielkonflikte entstehen können. Beispielsweise können größere Eckenradien zu einer geringeren Rauheit beitragen, während positive Span-

winkel eine Langspanbildung begünstigen. Dabei gestaltet sich die Spanabfuhr herausfordernder als beim Außendrehen, da die Späne sich nicht ungehindert entfernen können. Gelöst wird dies häufig durch Zuführung von Kühlschmierstoff unter hohem Druck, wobei der Kühlschmierstoff von außen an die Schneide geführt oder eine innere Kühlmittelzufuhr gewählt werden kann [Jen15; Sch02].

Der grundsätzliche Aufbau des Werkzeugsystems bzw. die gewählte Bohrstange haben eine große Relevanz beim Innendrehen und beeinflussen die erreichbaren l/D -Verhältnisse, die Werkzeugstandzeit und die Bauteilgüte.

Abbildung 2.11 ordnet nachfolgend die Bohrstangen in Abhängigkeit des Werkzeugdurchmessers und des l/D -Verhältnisses ein.

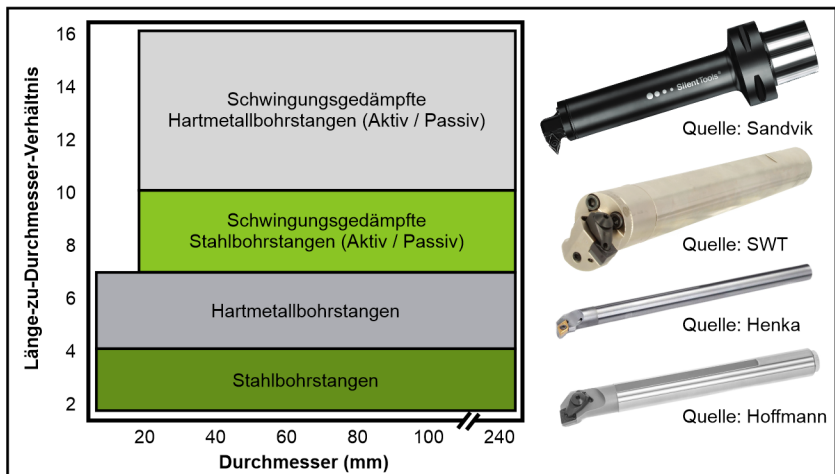


Abbildung 2.11: Einordnung der Bohrstangen für die Innendrehbearbeitung nach [Fuß18; Jen15]

Bei geringen Bohrtiefen finden standardmäßig Stahlbohrstangen Anwendung, Hartmetallbohrstangen können darüber hinaus bis $l/D = 7$ eingesetzt werden. Neben Stahl und Hartmetall können darüber hinaus Kohlefaser-Epoxid-Verbundwerkstoffe und metallische Kombinationsstrukturen verwendet werden [FM19b]. Mit größerer Werkzeugauskragung steigen jedoch bei allen Methoden die Rauheit der Werkstückoberfläche und die Durchbiegung der Bohrstange [AAS13]. Weiterhin ist der Einsatz von schwingungsgedämpften Bohrstangen möglich, um die realisierbaren Bearbeitungstiefen zu erhöhen. Hierdurch werden die bestehenden Grenzen bei Stahlhaltern auf $l/D = 10$ sowie bei Hartmetallhaltern auf $l/D = 16$ verschoben [TFS20].

Bei den schwingungsgedämpften Systemen sind aktive und passive Dämpfer zu unterscheiden, wobei aktive Dämpfer dem System gezielt Energie zuführen und passive Dämpfer die Bewegungsenergie der Schwingung entziehen und umwandeln [ABE⁺07; VPL⁺19; WB06; YNS21]. Die passiven Systeme umfassen elektrorheologische und magnetorheologische Flüssigkeitsdämpfer, Schwingungstilger sowie Partikeldämpfer. Letztere, welche verbreitet untersucht und eingesetzt werden, nutzen Partikel in einer Kavität der Bohrstange, um Vibrationen zu dämpfen und den Werkzeugüberhang zu vergrößern [DDS⁺19; SDP16; TDP⁺19]. Aktive Dämpfer sind komplexer und teurer, können aber die Ratterfestigkeit und die dynamische Steifigkeit für verschiedene Prozessbedingungen weiter steigern. Hierzu zählen elektrohydraulische, piezoelektrische und elektromagnetische Dämpfersysteme [FM19a].

2.3.2 Auskammerverfahren

Ausgehend von den limitierenden Möglichkeiten des Innendrehens entstand der Bedarf auch Konturierungen von Bauteilen in größeren Bearbeitungstiefen durchzuführen. Aus diesem Grund wurde die Auskammertechnologie entwickelt, welche auch als Bottle Boring oder Innenkonturierung bezeichnet wird. Diese Technologie vereint Eigenschaften des Tiefbohrens mit denen des NC-gesteuerten Innendrehens und ergänzt den Aufbau konventioneller Tiefbohrwerkzeuge um eine weitere Achse. **Abbildung 2.12** zeigt nachfolgend schematisch beispielhafte Auskammerwerkzeuge.

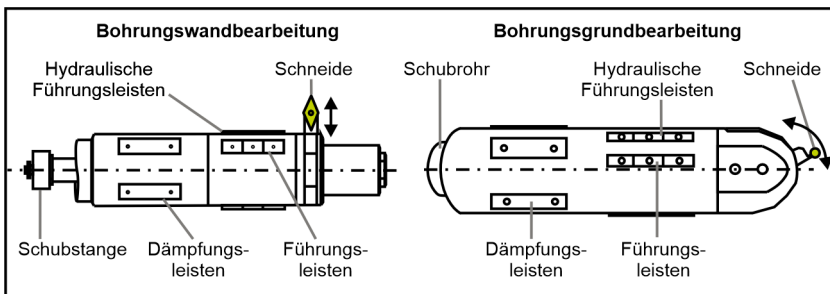


Abbildung 2.12: Möglicher Aufbau von Auskammerwerkzeugen

Der Systemaufbau umfasst einen Werkzeugkopf, der sich, ähnlich zu den klassischen Tiefbohrverfahren, mit Hilfe von Führungsleisten in der Bohrung abstützt. Hierfür bedarf es einer maßgenauen Führungsbohrung, die zuvor meist mittels des BTA-Tiefbohrens erzeugt wird und eine Durchgangsbohrung darstellt. Diese Vorbohrung bestimmt die später erreichbare Genauigkeit bei der Auskammerbearbeitung, weshalb zur Verbesserung der Bohrungsqualität teilweise ein ziehender Aufbohrvorgang auf das BTA-Vollbohren folgt. Darüber hinaus verfügt der Werkzeugkopf über ein ausstellbares Schneidelement, welches radial verfahren werden kann. Eine axiale Schubbewegung wird hierbei über einen innenliegenden Mechanismus in die radiale Bewegung der Schneide gewandelt, sodass bei Rotation des Werkzeugs oder des Werkstücks die Spanabnahme ermöglicht wird. Die axiale Schubbewegung kann durch eine äußere Antriebseinheit oder einen im Werkzeugkopf integrierten Aktuator erzeugt werden. Die Anbindung des Werkzeugkopfes erfolgt über ein BTA-Verbindungsgewinde an ein Bohrohr, in welchem sich bei äußerer Antriebseinheit ein Schubgestänge befindet. Einzelne Führungsleisten können bei Bedarf für eine bessere Werkzeugführung zudem in einem geringen Maß hydraulisch verfahren und an die Bohrungswand gedrückt werden. Wird der eigentliche Bearbeitungsprozess des Werkzeugsystems betrachtet, so können Kurz- und Langkammerverfahren (**Abbildung 2.13**) unterschieden werden [BBF94; FBP97].

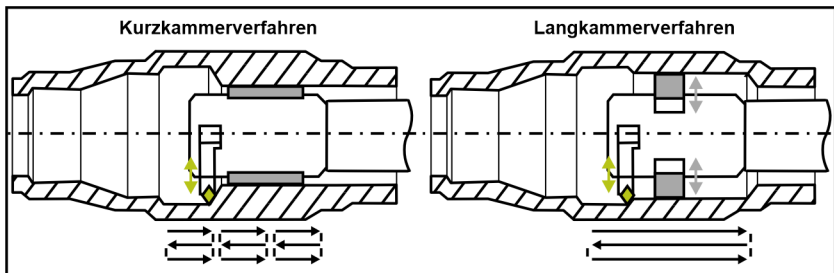


Abbildung 2.13: Verfahrenstrategien zur Auskammerbearbeitung

Beim Kurzammerverfahren wird die Schneide radial ausgestellt und über ein kurzes Stück, welches in der Länge den axialen Abstand zwischen Schneide und Führungsleiste nicht überschreitet, gefahren. Eine Kammer kann hierdurch auf mehrere Schnitte aufgeteilt werden. Nach Vollendung einer Kammer wird mit dem geringsten zu bearbeitenden Durchmesser der nächsten Kammer begonnen. Die Schritte mit dem größten Durchmesser

bei jeder Kammer bilden die finale Kontur und können beliebige Gestalt annehmen. Die Kontur wird beim Kurzkammerverfahren im Rückzug erzeugt. Diese Methode verwendet für die Werkzeugführung feste Führungsleisten, die sich während des gesamten Prozesses immer in der Vorbohrung abstützen. Das Langkammerverfahren arbeitet hingegen mit Schritten über die gesamte Länge der Bohrung, weshalb die Führungsleisten entsprechend des vergrößerten Innendurchmessers radial verstellt werden müssen. Die Arbeitsrichtung kann hierbei sowohl ziehend als auch stoßend sein [BBF94]. Bei der Kurzkammermethode besteht die Herausforderung, an den Kammerübergängen Marken, Winkelabweichungen und Parallelversätze zu vermeiden. Hingegen kann das Langkammerverfahren durch das wiederholte Aufbohren des Bauteils eine Werkzeugverlagerung und Konturveränderungen hervorrufen [FBP97]. Eine neue Werkzeugentwicklung realisiert erstmalig die Bearbeitung des Bohrungsgrundes bei Sacklochbohrungen über eine tangentielle Verfahrbewegung der Schneide, sodass hierdurch eine belastungsgerechte Konturierung erreicht werden kann [FMI*21]. Auch kann die Auskammerbearbeitung um einen Walzprozess ergänzt werden, indem ein hydraulisch ansteuerbares Walzelement im Werkzeugsystem anstelle des Schneidenschiebers integriert wird [Met19].

Durchgeführt werden können die Auskammerverfahren auf Tiefbohrmaschinen sowie auf Bearbeitungszentren, wobei der Einsatz auf Tiefbohrmaschinen aus mehreren Gründen als sinnvoll zu erachten ist. Die Grundbohrung kann auf einer ebensolchen Maschine bereits hergestellt werden, womit die Komplettbearbeitung auf einer Werkzeugmaschine ermöglicht wird. Weiterhin verfügen Tiefbohrmaschinen zur Erreichung großer l/D -Verhältnisse über ein langes Bohrbett sowie über eine leistungsfähige Kühlschmierstoffanlage. Auch der Antrieb des Werkstücks und somit ein stehendes Werkzeug kann den Prozess vereinfachen. Bedingung für den Einsatz auf einer Tiefbohrmaschine ist eine NC-Bearbeitung mit zwei Achsen, sodass der Werkzeugkopf und das Schneidelement unabhängig angesteuert werden können [BBF94].

Die minimale Größe des Werkzeugkopfes im Durchmesser wird durch den Systemaufbau begrenzt, sodass mit dem derzeitigen Stand der Technik tiefe Auskammerungen ab $D > 35$ mm realisiert werden können. Der maximale Durchmesser ist nahezu unbegrenzt und auch die erreichbare Bearbeitungstiefe wird vornehmlich durch die Werkzeugmaschine und das Bau-

teil limitiert. Ausgehend von der Führungsbohrung kann für den größtmöglichen Kammerdurchmesser als Richtwert das 1,5-fache des Nenndurchmessers angegeben werden.

2.3.3 Weitere Verfahren

Aussteuern

Aussteuerwerkzeuge weisen im Vergleich zu konventionellen Innendrehwerkzeugen eine zusätzliche interne Achse auf, welche eine seitliche Ausfahrbewegung eines Schneidelements ermöglicht. Hierdurch können hochkomplexe nichtzylindrische Innenkonturen aber auch Außenkonturen erzeugt werden. Klassische Aussteuerwerkzeuge sind mechanische Systeme, welche antriebsseitig über Kühlmitteldruck, das Auflaufprinzip oder eine Zug-/Druckstange betätigt werden (**Abbildung 2.14**). Darüber hinaus gibt es einwechselbare Aussteuersysteme, die als eigenständige NC-Achse bzw. U-Achse in der Werkzeugmaschine eingebunden werden. Hierbei handelt es sich um mechatronische Systeme mit integriertem Servomotor als Antriebsart. Bei den Abtriebsarten zur Umsetzung der Verfahrbewegung finden sich Linear-, Schräg-, Schwenk- und Drehschieber sowie Biege- und Wipphalter. Aussteuern kann oftmals durch die flexible Bearbeitung eine Vielzahl weiterer Werkzeuge ersetzen und wird häufig auf Bearbeitungszentren eingesetzt. Durch den komplexen Aufbau ist ein Bohrungsmindstdurchmesser von $D > 30$ mm zu berücksichtigen und auch die Auskragung ist stark begrenzt ($l/D < 5$) [Dus22; Kon13; x-t21].

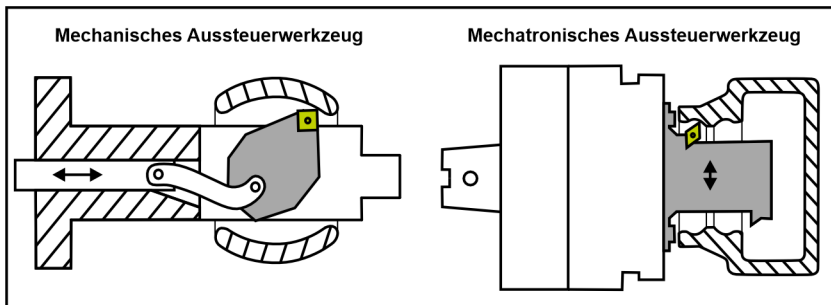


Abbildung 2.14: Aussteuerwerkzeuge nach [Map24]

Innenfräsen

Innenkonturen können auch durch Fräsen erzeugt werden, indem eine speziell entwickelte Technologie auf einer Sonderwerkzeugmaschine eingesetzt wird. Ein Fräser mit der Gestalt des periodischen Profilausschnitts einer Innenkontur wird in einem Werkzeug montiert, welches ziehend durch das Werkstück geführt wird, wobei Letzteres unterdessen zeitgleich eine

Rotation ausführt. Ein Aufsatzaggregat außerhalb des Werkstückes erzeugt die Schnittbewegung des Fräasers und leitet diese über eine Welle und ein Umlenkgetriebe in das Werkzeug. Eine beispielhafte Anwendung für das Innenfräsen ist die Herstellung von Exzentrerschneckenpumpen, die unter anderem für Explorationsbohrungen von Erdöl und Erdgas verwendet werden. Ebenso wie das Aussteuern ist das Verfahren insbesondere im minimal realisierbaren Bearbeitungsdurchmesser begrenzt [DGE*16; Rei15]. **Abbildung 2.15** skizziert die Werkzeuganlage mit einem Fokus auf die Eingriffssituation.

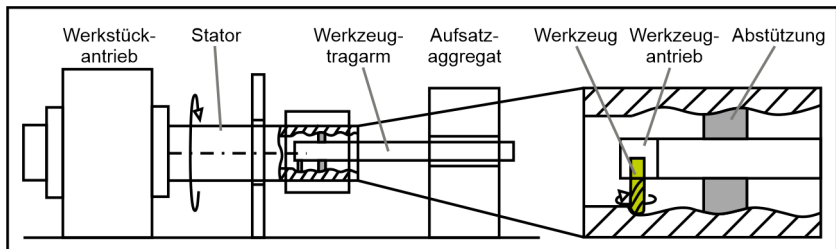


Abbildung 2.15: Aufbau einer Werkzeuganlage zum Innenfräsen nach [DGE*16; FJC10]

Formbohren

Mittels des Formbohrens können Konturen in (Tief-)Bohrungen eingebracht werden, indem das Bohrwerkzeug die zu erzielende Kontur abbildet. Hierfür liegt eine definierte Schneidenanordnung und Gestalt des Bohrers vor, sodass ein Bohrer für eine Kontur und festgelegte Durchmesser bestimmt ist. Die zu bearbeitenden Durchmesser können nicht den Bohrungseingangsdurchmesser überschreiten, da diese Werkzeuge über kein ausfahrbares Schneidensystem verfügen. Folglich sind ausschließlich absteigende oder konstante Durchmesser mit zunehmender Bearbeitungstiefe umsetzbar. Das Formbohren kann den vollständigen Bohrprozess abdecken oder sich an einen Vorbohrprozess anschließen und hierbei profilierte Bohrungsgründe oder Konturübergänge erzeugen (**Abbildung 2.16**). Werkzeugseitig ist die Umsetzung als Wendelbohrer, BTA-Bohrer und ELB realisierbar, wobei bei tiefen Formbohrungen insbesondere BTA-Bohrer Anwendung finden. Das Verfahren zeichnet sich durch hohe Fertigungs- und Wiederholgenauigkeit aus und erweist sich im Spezifischen bei hohen Stückzahlen als wirtschaftlich. Jedoch sind durch den konturbezogenen Werkzeugeinsatz eine geringe Flexibilität und je nach Schneidenanordnung ein ausgeprägtes

Kräfteungleichgewicht zu berücksichtigen. Darüber hinaus kann die verfahrensbezogene Charakteristik der zur Bohrermitte abfallenden Schnittgeschwindigkeit zu Herausforderungen bei der Spanform und der Bohrungsgüte führen [Klo18; Sch22].

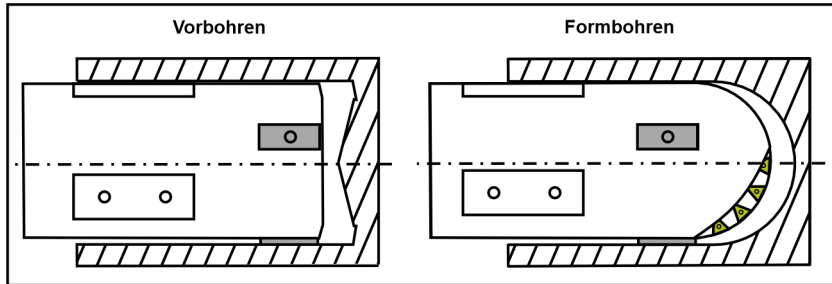


Abbildung 2.16: Prozessvorgang zur Herstellung eines profilierten Bohrungsgrundes unter Einsatz eines Formbohrers

Elektrochemisches Abtragen

Elektrochemisches Abtragen beruht auf dem Prinzip der elektrolytischen Zersetzung, bei der ein elektrischer Strom durch eine Elektrolytlösung geleitet wird, um gezielt Material von einem elektrisch leitenden Werkstück abzutragen. Durch die kontrollierte Anwendung von Spannung und Stromstärke wird die chemische Reaktion zwischen Werkstück und Elektrolyt gesteuert, womit das Material des Werkstücks in gelöster Form abgetragen wird [Koh96].

Für die Herstellung von Innenkonturen in tiefen Bohrungen wurde basierend auf dem Prinzip des elektrochemischen Abtragens ein Verfahren entwickelt, bei dem in eine vorgebohrte Grundbohrung ein Kathodenwerkzeugverfahren wird (**Abbildung 2.17**). Diese Werkzeuge weisen die zu erzielende Querschnittsform des Werkstücks auf, um in dieser Weise Nuten mittels chemischer Erosion in das Material einzubringen. Dies erfordert den Einsatz von Elektrolyt, das je nach Verfahren noch um die lokale Bearbeitungsstelle abgedichtet werden muss. Weiterhin bedarf es der Verwendung von Kühlflüssigkeit, was durch ein Zu- und Abführsystem realisiert wird. Das Verfahren ermöglicht die Bearbeitung schwer zu zerspanenden Materialien wie Titanlegierungen mit einer Abtragsgeschwindigkeit von $A_v = 0,2 \dots 10 \text{ mm}^3/\text{min}$. Vorteilhaft sind zudem der geringe Werkzeugver-

schleiß und die Abwesenheit von mechanischen sowie thermischen Belastungen der Werkstücke. Hingegen sind der komplexe Systemaufbau und der hohe erforderliche Energiebedarf zu beachten [BBC02].

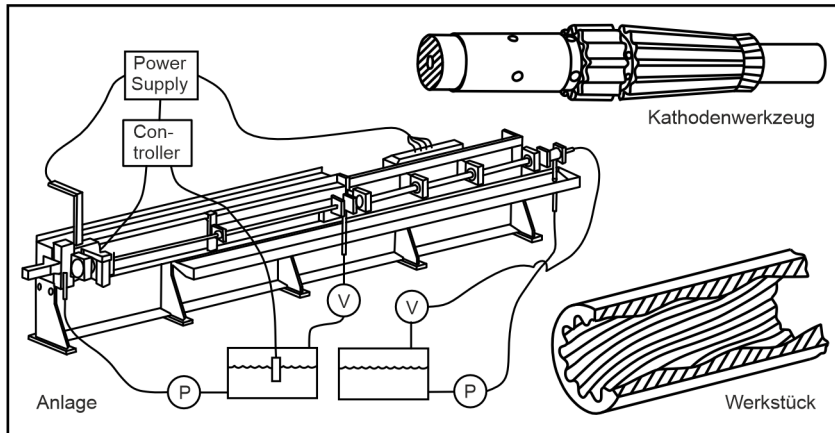


Abbildung 2.17: Anlage zum elektrochemischen Abtragen zur Innenkonturierung nach [BBC02]

Umformen

Neben den abtragenden Verfahren ist es ebenso möglich, Innenkonturen durch Umformen in Bohrungen einzubringen. Hierzu wurden mehrere Verfahren entwickelt, die der Herstellung von konturierten Querschnittsprofilen in langen Werkstücken dienen (**Abbildung 2.18**). Bei einer ersten Variante werden die Innenflächen einer Bohrung durch das Außenprofil eines Dorns, welcher sich im Inneren der Bohrung befindet, definiert. Die Prozessarten umfassen hierbei das Pilgerschrittwalzen sowie Kalt- und Warm Schmieden [KRW03]. Weiterhin ist die Innenkonturierung mittels Ziehen eines Rohres durch drehbare Innen- und Außengesenke umsetzbar. Dies erfordert Matrizen, die die Profilsteigung der zu erzielenden Kontur aufweisen. Die Rohre werden bei dieser Methodik gezielt gedreht und umgeformt [BU02]. Beide beschriebenen Verfahrensvarianten weisen eine werkzeugbezogene Kontur auf, sodass eine Änderung der Querschnittskontur stets auch mit einer Anpassung des Werkzeugsystems einhergeht. Darüber hinaus werden die Außenflächen zum Teil während der Bearbeitung zu nicht-zylindrischen Außenprofilen umgeformt, was in einigen Anwendungsfällen eine Nachbearbeitung erforderlich macht oder sogar ein derartiges Verfah-

ren für Bauteile vollständig ausschließt. Eine dritte Variante nutzt das Prinzip des Innenhochdruckumformens, bei dem Werkstücke in einem Formwerkzeug mit Druck beaufschlagt werden. Dies bedarf einer Sonderanlage und ist zudem in den Dimensionen der Wandstärke und der Bearbeitungslänge begrenzt. Sollten längere Werkstücke benötigt werden, müssen einzelne Segmente zusammengefügt und teilweise mit einem zusätzlichen Außengehäuse verbunden werden [LC03].

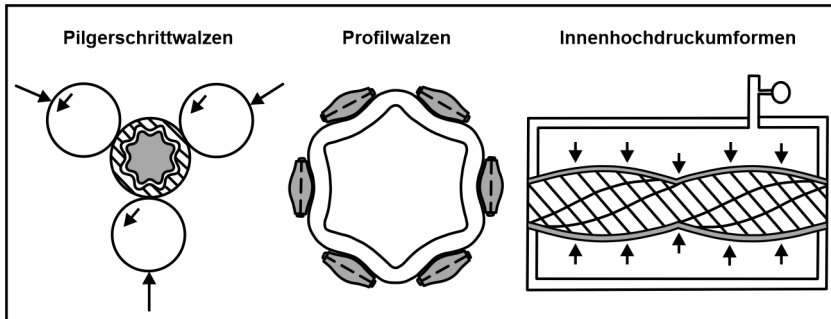


Abbildung 2.18: Verschiedene Umformverfahren zur Innenkonturierung nach [BU02; KRW03; LC03]

Der aufgezeigte Stand der Technik zeigt die bestehenden Möglichkeiten zur Innenkonturierung und dabei insbesondere die Grenzen der einzelnen Verfahren auf. Es kann zusammengefasst werden, dass die Innenbearbeitung von Bauteilen meist mit aufwendigen Anlagen und einem erhöhten Aufwand verbunden ist. Daher werden komplexe Innenkonturen in vielen Fällen bereits in der Werkstückauslegung aus Kostengründen vermieden. Zudem beschränken sich die technischen Möglichkeiten auf verschiedene Bauteilabmessungen, wobei auch Bereiche vorliegen, in denen kein gängiges Verfahren zur Innenkonturierung zur Verfügung steht.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Anforderungen an Bauteile umfassen Vorgaben an die Materialeigenschaften sowie die Bauteilkontur, wobei insbesondere die Bauteilkontur zunehmend komplexer wird. Hierbei liegt der vorwiegende Fokus in der Produktionstechnik auf der Bearbeitung der äußeren Bauteilkontur. Dahingegen stellt sich die Innenbearbeitung als teurer und aufwendiger dar und wird daher nach Möglichkeit vermieden oder auf die Herstellung einer Bohrung beschränkt. Dies begründet sich in den aufgezeigten Herausforderungen bei der Innenkonturierung, jedoch weisen komplexe, innenliegende Konturen in Bauteilen eine hohe Relevanz auf. In diesem Zusammenhang findet sich vor allem für kleine Tiefbohrungen keine produktive Methode, die eine Innenkonturierung ermöglicht. Die Notwendigkeit eines derartigen Verfahrens ergibt sich jedoch durch das Potential, welches infolge von Materialeinsparungen, höheren spezifischen Belastbarkeiten und einer erweiterten Funktionalität realisiert werden kann. Aus diesem Grund wird als Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ein neuartiges Werkzeugsystem zur Innenkonturierung kleiner Tiefbohrungen entwickelt und eingesetzt. Die Vorgehensweise dieser Entwicklung wird in **Abbildung 3.1** veranschaulicht.

Zunächst erfolgen Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen, bei denen Innenlängs-Drehversuche unter Variation der Schneidplattenform, der Schnittparameter und des Werkstoffes mit einem l/D -Verhältnis des Halters von $l/D = 4,5$ umgesetzt werden. Die Spanform, die mechanischen Werkzeugbelastungen und die Oberflächengüte stellen die Analyse Kriterien zur Bewertung des Prozesses dar. Die Untersuchungen dienen dem Aufbau eines Prozessverständnisses und der Erarbeitung konkreter Empfehlungen für die Innenbearbeitung kleiner Bohrungen. Ferner werden Untersuchungen zum Werkzeugverschleißverhalten durchgeführt, um Erkenntnisse über die Einsatzfähigkeit der Schneidplatten in längeren Bearbeitungsoperationen zu generieren.

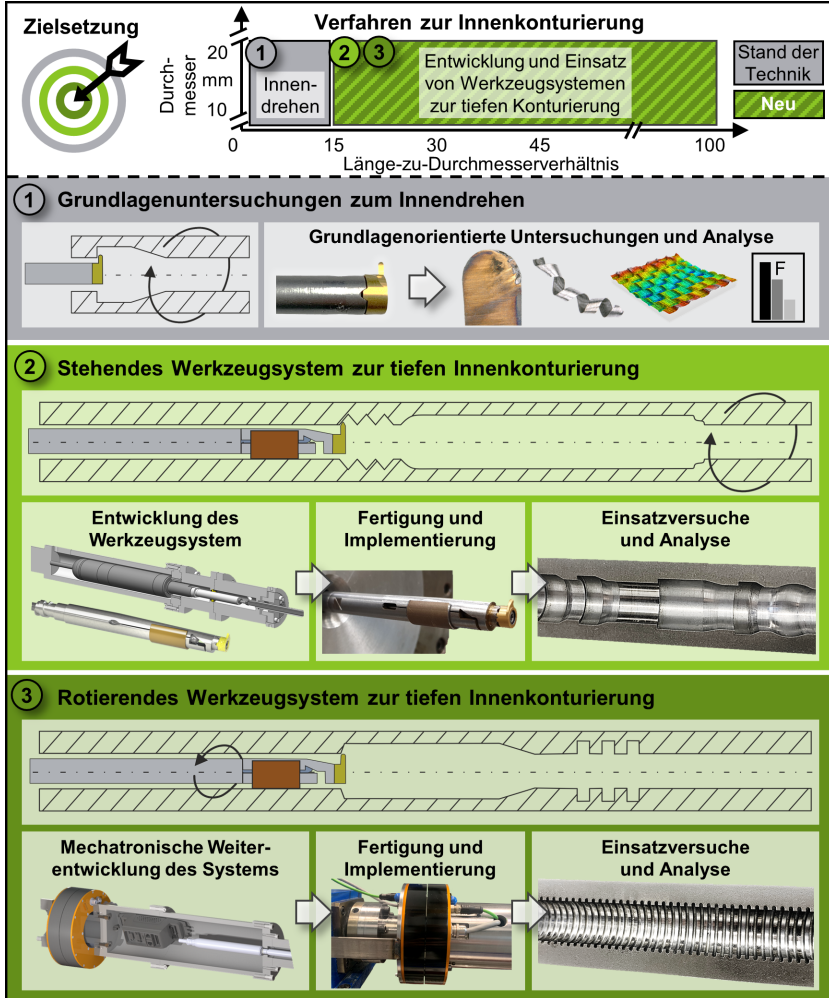


Abbildung 3.1: Vorgehen zur Entwicklung eines neuartigen Werkzeugsystems

Im Anschluss an die Untersuchungen folgt die Entwicklung des neuartigen Werkzeugsystems in der ersten Stufe als stehendes System. Dieses umfasst eine Antriebs- und Anbindungseinheit, ein Sonderrohrgestänge und einen Werkzeugkopf. Letzterer soll die Zugänglichkeit auch in kleinen Bohrungen erlauben, weshalb ein auf Materialelastizität basierender Ausstellmechanismus eingesetzt wird. Die primäre Bewegung zur Ausstellung eines Schneidelements wird durch einen integrierten Aktuator induziert. Für die

Auslegung einer steuerbaren sowie dauerhaft elastischen und dadurch reproduzierbaren Ausstellbewegung wird eine Spannungs- und Verformungsanalyse des Werkzeugkopfes anhand einer Finite Elemente Methode (FEM)-Simulation angewendet. Nachfolgend zur Werkzeugsystemfertigung wird dieses auf einer BTA-Tiefbohrmaschine mechanisch und steuerungstechnisch implementiert. Dort agiert das System als unabhängige, einwechselbare NC-Achse, die an die bestehende Steuerung angeschlossen werden kann. Bei den folgenden Einsatzversuchen werden unterschiedliche Innenkonturen unter Variation der Schnittparameter, der Schneidplatte und des Werkstoffes in das rotierende tiefgebohrte Werkstück eingebracht. Die ausgewerteten Untersuchungen werden näher analysiert und mit den Grundlagenversuchen zum Innendrehen verglichen.

Basierend auf dem entwickelten Werkzeugsystem wird die Weiterentwicklung zu einem rotationsfähigen System vollzogen. Hierfür bedarf es einer induktiven Daten- und Energieübertragung, um den für die Ausstellung erforderlichen Linearaktuator ohne Kabelverbindung zu versorgen. Messungen des Leistungsbedarfes und die Erarbeitung von Übertragungskonzepten stellen in diesem Zusammenhang elementare Entwicklungsschritte dar. Mittels eines Analogieversuchsstandes werden das Übertragungsverhalten und die Ansteuerung des Aktuators getestet. Bei dieser Entwicklungsstufe folgt auf die Fertigung und Montage des Gesamtsystems die mechatronische Inbetriebnahme auf einer Koordinaten-Tiefbohrmaschine. Dies umfasst im Wesentlichen die steuerungstechnische Vorbereitung der Werkzeugmaschine für den Einsatz der zusätzlichen Achse. Es folgen erste Einsatzversuche des rotierenden Werkzeugs mit variierenden Innenkonturen zur Prüfung der Funktionsfähigkeit. Weiterhin beinhaltet die vorliegende Arbeit den Nachweis der industriellen Einsetzbarkeit des Systems anhand von konkreten Anwendungsbeispielen.

Übergeordnet ergibt sich das Ziel der Entwicklung, der Fertigung und des Einsatzes von neuartigen Werkzeugsystemen zur produktiven Konturierung kleiner Tiefbohrungen. Hierdurch werden die produktionstechnischen Möglichkeiten deutlich vergrößert, indem Bauteile in ihrer Funktionalität erweitert, in ihrer spezifischen Belastbarkeit gesteigert sowie in ihrem Gewicht reduziert werden können.

4 Experimentelle Randbedingungen

4.1 Versuchswerkstoffe

Bei den Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen sowie den technologischen Untersuchungen zum Innenkonturieren wurden als Werkstückstoff der legierte Vergütungsstahl 42CrMo4+QT sowie die Nickelbasislegierung Inconel 718 verwendet, darüber hinaus erfolgten einzelne Untersuchungen im Rahmen der experimentellen Anwendung des entwickelten Werkzeugsystems mit den nichtrostenden Edelstählen X5CrNi18-10 und X5CrNiMo17-12-2. Die genannten Stahllegierungen weisen verschiedene Eigenschaften auf und sind in unterschiedlichen Einsatzbereichen vorzufinden, wodurch ein breites Anwendungsfeld abgedeckt werden soll, um die Einsatzfähigkeit des Entwicklungsgegenstands zu prüfen.

42CrMo4+QT ist ein häufig eingesetzter Vergütungsstahl, wobei durch das Vergüten eine hohe Dauer- und Zugfestigkeit der Werkstücke eingestellt werden kann. Im Allgemeinen erhöht sich die Zähigkeit bei einer sich reduzierenden Härte. Der Werkstoff weist in der Regel eine gute Zerspanbarkeit auf, die dabei vornehmlich durch die Gefügeausbildung beeinflusst wird. Anwendung findet 42CrMo4+QT aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften insbesondere im Maschinen- und Fahrzeugbau für hochbeanspruchte Bauteile wie Gelenke, Schrauben und Achsen [BT08; DIN683-1; DIN683-2; Sch23; WDJ15].

Inconel 718 stellt den zweiten Versuchswerkstoff dar und ist eine austenitische Nickel-Chrom-Basislegierung. Diese Superlegierung verfügt über eine hohe mechanische Festigkeit und ist darüber hinaus beständig gegen Korrosion sowie chemische Einflüsse. Weitere relevante Eigenschaften des Werkstoffes sind die geringe Wärmeleitfähigkeit und die Hochtemperaturbeständigkeit. Bei der Zerspanung gestaltet sich Inconel 718 aufgrund der hohen Festigkeit und im Material enthaltenen harte Gefügebestandteile als herausfordernd. Darüber hinaus geht die geringe Wärmeleitfähigkeit mit einer hohen thermischen Schneidstoffbelastung einher. In der Praxis wird Inconel 718 vornehmlich in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie für hochbelastbare, sicherheitskritische Bauteile wie Motorventile und Triebwerkskomponenten eingesetzt [Bee16; FDZ*10; Ren07; Ves13].

In weiterführenden Untersuchungen wurden die Edelstahllegierungen X5CrNi18-10 und X5CrNiMo17-12-2 eingesetzt, bei denen es sich um austenitische Chrom-Nickel- respektive Chrom-Nickel-Molybdänstähle handelt. Beide Stahllegierungen sind korrosionsbeständig sowie schweißgeeignet und auch für Tieftemperaturanwendungen geeignet. Eine verhältnismäßig hohe Zähigkeit und Duktilität sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit können die spanende Bearbeitung durch Langspanbildung und gesteigerte thermische Schneidenbelastung erschweren. Die Stähle finden breite Anwendungsgebiete unter anderem in der Lebensmittel- Automobil-, Bau- und Chemieindustrie [Sch23; WDJ15]. **Tabelle 4.1** führt eine Auswahl relevanter mechanischer Kennwerte der vorgestellten Werkstoffe auf.

Tabelle 4.1: Mechanische Kennwerte der eingesetzten Versuchswerkstoffe

Werkstoff	42CrMo4+QT (1.7225)	Inconel 718 (2.4668)	X5CrNi18-10 (1.4301)	X5CrNiMo17-12-2 (1.4401)
Zugfestigkeit R_m	1050 MPa	1470 MPa	580 MPa	600 MPa
Bruchdehnung A_5	11 %	18 %	45 %	40 %
Wärmeleit- koeffizient λ	42 W/(m*K)	11 W/(m*K)	15 W/(m*K)	15 W/(m*K)
Härte H_m	300 HB	410 HB	210 HB	210 HB
Verwendung	Grundlagenuntersuchungen (Kap. 5) Tiefe Innenkonturierung (Kap. 6,7)		Weiterführende Innenkonturierung (Kap. 8)	

Für die Innendrehversuche auf einer CNC-Drehmaschine lagen die Werkstücke als Welle mit einer Länge von $l = 54$ mm und einer Durchgangsbohrung von $D = 14$ mm vor. Für die Innenkonturierungsversuche mittels des neuartigen Werkzeugsystems wurden Wellen mit einer Länge von $l = 300$ mm sowie einer tiefgebohrten Durchgangsbohrung verwendet. Die Untersuchungen auf einer BTA-Tiefbohrmaschine erfordern zudem zur Tiefbohrung konzentrische Fasen zur Aufnahme des Werkstückes über Konen.

4.2 Werkzeugmaschinen

Für die Grundlagenuntersuchungen zur Innendrehbearbeitung kleiner Bohrungen wurde die CNC-Drehmaschine RNC 200 A der Fa. Monforts verwendet. In der Drehmaschine, die in 60°-Schrägbettbauweise aufgebaut ist, erfolgt die Probenspannung in einem Dreibackenfutter. Die Werkstückspindel ermöglicht hierbei die Rotation der Proben mit einer Maximaldrehzahl von $n = 6\,000 \text{ min}^{-1}$. Über den 12-fach Werkzeugrevolver mit VDI-30-Aufnahme werden die translatorischen Verfahrensbewegungen der Werkzeuge in x- und z-Richtung umgesetzt. Als KSS wird das Schneidöl vom Typ Blasomill 15 der Fa. Bechem eingesetzt, welches auf Mineralöl basiert und eine Viskosität von $\eta = 15 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40 °C aufweist. Die Werkzeugmaschine mit den technischen Maschinendaten wird in **Abbildung 4.1** dargestellt.



Abbildung 4.1: CNC-Drehmaschine Monforts RNC200A

Die Untersuchungen zur Innenkonturierung unter Verwendung eines neuartigen Werkzeugsystems wurden auf der Werkzeugmaschine vom Typ Giana GGB 560 CNC der Fa. Giuseppe Giana umgesetzt. Hierbei handelt es sich um eine BTA-Tiefbohrmaschine, welche für Bohrtiefen bis $l_t = 3\,000 \text{ mm}$ ausgelegt ist. Die Maschine verfügt über zwei Spindeln mit Antriebsleistungen von $P = 75 \text{ kW}$ (Werkstückspindel) und $P = 50 \text{ kW}$ (Werkzeugspindel), wobei eine Einzelrotation einer Spindel sowie auch die gleichzeitige, gegenläufige Rotation beider Spindeln möglich ist. In den Untersuchungen zu der vorliegenden Arbeit wurde mit rotierendem Werkstück gearbeitet. Neben der rotierenden Spindelbewegung wird die translatorische Werkzeugbewegung entlang der Werkzeugachse über einen Zahnstangenantrieb umgesetzt. Die für die Innenkonturierung notwendige radiale Ausstellbewegung erfordert eine weitere Werkzeugachse, das Vorgehen zur Integration dieser wird in Kapitel 6 beschrieben. Die Werkstückspannung erfolgte über Konen

zwischen der Werkstückspindel und dem Bohrölzufuhrapparat. Letzterer stellt eine dichte Verbindung zwischen Werkzeug und Werkstück dar und ermöglicht die Zuführung des KSS zur Wirkstelle. Hierfür verfügt die Tiefbohrmaschine über eine leistungsfähige Kühlschmierstoffanlage mit einem maximalen Volumenstrom von $\dot{V} = 600 \text{ l/min}$. Das verwendete Bohröl vom Typ Berocut RMO TC 22 der Fa. Bechem ist ein nichtwassermischbarer Kühlschmierstoff mit AW-Additivierung und einer Viskosität von $\eta = 23,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Maschine sowie relevante Daten werden in **Abbildung 4.2** gezeigt.



Abbildung 4.2: BTA-Tiefbohrmaschine Giana GGB560 CNC

Die Koordinaten-Tiefbohrmaschine KTE40-1000 (**Abbildung 4.3**) der Fa. TIBO Tiefbohrtechnik wurde im Rahmen der experimentellen Versuche unter Einsatz eines rotierenden Werkzeugsystems zur Innenkonturierung (vgl. Kap. 7) verwendet. Dieser Maschinentyp wird insbesondere für Tiefbohr- und Planfräsoperationen eingesetzt, wobei Bohrtiefen von bis zu $l_t = 1\,000 \text{ mm}$ erreicht werden können. Die Werkzeugspindel wird über einen Riemen angetrieben und ermöglicht eine maximale Drehzahl von $n = 6\,000 \text{ min}^{-1}$. Mittels einer Drehdurchführung erfolgt eine interne KSS-Zufuhr zum Werkzeug, dabei kann ein Volumenstrom von $\dot{V} = 120 \text{ l/min}$ realisiert werden. Zur Schmierung sowie zum Spanabtransport wurde während der Untersuchungen das Schneidöl Blasomill 10 DM der Fa. Blaser eingesetzt, welches mit einer Viskosität von $\eta = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ den mittelviskosen Schmierstoffen zugeordnet werden kann.



Abbildung 4.3: Koordinaten-Tiefbohrmaschine tibo KTE40-1000

Zusätzlich zu den aufgezeigten Werkzeugmaschinen wurden weitere Maschinen zur Probenvorbereitung und zur Fertigung des Werkzeugsystems verwendet. Dabei wurde das Vorbohren der Proben für die Grundlagenversuche zum Innendrehen auf einem Bearbeitungszentrum vom Typ FT4000 der Fa. Gebr. Heller Maschinenfabrik durchgeführt, das Einlippentiefbohren der Werkstücke für die angeschlossene Konturierung erfolgte auf dem Tiefbohrbearbeitungszentrum TLF 1004 der Fa. Ixion. Die Fertigung des Werkzeugsystems erfolgte zudem auf Dreh-, Schleif-, Erodier- und Fräsmaschinen.

4.3 Werkzeuge

In den Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen sowie den angeschlossenen Einsatzversuchen des Werkzeugsystems wurden Hartmetall-Schneidplatten für die drehende Innenbearbeitung kleiner Durchmesser der Fa. Simtek verwendet (**Abbildung 4.4**). Hierbei wurden vier verschiedene Schneidplattengestalten eingesetzt, die alle einen Mindestbohrungsdurchmesser von $D_{min} = 11$ mm aufweisen. Zudem fanden zwei unterschiedliche Schneidstoffe Anwendung.

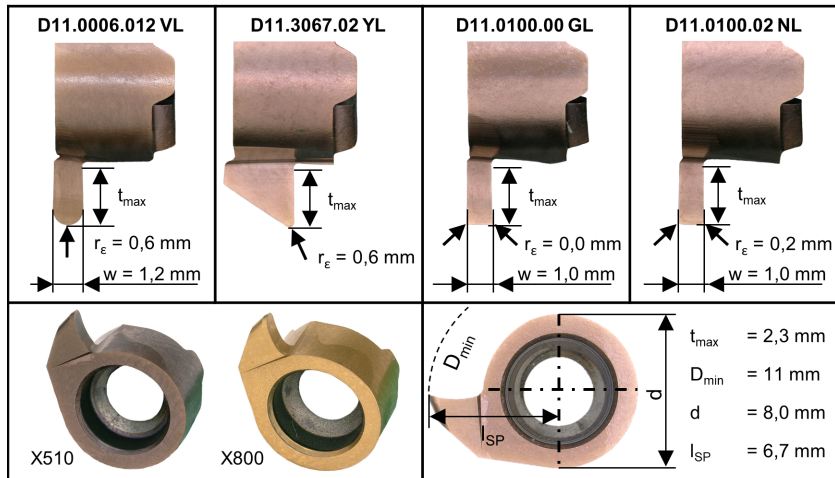


Abbildung 4.4: Verwendete Schneidplatten zur Innenbearbeitung

Die verwendeten Schneidplatten wurden für die Anwendungen Vollradiusnuten (D11.0006.12 VL/R), Rückwärtsdrehen (D11.3067.02 YL/R), Nutensteichen (D11.0100.00 GL/R) sowie Einstechen und Profildrehen (D11.0100.02 NL/R) ausgelegt. Sie ermöglichen gestaltungunabhängig eine maximale Zustelltiefe von $t_{max} = 2,3$ mm und verfügen aufgrund ihrer geringen Größe über keinen Spanformer. Bei den Schneidstoffen wurden die Varianten X800 sowie X510 bei gleicher Schneidplattenform eingesetzt. Der Schneidstoff X800 setzt sich aus einem Hartmetall-Grundsubstrat und einer TiAlN-Mehrlagenbeschichtung mit einer TiN-Deckschicht zusammen. Die mittels PVD-Verfahren aufgetragene ternäre Verbundbeschichtung TiAlN weist dabei eine hohe Härte, eine ausgeprägte Verschleißbeständigkeit sowie eine thermische und chemische Stabilität auf [Str15]. Der Schneidstoff ist für

alle Werkstoffgruppen, insbesondere Stahl, geeignet und wurde in den vorliegenden Untersuchungen für die Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT genutzt. Der zweite Schneidstoff X510 wird für die Werkstoffklassen M, S und H empfohlen und fand in dieser Arbeit für das Innendrehen und Konturieren der warmfesten Superlegierung Inconel 718 (Werkstoffgruppe S) Anwendung. Die verwendete TiAlSiN-Beschichtung ermöglicht hierbei eine hohe Oxidations- sowie Hochtemperaturbeständigkeit durch die Struktur der kubischen TiAlN-Nanokristalle in der amorphen Matrix aus Si_3N_4 und eignet sich folglich speziell für die Bearbeitung von Werkstoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit [VMJ*04; ZHN*12].

Für die Aufnahme in einem Werkzeughalter verfügen die Schneidplatten über eine dreigeteilte, rotationssymmetrische Verzahnung. In den Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen wurde dafür eine schwingungsgedämpfter Hartmetallhalter mit einem Rundschaft und einer inneren Kühlmittelzufuhr eingesetzt. Die maximale Auskraglänge dieses Halters beträgt $l = 64$ mm, sodass bei einem minimalen Bohrungsdurchmesser von $D = 11$ mm ein maximales l/D -Verhältnis kleiner sechs realisiert werden kann. Neben den zuvor vorgestellten Schneidplatten wurden weitere Werkzeuge für konkrete Anwendungen des Werkzeugsystems verwendet. Hierbei handelt es sich zum einen um eine Schneidplatte zum Gewindedrehen mit metrischem ISO-Profil, zum anderen um eine Sonder-Schneidplatte mit einem Profil, welches zur Herstellung kleiner Einstiche ausgelegt wurde. Die Gewinde-Schneidplatte besteht aus dem erläuterten Schneidstoff X800, die Einstech-Schneidplatte wurde mit mehreren TiAlN-Lagen beschichtet. **Abbildung 4.5** stellt die zwei Schneidplatten mit relevanten Werkzeugdaten dar.

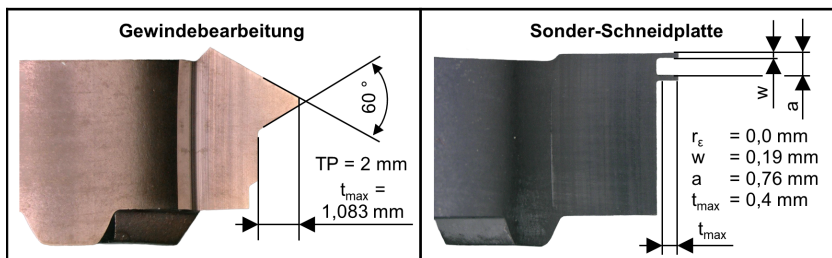


Abbildung 4.5: Eingesetzte Schneidplatten zur Gewinde- und Nutenherstellung

4.4 Mess- und Analysetechnik

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen und die Entwicklung des Werkzeugsystems erforderte den Einsatz umfangreicher Mess- und Analysetechnik sowie Software. Nachfolgend wird zum Verständnis der Arbeit die relevante Technik näher beschrieben, konkrete Anwendungsfälle werden in den Kapiteln 6 und 7 detailliert dargestellt.

Auswertung von Untersuchungen zur tiefen Bohrkanturierung

Zur Erfassung der mechanischen Werkzeugbelastungen bei den Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen (Kap. 5) wurde das Kraftmessdynamometer vom Typ 9121 der Fa. Kistler verwendet. Dieses Mehrkomponenten-Dynamometer ermöglicht die Messung der Zerspankraft, bestehend aus Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft. Der piezoelektrische Effekt stellt das zugrundeliegende Messprinzip dar und beschreibt eine Ladungsverschiebung in einem kristallinen Material infolge einer Krafteinwirkung. Die auftretende Kraft bewirkt in einem proportionalen Verhältnis eine Änderung der elektrischen Polarisierung durch eine Ungleichverteilung der Ionen. Diese auftretende Verschiebung der Ladungsträger wird an einen Verstärker, im vorliegenden Fall vom Typ 5017 der Fa. Kistler, weitergeleitet. Nachfolgend kann mit Hilfe eines Messrechners sowie eines Umrechnungsfaktors die auftretende Kraft bestimmt werden. Das System zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Steifigkeit sowie Empfindlichkeit aus. Die Empfindlichkeit des Dynamometers beträgt in x- und y-Richtung kleiner $-8 \text{ pC} / \text{N}$ sowie in z-Richtung kleiner $-3,9 \text{ pC} / \text{N}$. Die Linearität des Systems liegt bei unter $\pm 0,15 \%$. Bei den tiefen Kanturierungsversuchen mittels des neuartigen Werkzeugsystems erfolgte keine Erfassung der mechanischen Werkzeugbelastungen, da keine Messtechnik implementierbar war. Bei weiteren Tiefbohr- und Auskammeruntersuchungen im größeren Durchmesserbereich wurden zuvor Dehnungsmessstreifen am Bohrrohr adaptiert, dies ist aufgrund der geringen Belastungen und der hohen Steifigkeit des Bohrrohrs jedoch nicht umsetzbar.

Oberflächengüte und -profil der Werkstücke wurden mittels Lichtmikroskopie berührungslos erfasst. Hierfür wurde das Konfokalmikroskop Confovis DUO Vario verwendet. Das Funktionsprinzip dieser Mikroskope beruht dabei auf dem konfokalen Messprinzip. Hierbei entsteht unter Verwendung zweier LED sowie Teilerspiegel ein Gittermuster in der Objektebene. Über

einen weiteren Strahlengang wird daraufhin die beleuchtete Probe für eine Höhenebene in einem Bildsensor abgebildet. Werden alle Höhenebenen durchlaufen und die Oberflächenpunkte mittels einer Topographiebestimmung erfasst, kann eine Punktwolke der Objektoberfläche erstellt werden. Die vertikale Auflösung beträgt beim verwendeten Objektiv mit 20-facher Vergrößerung 10 nm, die laterale optische Grenzauflösung wird mit 267 nm angegeben.

Weiterhin fand ein Digitalmikroskop vom Typ VHX5000 der Fa. Keyence Anwendung, um Werkzeugverschleiß, Spanform und Werkstückgestalt dokumentieren zu können. Mit dem eingesetzten Objektiv VH-Z50 sind hierbei 200-fache Bildvergrößerungen mit einer maximalen Auflösung von 4800 x 3600 Pixel möglich. Die beschriebenen Messgeräte werden in **Abbildung 4.6** dargestellt.

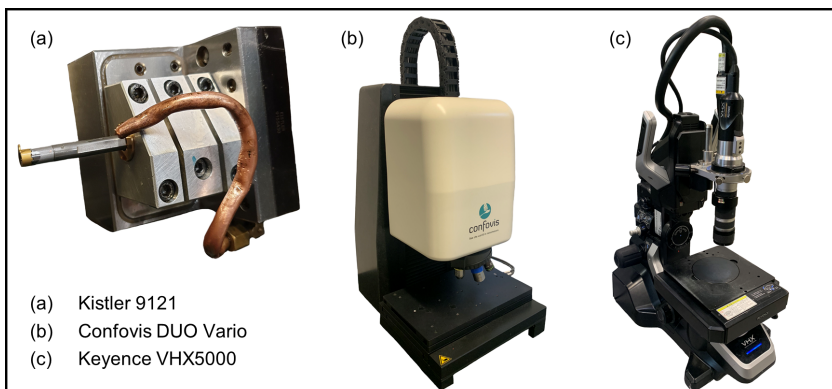


Abbildung 4.6: Verwendete Messtechnik für technologische Untersuchungen der Innenkonturierung

Entwicklung des Werkzeugsystems

Für die Entwicklung, Konstruktion und den Einsatz des Werkzeugsystems wurden unterschiedliche Mess- und Analysegeräte genutzt. Hierbei wurde unter anderem das 3D-Messgerät InfiniteFocus G5 der Fa. Bruker Alicona eingesetzt, welches Form- und Oberflächenrauheitsmessungen ermöglicht. Mit einem optischen Sensor wird eine Fokusvariation umgesetzt, bei der entlang einer Achse der Fokus variiert wird, während Bilder von einer Oberfläche aufgenommen werden. Durch Analyse der Schärfenebenen in den Bildern können Tiefeninformationen erfasst und dreidimensionale Re-

konstruktionen der Oberfläche erstellt werden. Die laterale Auflösung beträgt für dieses System beim verwendeten Objektiv mit 20-facher Vergrößerung $0,88 \mu\text{m}$ und die vertikale Auflösung 50 nm .

Zur Untersuchung des Ausstellverhaltens des Werkzeugsystems wurden zwei verschiedene Wegmesssensoren verwendet. Zum einen wurde der Weg mit dem taktilen Sensor HBM WI 2 erfasst, bei welchem es sich um einen Miniatur-Wegaufnehmer mit einer Linearitätsabweichung von $\pm 0,2 \%$ handelt. Das Messprinzip basiert hierbei auf einer induktiven Halbbrücke, die zu einer Vollbrücke verschaltet wird. Zum anderen erfolgten Messungen mit dem CCD-Laser-Wegmesssensor vom Typ LK-G32 der Fa. Keyence, welches eine Linearität von $\pm 0,05 \%$ aufweist. Diese Sensoren verwenden einen Laserstrahl, der auf ein Zielobjekt gerichtet wird. Mit einem lichtempfindlichen CCD-Chip wird die Laufzeit des reflektierten Lichts gemessen und die Entfernung des Messobjekts bestimmt. Beide Wegmesssensoren wurden in den experimentellen Untersuchungen an das Spannungsmessmodul NI 9239 angeschlossen, welches wiederum mit einem Messrechner verbunden wurde. Weiterhin erfolgten im Rahmen der Untersuchungen Leistungsmessungen des Werkzeugsystems zur Erfassung des Energiebedarfs. Einer der beiden Versuchsaufbauten wurde während der Konturierung auf einer BTA-Tiefbohrmaschine realisiert und umfasste die Leistungsmessung an der Versorgungseinheit des Linearaktuators. Hierbei wurde die Spannung direkt gemessen, während der erforderliche Strom über einen definierten Messwiderstand mit $R = 0,05 \Omega$ sowie einer weiteren Spannungsmessung indirekt ermittelt wurde. Beide Kenngrößen wurden dabei mit dem Datenrekorder Nicolet Vision erfasst und dokumentiert. In der zweiten Variante wurde ein Analogieversuchsstand ohne einen simultanen Bearbeitungsprozess erarbeitet. Diesem Versuchsstand zugehörig finden sich das Quarz-Kraftmesselement Kistler 9301B, der Ladungsverstärker Kistler 5011, das Signalerfassungsmodul NI USB-4431 und ein Messrechner. Für die Entwicklung einer rotationsfähigen Variante des Werkzeugsystems wurde das Signalübertragungsverhalten untersucht. Hierfür wurden das Analogausgangsmodul NI-9263 sowie das Spannungseingangsmodul NI-9293 mit Spannungsmessbereichen von $\pm 10 \text{ V}$ verwendet.

Software zur Konstruktion, Analyse und Auswertung

Die Entwicklung des Werkzeugsystems und die Auswertung der Untersuchungen erforderten verschiedene Software-Programme, wobei relevante Programme nachfolgend aufgeführt werden sollen. Zur Konstruktion aller Komponenten des Systems sowie von weiteren Peripherie-Elementen wurde das 3D-CAD-Programm SolidWorks 2020 des Unternehmens Dassault Systèmes verwendet. Weiterhin fand die Simulationssoftware ANSYS 2024 des gleichnamigen Unternehmens Anwendung. Hiermit wurden Spannungs- und elastische Verformungsanalysen des Werkzeugkopfes durchgeführt. Die Auswertung mechanischer Werkzeugbelastungen sowie von Leistungsdaten erfolgte mit dem Visualisierungs- und Analysetool NI Diadem 2021. Für weitere Aufzeichnungen und Analysen von Messdaten wurde die Datenerfassungssoftware NI FlexLogger verwendet. Zudem wurde mit Hilfe der Software MountainsMap der Fa. Digital Surf die Oberflächengüte der bearbeiteten Bauteile analysiert. Die Ansteuerung des Linearaktuators und das Auslesen von Motorkennwerten wurde über Motion-UI des Aktuatorherstellers Wittenstein umgesetzt.

5 Technologische Grundlagenuntersuchungen zur Innendrehbearbeitung

Innendrehen stellt ein konventionelles Verfahren für die Innenbearbeitung dar, welches auch in kleinen Durchmesserbereichen noch Anwendung findet, jedoch in der Bearbeitungstiefe begrenzt ist. Das zu entwickelnde Werkzeugsystem folgt dem Funktionsprinzip des Innendrehens und weist in dieser Weise charakteristische Merkmale hiervon auf. Aus diesem Grund sind technologische Untersuchungen zur Innendrehbearbeitung durchzuführen, um Erkenntnisse auf die Auskammerbearbeitung übertragen zu können. Zu den Erkenntnissen zählen die Auswahl geeigneter Schneidplatten und Schnittparameter sowie die Bestimmung der Grenzen des Innendrehens. Darüber hinaus sind Daten zum Verschleißverhalten der Werkzeuge zu generieren. Mit diesen Untersuchungen wird abschließend ein Verfahrensvergleich ermöglicht. Durchgeführt werden die Versuche auf einer CNC-Drehmaschine unter Verwendung von Öl als KSS. Die Werkstücke aus den Werkstoffen 42CrMo4+QT und Inconel 718 weisen eine Durchgangsbohrung mit $D = 14$ mm und eine Bauteillänge von $l = 54$ mm auf. Eine Übersicht der nachfolgenden Grundlagenuntersuchungen wird in **Abbildung 5.1** aufgezeigt.

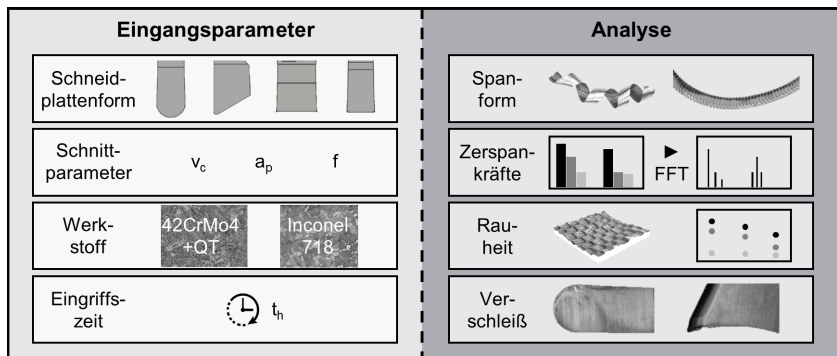


Abbildung 5.1: Übersicht der Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen

5.1 Einfluss der Schneidplattenform

Zunächst erfolgen grundlegende Untersuchungen mit verschiedenen Schneidplattenformen in beiden Versuchswerkstoffen mit zuvor festgelegten Basisparametern. Die Einflüsse des Schneidplattenform auf die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Oberflächengüte und die Spanform werden in **Abbildung 5.2** aufgezeigt.

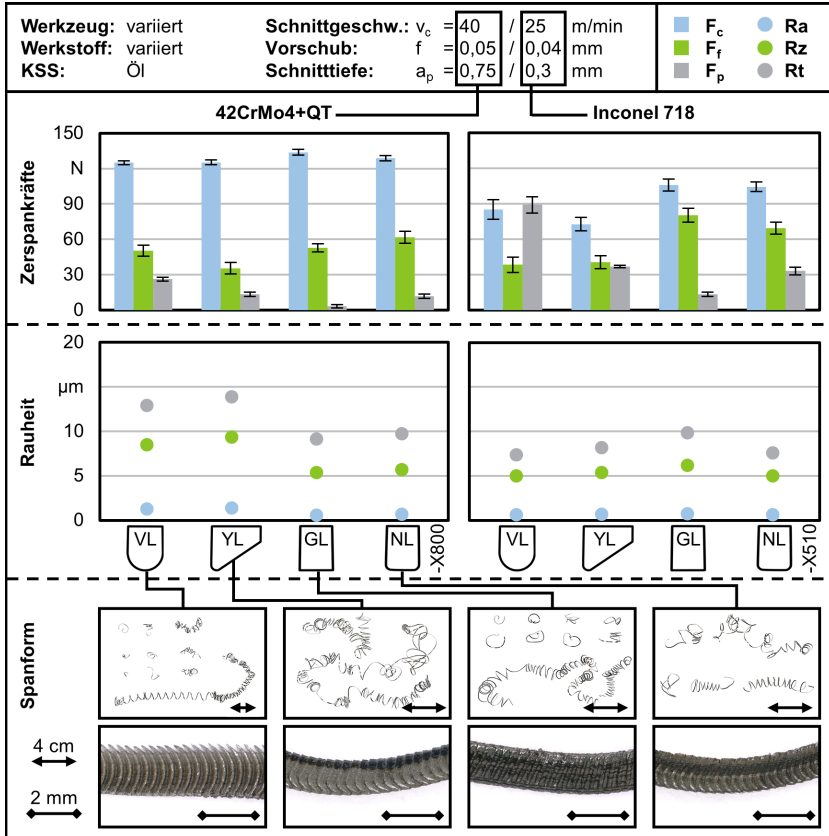


Abbildung 5.2: Einfluss der Schneidplattenform beim Innenlängsdrehen

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Schneidplattengestalt unmittelbar auf den Bearbeitungsprozess auswirkt. Bei konstantem Spannungsquerschnitt liegt bei der jeweiligen Bearbeitung der Werkstoffe eine unterschiedliche

Aufteilung der Zerspankkraftkomponenten vor. Dies begründet sich vorwiegend in den Eingriffsbedingungen bzw. der in Abhängigkeit der Schneidplatte variierenden Spannungsbreite und Spannungsdicke. Eine geringere Spannungsdicke resultiert im Allgemeinen in einer einfacheren Spannumformung und damit in geringeren Schnittkräften. Ebenjene Charakteristik ist aufgrund des Eckenradius bei der VL- sowie der YL-Schneidplatte zu beobachten. Die größere Spannungsbreite bedingt hingegen insbesondere bei der VL-Schneidplatte mit einem Eckenradius von $r_\epsilon = 0,6$ mm höhere Passivkräfte und somit eine vom Werkstück weg gerichtete Kraftentstehung. Dies kann bei den für das Innendrehen erforderlichen langauskragenden, dünnen Werkzeugen eine Abdrängung und die Entstehung von Schwingungen begünstigen. **Abbildung 5.3** verdeutlicht die Eingriffsbedingungen der vier Schneidplatten und die Auswirkung auf die resultierende Krafrichtung.

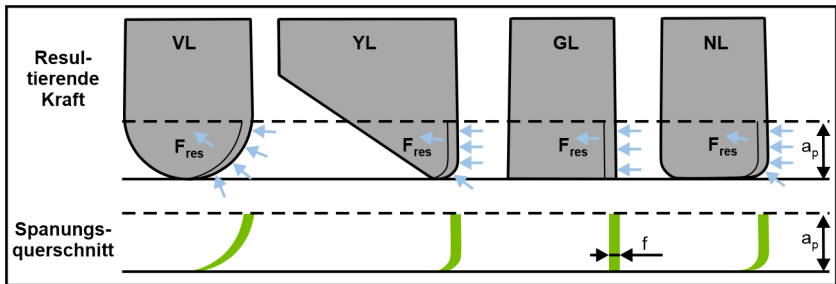


Abbildung 5.3: Einfluss der Schneidplattengestalt auf die resultierende Kraft und den Spannungsquerschnitt

Beim Innenlängsdrehen des Werkstoffes Inconel 718 ist dieses Verhalten durch die im Vergleich zum Eckenradius geringe Schnitttiefe von $a_p = 0,3$ mm besonders ausgeprägt. Demgegenüber bedingen Schneidplatten mit geringem Eckenradius (GL, NL) verstärkt Kräfte in Vorschubrichtung. Zudem zeigen bei diesem Werkstückstoff die Ergebnisse der mechanischen Werkzeugbelastungen größere Standardabweichungen vom Mittelwert auf, was auf Prozessschwingungen zurückgeführt werden kann. Insgesamt sind bei der Nickelbasis-Legierung geringere Schnittdaten einzusetzen, da die höheren mechanischen Eigenschaften in Form von Härte und Zugfestigkeit sowie die niedrigere Wärmeleitfähigkeit zu einer stärkeren thermomechanischen Schneidstoffbelastung führen.

Bei der Oberflächengüte wird die erreichbare Rauheit ebenso wesentlich durch die Schneidenform bzw. den Eckenradius bestimmt, dies wird insbesondere beim Innenlängsdrehen von 42CrMo4+QT deutlich. Ein größerer Eckenradius resultiert in einer geringeren theoretischen Rautiefe, sodass mit einem Eckenradius von $r_\epsilon = 0,6$ mm (VL-Schneidplatte) eine glattere Oberfläche im Vergleich zu einem Eckenradius von $r_\epsilon = 0,2$ mm (YL-Schneidplatte) erreicht werden kann. Die Einstech- bzw. Nutenstechplatten NL und GL stellen eine Sonderform beim Innenlängsdrehen dar. Im stabilen Schnitt, welcher nicht durch Schwingungen oder Abdrängung geprägt ist, entsteht durch die gerade Schneidkante, vergleichbar zu Schneidplatten mit einer Wiper-Gestalt, eine glatte Oberfläche. Hierbei sind jedoch die geringere Schneidkantenstabilität und die Auswirkungen auf den Spanbildungsprozess zu beachten.

Bei der Spanform ist zu berücksichtigen, dass die Schneidplatten über keinen Spanformer verfügen, sodass der ablaufende Span keine zusätzliche Umformung erfährt. Schneidplattenunabhängig stellen sich Wirr- und Flachwendelspäne ein, die insbesondere bei geringem KSS-Durchfluss nur schwierig aus der Bohrung geführt werden können. In einem ziehenden Bearbeitungsprozess kann sich der Span zudem in der erzeugten Kammer sammeln und einen Spanknäuel hervorrufen. Auch aufgrund des vorliegenden länglichen Spanungsquerschnittes stellt sich kein Spanbruch ein, da der im Vergleich zur Schnitttiefe geringe Vorschub einen dünnen, flexiblen Span mit hohem Umformvermögen bedingt. Somit tritt beim Spanbildungsvorgang keine ausreichende Vorschädigung des Spans auf. In der Detailansicht der Spanoberseite wird die Spanstruktur deutlich, wodurch ein Rückschluss auf die Spanbildung gezogen werden kann. Bei den Schneidplatten mit Eckenradius (VL, YL, NL) tritt eine Lamellenspanbildung auf, die auf ein ungleichmäßig verformtes Werkstoffgefüge deutet. Eine Erklärung kann in veränderten Reibungsverhältnissen zwischen Werkzeug und Span gefunden werden, sodass ein Ruckgleiten mit Schwingungen im Kilohertzbereich hervorgerufen wird [Klo18; Sch64].

5.2 Einfluss der Schnittparameter

Im folgenden Unterkapitel wird der Einfluss der Schnittparameter auf den Innenlängsdrehprozess untersucht. Hierfür wurde eine Variation der Schnitttiefe, der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs für beide Werkstoffe und alle Schneidplattentypen durchgeführt. Es wurden wie im vorherigen Abschnitt die mechanischen Werkzeugbelastungen, die Oberflächengüte und die Spanform betrachtet. Nachfolgend sollen von den gesamten Untersuchungen charakteristische Versuche und besondere Prozessmerkmale dargestellt werden. In einem ersten Schritt wird der Einfluss der Schnitttiefe auf den Prozess analysiert, **Abbildung 5.4** zeigt dafür die Zerspankräfte und die Rauheit für die Vollradiuschneidplatte VL und die Rückwärtsdrehplatte YL für den Werkstoff 42CrMo4+QT auf.

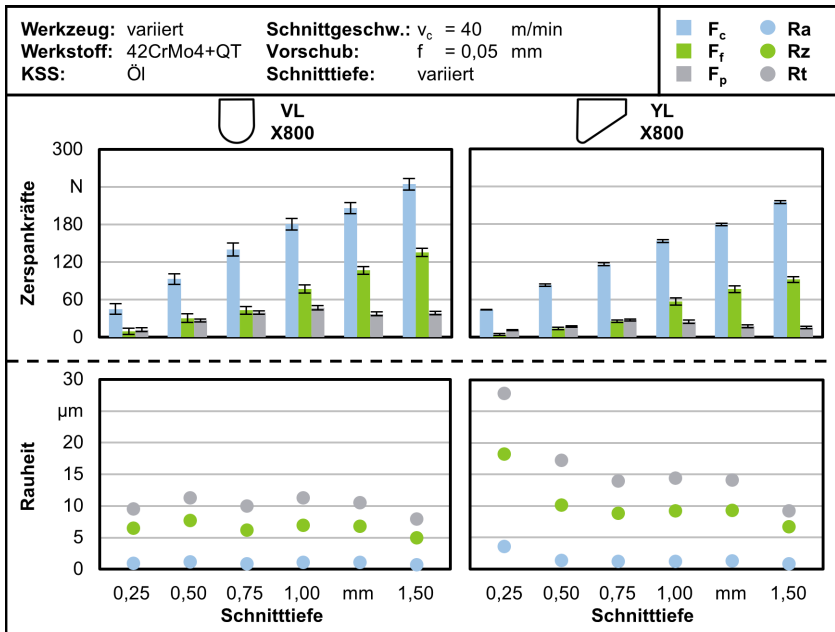


Abbildung 5.4: Einfluss der Schnitttiefe beim Innenlängsdrehen

Bei der Untersuchung der Zerspankraftkomponenten ist ein proportionaler Anstieg der Schnitt- und der Vorschubkraft entsprechend der steigenden Schnitttiefe und somit des größeren Spannungsquerschnittes zu beobachten. Im Vergleich hierzu liegt eine nahezu konstante Passivkraft unabhängig von der gewählten Schnitttiefe vor. Dies begründet sich darin, dass die Zerspankräfte sich in radialer Richtung nicht weiter ausprägen, wenn die Schnitttiefe den Eckenradius der Schneidplatte überschreitet. Dies wird bei Annahme einer steigenden Schnitttiefe auch in Abbildung 5.3 deutlich. Bei der VL-Schneidplatte ergeben sich konstante Rauheitskennwerte, der Einsatz der YL-Schneidplatte resultiert hingegen in höheren Kennwerten bei geringer Schnitttiefe. Hierbei kann angenommen werden, dass eine ausreichende Werkzeugbelastung vorliegen muss, um den Zerspanprozess zu stabilisieren. Dies geht mit der sehr geringen Vorschubkraft bei $a_p = 0,25$ mm einher, wodurch der Werkzeughalter in axialer Richtung kaum belastet wird und Schwingungen in tangentialer und radialer Richtung begünstigt werden. Die Oberflächengüte bei der GL- und der NL-Schneidplatte liegt auf einem vergleichbaren Niveau zur VL-Schneidplatte. Bei der Bearbeitung des Werkstoffes Inconel 718 werden aufgrund eines geringeren Vorschubs ($f = 0,04$ mm) folglich niedrigere Rauheitskennwerte eingestellt, die keine Korrelation zur Schnitttiefe aufweisen. Auch bei diesem Werkstoff können proportional steigende Schnitt- und Vorschubkräfte bei ebenso konstanten Passivkräften ermittelt werden. Eine Schnittparametervariation konnte mit der GL- und der NL-Schneidplatte bei Bearbeitung der Superlegierung aufgrund von Schneidplattenbrüchen nicht umgesetzt werden, hier waren lediglich die Basisparameter prozesssicher einsetzbar.

Die Schnittgeschwindigkeitsvariation wurde im Bereich von $v_c = 20 - 120$ m/min (42CrMo4+QT, $\Delta = 20$ m/min) bzw. $v_c = 15 - 35$ m/min (Inconel 718, $\Delta = 5$ m/min) durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse zu diesen Versuchen werden in **Abbildung 5.5** dargestellt.

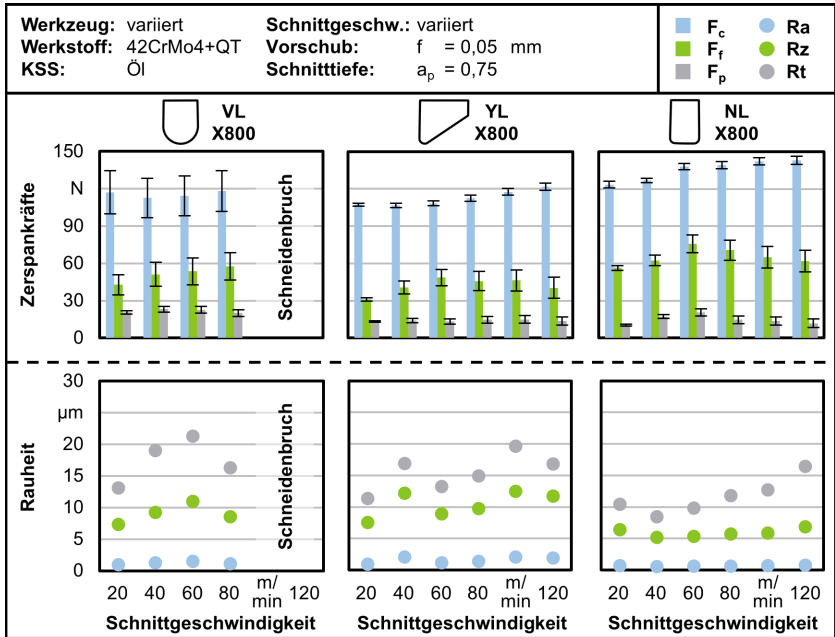


Abbildung 5.5: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit beim Innenlängsdrehen

Für die Radius-Schneidplatte ergeben sich beim Innendrehen von 42CrMo4+QT konstante Schnitt- und Passivkräfte, bei der Vorschubkraft ist hingegen eine 35 %-ige Zunahme bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20 \text{ m/min}$ auf $v_c = 80 \text{ m/min}$ zu verzeichnen. Schneidenbrüche verhindern bei diesem Schneidplattentyp den Einsatz höherer Schnittgeschwindigkeiten. Hier kann angenommen werden, dass Schwingungen und damit eine wechselnde mechanische Belastung zu einem Versagen der Schneidplatte führen, was sich auch in den Standardabweichungen der Schnittkraft abzeichnet. Beim zweiten Versuchswerkstoff Inconel 718 steigen die Passivkräfte um 24 %, wobei höhere Schnittgeschwindigkeiten die Schwingungsfrequenz erhöhen und damit insbesondere Abdrängungen hervorrufen kann, die sich in höheren Mittelwerten der radialen Kraft abbilden. Bei den drei weiteren Schneidplatten werden beim Werkstückstoff 42CrMo4+QT geringfügig steigende Schnittkräfte ermittelt und auch die Rauheitskennwerte weisen eine leichte Zunahme auf. Dementsprechend ist bei diesem Prozess der Einsatz produktiver, hoher Schnittgeschwindig-

keiten stets kritisch hinsichtlich der geforderten Bauteilqualität und Prozesssicherheit zu prüfen. Weiterhin wurden die Schwingungen der mechanischen Werkzeugbelastungen mittels einer FFT-Analyse näher untersucht. Hierbei können meist zwei kritische Frequenzen lokalisiert werden. Zunächst ist in vielen Versuchen eine drehzahlbedingte Frequenz in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit und des Durchmessers zwischen $f_{Schw} = 5...50$ Hz zu beobachten, die den fremderregten Schwingungen zuzuordnen ist. Die zweite kritische Frequenz, die in der Regel die größere Amplitude aufweist, findet sich im Bereich $f_{Schw} = 1600...1700$ Hz und wurde im Folgenden ausgewertet. **Abbildung 5.6** stellt den Betrag dieser maximalen Amplitude für die Zerspankraftkomponenten unter Variation der Schnittgeschwindigkeit dar.

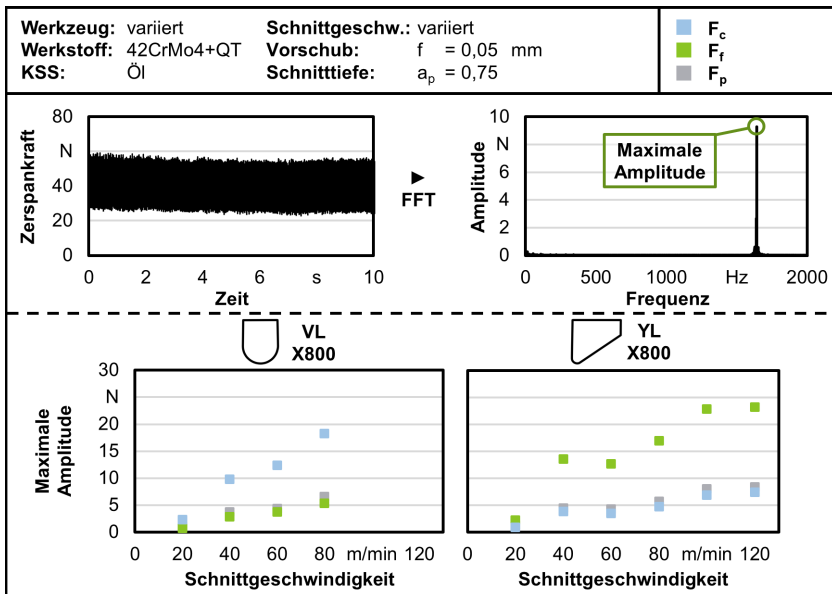


Abbildung 5.6: FFT-Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Die systembedingte Frequenz im kHz-Bereich korreliert mit den zuvor beschriebenen Beobachtungen der Lamellenspanbildung. Dabei stellen sich für beide untersuchten Schneidplatten größere Schwingungsamplituden mit höheren Schnittgeschwindigkeiten ein. Bei der VL-Schneidplatte wird

dies im Spezifischen für die Schnittkraftkomponente deutlich, die YL-Schneidplatte weist im Vergleich hierzu die größte Amplitude in Vorschubrichtung auf. In axialer Richtung (Vorschubkraft) können die Kräfte und Schwingungen beim vorliegenden Aufbau besser als in tangentialer Richtung (Schnittkraft) an die Werkzeugaufnahme übertragen werden, sodass dies ein Erklärungsansatz für die Schneidenbrüche der VL-Schneidplatte bei hohen Schnittgeschwindigkeiten sein kann.

Zuletzt wurde der Vorschub im Bereich von $f = 0,01 - 0,12$ mm (42CrMo4+QT, $\Delta = 0,01$ mm) bzw. $f = 0,01 - 0,06$ mm (Inconel 718, $\Delta = 0,01$ mm) variiert. Die sich einstellende Oberflächengüte beim Vergütungsstahl wird in **Abbildung 5.7** aufgezeigt.

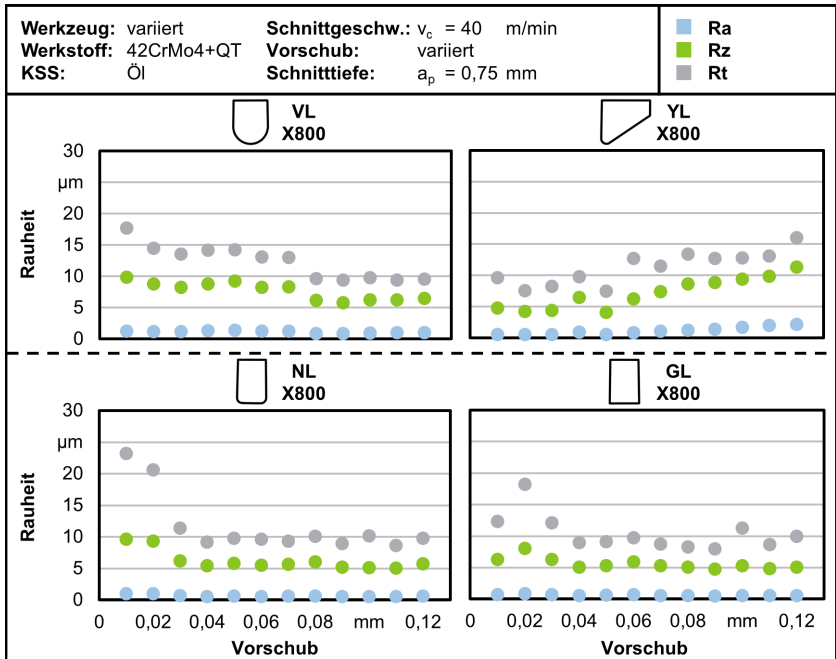


Abbildung 5.7: Einfluss des Vorschubs beim Innenlängsdrehen

Bei Erhöhung des Vorschubs ergeben sich erwartungsgemäß ansteigende Schnittkräfte für alle Schneidplatten. Dahingegen steigen die Vorschubkräfte bis zu einem Vorschub von $f = 0,06$ mm, um hiernach auf einem konstanten Niveau zu verbleiben. Die Passivkraft verzeichnet über die gesamte

Vorschubvariation einen geringfügigen Anstieg. Die gedrehte Oberfläche weist entgegen des theoretischen Profils eine höhere Rauheit, insbesondere der (maximalen) Rautiefe, bei geringem Vorschub für die VL-, GL- und NL-Schneidplatte auf. Eine in Abhängigkeit zur Schneidkantenverrundung erforderliche Mindestspandicke sollte somit bei der Wahl des Vorschubs berücksichtigt werden. Bei größeren Vorschüben ergeben sich nahezu gleichbleibende Oberflächengüten. Dies deutet darauf hin, dass die Oberflächengestalt nicht vorwiegend durch die Schneidplattenform und die Schnittparameter bestimmt wird, sondern Schwingungen sowie die Spanbildung Einfluss nehmen. Folglich können Rauheitsspitzen- und -täler durch die entstandenen Späne und unregelmäßige Werkzeugschwingungen hervorgerufen werden. Eine höhere Werkzeugbelastung stabilisiert diesen Prozess und führt zu einer gleichmäßigeren Spanbildung. Dahingegen steigen bei Einsatz der YL-Schneidplatte mit höheren Vorschüben auch die Rauheitskennwerte.

Die Spanform wurde für jeweils einen Schrupp- sowie Schlichtprozess für beide Werkstoffe und die vier Schneidplattentypen qualitativ und digital-mikroskopisch dokumentiert. **Abbildung 5.8** zeigt diese Dokumentation mit jeweils einer Übersicht der Späne und einer Detailaufnahme.

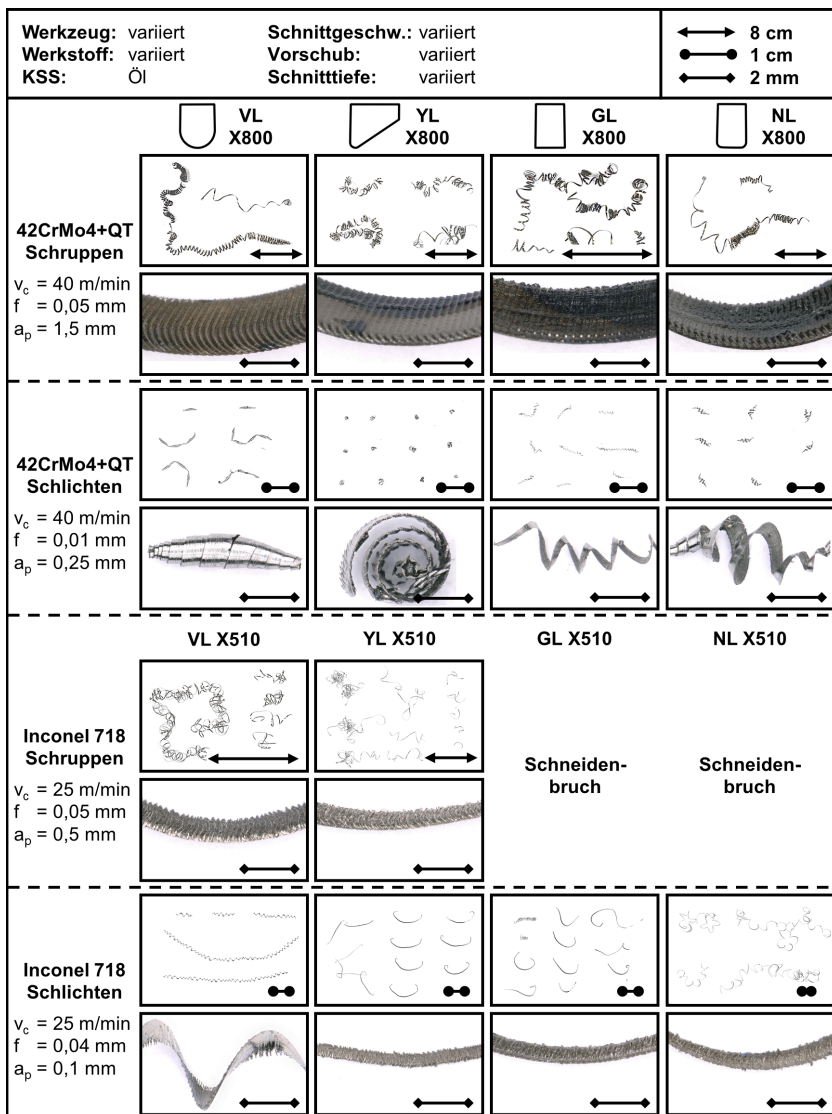


Abbildung 5.8: Spanform beim Innenlängsdrehen in Abhängigkeit von Bearbeitungsprozess, Werkstoff und Schneidplattentyp

Beim Werkstoff 42CrMo4+QT treten beim Schruppprozess die zuvor erläuterten Wendel-, Band- und Wirrspäne bei einer Lamellenspanbildung, insbesondere bei der VL- und der YL-Schneidplatte, auf. Bei einer Spanwendelung kleiner als der Bohrungsdurchmesser können diese Späne noch aus der Bohrung transportiert werden, größere Wendelungen können jedoch zu einer kritischen Spanansammlung führen. Bedingt durch die hohe Werkstoffzähigkeit und das feine Gefüge stellen sich lange Späne mit glatten Spanunterseiten ein. Ebenso ist auch hier zu berücksichtigen, dass kein Spanformer auf der Spanfläche verwendet wird. Hingegen liegt vor allem aufgrund der reduzierten Spanungsbreite sowie des daraus resultierenden Spanungsquerschnitts ein häufigerer Spanbruch beim Schlichtprozess vor. Bei der Vollradius-Schneidplatte treten enge Wendelspane auf, wobei die sichelförmige Umschlingung beim Schneideneingriff bei der Spanform deutlich wird. Bei der YL-Schneidplatte ergeben sich prozesssichere konische Wendel- und Wirrspäne, die GL- und die NL-Schneidplatte erzeugen dahingegen Schrägwendelspane. Bei der Schruppbearbeitung des Werkstückstoffes Inconel 718 sind lange Band- und Wirrspäne zu dokumentieren, die zumeist in der Bohrung verbleiben und die Prozesssicherheit gefährden können. Ebenso deutet hier die Segmentierung der Spanoberseite auf einen Rückgleiten der Schneidplatte hin. Beim Schlichten ergeben sich für die VL-Schneidplatte lange, enge Wendelspane; Bandspane liegen bei den weiteren drei Schneidplatten vor. Bei ausreichendem KSS-Druck und Volumenstrom können voraussichtlich auch hierbei alle entstehenden Späne des Schlichtbearbeitungsprozesses aus der Bohrung abtransportiert werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse eine ausgeprägte Abhängigkeit der Spanform von den Schnittparametern, dem Werkstoff und der Schneidplatte. Es sind somit bei der Auskammerbearbeitung kurze Späne durch geringe Schnitttiefen oder enge Spanwendelungen bei größeren Schnitttiefen zu erreichen, um Späneknäuel zu vermeiden. Ebenso zeichnen sich bei der Spanform Prozessschwingungen ab, die das Werkzeug schädigen und die Oberflächengüte reduzieren können.

5.3 Ergänzende Untersuchungen

In weiteren Untersuchungen wurden Versuche über eine Eingriffszeit von $t_h = 30$ min bei prozessbegleitender Betrachtung der mechanischen Werkzeugbelastungen sowie des Werkzeugverschleißes durchgeführt. Betrachtet wurden hierbei die VL- und die YL-Schneidplatte, die sich in den vorherigen Untersuchungen als günstig für längere, komplexe Innenkonturierungen herausgestellt haben. **Abbildung 5.9** stellt die Ergebnisse für den Vergütungsstahl 42CrMo4+QT dar.

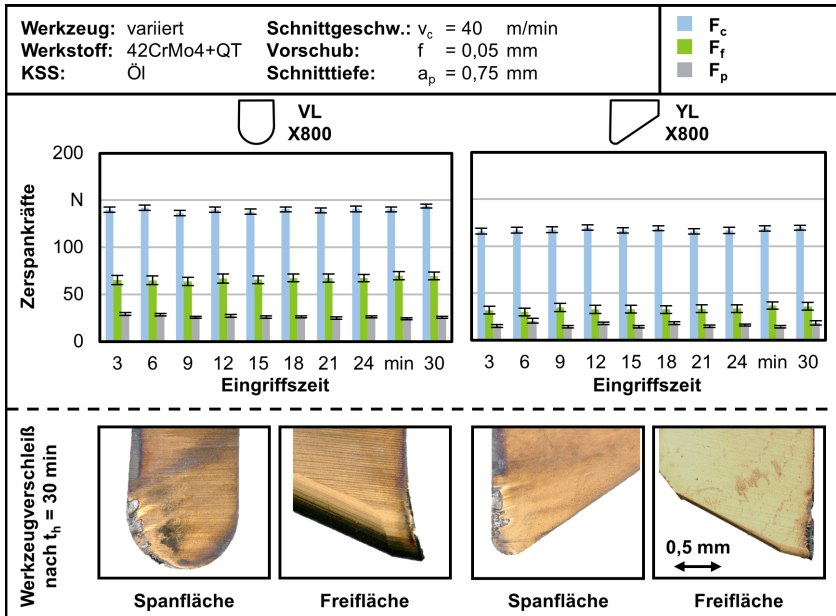


Abbildung 5.9: Eingriffszeituntersuchungen zum Innenlängsdrehen von 42CrMo4+QT

Eingesetzt wurden die zuvor verwendeten Basisparameter mit moderater Schnitttiefe und einem mittleren Vorschub. Die Betrachtung der Zerspankräfte zeigt eine durchschnittlich höhere mechanische Werkzeugbelastung beim Innenlängsdrehen unter Verwendung der Vollradiuschneidplatte im Vergleich zur Rückwärtsdrehplatte. Dies ist im Zusammenhang mit dem Spannungsquerschnitt auf die leichtere Spannumformung bei der YL-Schneidplatte zurückzuführen. Über die betrachtete Eingriffszeit liegen

konstante Zerspankraftkomponenten vor, sodass sich durch etwaigen Verschleiß keine Veränderungen einstellen. Ein abrasiver Werkzeugverschleiß an der Hauptfreifläche und ein mechanischer Abrieb auf der Spanfläche sind bereits nach einer Eingriffszeit von $t_h = 3$ min bei der YL-Schneidplatte zu beobachten, im weiteren Verlauf stellen sich Ausbrüche an der Schneidkante und tiefer werdende Einkerbungen auf Höhe der Schnitttiefe ein. Die Verschleißerscheinungsformen verstärken sich dabei mit zunehmender Eingriffszeit in Richtung des Eckenradius. Am Übergang zwischen Haupt- und Nebenfreesfläche sowie an der Nebenfreesfläche liegen auch am Ende der Untersuchungen nur ein geringer abrasiver Freiflächenverschleiß und eine Schneidkantenverrundung vor, dies korreliert mit der ermittelten konstanten Oberflächengüte ($Ra \approx 1,6 \mu\text{m}$, $Rz \approx 8,4 \mu\text{m}$). Bei der VL-Schneidplatte ist eine wiederkehrende Aufbauschneidenbildung auf der Spanfläche zu dokumentieren, sodass bei einer späteren Auskammerbearbeitung die Schnittgeschwindigkeit variiert werden sollte. Auch hier prägt sich die Bearbeitung in Form von Freiflächenverschleiß, Schneidkantenausbrüchen und Abrieb auf der Spanfläche bei konstanten Rauheitskennwerten aus. Jedoch liegt eine geringere Kerbwirkung auf Schnitttiefenhöhe vor. Die Rauheitskennwerte befinden sich auf einem gleichmäßigen Niveau ($Ra \approx 1,0 \mu\text{m}$, $Rz \approx 5,8 \mu\text{m}$) und unterhalb der Werte der YL-Schneidplatte, was wie bereits erläutert durch den größeren Eckenradius erklärt werden kann. Folglich sind die zwei Schneidplatten bei der Bearbeitung dieses Werkstoffes über die beschriebene Eingriffszeit prozesssicher einsetzbar. Ebenso wurde die Nickel-Basis-Legierung Inconel 718 betrachtet, die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in **Abbildung 5.10** aufgezeigt.

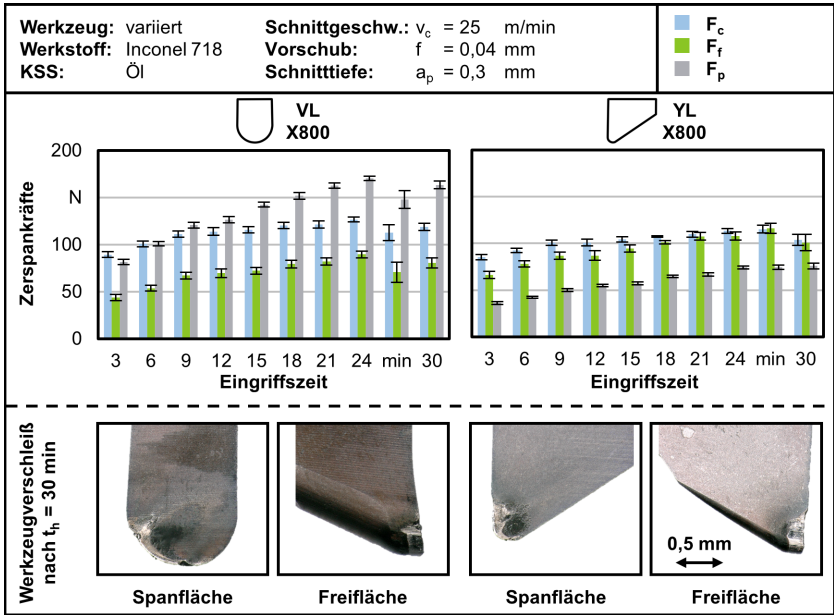


Abbildung 5.10: Eingriffszeituntersuchungen zum Innenlängsdrehen von Inconel 718

Bei Einsatz der VL-Schneidplatte ist zunächst ein linearer Anstieg der Passivkraft bis zu einer Eingriffszeit von $t_h = 24$ min mit einer Verdopplung des Mittelwertes zu verzeichnen. Auch die Schnitt- und die Vorschubkraft steigen, in einem reduzierteren Verhältnis, an. Diese Beobachtungen gehen mit einem ausgeprägten abrasiven Freiflächenverschleiß ($VB_{max} = 130 \mu\text{m}$) einher, der sich bereits initial nach drei Minuten einstellt. Die Verschleißmarkenbreite steigt bis zum Ende der Untersuchungen auf $VB_{max} = 217 \mu\text{m}$. Ursachen für diesen Materialabtrag können die im Werkstoff eingeschlossenen Karbide und festigkeitssteigernden Ausscheidungen sowie eine ausgeprägte thermische Belastung sein. Der Freiflächenverschleiß führt im Eingriff zu einer höheren Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, sodass hierdurch die steigenden Schnitt- und Vorschubkräfte erklärt werden können. Die größer werdende Schneidkantenverrundung und der Verlust einer scharfen Schneidkante bedingen zudem die Werkzeugabdrängung bzw. den Anstieg der Passivkraft. KSS-Verkokungen auf der Freifläche weisen darüber hinaus auf eine hohe thermische Werkzeugbelastung hin. Trotz der

Verschleißerscheinungen findet eine vollständige Ausprägung der Drehoberfläche mit hoher, gleichmäßiger Oberflächengüte ($Ra \approx 0,36 \mu\text{m}$, $Rz \approx 2,5 \mu\text{m}$) statt. Die Verwendung der YL-Schneidplatte resultiert in einem geringeren Anstieg der Schnitt- und Passivkraft, hierbei nehmen jedoch vor allem die mechanischen Werkzeugbelastungen in Vorschubrichtung zu. Es treten vergleichbare Verschleißerscheinungsformen mit einer verstärkten Ausbildung von Kerbverschleiß auf Höhe der Schnitttiefe und einem Verlust der ursprünglichen Schneidkantenform auf. Auch hier wirkt sich der Werkzeugverschleiß noch nicht negativ auf die Rauheitskennwerte ($Ra \approx 0,46 \mu\text{m}$, $Rz \approx 3,2 \mu\text{m}$) aus, aus Gründen der Prozesssicherheit sollte aber von einem längeren Werkzeugeinsatz abgesehen werden. Zusammenfassend eignen sich die beiden gewählten Schneidplattenformen für längere Innendrehoperationen, die bei der Konturierung von Tiefbohrungen vorzufinden sind. In Bezug auf die zu bearbeitenden Werkstoffe zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Verschleißerscheinungen, sodass bei der Bearbeitung der Superlegierung Inconel 718 auch bei angepassten Schnittdaten ein frühzeitiger Werkzeugwechsel durchzuführen ist, um Werkzeugbrüche und geringe Oberflächengüten zu vermeiden.

Die Auskammerbearbeitung mit dem zu entwickelnden Werkzeugsystem erfordert die Herstellung komplexer Konturen, die über einen Innenlängsdrehprozess hinausgehen. Hierfür wurde eine Kontur gefertigt, die verschiedene Eingriffs- und Bearbeitungssituationen darstellt. Für eine maßgenaue Herstellung sollte nach Möglichkeit die vollständige Bearbeitung einer Innenkontur mit einer Schneidplatte ohne Schneidplattenwechsel erfolgen, um Konturabweichungen und fehlerhafte Kammerübergänge zu vermeiden. Die Bauteile aus 42CrMo4+QT wurden mit der VL- und YL-Schneidplatte bearbeitet, das Ergebnis wird in **Abbildung 5.11** aufgezeigt. Dabei ist die Fertigung in einem ziehenden Schritt erfolgt.

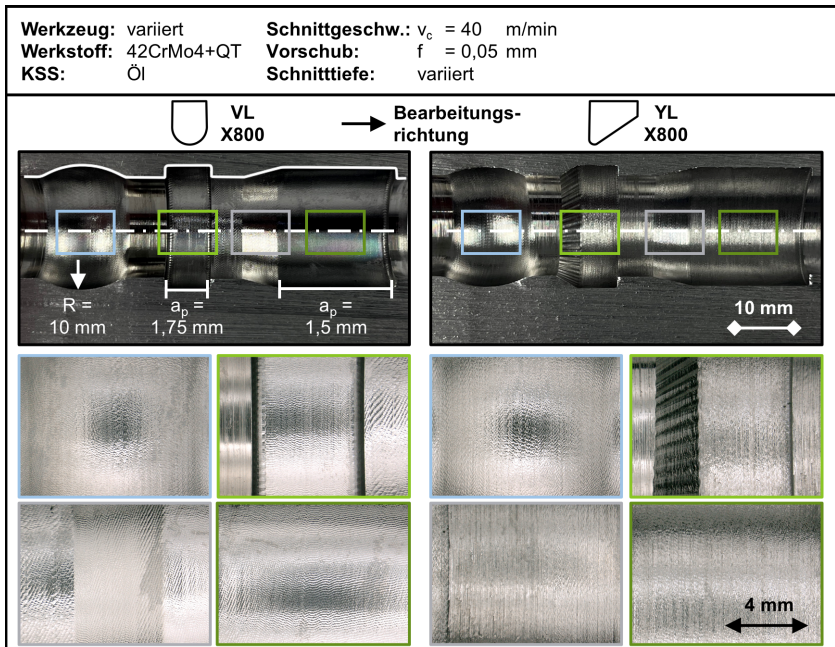


Abbildung 5.11: Innendrehen komplexer Konturen unter Variation der Schneidplattenform

Eine Radiuskontur und somit die Überlagerung zweier Bewegungsrichtungen führt bei beiden Schneidplatten zu überlagerten Schwingungserscheinungen, die die Oberflächengüte reduzieren und die Schneidplatte überlasten können. Bei einem radialen Einstechprozess kommt es, insbesondere bei der YL-Schneidplatte, zu Rattermarken, dahingegen eignet sich diese Schneidplatte für schräge Einstechoperationen mit einem Einstechwinkel unter 36° . Beide Schneidplattentypen ermöglichen eine Bearbeitung mit einer Schnitttiefe von $a_p = 1,75$ mm, wie bei den vorhergegangenen Parameterstudien wird in diesem Zusammenhang deutlich, dass sich die YL-Schneidplatte mit größeren Schnitttiefen stabilisiert.

Die Untersuchungen zeigen relevante Charakteristika des Innendrehens auf, die für die Einordnung und Weiterentwicklung des Verfahrens essenziell sind. Der Prozess ermöglicht insbesondere bei kleinen Bohrungsdurchmessern nur geringe Bearbeitungstiefen und wird zudem deutlich durch Schwingungen geprägt. Dies zeigt sich bei den mechanischen Werkzeugbelastungen, der Oberflächengüte und der Spanform. Ebenjene Schwingungen, die eine Frequenz von $f_{Schw} = 1\,600 \dots 1\,700$ Hz aufweisen und eine Lamellenspannbildung bewirken, sind auf die geringe Stabilität des Systems in Folge der langen Auskragung des Hartmetall-Werkzeughalters zurückzuführen. Der Aufbau eignet sich somit vorwiegend für eine axiale Belastung entlang des Werkzeughalters, sodass die Kräfte an die Werkzeugaufnahme weitergeleitet werden können. Bei radialen sowie tangentialen Belastungen liegt dahingegen eine größere Nachgiebigkeit des Systems vor, wodurch sich Schwingungen im Besonderen bei einstechenden und überlagerten Bewegungen verstärken.

Weiterhin ist eine ausgeprägte Abhängigkeit des Innendrehprozesses von der Schneidplattenform und dem daraus resultierenden Spannungsquerschnitt zu beobachten. Jedoch ist für eine komplexe Innenkonturierung der Einsatz verschiedener Schneidplatten zur Erreichung vorgegebener Konturen und Bearbeitungsstellen unerlässlich. Für einen universalen Einsatz ist dabei die Vollradiusschneidplatte geeignet, diese unterliegt aber gestaltbedingt hohen Passivkräften und Schwingungen. Das Konturieren mittels konventionellem Innendrehen eignet sich somit nur für kleine l/D -Verhältnisse bei angepassten Schnittdaten, wodurch sich erneut der Bedarf eines Werkzeugs zur tiefen Bohrunkskonturierung ergibt. Die aufgezeigten Herausforderungen können hierbei voraussichtlich mit einer kürzeren Auskraglänge vermieden werden, indem die ursächliche Schwingungsentstehung unterbunden wird.

6 Stehendes Werkzeugsystem zur Innenkonturierung

6.1 Anforderungsprofil und Werkzeugkonzept

Die grundsätzliche Aufgabe und Herausforderung ist es, die Möglichkeiten des Innendrehens im kleinen Durchmesserbereich so zu erweitern, dass relevante Limitationen der bestehenden Verfahren verschoben werden. Zu diesen Limitationen gehören, wie zuvor erläutert, die begrenzten Bearbeitungstiefen und die ausgeprägte Schwingungsanfälligkeit der Innendrehwerkzeuge. Aus diesem Grund ist ein Werkzeugsystem zu entwickeln, welches die l/D -Verhältnisse oberhalb des Innendrehens von $l/D > 16$ abdeckt und im Durchmesserbereich unterhalb der Auskammertechnologie von $D < 35$ angeordnet ist (vgl. Abbildung 2.10). Nachfolgend werden die übergeordneten Anforderungen an den Entwicklungsgegenstand in **Abbildung 6.1** aufgeführt.

Prozess	Bauteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zerspanende Innenkonturierung der Bohrungswand von tiefen Bohrungen ▪ Produktive Bearbeitung mit zum Innendrehen vergleichbaren Schnittparametern ▪ Konturtreue $< 0,05$ mm ▪ Prozesssichere Spanabfuhr 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stahlwerkstoffe, Gruppen: P, M, S ▪ Zylindrische Tiefbohrung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchgangsbohrung ▪ \varnothing_1 10...20 mm ▪ $l/D < 100$ ▪ Max. Kammertiefe: $\varnothing_1 \times 10$ % ▪ Härte < 50 HRC
Werkzeugsystem	Werkzeugmaschine
<ul style="list-style-type: none"> ▪ NC-gesteuerte Ausstellung eines Schneidelementes ▪ Integration einer unabhängigen NC-Achse ▪ Produktionsumgebung, Schutzklasse IP66 ▪ Zerstörungsfreie Austauschbarkeit von Verschleißelementen ▪ Gängige mechanische Schnittstelle ▪ Korrosionsbeständig, recyclebar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leistungsfähige KSS-Versorgung mit $V > 20$ l/min; Öl / Emulsion ▪ CNC-Steuerung, min. Sinumerik 840D sl ▪ Drehzahl > 500 1/min ▪ 1. Stufe <ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkstückrotation ▪ 2. Stufe <ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkzeugrotation

Abbildung 6.1: Anforderungen an den Entwicklungsgegenstand zur Konturierung kleiner Tiefbohrungen

Bei der Entwicklung soll es sich um einen zerspanenden Prozess mit hoher Produktivität handeln, sodass zum Innendrehen vergleichbare oder größere Schnitttiefen und Vorschübe eingesetzt werden können sollen. Der Spanabtransport ist mittels eines ausreichenden KSS-Stroms prozesssicher umzusetzen. Hinsichtlich der zu konturierenden Bauteile sollen diese alle gängigen Stahlwerkstoffe umfassen und eine tiefgebohrte Durchgangsbohrung aufweisen. Letztere hat die bei der Auskammerbearbeitung

üblichen hohen Anforderungen an die Durchmesser- und Mittverläuftoleranz zu erfüllen, um als Basis für die angeschlossene Konturierung verwendet werden zu können. Mit einem l/D -Verhältnis von $l/D > 100$ sollen die vorliegenden Möglichkeiten des Status Quo deutlich erweitert werden. Das eigentliche Werkzeug ist als modernes, NC-gesteuertes System auszu-legen, welches ein Schneidelement zur Konturierung verfahren kann. Um die Einsatzfähigkeit auf verschiedenen Werkzeugmaschinen zu realisieren, dürfen hierfür keine zusätzlichen Maschinenachsen benötigt werden und die Anbindung soll über bestehende Schnittstellen erfolgen. Weiterhin ist elementar, dass vergleichbar zu einem Wechselkopfwerkzeug, alle dem Verschleiß unterliegenden Elemente zerstörungsfrei austauschbar sind. Die Anforderungen an die Werkzeugmaschine umfassen eine leistungsfähige KSS-Versorgung und eine moderne CNC-Steuerung. Dabei ist in einem ersten Schritt ein Werkzeugsystem zu entwickeln, bei dem die Schnittbewegung über das Werkstück umgesetzt wird, in der nachfolgenden Iterationsstufe ist das Werkzeug rotatorisch anzutreiben.

Bei bestehenden Auskammerwerkzeugen wird die radiale Zustellung des Schneideelementes über eine ursprünglich axiale Bewegung generiert. Diese axiale Verfahrbewegung kann durch eine an der Werkzeugmaschine montierte Antriebseinheit oder einen im Werkzeugkopf angeordneten Linearaktuator erzeugt werden. Die Umwandlung der Bewegungsrichtungen folgt daraufhin im Werkzeugkopf über einen Verzahnungsmechanismus, wobei dies den begrenzenden Faktor dieser Technologie darstellt. Diese Verzahnung muss ausreichend groß dimensioniert werden, um die Prozesskräfte aufnehmen zu können und auch die Fertigung der Verzahnung sowie des umliegenden Werkzeugkopfes zu ermöglichen. Daher ist beim zu entwickelnden System die Umsetzbarkeit über konventionelle Methoden nicht gegeben, da der Ausstellmechanismus im Werkzeugkopf und damit in der kleinen Tiefbohrung realisiert werden muss. Aus diesem Grund bildet bei der Konstruktion des Auskammerwerkzeugs die Elastizität von Stahl den Ausgangspunkt. Diese soll es ermöglichen, einen zweigeteilten Werkzeugkopf durch das Verfahren eines innenliegenden Keils auseinander zu spreizen. Zweipunkt-Innenfeinmessgeräte, die über einen geschlitzten Messkopf mit einer im Inneren geführten Nadel verfügen, dienen für diese Systematik als Vorbild. Bei axialem Verfahren in Richtung der elastisch verformbaren Messkopfhälften bedingt die Keilform der Nadel eine Spreizung

des Messgerätes in radiale Richtung (**Abbildung 6.2**). In dieser Weise werden die Messflächen an die zu messende Bohrungswand angelegt und die verbundene Messuhr kann durch die geometrisch bestimmte Keilform den Wert des Innendurchmessers anzeigen.

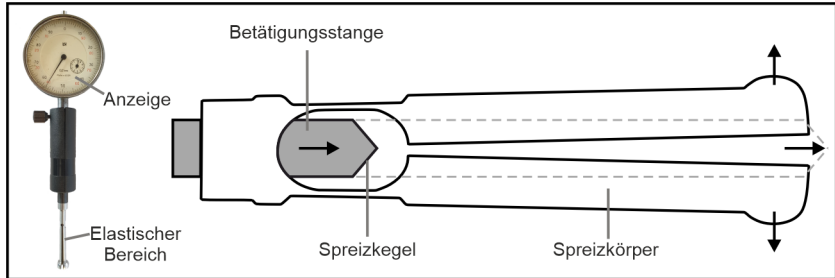


Abbildung 6.2: Funktionsweise eines Zweipunkt-Innenfeinmessgeräts

Bei Adaption dieser Funktionsweise auf ein Auskammerwerkzeug kann ein Schneidelement an einer beweglichen Hälfte montiert werden, während sich an der gegenüberliegenden Hälfte eine Führungsleiste befindet. Die Führungsleiste ist, vergleichbar zu Führungselementen bei Tiefbohrwerkzeugen, dazu bestimmt, an der Bohrungswand anliegend das Werkzeug abzustützen und somit Prozesskräfte auf das Bauteil übertragen zu können. Der erwartete positive Effekt besteht in der Möglichkeit einer erhöhten Bearbeitungstiefe aufgrund gesteigerter Stabilität und verstärkter Schwingungsvermeidung im Vergleich zu freischwingenden, nicht abgestützten Systemen. Die Abstützung an der Bohrungswand und die dadurch fest definierte Position des Werkzeugs auf einer Hälfte, führen bei Einsatz eines Keils zu einer radialen Auslenkung der zweiten Werkzeughälfte, die über das Schneidelement verfügt. Durch Ausstellung dieser Schneide kann somit ein zerspanender Prozess in einer Bohrung bzw. die Innenkonturierung realisiert werden. Diese Ausstellung erfolgt analog zum Innenfeinmessgerät mittels eines Schubstabs, dessen Spitze gegen eine schräge Fläche drückt und den beweglichen Teil des Werkzeugkopfes radial verfährt. Das gesamte Werkzeugsystem soll nachfolgend in **Abbildung 6.3** schematisch dargestellt und im Anschluss erläutert werden.

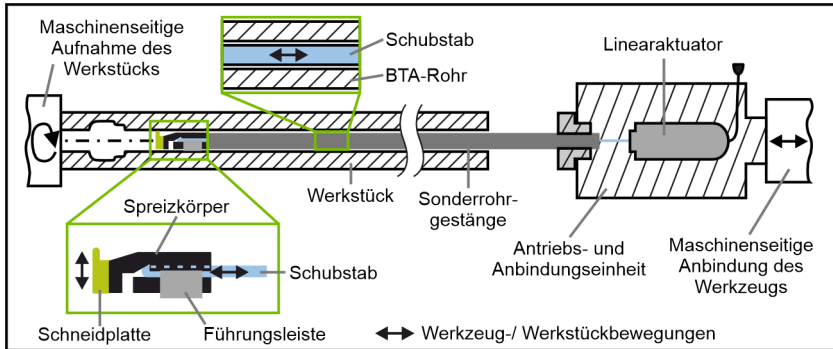


Abbildung 6.3: Schematischer Aufbau des neuartigen Werkzeugsystems

Das zuvor beschriebene Prinzip erläutert den vorderen Bereich des Werkzeugs im Zerspanungsprozess, wobei weitere Bedingungen erfüllt sein müssen, um eine erfolgreiche Funktionalität zu gewährleisten. Die axiale Schubstabbewegung muss initiiert und der Werkzeugkopf zur Bearbeitungsstelle geführt werden. Letzteres soll durch die Verwendung eines speziellen Rohrgestänges realisiert werden, das aus einem äußeren BTA-Rohr und einem inneren Schubstab besteht. Das BTA-Rohr trägt an einem Ende den Werkzeugkopf und ermöglicht dessen Positionierung in Z-Richtung. Die vorher beschriebene Spreizung des Werkzeugkopfes wird durch den Schubstab bewirkt. Für die Relativbewegung zwischen Schubstab und BTA-Rohr muss das Rohr in einer definierten Lage fixiert und der Stab axial bewegt werden können. Dies bedarf der Konstruktion einer Antriebs- und Anbindungseinheit (AAE), welche am anderen Ende des Rohrgestänges orientiert wird. Dabei umfassen die Aufnahme des BTA-Rohres und der Antrieb des Schubstabes die Zwecke dieser Einheit. Weiterhin ist sie mechanisch und elektronisch an eine Werkzeugmaschine anzuschließen. Größere Auskammerwerkzeuge verwenden für die Ausstellung der Schneide einen Linearaktuator, der sich im Werkzeugkopf befindet. Diese Technik soll im vorliegenden Fall auch für das neuartige Auskammerwerkzeugsystem verwendet werden, sodass ein Aktuator in der AAE zu integrieren ist. Wie beschrieben soll in der ersten Entwicklungsstufe die Schnittbewegung über die Werkstückrotation erfolgen, wodurch das System folglich auf vielen Tiefbohr- und Drehmaschinen eingesetzt werden können soll.

Die Gestalt des zweigeteilten Werkzeugkopfes bildet die Basis für das elastische Ausstellverhalten und die gezielte Herstellung von Auskammerungen. Aus diesem Grund werden in einem ersten Schritt verschiedene Innenkonturen in Werkzeugkopf-Rohlinge eingebracht und die Auslenkung untersucht. Die Rohlinge werden hierfür eingespannt und der zu bewegende Teil, an dem die Schneidplatte montiert werden soll, wird über einen definierten Weg bis $r = 1,5$ mm ausgestellt. Nach der Auslenkung wird das System entspannt und erneut ausgestellt, prozessbegleitend erfolgt die Messung der erforderlichen Ausstellkraft. Der Aufbau und die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in **Abbildung 6.4** aufgezeigt.

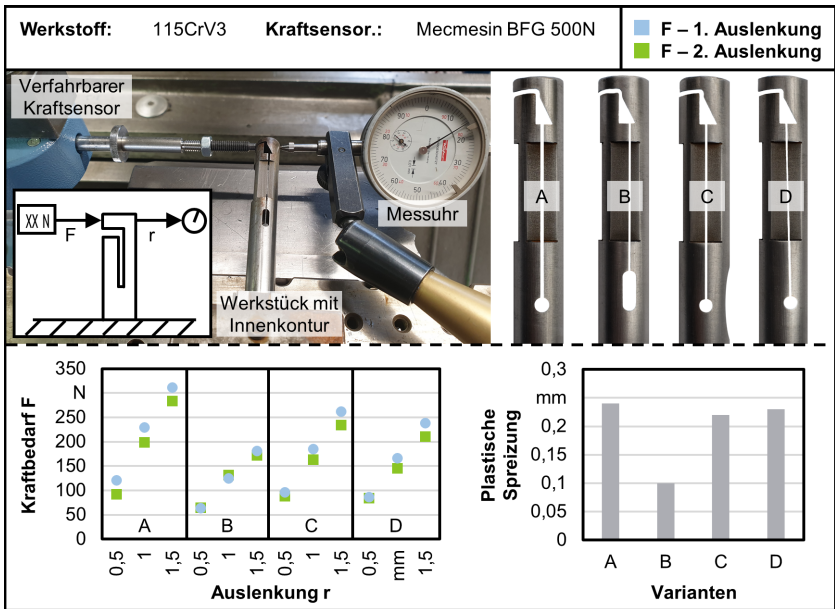


Abbildung 6.4: Grundlegende Untersuchungen zur Innenkontur des Werkzeugkopfes

Bei den Varianten A und C ist die entlang des Werkzeugkopfes verlaufene Spreizfuge mittig positioniert, wobei Variante C über eine zusätzliche Aussparung oberhalb des Konturendes verfügt. Bei Variante B wird die Spreizfuge radial $r = 1$ mm außermittig nach oben versetzt, bei Variante D liegt eine schräg verlaufene Spreizfuge vor. Zusätzlich wird bei Variante B eine längere Aussparung am Konturende eingebracht, um die Spannung zu re-

duzieren und die elastische Verformbarkeit des Werkzeugkopfes zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen auf, dass dadurch nach zweimaliger Ausstellung auch die geringste plastische Verformung bestehen bleibt, sodass in diesem Fall die Streckgrenze nur geringfügig überschritten wird. Auch wird durch den Versatz der Spreizfuge und das materialärmere Konturende ein geringerer Kraftbedarf zur Ausstellung erreicht. Dabei liegen der Kraftbedarf der ersten und der zweiten Auslenkung auf einem vergleichbaren Niveau. Hingegen wird bei den weiteren Varianten aufgrund der dann bereits vorliegenden plastischen Verformung eine geringere Kraft bei der zweiten Auslenkung benötigt. Hier ist zu beobachten, dass die Aussparung bei Variante C zu geringeren Kraftbeträgen im Vergleich zu Variante A beitragen kann. Diese Erkenntnis gilt ebenso für die schräg verlaufene Spreizfuge der Variante D. Bei Berücksichtigung der Ziele eines elastischen Ausstellverhaltens und einer geringen, gleichmäßigen Belastung des Aktuators, wird sich somit bei der weiteren Werkzeugauslegung an Variante B orientiert.

6.2 Mechanische Auslegung des Werkzeugsystems

Entsprechend des zuvor beschriebenen Schemas und der ersten Untersuchungen zur Auslegung des Werkzeugkopfes, wird das neuartige Werkzeugsystem entwickelt und konstruiert. Das gesamte System wird nachfolgend in **Abbildung 6.5** dargestellt, im Anschluss folgen detaillierte Beschreibungen zum Aufbau und der Funktionsweise der einzelnen Komponenten.

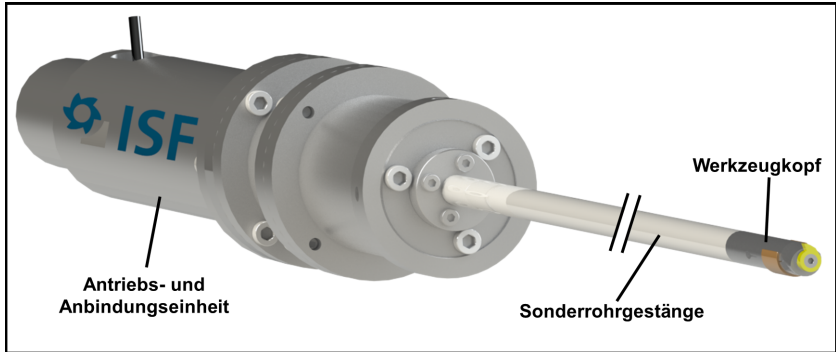


Abbildung 6.5: CAD-Darstellung des Werkzeugsystems

Die größte Komponente wird durch die AAE (**Abbildung 6.6**) gebildet, welche die erforderliche Aktorik integriert und an der Werkzeugmaschine angebunden wird. Der für den Bearbeitungsprozess erforderliche Werkzeugkopf wird dabei über ein Sonderrohrgestänge mechanisch mit der Einheit verbunden.

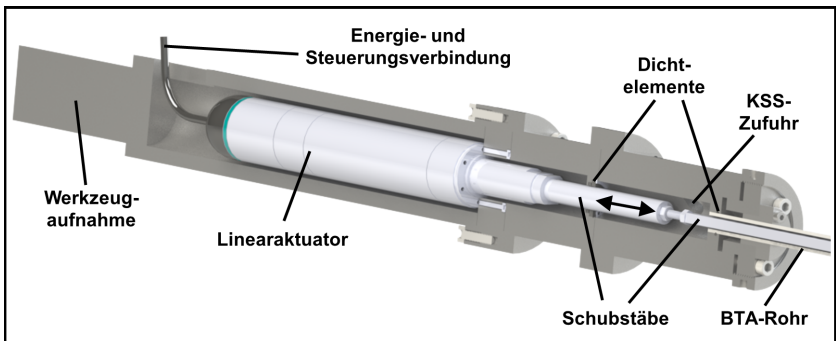


Abbildung 6.6: CAD-Schnittansicht der Antriebs- und Anbindungseinheit

Die Einheit erfüllt wie zuvor beschrieben verschieden Aufgaben, wobei der Linearaktuator die zentrale Komponente darstellt und durch die Generierung der Verfahrensbewegung und folglich der radialen Werkzeugausstellung die Kernaufgabe übernimmt. Anwendung findet dafür ein bürstenloser Servomotor vom Typ cyber dynamic actuator der Fa. Wittenstein, dessen äußerer Durchmesser bei der gewählten Variante $d_o = 40$ mm beträgt. Der Motor verfügt über einen integrierten Kugelgewindetrieb sowie eine Linearführung und ermöglicht die Verwendung einer maximalen Leistung von $F_{max} = 2,0$ kN über einen maximalen Hub von $s = 50$ mm.

Angebunden werden kann das erste Element des Schubgestänges mittels eines Gewindes, wobei eine Verdrehsicherung die definierte Lage der Schubstäbe sichert. Über eine Leistungs- und Geberleitung erfolgt der Anschluss am Servoregler vom Typ cyber simco drive, dieser wird wiederum von der Numerical Control Unit der Werkzeugmaschine über Profinet angesteuert. Aufgrund dieser kabelgebundenen Leitung liegt für das vorliegende System keine Rotationsfähigkeit vor. Im vorderen Bereich der AAE kann über eine Gewindebohrung eine KSS-Zuführung angeschlossen werden, sodass der KSS in das Sonderrohrgestänge eingeleitet und zum Werkzeugkopf transportiert wird. Dies bedarf Dichtungen, um den Motor vor Wasser zu schützen und einen Austritt außerhalb der vorgesehenen Wirkstelle zu verhindern. Für den vorliegenden dynamischen Anwendungsfall mit der sich bewegenden Schubstange wird in Motorrichtung ein Quad-Ring verwendet, da dieser die Vorteile einer geringen Reibwirkung bei doppelter Dichtfunktion und eine Sicherheit gegen Verdrillen vorhält.

Die Klemmung des BTA-Rohres erfolgt über einen Spannsatz, der sich in einem axial verstellbaren Lageadapter befindet. Im vorliegenden Fall weist die AAE im hinteren Bereich einen zylindrischen Absatz auf, um mit Hilfe von Halbschalen das Werkzeugsystem an einer BTA-Tiefbohrmaschine anbinden zu können. Das an der AAE montierte Sonderrohrgestänge wird in der Schnittansicht in **Abbildung 6.7** aufgezeigt.

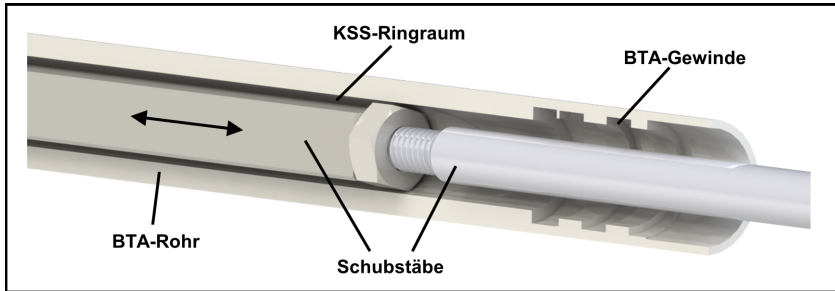


Abbildung 6.7: CAD-Schnittansicht des Sonderrohrgestänges

Ein BTA-Rohr mit einer geschliffenen Außenfläche bildet die äußere Komponente des Sonderrohrgestänges. Zur Anbindung des Werkzeugkopfes verfügt das Rohr an einem Ende über ein eingängiges BTA-Gewinde. Innenliegend im BTA-Rohr führt sich ein Vierkant mit geschliffenen Kanten, der die axiale Schubbewegung und an das letzte Schubstabelement im Werkzeugkopf angebunden ist. Das gesamte Gestänge ist in der Länge frei einstellbar und wird vornehmlich durch die Grenzen der verwendeten Werkzeugmaschine limitiert. Der in die AAE eingeleitete KSS wird durch die freien Bereiche zwischen BTA-Rohr und Schubstab geleitet und umströmt hiernach den Werkzeugkopf. Bei einem Innendurchmesser des Rohres von $D_i = 8 \text{ mm}$ ergibt sich ein Zuleitungsquerschnitt von $A_{KSS} = 14,52 \text{ mm}^2$, sodass sich bei einem beispielhaften Volumenstrom von $\dot{V} = 30 \text{ l/min}$ eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit von $v_{KSS} = 34,3 \text{ m/s}$ einstellt. Im Besonderen auf Bearbeitungszentren kann diese Art der KSS-Zuführung verwendet werden, als zweite Möglichkeit kann ferner eine äußere KSS-Zufuhr zum Einsatz kommen. Diese Möglichkeit besteht unter anderem auf BTA-Tiefbohrmaschinen, bei denen der KSS über einen BOZA in den Ringraum zwischen äußerem Bohrrohr und der Bohrungswand des Werkstückes eingeleitet wird. Die dritte Komponente, der Werkzeugkopf, wird mit seinen einzelnen Bestandteilen nachfolgend in **Abbildung 6.8** dargestellt.

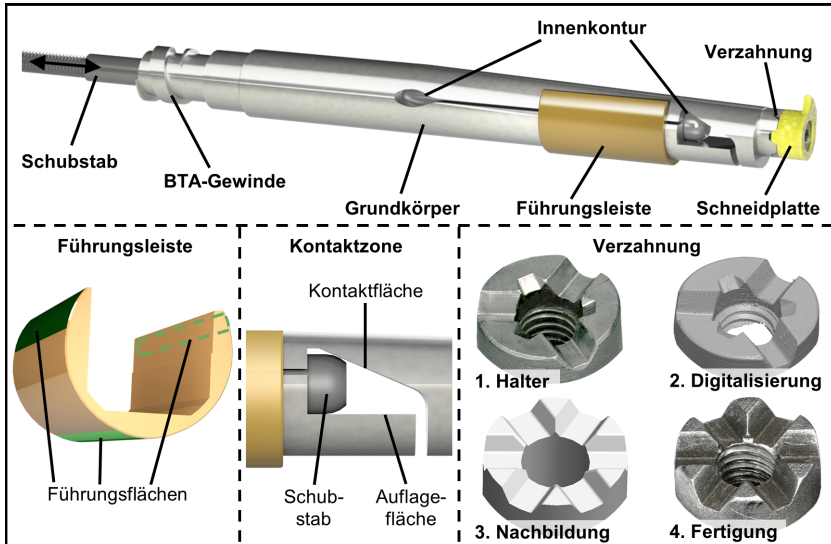


Abbildung 6.8: CAD-Darstellung des Werkzeugkopfes

Die Befestigung des Werkzeugkopfes erfolgt wie zuvor beschrieben am BTA-Rohr. Dafür wird ein eingängiges BTA-Außengewinde im hinteren Bereich gefertigt, sodass der gesamte Werkzeugkopf jederzeit montiert und demontiert werden kann. Wie bei den Grundlagenuntersuchungen beobachtet werden konnte, stellen Schwingungen eine der größten Herausforderungen bei der Innenbearbeitung dar. Dieser Thematik soll mit der Verwendung einer Leistenführung entgegengewirkt werden, wobei hierfür eine Führungsleiste aus Hartmetall in einem mit Nuten versehenen Bereich geklemmt wird. Eine sonst übliche Verschraubung ist dabei aufgrund der geringen Materialstärke und der kleinen Werkzeugdimensionen nicht umsetzbar, gelötete Führungsleisten ermöglichen dahingegen keine schnelle Austauschbarkeit dieses Verschleißelementes. Die Leiste erstreckt sich in der Bohrung über einen Umfang von ca. 255 ° und verfügt, vergleichbar zu weiteren Tiefbohrwerkzeugköpfen, über drei herausgestellte Führungsbereiche. Diese Bereiche weisen einen geringeren Radius als die Bohrung auf, sodass eine Linienführung des Werkzeugkopfes vorliegt. Das Werkzeug führt sich somit vollständig in der Tiefbohrung und die Prozesskräfte können über die Führungsleiste an die Bohrungswand weitergeleitet werden. Zudem wird eine Ein- und Auslauffase an den Leistenkanten gefertigt, um

ein Verklemmen bei axialen Bewegungen zu vermeiden. Die freie Ausspannlänge, die maßgeblich die Entstehung und Ausprägung von Schwingungen mitbestimmt, ergibt sich im vorliegenden Fall durch den Abstand zwischen der vorderen Kante der Führungsleiste und der Schneidplatte. Beim dargestellten Werkzeug beträgt diese Länge $l = 20 \text{ mm}$ und somit $l/D < 2$. Dieser Führungsleistenrückstand definiert beim Kurzkammerverfahren, unter der Voraussetzung einer uneingeschränkten Leistenauflage in der Vorbohrung, die maximale Länge eines einzelnen Kammerelementes.

Die Innenkontur wird mittels eines Drahterodierprozesses gefertigt und orientiert sich an den grundlegenden Erkenntnissen der Vorarbeiten. In weiteren Iterationsschritten wird die Kontur darüber hinaus noch weiterentwickelt und angepasst (vgl. Kapitel 6.3). Sie charakterisiert sich insbesondere durch das Konturende, die Schlitzlänge und die Ausgestaltung der Kontaktfläche. An letzterer wirkt der Schubstab, welcher durch eine zentrische Bohrung durch den Werkzeugkopf geführt wird und auf einer zur Bohrungswand parallelen Fläche aufliegt. Auch hier ergibt sich Gestaltungsspielraum, indem die vordere Schubstabgestalt und der Durchmesser variiert werden können. Dies korreliert mit den Anforderungen an die maximale Ausstellung und das Ausstellverhältnis.

Zuletzt muss die Verzahnung eine sichere, formschlüssige Aufnahme der Schneidplatte gewährleisten und Zerspankräfte aus verschiedenen Richtungen aufnehmen können. Hierfür bildet der Halter, welcher zuvor bei den Grundlagenversuchen verwendet wurde, die Basis. Dieser wird mit einem optischen Formmessgerät digitalisiert, sodass eine Punktwolke die reale Oberfläche nachbildet. Anschließend wird die Kontur mit Hilfe von CAD-Software nachgebildet und für die Fertigung vorbereitet. Die finale Verzahnung wird ebenfalls mit einem Drahterodierprozess gefertigt, sodass sich die Vertiefungen über den gesamten Durchmesser erstrecken. Eine Verschraubung sichert die Lage der Schneidplatte in der Verzahnung.

6.3 Simulationsgestützte Auslegung des Werkzeugkopfes

Wie zuvor erläutert, besteht die Notwendigkeit einer gleichmäßigen sowie definierten Ausstellung der Schneidplatte. Dies ist über experimentelle Untersuchungen eines gefertigten Werkzeugsystems und der nachfolgenden Anpassung des Werkzeugkopfes möglich, geht jedoch mit einem hohen Ressourcen- und Zeiteinsatz einher. Aus diesem Grund werden statisch-mechanische FEM-Berechnungen durchgeführt, mit Hilfe derer eine Simulation des Ausstellverhaltens sowie der am Werkzeugkopf wirkenden Belastungen realisiert werden können. Die übergeordneten Anforderungen an die Werkzeugkopfentwicklung sind hierbei eine rein elastische Materialdeformation im Zuge der Ausstellbewegung sowie eine im Verhältnis zur Zustellung des Schubstabes lineare, radiale Verfahrbewegung des Schneidelementes. Für die Durchführung der FEM-Berechnungen wird die Software ANSYS 2024 R1 verwendet, in welche ein CAD-Modell des Werkzeugkopfes geladen wird. Zur Begrenzung des Rechenaufwandes wird hierbei das Modell an sinnvollen Stellen vereinfacht. Dies umfasst spezifisch das BTA-Gewinde zur Aufnahme des Werkzeugkopfes, das metrische Außengewinde des Schubstabes sowie das metrische Innengewinde am Werkzeugkopf zur Verschraubung der Schneidplatte. Diese Bereiche würden für die Simulation einen nicht relevanten, jedoch komplexen Kontaktbereich darstellen, sodass sie zu zylindrischen Konturen vereinfacht werden. Für eine realitätsnahe Vorhersage der Verformungen und Spannungen im Zuge der Ausstellbewegung sind den Teilkomponenten des Systems geeignete Modelle für das (elastische) Materialverhalten zuzuweisen. Der Grundkörper besteht dabei aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4+QT, die Führungsleiste aus Hartmetall sowie der Schubstab aus dem Kaltarbeitsstahl 115CrV3. Weiterhin sind Kontaktbedingungen zwischen den Komponenten festzulegen. Dabei wird zwischen der Führungsleiste und dem Grundkörper ein Verbundkontakt definiert, sodass Druck- und Zugkräfte übertragen werden, während zwischen Schubstab und Grundkörper ein reibungsfreier Kontakt vorliegt, welcher nur die Übertragung von Druckkräften zulässt. Schneidplatte, Grundkörper und Verbindungsschraube werden zu einem Bauteil zusammengefügt, wodurch in der Folge die Kontaktbedingungen hierbei entfallen. Neben den Kontaktbedingungen erfordert die Simulation die Angabe über die Einspannbedingungen des Werkzeugkopfes, wodurch Freiheitsgrade in der Bewegung entzogen werden. Aufgrund der im Prozess vorliegenden Anbindung an das BTA-Rohr über das BTA-Gewinde, wird an dieser

Stelle eine fixierte Lagerung gewählt. Bewegungen des Grundkörpers werden somit in allen Freiheitsgraden verhindert. Die zweite Lagerung ergibt sich durch die Abstützung der Führungsleiste in der Tiefbohrung an den Kontaktzonen, hierfür wird eine zylindrische Lagerung gewählt.

Die Vernetzung der Komponenten stellt den dritten Eingangsparameter für die FEM-Berechnungen dar. Die Komponentengestalt wird in kleine Elemente mit einer Kantenlänge von $e = 0,8 \text{ mm}$ zerlegt, welche über Knotenpunkte miteinander verbunden werden. Im vorliegenden Fall werden als Elementtyp der Diskretisierung Tetraeder bestimmt. Für die Berechnungen wird eine manuelle Vernetzung mit einer selektiven, höheren Netzdichte ($e = 0,25 \text{ mm}$) in Bereichen, in denen eine große Verformung und Belastung erwartet wird, vorgenommen. Dies gilt insbesondere für den Endbereich der Innenkontur und den Kontaktbereich zwischen Schubstab und Grundkörper. **Abbildung 6.9** stellt im Folgenden den vernetzten Werkzeugkopf dar.

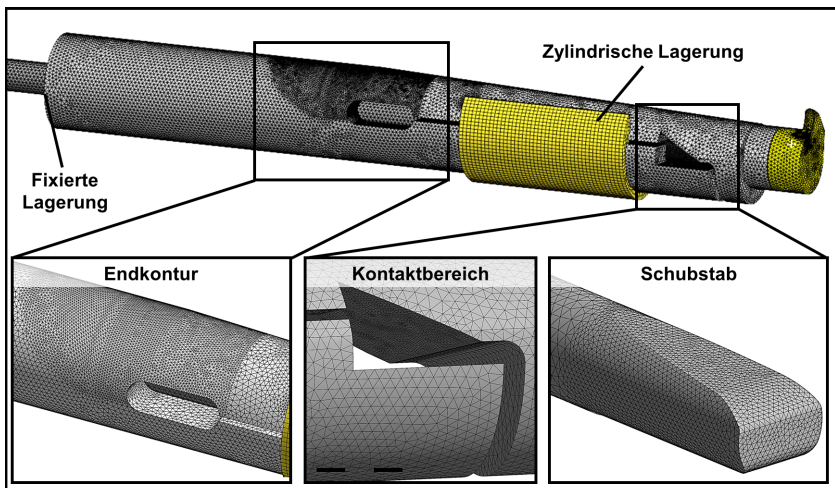


Abbildung 6.9: Vernetztes Simulationsmodell des Werkzeugkopfes

Der erste zu untersuchende Werkzeugkopf weist eine Bohrung mit einem Durchmesser von $D = 5 \text{ mm}$ und eine schräge Schubstab-Kontaktfläche mit einem Länge-zu-Höhe-Verhältnis von $l/h = 2$ auf. Der Schubstab mit einem Kerndurchmesser von $d = 4 \text{ mm}$ berührt die Innenkontur des Grundkörpers im oberen Bereich über einen Linienkontakt, an der unteren Werkzeug-

hälfte über einen Flächenkontakt. Die Gestalt des Schubstabs ist nicht rotationssymmetrisch, weshalb nur eine definierte Lage für die beabsichtigte Aufspreizung des Grundkörpers zulässig ist. Dieser Schubstab wird bei den Berechnungen in Teilschritten bis zu einer axialen Verschiebung von $c = 3 \text{ mm}$ zugestellt, wobei zum einen die Auswirkungen im Rahmen einer elastischen Verformungsanalyse, zum anderen mit Hilfe einer Spannungsanalyse betrachtet werden. Beide Analysen werden im Weiteren vorgestellt.

Elastische Verformungsanalyse des Werkzeugkopfes V1

Bei der statisch-mechanischen FEM-Berechnung zur Verformungsanalyse wird der oberste Punkt der Schneidplatte zur Erfassung der radialen Position vermessen. **Abbildung 6.10** zeigt hierzu die ausgewertete Schneidposition im Vergleich zur experimentell erfassten Ausstellbewegung.

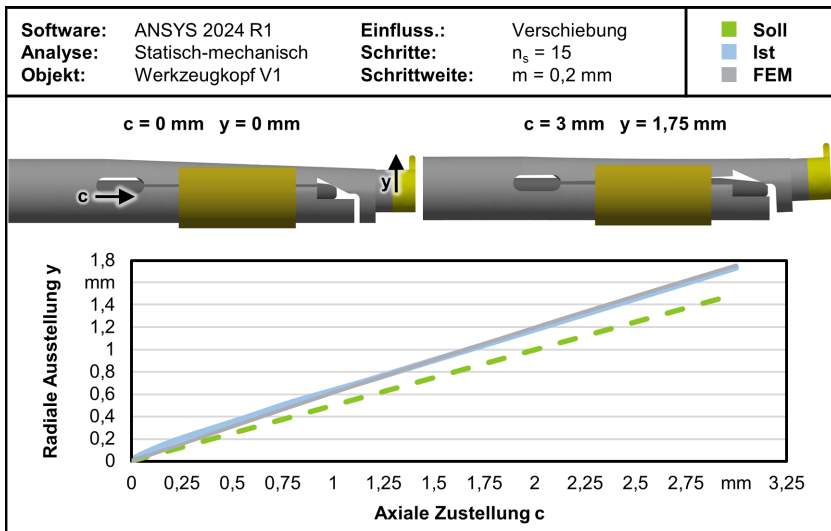


Abbildung 6.10: Elastische Verformungsanalyse des Werkzeugkopfes V1

Die Simulation sagt ein nahezu lineares Ausstellverhalten der Schneidplatte vorher und bildet die real gemessene Ausstellbewegung in einer hohen Vorhersagegüte nach. Die Berechnungen sind somit geeignet, um Werkzeugmodifikationen ohne aufwendige Fertigung und Einsatzversuche vorzunehmen. Diese Modifikationen sind dabei auch erforderlich, da Abweichungen

zum Soll-Wert aus der Systemauslegung durch eine zu starke Ausstellbewegung vorliegen.

Spannungsanalyse des Werkzeugkopfes V1

Um festzustellen, ob die Ausstellbewegung tatsächlich nicht zu einer plastischen Deformation am Werkzeugkopf führt, ist eine Analyse der auftretenden mechanischen Spannungen durchzuführen (**Abbildung 6.11**). Diese dürfen die Streckgrenze des Materials nicht überschreiten.

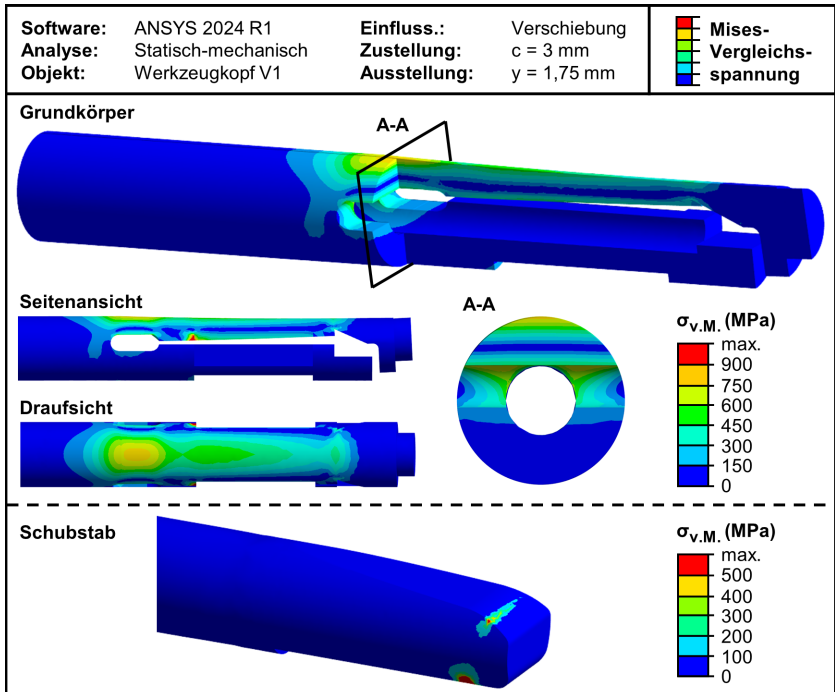


Abbildung 6.11: Spannungsanalyse des Werkzeugkopfes V1 auf Grundlage der Mises-Vergleichsspannung

Die auftretenden Spannungen werden mittels der von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{v.M}$ analysiert, die auf der Gestaltänderungshypothese basiert. Diese besagt, dass bei Überschreitung eines Grenzwertes der Gestaltänderungsenergie der Werkstoff versagt. Die Gestaltänderungsenergie ist hierbei die Energie, bei welcher die Deformation oder Verzerrung eines Körpers verursacht wird. Bei der Gestaltänderungshypothese werden alle Spannungskomponenten berücksichtigt, wobei bei einem hydrostatischen

Spannungszustand eine Vergleichsspannung von $\sigma_{v,M} = 0$ MPa vorliegt. Die Analyse beschränkt sich auf lineares und damit elastisches Materialverhalten ohne eine Berücksichtigung von plastischen Verformungen.

In den Untersuchungen ist ein symmetrischer Spannungsverlauf mit einer neutralen Faser entlang des Querschnittes an der oberen Hälfte des Werkzeugkopfes zu beobachten. Oberhalb dieser Faser wird der Grundkörper auf Druck beansprucht, die größten Spannungen liegen hierbei an der äußeren Oberfläche am Ende der inneren Spreizkontur vor. Hingegen wird unterhalb der Faser der Werkzeugkopf auf Zug beansprucht. Die höchsten Spannungen ergeben sich, bedingt durch die Kerbwirkung, an den Kantenübergängen der Innenkontur mit einer maximalen Vergleichsspannung von $\sigma_{v,M} = 781$ MPa. Die Streckgrenze des Werkstoffes ($R_{p0,2} \approx 900$ MPa) wird dabei nicht erreicht, sodass ein vollständig elastisches Verhalten vorliegt. Der Schubstab unterliegt im Kontaktbereich einer Druckbeanspruchung, welche Spannungsspitzen ($\sigma_{v,M} = 592$ MPa) an den Kanten hervorrufen. Dies kann in einer Einebnung an ebenen Stellen aufgrund der geringeren Streckgrenze von $R_{p0,2} \approx 500$ MPa resultieren.

Simulationsbasierter, modifizierter Werkzeugkopf V2

Aus den aufgezeigten Ergebnissen der Simulation sowie den beabsichtigten experimentellen Untersuchungen ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Weiterentwicklung des Werkzeugkopfes. Zunächst ist eine lineare Ausstellung mit einem Verhältnis zwischen axialer Zustellung und radialer Schneidenausstellung von 2:1 zu erreichen. Weiterhin soll auch eine größere Verfahrbewegung mit einer maximalen radialen Ausstellung von $y = 2$ mm realisiert werden können. Zudem ist eine gleichmäßigere Verteilung der wirkenden Spannungen an den kritischen Stellen des Werkzeugkopfes zu erzielen.

Durch den Anwendungsfall eines rotierenden Werkzeugsystems ergibt sich auch die Anforderung eines rotationsfähigen Werkzeugkopfes. Dies bedeutet, dass die Funktionsfähigkeit der Ausstellung in allen Lagen des Schubstabes im Verhältnis zum Werkzeugkopf gegeben sein muss. In iterativen Schritten wurden die Innenkontur sowie die Form des Schubstabes angepasst, um die Anforderungen zu erfüllen (**Abbildung 6.12**).

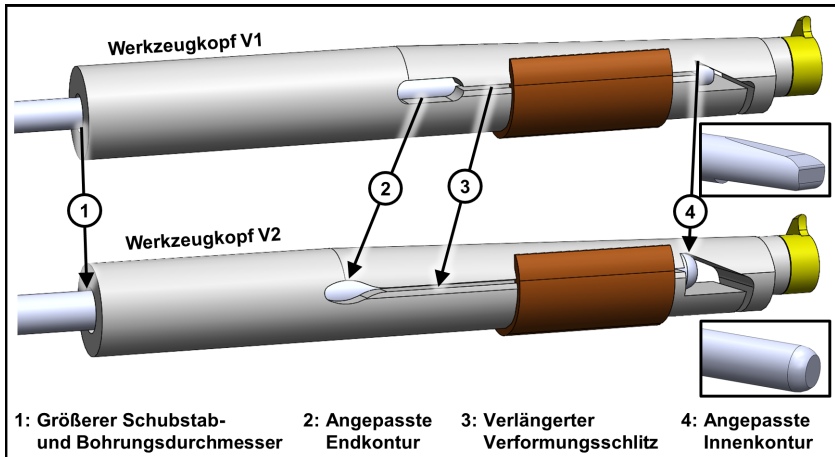


Abbildung 6.12: Anpassungen des Werkzeugkopfes sowie des Schubstabes zur Erfüllung der Anforderungen

Durch eine größere Bohrung und einen größeren Schubstabdurchmesser werden längere Ausstellwege ermöglicht. Um bei der maximalen Ausstellung die Streckgrenze nicht zu überschreiten, werden dafür der Verformungsschlitz der Innenkontur verlängert sowie die Endkontur angepasst. Die neue Endkontur charakterisiert sich vollständig durch radiale Formelemente und tangentiale Übergänge, wodurch die Kerbwirkung an scharfen Kanten vermieden werden soll. Die vordere Schräge der Innenkontur, an welcher der Schubstab den Grundkörper aufspreizt, wird in der Weise angepasst, dass eine 2:1-Ausstellverhältnis erreicht wird. Zuletzt verändert sich die rotationssymmetrische Schubstabgestalt zur Erfüllung der Anforderung der Rotationsfähigkeit.

Elastische Verformungsanalyse des Werkzeugkopfes V2

Zunächst wird wieder eine Betrachtung der elastischen Verformung des neu entwickelten Werkzeugkopfes vorgenommen, jedoch mit einer gesteigerten axialen Zustellung. In 20 Schritten wird eine maximale Zustellung von $c = 4$ mm angefahren und erneut die resultierende Ausstellung y ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in **Abbildung 6.13** dargestellt.

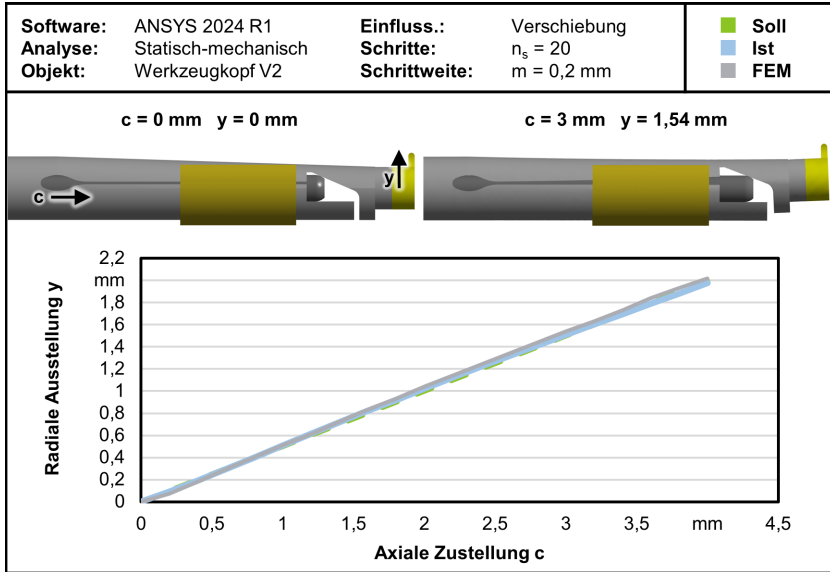


Abbildung 6.13: Elastische Verformungsanalyse des Werkzeugkopfes V2

Die größere Ausstellbewegung wird durch die Anpassungen am Werkzeugkopf und Schubstab vollumfänglich erreicht. Es ergibt sich in der Simulation eine nahezu lineare Ausstellbewegung bis zu einer radialen Ausstellbewegung von $y = 2,02$ mm. Das FEM-Modell zeigt dabei bis zu einer axialen Zustellung von $c = 3$ mm eine gute Übereinstimmung zur experimentell ermittelten Ausstellbewegung, darüber hinaus übersteigen die modellierten Werte geringfügig die des gefertigten Werkzeugkopfes. Über den betrachteten Parameterbereich kann eine maximale Abweichung der Ausstellbewegung zwischen der Simulation und den realen Werten von $\Delta y = 0,05$ mm dokumentiert werden, die maximale Differenz zwischen Simulation und Soll-Ausstellbewegung beträgt $\Delta y = 0,04$ mm. Basierend auf der elastischen Verformungsanalyse eignet

sich folglich der Werkzeugkopf für den beabsichtigten Einsatz zur Innenkonturierung.

Spannungsanalyse des Werkzeugkopfes V2

Weiterhin ist auch wieder der Spannungszustand am angepassten Werkzeugsystem bei ausgestellter Schneidplatte zu analysieren. **Abbildung 6.14** stellt in gleicher Weise zum ersten Werkzeugkopf die Vergleichsspannungen am Grundkörper und Schubstab dar.

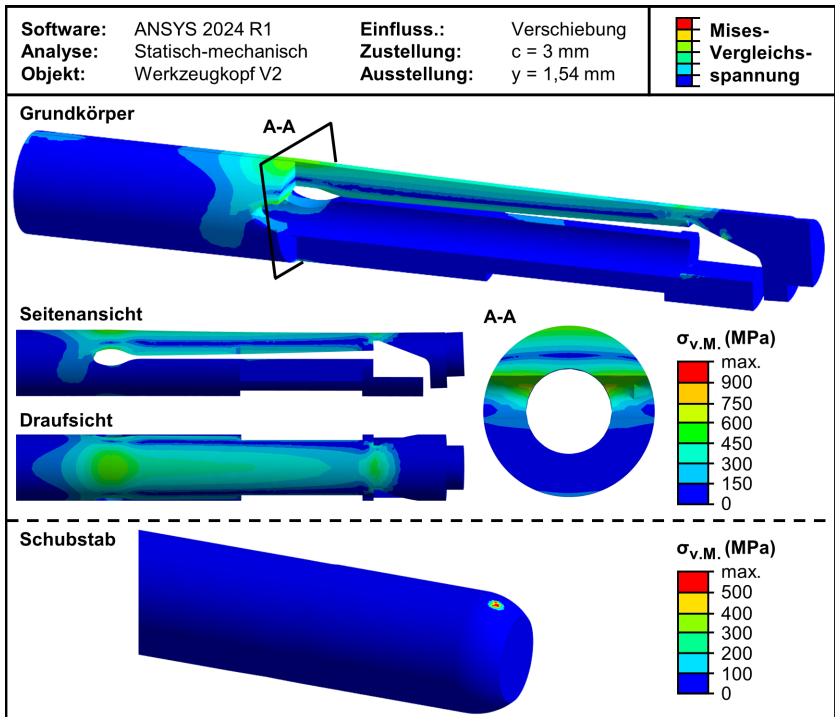


Abbildung 6.14: Spannungsanalyse des Werkzeugkopfes V1 auf Grundlage der Mises-Vergleichsspannung

Durch den längeren Verformungsschlitz und die veränderte Endkontur wird eine gleichmäßigere Verteilung der Spannung am Grundkörper eingestellt. Insgesamt ergeben sich durch die Anpassungen geringere Vergleichsspannungen als beim ersten Werkzeugkopf mit einer maximalen Spannung von $\sigma_{v,M} = 470$ MPa. Dies wird auch dadurch erreicht, dass die Kerbwirkungen an der Innenkontur vermieden bzw. reduziert werden. In dieser Weise sind

auch größere Ausstellungen ohne eine plastische Verformung möglich. Beim Schubstab liegt im Kontaktbereich eine Punktbelastung vor, bei der die Streckgrenze des Materials überstiegen wird. Für die weitere Werkzeugentwicklung hat das zur Folge, dass die Spitze des Schubstabes wärmebehandelt werden sollte, um partiell die Streckgrenze zu erhöhen. Somit kann Verschleiß und eine Einkerbung des Schubstabs vermieden werden.

Ausgehend von den Modellen können die Einsatzversuche des Werkzeugsystems auf einer Werkzeugmaschine zur erstmaligen tiefen Innenkonturierung in diesem Durchmesserbereich umgesetzt werden (vgl. Kapitel 6.5). Sollen weitere Bohrungen mit variierenden Durchmessern innenkonturiert werden, so besteht durch das entwickelte Modell die Möglichkeit einer ersten simulativen Auslegung der Werkzeugköpfe, wodurch die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems erhöht und die Entwicklungszeit reduziert werden.

6.4 Antriebstechnische Integration auf einer Tiefbohrmaschine

Nach der Fertigung des Werkzeugsystems ist dieses für die ersten experimentellen Einsatzversuche auf einer Werkzeugmaschine in Betrieb zu nehmen. Diese Versuche erfolgen auf der BTA-Tiefbohrmaschine Giana GGB 560 CNC, da hier eine Werkstückrotation ermöglicht wird, zudem eine leistungsfähige KSS-Anlage vorliegt und auch längere Bauteile bzw. Werkzeuge eingesetzt werden können. Der Aufbau des Systems wird nachfolgend in **Abbildung 6.15** aufgezeigt.

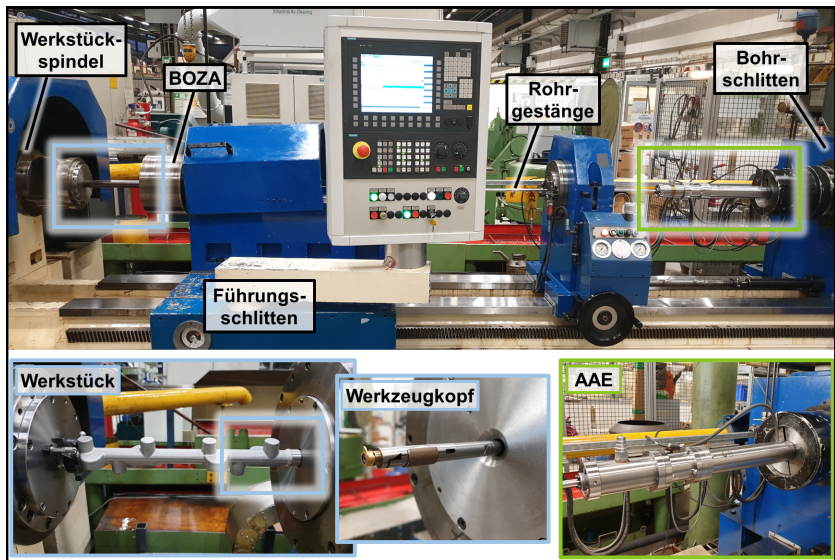


Abbildung 6.15: Aufbau des Werkzeugsystems auf BTA-Tiefbohrmaschine Giana GGB 560 CNC

Die Aufnahme des Werkzeugsystems wird über eine Klemmung in Halbschalen am Bohrschlitten der Maschine umgesetzt. Dieser Bohrschlitten ist dabei für die Bewegung der z-Achse und hierdurch alle axialen Verfahrbewegungen und Vorschubbewegungen des Werkzeugkopfes zuständig. Die innen zu konturierenden Werkstücke werden im vorliegenden Aufbau über Konen zwischen Werkstückspindel und BOZA gespannt. Hierfür weisen alle Bauteile definierte Fasen an den Außenkanten auf, sodass eine zentrische Lage des Werkstückes sowie eine Abdichtung der Proben erreicht wird. In Abhän-

gigkeit der Probe kann noch ein Drehherz verwendet werden, um ein Durchrutschen insbesondere bei schnellen Drehzahländerungen zu vermeiden und ein Spannen dünnwandiger Bauteile zu ermöglichen.

Die KSS-Zuführung zum Werkzeugkopf wird über den BOZA in den Ringraum zwischen Bohrungswand und BTA-Rohr realisiert, hiernach wird das KSS-/Späne-Gemisch durch die Werkstückspindel abtransportiert, welche das Werkstück antreibt. Weiterhin ist eine passende Hinterenddichtung mit dem Dicht- und Führungsmaß des äußeren Durchmessers des BTA-Rohres im BOZA zu montieren. Nach der mechanischen Integration des Systems ist die ordnungsgemäße Ansteuerung des Linearaktuator von besonderer Bedeutung, um definierte Konturierungsprozesse programmieren und durchführen zu können. Diese Ansteuerung wird in **Abbildung 6.16** schematisch skizziert.

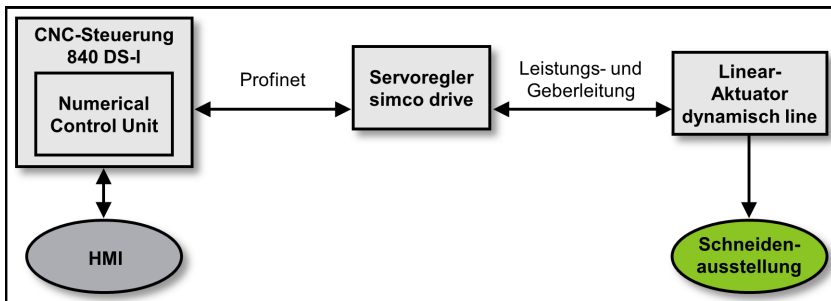


Abbildung 6.16: Schema der Aktuator-Ansteuerung

Für den Einsatz des Linearaktuator cyber dynamic line des Herstellers Witenstein bedarf es zur Ansteuerung und Energieversorgung eines Servoregler, wobei das System cyber simco drive desselben Herstellers verwendet wird. Dieser Servoregler wird im Schaltschrank der Maschine montiert und über das Kommunikationsprotokoll Profinet angesteuert. Angelegt wird der Aktuator als zusätzliche, virtuelle Achse in der CNC-Steuerung, sodass vergleichbar zu einer realen Achse eine Bewegungsführung vorliegt, jedoch keine Antriebs- und Geberanbindung. In der Steuerung wird dafür das Verhältnis von axialer Motorzustellung zu radialer Schneidenausstellung und damit die Werkzeugposition in der neuen y-Achse hinterlegt. Wie zuvor erläutert wird in diesem Zusammenhang bei der Werkzeugkopfauslegung ein lineares 2:1-Verhältnis angestrebt. In der Folge kann das Werkzeugsystem

über eine 2D-Bahnsteuerung programmiert werden, die Steuerung verrechnet hierbei, vergleichbar zu einer CNC-Drehmaschine, die zwei Achsbewegungen.

Bei der Inbetriebnahme des Werkzeugs ist zunächst der Servomotor zu referenzieren, indem dieser mit einem definierten Blockstrom seinen hinteren Nullpunkt anfährt. Hiernach kann das Referenzieren der Schubstablage zum Werkzeugkopf vorgenommen werden. Der erste Kontaktpunkt, aus welchem aus den technischen Zeichnungen die genaue Schneidenlage hervorgeht, wird angefahren und in der Maschinensteuerung eingepflegt. Davon ausgehend können Softwareendschalter programmiert werden, um eine unzulässige Ausstellbewegung und damit eine potentielle Werkzeugschädigung zu vermeiden. Die Erfassung der realen Ausstellbewegung ist direkt über ein Wegmesssystem außerhalb des Werkstückes an der Schneidenspitze oder indirekt über die Analyse des Innendurchmessers nach Durchführung einer Durchmesserreihe messbar. Falls diese Werte vom idealen Verhältnis abweichen, kann eine Kompensationstabelle angelegt werden, die bei der Achsansteuerung die realen Fehler berücksichtigt und kompensiert. Darüber hinaus können aufgrund der verschiedenen mechanischen Komponenten im Werkzeugsystem Umkehrlose vorliegen, die beachtet werden müssen. Liegen entsprechende Umkehrlose vor, kann die Schneidplatte, ohne Kenntnis der tatsächlichen Werkzeugposition, zu viel oder zu wenig ausgefahren werden. Daher sind in beide Bewegungsrichtungen der y-Achse bestimmte Punkte anzufahren und das Umkehrlos zu bestimmen. Diese Umkehrlose können daraufhin in der Steuerung hinterlegt werden. Ergänzend wird eine Bedienoberfläche am Human Machine Interface (HMI) programmiert, um das Werkzeugsystem an- und abzuwählen, zu referenzieren und die Positionswerte auslesen zu können.

6.5 Experimentelle Einsatzversuche

Die experimentellen Einsatzversuche und damit die erstmalige Erprobung des Werkzeugsystems werden mit dem zuvor vorgestellten Aufbau auf einer BTA-Tiefbohrmaschine durchgeführt. Bei den innen zu konturierenden Bauteilen handelt es sich um Wellen aus verschiedenen Werkstoffen mit einer Länge von $l = 300$ mm und einer Durchgangsbohrung mit $D = 14$ mm. In dieser Versuchsreihe liegt eine Rotation des Werkstücks gegen den Uhrzeigersinn vor, woraus sich eine rechte Orientierung der Schneidplatten ergibt. Hingegen wurden beim Innendrehen eine Werkstückrotation im Uhrzeigersinn und damit eine linke Schneidplatten-Orientierung eingesetzt. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf den Bearbeitungsprozess und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen (vgl. Kapitel 5) finden die Rückwärtsdrehplatte (YR) sowie die Vollradiusdrehplatte (VR) Anwendung. Zunächst erfolgen nach ersten Funktionsversuchen grundlegende Betrachtungen unter Variation der Schnitttiefe, des Vorschubs und des Schneidplattentyps. Von einer Schnittgeschwindigkeitsvariation muss aufgrund der Begebenheiten der Werkzeugmaschine abgesehen werden. Die verwendete Tiefbohrmaschine ist für die Voll- und Aufbohrbearbeitung größerer Durchmesser ($D > 40$ mm) ausgelegt und ermöglicht nur begrenzte Drehzahlen. Anschließend werden definierte Auskammerungen und funktionale Konturen in die Bauteile eingebracht. Weitere Versuche mit einem unmittelbaren Kontext zu einer industriellen Verwertung werden in Kapitel 8 vorgestellt. Im Fokus der Auswertungen stehen die Rauheit der Kammern, die Spanform sowie das allgemeine Prozessergebnis. Für eine detaillierte Analyse der Oberflächentopographie werden die Bauteile aufgetrennt, sodass eine Betrachtung mit einem Konfokalmikroskop vorgenommen werden kann. Es sei angemerkt, dass in diesen Untersuchungen keine direkte Betrachtung der mechanischen Werkzeugbelastungen vorgenommen wird. Dennoch kann anhand von Annahmen über die Vergleichbarkeit der Mittelwerte der Zerspankraftkomponenten des Innendrehens auf bestimmte Aspekte der Belastung geschlossen werden.

6.5.1 Grundlagenversuche zum Funktionsprinzip

Zunächst wird die grundsätzliche Ausstellbewegung ohne einen Schneideneingriff bzw. eine Materialabnahme geprüft, indem sich der Werkzeugkopf im Anbohrkonus am BOZA abstützt. Dies ermöglicht einen ersten Test der radialen Verfahrensbewegung der Schneidplatte, bei der Anbringung einer

Messuhr kann zudem diese Bewegung quantitativ erfasst werden. Hiernach erfolgen, nach der Einspannung eines Werkstückes, experimentelle Einsatzversuche unter Verwendung der Basisparameter aus den Grundlagenuntersuchungen zum Innendrehen. Bei einem eingestellten Volumenstrom des Tiefbohröls von $\dot{V} = 15 \text{ l/min}$ können Kammern eingebracht werden. Jedoch ist eine Ansammlung von Spänen im Werkstück zu beobachten, so dass kein prozesssicherer Abtransport vorliegt und Werkstück sowie Werkzeug beschädigt werden können. Eine Erhöhung des Volumenstroms auf $\dot{V} = 50 \text{ l/min}$ kann dieser Charakteristik erfolgreich entgegenwirken und bewirkt eine durchgehende Abführung des KSS-Späne-Gemisches. Zur Charakterisierung des Ausstellverhaltens bei der Innenkonturierung werden daraufhin zunächst systematische Untersuchungen durchgeführt. Dabei werden schrittweise Kammern mit steigender Schnitttiefe gefertigt und nachfolgend die Ist-Durchmesser der einzelnen Kammern im Werkstück vermessen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden in **Abbildung 6.17** dargestellt.

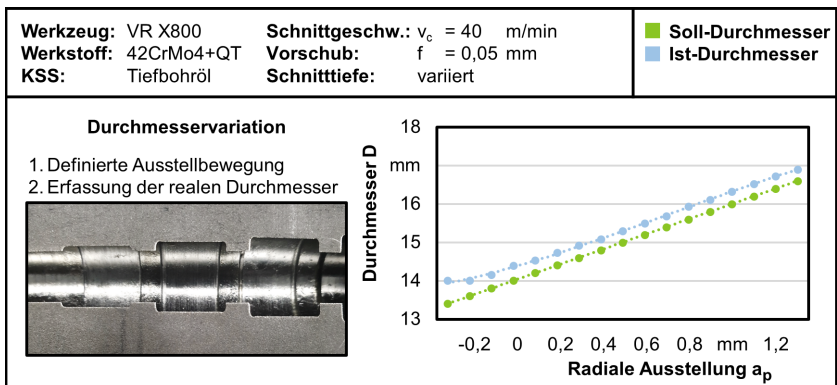


Abbildung 6.17: Untersuchungen zum hergestellten Durchmesser bei Variation der eingestellten Schnitttiefe

Die Untersuchungen zeigen ein nahezu lineares 2:1-Ausstellverhalten von axialer Zustellung des Aktuators zu radialer Ausstell der Schneidplatte. Jedoch ist in der absoluten Betrachtung eine geringfügig zu große Ausstell zu berücksichtigen, wodurch bereits bei einem eingestellten Durchmesser von $D = 13,8 \text{ mm}$ ein Kontakt zwischen Schneide und Werkstück vorliegt. Dies kann durch Fertigungstoleranzen und den Einfluss des KSS erklärt werden. Das den Werkzeugkopf umströmende Bohröl fließt mit einer

hohen Geschwindigkeit zur Schneide und kann ein Hochdrücken des Grundkörpers in der Bohrung bewirken. Hierdurch liegt eine radial verschobene Position der Schneidplatte vor. Mit der Kenntnis der realen Ausstellbewegung kann eine Kompensation vorgenommen werden, indem die erfassten Durchmesserwerte korrelierend zu den Sollwerten in eine Tabelle eingetragen werden und diese in der Steuerung hinterlegt wird. Bei einer Programmierung kann diese Kompensationstabelle aktiviert werden, sodass das Werkzeugsystem die korrekte Ausstellbewegung vollführt. Nachfolgende Tests konnten die Funktionsfähigkeit dieser Vorgehensweise bestätigen.

6.5.2 Einfluss der Schnittparameter

Vergleichend zu den Untersuchungen beim konventionellen Innendrehen (vgl. Kapitel 5), werden Kammern unter Variation der Schnitttiefe und des Vorschubs in die tiefgebohrten Werkstücke eingebracht. Dabei erfolgt zunächst die Betrachtung des Schnitttiefen-Einflusses auf die Oberflächen-güte, **Abbildung 6.18** stellt hierbei die Rauheitskennwerte für den Werkstoff 42CrMo4+QT dar.

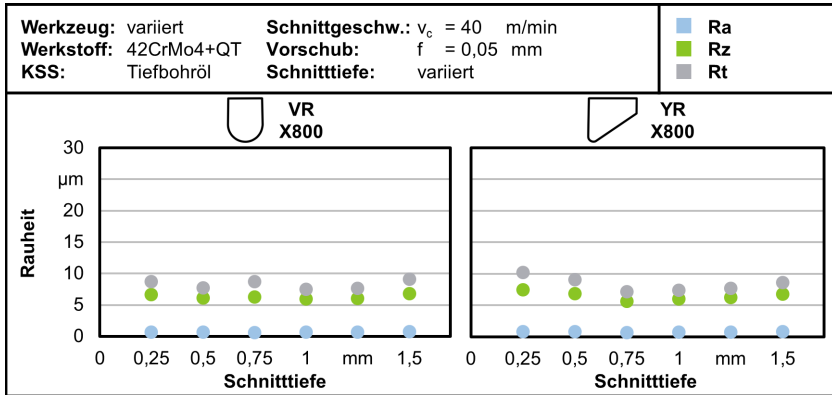


Abbildung 6.18: Einfluss der Schnitttiefe bei der Auskammerbearbeitung mit einem stehenden Werkzeugsystem für den Werkstoff 42CrMo4+QT

Bei Verwendung der Vollradius-Schneidplatte VR X800 stellt sich eine konstant hohe Oberflächengüte ohne einen Einfluss der Schnitttiefe ein. Dabei werden bei der Auskammerbearbeitung mit dem neuartigen Werkzeugsystem geringere Rauheitskennwerte ($a_p = 0,75 \text{ mm} \rightarrow Ra = 0,638 \text{ }\mu\text{m}$) im Vergleich zum Innendrehen in geringerer Bearbeitungstiefe ($a_p = 0,75 \text{ mm} \rightarrow Ra = 0,877 \text{ }\mu\text{m}$) erreicht. Ein hierzu vergleichbares Oberflächenprofil ergibt sich beim Einsatz der YR-Schneidplatte mit einem Minimum der Rauheit bei der Schnitttiefe $a_p = 0,75 \text{ mm}$. Insbesondere bei kleinen Schnitttiefen kann durch die neue Entwicklung ($a_p = 0,25 \text{ mm} \rightarrow Ra = 0,642 \text{ }\mu\text{m}$) ein glatteres Profil als beim Innendrehen ($a_p = 0,25 \text{ mm} \rightarrow Ra = 3,590 \text{ }\mu\text{m}$) erzielt werden. Die Abstützung des Werkzeugkopfes und die dadurch effektiv kürzere freie Ausspannlänge stabilisieren folglich die Eingriffsbedingungen und bewirken eine hohe Prozessstabilität bei allen gewählten Schnitttiefen. Die Rauheit für die tiefe Innenbearbeitung von Werkstücken aus Inconel 718 wird in **Abbildung 6.19** aufgezeigt.

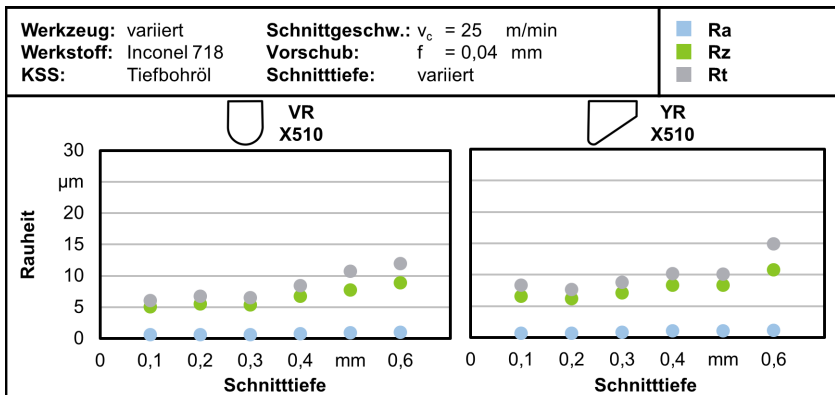


Abbildung 6.19: Einfluss der Schnitttiefe bei der Auskammerbearbeitung mit einem stehenden Werkzeugsystem für den Werkstoff Inconel 718

Bei kleineren Schnitttiefen ist auch bei diesem Werkstoff eine glatte Oberfläche ($a_p = 0,3 \text{ mm} \rightarrow Ra = 0,627 \text{ }\mu\text{m}$) herstellbar, dessen Rauheitskennwerte geringfügig die des Innendrehens ($a_p = 0,3 \text{ mm} \rightarrow Ra = 0,410 \text{ }\mu\text{m}$) übersteigen. Bei größeren Schnitttiefen ist bei beiden Schneidplattentypen ein Anstieg der Rauheit zu beobachten, verstärkt prägt sich dieser bei der gemittelten sowie der maximalen Rautiefe aus. Dies deutet auf einzelne Spitzen und Riefen im Oberflächenprofil hin. Ebenjene können zum einen durch Kontakt von Spänen mit der Bohrungswand entstehen, zum anderen können Schwingungen in tangentialer Richtung durch eine zu große

Schnittkraft die Oberflächengüte negativ beeinflussen. Hieraus folgt, dass bei harten, anspruchsvollen Werkstoffen eine moderate Schnitttiefe gewählt und für größere Kammertiefen eine Schnittaufteilung eingesetzt werden sollte. Als zweite Schnittparametervariation wird nachfolgend der Einfluss des Vorschubs auf die Rauheitskennwerte der konturierten Bauteile in **Abbildung 6.20** (42CrMo4+QT) und **Abbildung 6.21** (Inconel 718) dargestellt.

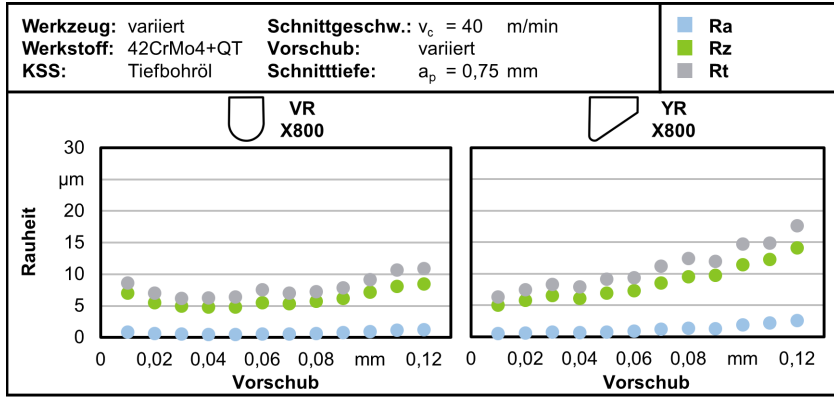


Abbildung 6.20: Einfluss des Vorschubs bei der Auskammerbearbeitung mit einem stehenden Werkzeugsystem für den Werkstoff 42CrMo4+QT

Bei der VR-Schneidplatte liegt im Bereich kleiner Vorschübe bis $f = 0,05$ mm kein linear steigender Zusammenhang entsprechend der zunehmenden theoretischen Rautiefe zwischen Vorschub und Rauheitskennwerten vor. In diesem Bereich können eine zu geringe Belastung in axialer Richtung sowie ein ungünstiger Spannungsquerschnitt negative Auswirkungen auf die Prozessstabilität haben. Der Eckenradius der Schneidplatte ($r_\epsilon = 0,6$ mm) bedingt eine im Vergleich zur Schnitt- und Vorschubkraft hohe Passivkraft, durch welche eine Abdrängung sowie Schwingungen verursacht werden können. Im Vergleich zum Innendrehen ($f = 0,02$ mm \rightarrow $Ra = 1,200$ µm, $Rt = 14,520$ µm) weisen die ausgekammerten Bauteile ($f = 0,02$ mm \rightarrow $Ra = 0,597$ µm, $Rt = 6,990$ µm) jedoch eine deutlich geringere Rauheit auf. Die Rauheitskennwerte erklären sich durch die Abstützung des Werkzeugkopfes in der Führungsbohrung, wodurch radiale Kräfte in die Bohrungswand weitergeleitet und die Entstehung von Schwingungen reduziert werden können. Bei größeren Vorschüben geht hiernach korrelierend zur Theorie ein höherer Parameterwert mit einer höheren Rauheit ein-

her. Diese Charakteristik kann bei der YR-Schneidplatte aufgrund des kleineren Eckenradius und der axialen Zerspankkraftorientierung für alle untersuchten Vorschübe ermittelt werden. Dies folgt den Ergebnissen aus den Grundlagenuntersuchungen sowohl relativ als auch vom absoluten Niveau der Rauheitskennwerte. Das System ist demgemäß vor allem für Eingriffsbedingungen mit radialer Schneidenbelastung geeignet, da in einer weiteren Ebene Kräfte durch das Werkzeug aufgenommen bzw. weitergeleitet werden können.

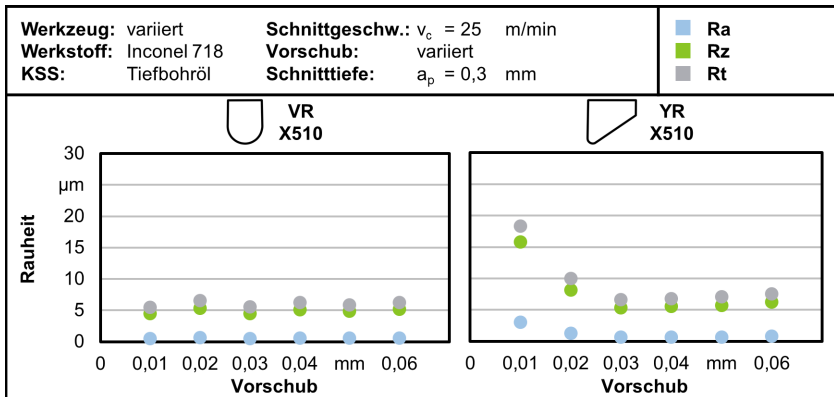


Abbildung 6.21: Einfluss des Vorschubs bei der Auskammerbearbeitung mit einem stehenden Werkzeugsystem für den Werkstoff Inconel 718

Bei der Vollradius-Schneidplatte ergibt sich für den betrachteten Parameterbereich nahezu kein Einfluss des Vorschubs auf das Oberflächenprofil. Vergleichbar zum Werkstoff 42CrMo4+QT kann auch bei Inconel 718 durch die Führungsleistenabstützung eine Stabilisierung bei kleinen Vorschüben und damit eine geringere Rauheit erzielt werden. Um hingegen durch die Schnittparameter die Oberflächengüte einstellen zu können, bedarf es bei der zum Rückwärtsdrehen ausgelegten Schneidplatte YR eines Vorschubs $f \geq 0,3$ mm. Kleinere Vorschübe resultieren hierbei in einer ungünstigen Spanabnahme und einem Reiben des Materials an der verrundeten Schneidkante.

Neben der Oberflächengüte ist für die Beurteilung des Innenkonturierungsprozesses die Spanform zu dokumentieren. Diese Späne werden für beide Schneidplattentypen und Werkstoffe für je einen Schrupp- und einen Schlichtprozess in der Übersicht sowie einer Detailaufnahme in **Abbildung 6.22** gezeigt.

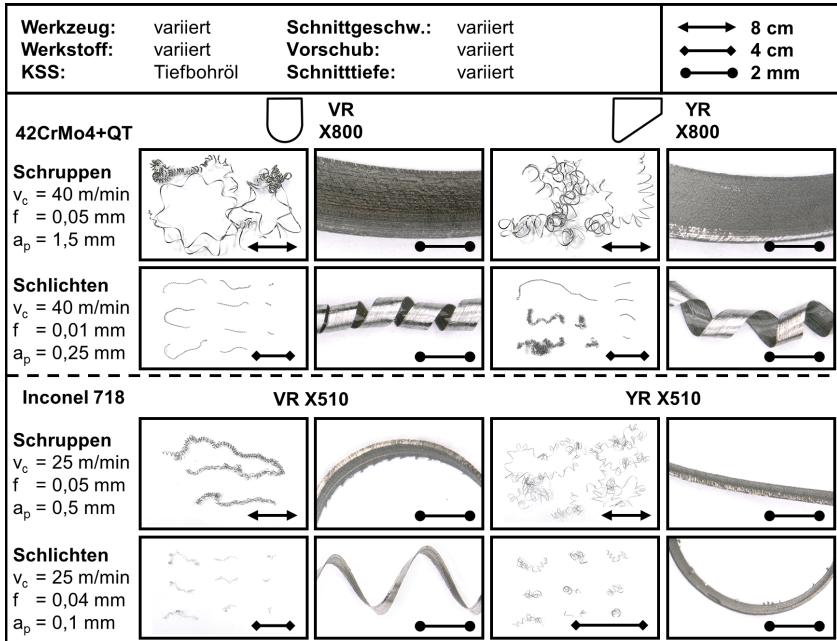


Abbildung 6.22: Einfluss der Schnittparameter, des Werkstoffes und der Schneidplattenform auf die Spanform bei der Auskammerbearbeitung mit einem stehenden Werkzeugsystem

Zunächst ist im Hinblick auf die Prozesssicherheit anzumerken, dass alle betrachteten Späne mit dem eingestellten Volumenstrom aus der Bohrung abtransportiert werden können. Bei Zerspanung des Werkstoffes 42CrMo4+QT stellen sich bei der Schruppbearbeitung längere Band- und Wendelspäne ein, im Vergleich hierzu sind bei der Schlichtbearbeitung kürzere Wendelspäne mit einem kleineren Wendeldurchmesser zu beobachten. Die glatte Spanoberseite und die Spanlänge sind bei beiden Prozessen auf eine gleichmäßige Fließspanbildung zurückzuführen. Dies unterscheidet sich deutlich von den segmentierten Spänen beim Innendrehen, welche durch eine Lamellenspanbildung entstehen können. Diese Erkenntnisse er-

lauben somit Rückschlüsse auf den eigentlichen Spanbildungsvorgang, sodass der stabile, schwingungsvermeidende Auskammerprozess in einer konstanten Fließspanbildung resultiert. Ähnliche Späne sind beim Werkstoff Inconel 718 in Form von langen Band- und Wendelspänen bei der Schruppbearbeitung und kürzeren Band- und Wendelspänen bei der Schlichtbearbeitung zu erkennen. Auch bei diesem Material deuten die längeren, glatten Späne auf die zuvor beschriebene Spanbildung hin. Dies kann sich insbesondere auf die erreichbare Oberflächengüte und die mechanischen Werkzeugbelastungen, bzw. die hiermit korrelierende Werkzeugstandzeit, positiv auswirken. Für eine weiterführende Analyse wurden Späne aus einem Innendrehprozess (vgl. Kapitel 5) sowie einem Auskammerprozess metallografisch untersucht. Beide Prozesse weisen dieselben Schnittparameter und den gleichen Schneidplattentyp auf, zudem fand in beiden Fällen Öl als KSS Anwendung. **Abbildung 6.23** zeigt im Folgenden lichtmikroskopische Aufnahmen der geätzten Spanquerschliffe.

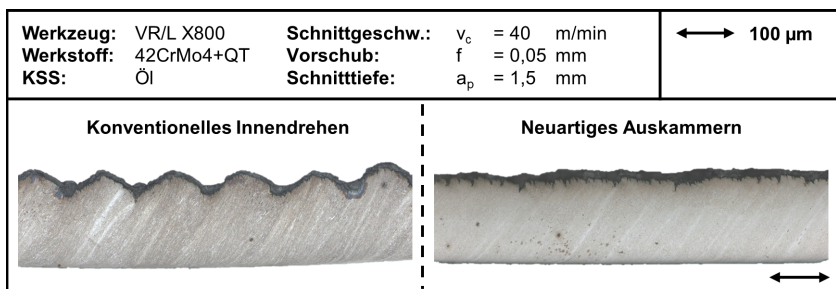


Abbildung 6.23: Spanquerschnitte eines beispielhaften Prozesses beim Innendrehen und Auskammern

Beim konventionellen Innendrehen wird die zuvor beobachtete Segmentierung auf der Spanoberseite verdeutlicht, wohingegen die Spanoberseite beim Auskammern eine konstante, leicht zerrüttete Oberfläche aufweist. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass beim Innendrehen Schwingungen in radialer Richtung einen sich verändernden Spanquerschnitt erzeugen, sodass dies den Spanbildungsvorgang beeinflusst. Durch die Auskrägung des Werkzeughalters wird die Steifigkeit limitiert, wodurch Werkzeugbewegungen in radialer und tangentialer Richtung ermöglicht werden. Die Aufzeichnung und Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen ergibt für diesen Versuch eine Schwingungsfrequenz von $f_{Schw} = 1633 \text{ Hz}$. Über die Spanablaufgeschwindigkeit und die Schwingungsbreite, die sich auf dem Span abzeichnet, kann im Folgenden auf die

Schwingungen, die die Spanbildung prägen, geschlossen werden. Zunächst ist hierfür die mittlere Spanungsdicke zu berechnen, die sich für die runde Schneidplatte wie folgt darstellt:

$$h' = f_z * \sqrt{\frac{a_p}{2 * r}} = 0,05 \text{ mm} * \sqrt{\frac{1,5 \text{ mm}}{1,2 \text{ mm}}} = 0,0559 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Für die Berechnung der Spanablaufgeschwindigkeit ist weiterhin die mittlere Spandicke zu messen, die $h_{ch} = 0,17 \text{ mm}$ beträgt. Mit diesen Werten kann die Spanablaufgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$v_{ch} = v_c * \frac{h'}{h_{ch}} = 40 \frac{\text{m}}{\text{min}} * \frac{0,0559 \text{ mm}}{0,17 \text{ mm}} = 13,15 \text{ m/min} \quad (6.2)$$

Dies entspricht umgerechnet einer Spanablaufgeschwindigkeit von $v_{ch} = 219,21 \text{ mm/s}$. Bei einer gemessenen, durchschnittlichen Periodenbreite der Schwingungen auf den Spänen von $b_{sp} = 0,133 \text{ mm}$, kann im letzten Schritt die Frequenz der Spansegmentierung berechnet werden:

$$f_{schw} = \frac{v_{ch}}{b_{sp}} = \frac{219,21 \text{ mm/s}}{0,133 \text{ mm}} = 1 \text{ 648 Hz} \quad (6.3)$$

Dies entspricht dem Bereich der Schwingungen, die mit Hilfe der Kraftmessung ermittelt wurden, sodass eine dominante Schwingungsfrequenz den Prozess hinsichtlich Spanbildung und mechanischen Werkzeugbelastungen beeinflusst. Hingegen verhindert beim Auskammern die Abstützung durch die Führungsleiste ebenjene Werkzeugbewegungen, die die Prozesssicherheit und die Bauteilqualität negativ beeinträchtigen können.

6.5.3 Fertigung unterschiedlicher Innenkonturen

Nach den grundlegenden Schnittparameteruntersuchungen ist das Werkzeugsystem im Hinblick auf die Fertigung komplexer Innenkonturen zu prüfen. Dies ermöglicht eine weitergehende Bewertung des Systems und kann Charakteristika sowie Optimierungspotentiale des Entwicklungsgegenstandes aufzeigen. Im Spezifischen kann hierdurch auch ein Vergleich zum konventionellen Innendrehen aufgestellt werden. Dafür werden zunächst die aus den Grundlagenuntersuchungen (vgl. Kapitel 5.3) bekannten Innenkonturen mit den zuvor analysierten zwei Schneidplattentypen gefertigt. Fotografische und mikroskopische Aufnahmen der aufgetrennten Werkstückproben werden in **Abbildung 6.24** gezeigt.

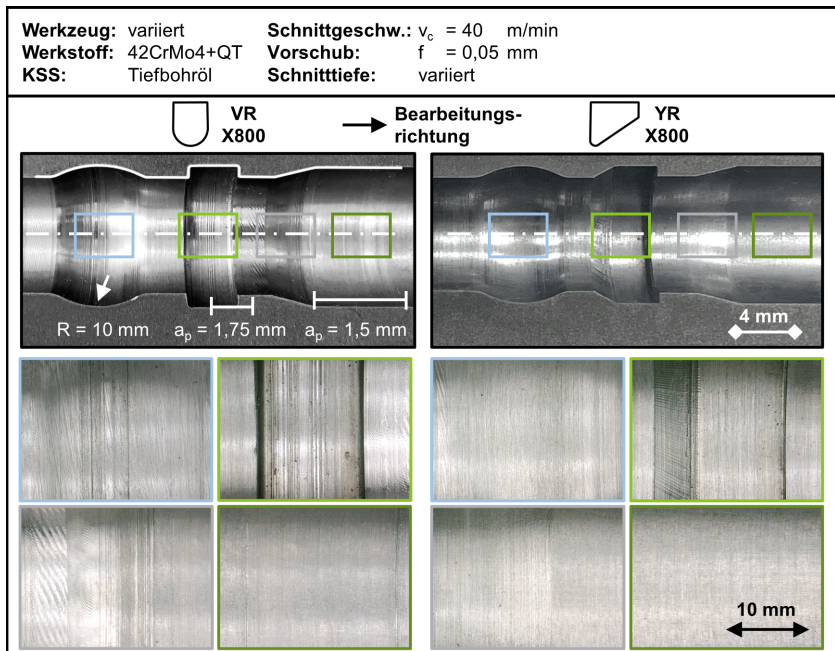


Abbildung 6.24: Auskammern komplexer Konturen unter Variation der Schneidplattenform

Das Werkzeugsystem ermöglicht eine vollständige Bearbeitung der komplexen Kontur und damit eine Überlagerung der axialen Vorschubachse und der radialen Ausstellbewegung des Werkzeugkopfes. Im Vergleich zum Innendrehen liegen nahezu keine Rattermarken auf der konturierten Bauteiloberfläche vor, dadurch kann auf einen schwingungsarmen Prozess

geschlossen werden. Dies ist insbesondere bei der radialen Einstechbewegung der YR-Schneidplatte zu erkennen, welche aufgrund ihrer Gestalt hierfür nicht ausgelegt ist. Die Vermeidung von Schwingungen in radialer und tangentialer Richtung mittels einer Abstützung durch die Führungsleiste in beiden Ebenen resultiert in einer deutlich gesteigerten Oberflächengüte, insbesondere bei Radiusoperationen und schrägen Einfahrbewegungen in das Werkstück. Dem konventionellen Innendrehen gegenübergestellt zeigt sich, dass das entwickelte Werkzeugsystem bei der komplexen Innenkonturierung eine stabilere Bearbeitung ermöglicht. Folglich kann der Bereich kleiner l/D -Verhältnisse, der mit dem aktuellen Stand der Technik innengedreht werden kann, dadurch mit einer höheren Oberflächengüte und geringeren mechanischen Werkzeugbelastungen realisiert werden. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz des Systems erstmalig, diese Konturen auch in großen Bearbeitungstiefen einzubringen und verschiebt somit die bestehenden Grenzen der spanenden Innenbearbeitung.

Für eine komplexe Innenkonturierung ist die Erzeugung längerer Kammern entscheidend, da hierdurch leichtere, belastungsangepasste Bauteile hergestellt werden können. Diese langen Kammern können zum einen schrittweise durch das sogenannte Kurzkammerverfahren gefertigt werden, zum anderen ist eine Kammerherstellung auf das finale Durchmessermaß in einem Bearbeitungsschritt bei angepasster Schnittparameterwahl umsetzbar. Dieses Vorgehen ist unter anderem vom Werkstückstoff abhängig, da bei Materialien mit guter bis mittlerer Zerspanbarkeit sich die Bearbeitung in einem Schritt empfiehlt, dahingegen anspruchsvolle, schwer zerspanbare Werkstoffe eine Schnittaufteilung erfordern. Beim Kurzkammerverfahren wird dabei die maximale Kammerlänge eines Segmentes durch den Führungsleistenrückstand, also den axialen Abstand zwischen Schneidplatte und vorderer Führungsleistenkante bestimmt. Potentielle Formfehler sind in diesem Zusammenhang durch das erneute Anfahren an eine Position Marken an der Kammerübergängen, Winkelabweichungen der Kammerkontur sowie ein Parallelversatz zur Sollkontur einer Kammer [FBP97].

Abbildung 6.25 zeigt die Herstellung von Kammern mit einer Gesamtlänge von $l = 60$ mm und einem Durchmesser von $D = 17$ mm. Für den Werkstoff

42CrMo4+QT wird das Langkammerverfahren angewendet, bei der Superlegierung Inconel 718 wird die Gesamtkammer in vier Segmente mit einer jeweiligen Aufteilung in drei bzw. vier Schritte unterteilt. Bei der zweiten Vorgehensweise des Kurzkammerverfahrens wird hierbei die finale Bearbeitung eines Segmentes wiederholt und damit ein sogenannter Leerschnitt durchgeführt.

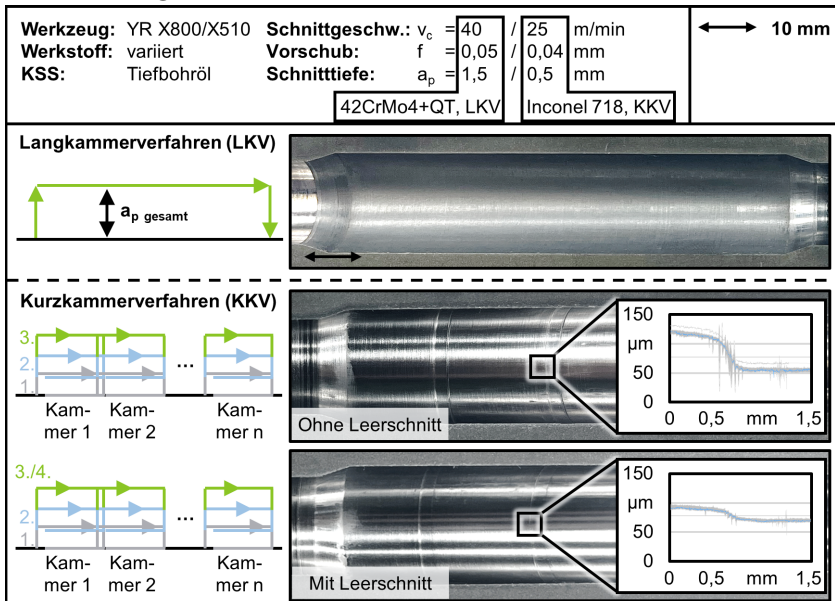


Abbildung 6.25: Vorgehensweisen zur Herstellung langer Kammern bei der tiefen Innenkonturierung

Beim Vergütungsstahl 42CrMo4+QT ist die Fertigung der langen Kammer in einem Zug umsetzbar. Um einen Schneidedefekt zu vermeiden, sollte aber in diesem Fall ein geringer Vorschub gewählt werden, sodass die mechanischen Werkzeugbelastungen begrenzt werden. Aufgrund der vollständigen Fertigung in einem Bearbeitungsschritt können folglich Formfehler vollständig vermieden werden. Beim Kurzkammerverfahren werden hingegen vier Segmente mit einer Länge von $l = 15$ mm gefertigt, in welchen drei Mal mit einer jeweiligen Schnitttiefe von $a_p = 0,5$ mm Material abgetragen wird. Ab dem zweiten Segment beginnt die Anfahrbewegung im bereits erzeugten Kammerbereich des vorherigen Segmentes, wodurch Bereiche vorliegen, in denen die Schneide zweifach verfährt. Diese Bereiche weisen eine Vertiefung von $\Delta r = 60 \dots 70 \mu\text{m}$ auf, was auf den entlasteten Zustand der

Schneide und die dadurch nicht vorliegenden Passivkräfte zurückzuführen ist. Hierdurch wird der Werkzeugkopf nicht von der Wirkstelle abgedrängt, in der Folge befindet sich die Schneidplatte auf einem größeren Durchmesser. Bei Anwendung eines Leerschnittes kann die Tiefe dieser Marke auf $\Delta r = 20 \dots 25 \mu\text{m}$ reduziert werden. Somit ist zu empfehlen, bei dem letzten Schritt einer Kammer eine geringere Schnitttiefe einzusetzen, einen Leerschnitt durchzuführen und gegebenenfalls zudem die Anfahrbewegung an ein Segment zu optimieren. Zusammenfassend zeigen auch diese Untersuchungen, dass durch die neuartige Entwicklung die produktionstechnischen Möglichkeiten deutlich erweitert werden, indem zum ersten Mal Tiefbohrungen über die vollständige Länge produktiv in einem Fertigungsschritt konturiert werden können. Dabei sind insbesondere die hohe Prozesssicherheit und Oberflächengüte hervorzuheben. Die Einbringung komplexer Konturen und der belastungsgerechte Leichtbau von Bauteilen können somit erstmalig unabhängig von der Bearbeitungstiefe umgesetzt werden.

Eine wesentliche Zielsetzung des Werkzeugsystems ist die Einbringung von funktionalen Innenkonturen. Dabei können insbesondere Gewinde aufgeführt werden, die durch die definierte Schneidplattenform und den festgelegten Vorschub eine produktionstechnische Besonderheit darstellen. Soll das entwickelte Werkzeugsystem für die Gewindefertigung eingesetzt werden, empfiehlt es sich hierfür zunächst vorbereitende Kammern vor und hinter dem Gewindebereich einzubringen, um einen Ein- und Auslauf der Gewindezyklus-Bewegung zu ermöglichen. Weiterhin ist zu beachten, dass die maximale Gewindelänge vergleichbar zum Kurzkammervorgang durch den Führungsleistenrückstand bestimmt wird. In experimentellen Untersuchungen wird ausgehend von einer Durchgangsbohrung mit $D = 14 \text{ mm}$ ein M16x2-Linksgewinde erzeugt, dessen Gewindeprofil mit Hilfe eines 3D-Messgeräts analysiert wird (**Abbildung 6.26**).

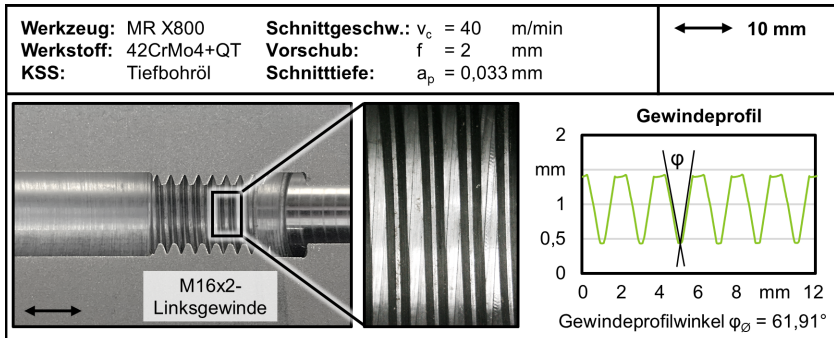


Abbildung 6.26: Fertigung eines Innengewindes in großer Bearbeitungstiefe

Das Innengewinde wird in 30 Schritten gefertigt und weist eine deutliche Ausprägung der Gewindegänge ohne makroskopische Defekte auf. Mit einem durchschnittlichen Kerndurchmesser von $D_1 = 14,205$ mm und einem Außendurchmesser von $D = 16,117$ mm wird hierdurch die für die allgemeine Anwendung mittlere Toleranzklasse 6H erreicht [DIN965-1; DIN68-1]. Der durchschnittliche Gewindepfilswinkel beträgt $\varphi_0 = 61,91^\circ$, dieser Winkel ist zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nicht für Werkstücke, sondern nur für Lehren und Gewindebohrer toleriert. Daher wurde die Funktionsfähigkeit mit einem Prüfwerkstück getestet und bestätigt. Es ist zu beachten, dass das Gewinde aufgrund der Ausstellbewegung des Werkzeugkopfes mit einer leichten Verkippung in das Bauteil eingebracht wird. Sollte das zulässige Gewindepfil enger toleriert werden, ist es in diesem Fall möglich, angepasste Schneidplatten zu verwenden. Diese sind dann für die maximale Ausstellung ausgelegt und berücksichtigen in ihrer Gestalt die Verkippung, sodass im finalen Fertigungsschritt, eine zur Führungsbohrung korrekte Lage der Schneidplatte vorliegt.

6.6 Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen

Die Entwicklung des Werkzeugsystems für die Innenkonturierung kleiner Bohrungen konnte in der ersten Stufe erfolgreich umgesetzt werden. Experimentelle Untersuchungen auf einer BTA-Tiefbohrmaschine zeigen dabei die generelle Funktionsfähigkeit dieses stehenden Systems. Erstmals wird hierdurch eine produktive, spanende Innenkonturierung auch für Tiefbohrungen mit einem Durchmesser kleiner 35 mm ermöglicht. Im vorliegenden Fall wurden Werkstücke aus 42CrMo4+QT sowie Inconel 718 mit einer Länge von $l = 300$ mm und einem Bohrungsdurchmesser von $D = 14$ mm ganzheitlich ausgekammert. **Abbildung 6.27** stellt nachfolgend relevante Ergebnisse dieses Auskammerprozesses dem Innendrehen gegenüber.

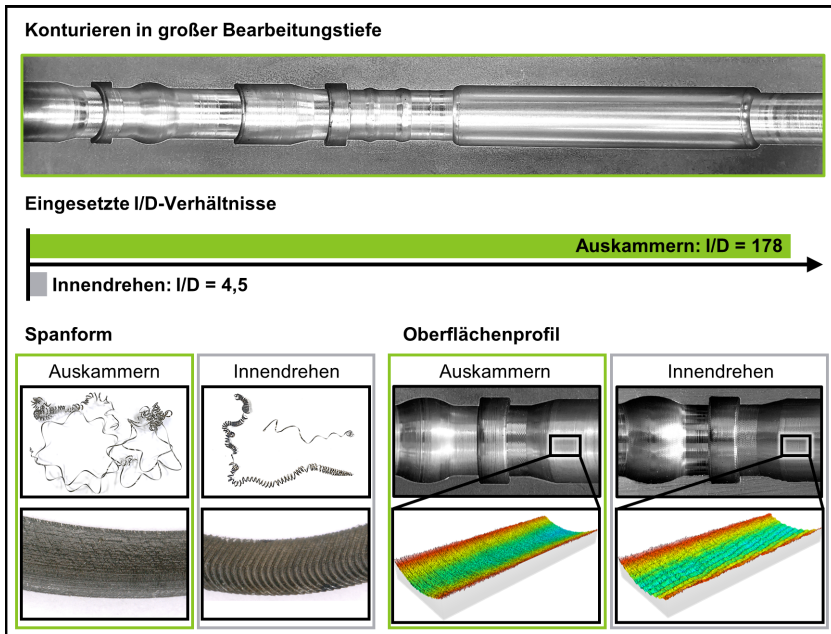


Abbildung 6.27: Prozessergebnisse vom Auskammern mit neuartigem Werkzeugsystem im Vergleich zum Innendrehen

Die Untersuchungen zeigen die Umsetzbarkeit von komplexen Verfahrensbewegungen zur Herstellung von Einstichen, Radiuskonturen, langen Kammern und Gewinden. Der größte Unterschied dieser Technologie zum Innendrehen ist das maximale l/D -Verhältnis, in welchem ebenjene Konturen hergestellt werden können, was sich mit der Leistenführung im Werkstück

begründet. Dies resultiert in einer von der Bearbeitungstiefe unabhängigen, freien Spannlänge der Schneidplatte. Voraussetzung für die Abstützung des Werkzeugkopfes und damit die Anwendung des Systems ist eine tiefgebohrte Durchgangsbohrung mit geringem Mittenverlauf und einem konstanten Durchmesser. Liegt eine solche Tiefbohrung vor, können die radialen und tangentialen Prozesskräfte an die Bohrungswand weitergeleitet und hierdurch die Prozessstabilität erhöht werden. Dies vermeidet das Auftreten von Schwingungen, welche beim konventionellen Innendrehen den Bearbeitungsprozess prägen. Deutlich wird dies zum einen bei der Spanform, da die schwingende Eingriffssituation beim Innendrehen eine segmentierte Spanoberfläche erzeugt. Zum anderen kann die Oberflächen-güte der Bauteile beim Einsatz des Werkzeugsystems im Vergleich zum Innendrehen gesteigert werden. Aus diesem Grund eignet sich das Werkzeugsystem auch für den Einsatz in kleinen Bearbeitungstiefen. Zusammengefasst können mittels des Entwicklungsgegenstandes vollständig neue Bearbeitungen umgesetzt werden, wodurch Bauteiler leichter, funktionaler und belastungsgerechter gestaltet werden können. Das System verbindet über die Funktionsweise relevante Eigenschaften des Innendrehens sowie Auskammerns, wobei eine bedienerfreundliche, zum Innendrehen vergleichbare Programmierung und Anwendung vorliegt.

Das vorgestellte System bedarf für die Erzeugung der Schnittbewegung einer Werkstückrotation, wodurch das Spektrum an verwendbaren Werkzeugmaschinen eingeschränkt wird. Daher ist es in einem weiteren Schritt sinnvoll, ein rotationsfähiges Werkzeug zu entwickeln, um den Einsatz auf weiteren Werkzeugmaschinen zu befähigen und auch außermittige Bohrungen konturieren zu können. Darüber hinaus sind weitere Durchmesserbereiche abzudecken, indem das Werkzeug in Form des Werkzeugkopfes, der Schneidplatte und der Führungsleiste hierfür angepasst wird.

7 Rotierendes Werkzeugsystem zur Innenkonturierung

7.1 Auslegung der Leistungs- und Datenübertragung

Für die Verwendung eines rotierenden Werkzeugsystems besteht die Notwendigkeit einer rotationsfähigen Übertragung von Daten und Energie zum Linearaktuator. Dabei sind die Daten hinsichtlich ihres Austauschformates und der Übertragungsfrequenz bekannt. Dahingegen muss die Leistung zum Betreiben des Motors und damit der radialen Schneidenausstellung zunächst ermittelt werden. Hierfür werden Versuche zur Innenkonturierung wie zuvor erläutert auf einer BTA-Tiefbohrmaschine umgesetzt. Zuvor wird ein Shunt mit einem definierten Widerstand von $R = 0,05 \Omega$ zum Netzteil des Aktuators parallelgeschaltet und die am Messwiderstand abfallende Spannung U mittels eines Datenerfassungssystems ermittelt. Über die Messung der Spannung U kann daraufhin die Stromstärke I berechnet werden. Im Anschluss wird die elektrische Leistung P als Produkt der elektrischen Spannung U und der Stromstärke I bestimmt. Die Messergebnisse, zugehörig zu Versuchen mit variierenden Schnittparametern und Bearbeitungsoperationen, unterliegen einem starken Rauschen und zeigen keine Ausschläge durch Motorstellbewegungen. Aufgrund der hohen Getriebeübersetzung und der nur kurzen Verfahrswege nimmt der Regler nur geringe Ströme aus der Zwischenkreisebene auf. Es kann angenommen werden, dass die Stromspitzen durch die integrierten Elektrolytkondensatoren gepuffert werden und sich somit nicht von der kontinuierlichen Stromabnahme bei der Speisung aus der 48 V-Zwischenkreisebene abheben. Aus diesen Gründen erfolgt die Auslegung eines Analogie-Versuchsstandes, bei dem die Stromversorgung und Ansteuerung des Motors unabhängig von einer Werkzeugmaschine gestaltet sind. Der Motor kann über einen Rechner mittels einer Software angesteuert werden, diese Software erlaubt zudem die Erfassung und Dokumentation von relevanten Motorkennwerten. **Abbildung 7.1** zeigt den genauen Aufbau des Versuchsstandes.

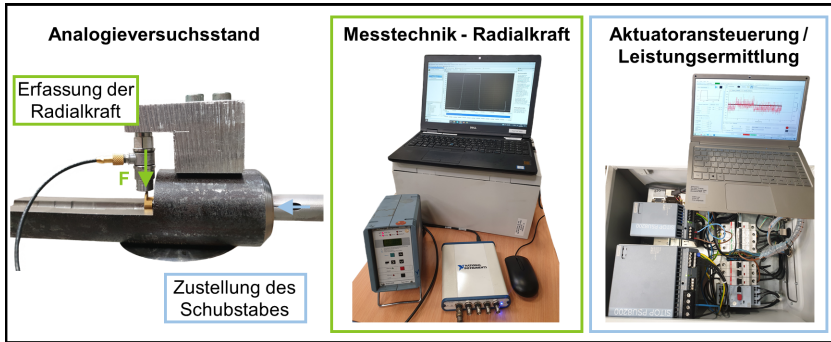


Abbildung 7.1: Analogie-Versuchsstand zur Ermittlung des Leistungsbedarfes des eingesetzten Linearaktuators im Werkzeugsystem

Um den Schneideneingriff und die hierdurch wirkenden Kräfte auf die Schneide nachstellen zu können, wird die Schneidplatte gegen ein piezoelektrisches Kraftmesselement bei gleichzeitiger Abstützung des Werkzeugkopfes in einer Bohrung verfahren. Das erfasste Signal wird an einen Ladungsverstärker geleitet und kann hiernach mit Hilfe eines Messrechners aufgezeichnet werden. In den Versuchen wird die Schneide um einen festgelegten Bedarf radial ausgestellt, wodurch sich eine mechanische Belastung einstellt. In diesem Zustand wird das System für einige Sekunden gehalten, bevor das vollständige Einfahren der oberen Werkzeugkopfhälfte erfolgt. Diese mechanische Belastung stellt die Vorschubkraft beim Einstecken bzw. die Passivkraft beim Innenlängsdrehen dar und soll einen Betrag von $F = 350 \text{ N}$ erreichen. Die Grundlagenuntersuchungen haben eine maximale radiale Kraftkomponente von $F = 160 \text{ N}$ aufgezeigt, sodass eine Sicherheit von $S > 2$ berücksichtigt wird. Die Aufzeichnungen zur Radialkraft und zur Motorleistung während eines Versuches werden in **Abbildung 7.2** dargestellt.

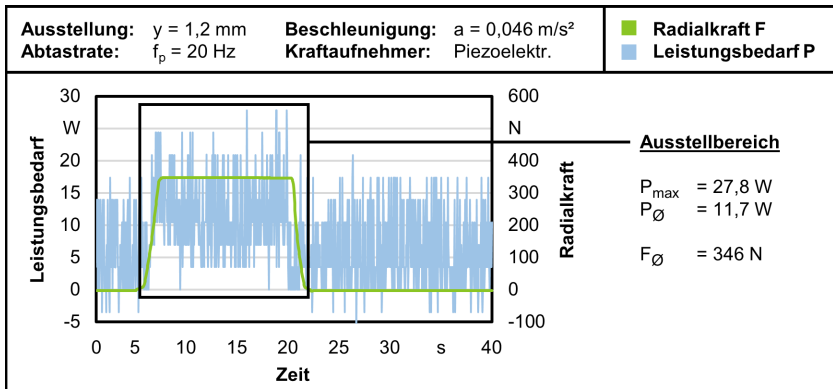


Abbildung 7.2: Messergebnisse zur Bestimmung des Leistungsbedarfes des Linearaktuators

Ausgehend vom Grundbedarf ist ein Anstieg der Motorleistung in Folge einer Stellbewegung bei den Analogieversuchen zu erfassen. Wird die Schneide wie beschrieben belastet, ergibt sich ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von $P_{\emptyset} = 11,7 \text{ W}$, einzelne Leistungsspitzen liegen bei $P_{max} \approx 28 \text{ W}$. Zu diesen Leistungswerten ist die Leistung für den Safe Torque Off mit $P_{STO} \approx 2 \text{ W}$ zu addieren. Hierbei handelt es sich um unabhängige Komponente zur sicheren Abschaltung des Drehmomentes, um Schäden am elektrischen Antriebssystem zu vermeiden. Darüber hinaus ist die Logikversorgung mit $P \approx 5,5 \text{ W}$ in der Gesamtbetrachtung hinzuzufügen. Folglich ist eine maximale Leistung von $P_{ges} \approx 35 \text{ W}$ bei einer Schneidenbewegung zu übertragen.

Für die Übertragung der Daten und dieser bekannten Leistung werden zwei potentielle Konzepte erarbeitet, die im Folgenden vorgestellt werden. Bei der ersten Methode ist ein Schleifring für die Übertragung zu verwenden, die zweite Methode nutzt einen Induktivkoppler. Zunächst erfolgt die schematische Erarbeitung für ein Konzept mit den zu berücksichtigenden Komponenten, Leitungen und Signalen. Im Anschluss wird ein Versuchsstand ausgelegt und das Konzept hinsichtlich Funktionsfähigkeit, Anwendbarkeit und Robustheit geprüft. **Abbildung 7.3** skizziert dies für die Verwendung eines Schleifringes.

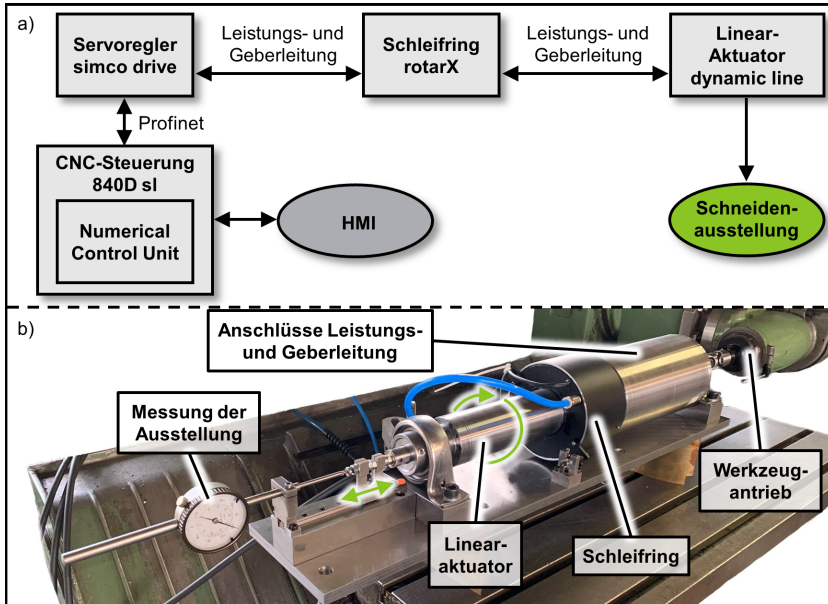


Abbildung 7.3: Übertragungskonzept mit Schleifringtechnologie
a) Schematische Darstellung; b) Versuchsaufbau

Der grundsätzliche Aufbau bei Verwendung eines Schleifringes ist vergleichbar zur steuerungstechnischen Umsetzung mit einem stehenden Werkzeugsystem (vgl. Kapitel 6). Jedoch ist die Leistungs- und Geberleitung zweigeteilt und ein Schleifring zwischen zu schalten. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen Drehübertrager vom Typ rotarX der Fa. B-Command, welcher zehn Übertragungsringe mit einer Gold-Gold-Verbindung aufweist. Dies erlaubt ein Durchschleifen der Signale und somit den Übergang von einem stehenden zu einem rotierenden System. Auf dem Versuchsaufbau befindet sich der Linearaktuator in einem gelagerten, rotationsfähigen Motorgehäuse, weiterhin liegt ein ebensolches Gehäuse für die Leitungsverbindung zwischen Motor und Schleifring vor. Der Aktuator bewirkt eine axiale Bewegung auf einer Linearführung, auf der sich eine Drehkopplung befindet. Aufgebaut wird der Versuchsaufbau auf einer Fräsmaschine, die das System rotatorisch antreibt. Versuche mit aufsteigender Drehzahl zeigen, dass eine Übertragungsfähigkeit bis $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ vorliegt, darüber hinaus kann aufgrund eines Encoder-Fehlers keine Verfahrbewegung realisiert werden. Dies deutet auf Kommunikationsprobleme

zwischen Aktuator und Servoregler in der mechanischen Verbindung hin. Weiterhin ist für höhere Drehzahlen eine Druckluftzufuhr notwendig, um die reibungsbedingte, ausgeprägte Erwärmung zu reduzieren. Auch ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass der Schleifring eine verschleiß-behaftete Komponente darstellt, dessen Lebensdauer mit durchschnittlich 20 Mio. Umdrehungen angegeben wird. Zusammenfassend stellt dies signifikante Einschränkungen für den Einsatz des zu entwickelnden, rotationsfähigen Werkzeugsystems dar, sodass im zweiten Konzept die Verwendung eines Induktivkopplers als Übertragungseinheit fokussiert wird (**Abbildung 7.4**).

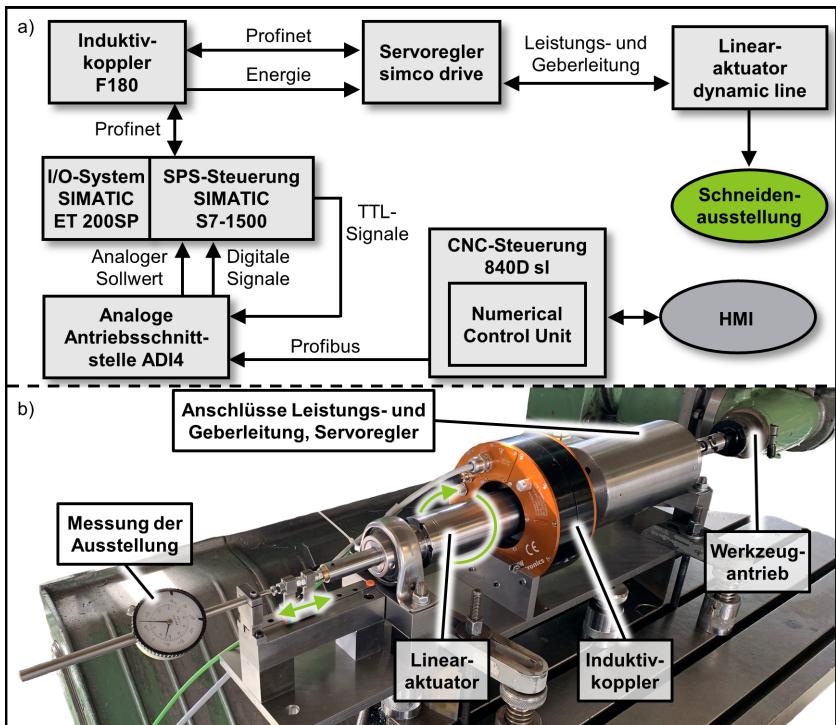


Abbildung 7.4: Übertragungskonzept mit Induktivkoppler
a) Schematische Darstellung; b) Versuchsstand

Der Induktivkoppler vom Typ F180 der Fa. SMW Autoblok erlaubt die berührungslose Übertragung von Signalen und Energie zwischen einem Stator und einem Rotor mit einer maximalen Übertragungsleistung von $P = 400 \text{ W}$ bei einer Spannung von $U = 48 \text{ V}$. Die Signalübertragung wird bei diesem System mit dem Austauschformat Ethernet umgesetzt. Mittels des hierauf basierenden Profinet kommuniziert der Servoregler des Linearaktuators mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) bei einer maximalen Übertragungsrate von 5 MBit/s. Ein Durchschleifen der einzelnen Leitungen der vollständigen Leistungs- und Geberleitung ist wie bei der zuvor vorgestellten Methode nicht möglich, sodass auch der Servoregler im rotierenden Teil integriert werden muss. Für einen zukünftigen flexibleren Einsatz bei verschiedenen Steuerungen wird zudem eine analoge Antriebsschnittstelle verwendet, welche an die CNC-Steuerung einer Werkzeugmaschine angeschlossen werden kann. Dieses Analog Digital Interface (ADI) 4-Board wandelt Digital- in Analogwerte um und bildet hierdurch eine eigene Achse. Die angebundene SPS wandelt zur Ansteuerung des Motors diese Signale in digitale Werte um und generiert zudem TTL-Signale zur Rückkopplung an die analoge Antriebsschnittstelle. Getestet wurde der Versuchsstand bis $n = 2000 \text{ min}^{-1}$; im gesamten Bereich kann der Aktuator fehlerfrei angesteuert werden, womit auch höhere Schnittgeschwindigkeiten erreicht werden können. Weiterhin weist dieses Konzept den Vorteil der Verschleiß- und Reibungsfreiheit auf, wodurch es sich für den Einsatz im rotierenden Werkzeugsystem empfiehlt. **Abbildung 7.5** fasst die Erkenntnisse der Untersuchungen zusammen, die weitere Entwicklung des Systems basiert aus den erläuterten Gründen somit auf dem Konzept des Induktivkopplers.

Konzept	Maximale Drehzahl	Vorteile	Nachteile
Schleifring	$n = 1200 \text{ min}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Rotation sonstiger Komponenten ▪ Keine Signalumwandlung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Thermische Belastung ▪ Verschleißbehaftet ▪ Begrenzte Lebensdauer ▪ Begrenzte Drehzahlen ▪ Druckluftanschluss
Auswahl Induktivkoppler	$n = 2000 \text{ min}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reibungs- und verschleißfrei ▪ Hohe Drehzahlen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotation des Servoreglers ▪ Signalumwandlung

Abbildung 7.5: Zusammenfassung der Untersuchungen zur Daten- und Energieübertragung

7.2 Konstruktive Anpassungen zum Einsatz auf einer Werkzeugmaschine

Durch die Vorversuche ergibt sich die Kenntnis über den prinzipiellen Aufbau des Werkzeugsystems, bei welchem für die Daten- und Leistungsübertragung ein Induktivkoppler zu integrieren ist. Hieraus folgt, dass in der Antriebs- und Anbindungseinheit neben dem Linearaktuator ebenso der Servoregler sowie die Leitungs- und Geberleitung zu verbauen sind, sodass sich diese Einheit im Bauraum vergrößert. An dieser Einheit muss sich zudem der Rotor des Induktivkopplers befinden. Weiterhin muss die KSS-Übergabe zentrisch über die Werkzeugspindel umgesetzt werden, woraus sich die Notwendigkeit von KSS-Leitungen im Werkzeugsystem von der Spindelanbindung bis zur Einführung in das BTA-Rohr ableitet. Ebenjene Leitungen sind darüber hinaus entsprechend abzudichten, um einen Kontakt zwischen KSS und Elektronikkomponenten zu verhindern. Bei den vorderen Komponenten zur KSS-Zuführung und -Abdichtung sowie dem Sonderrohrgestänge kann sich am zuvor entwickelten stehenden System orientiert werden. **Abbildung 7.6** zeigt den konstruktiven Aufbau in der Schnittansicht.

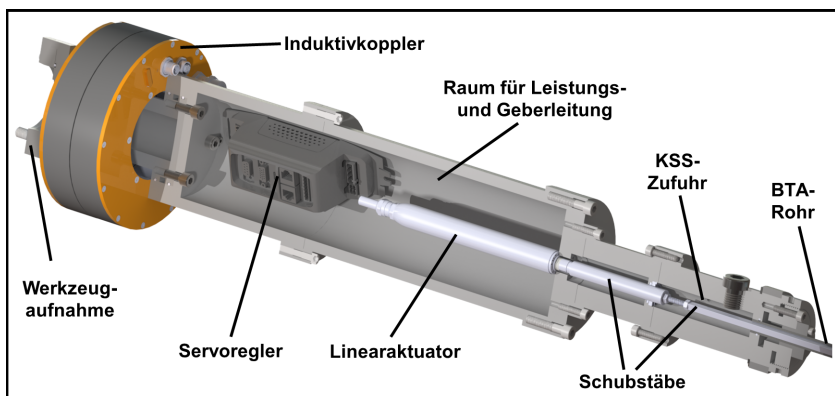


Abbildung 7.6: CAD-Schnittansicht der Antriebs- und Anbindungseinheit des rotationsfähigen Werkzeugsystems

Durch den geplanten Einsatz auf einer Koordinaten-Tiefbohrmaschine verändert sich zudem die Werkzeugaufnahme. Ist auf einer BTA-Tiefbohrmaschine die Anbindung über Halbschalen erfolgt, so ist diese nun über einen Kurzkegelflansch zu realisieren. Zudem ist die werkzeugmaschinenseitige Kopplung des Stators im coaxialen Zustand und definierten Abstand zum Rotor umzusetzen. Hierfür wird der Stator über eine Halterung an den Spindelkasten angebunden. Aufgrund der hohen Gesamtlänge und des Gewichts des Werkzeugsystems wird, vergleichbar zu Tiefbohrprozessen mit großem l/D -Verhältnis, die Abstützung über eine Lünette verwendet. Dafür wird das Werkzeug in einer Hülse im vorderen Bereich der Einheit eingespannt und die Lünette wird mit dem Führungsschlitten axial gekoppelt. Der vollständige Aufbau des Werkzeugsystems auf der Koordinaten-Tiefbohrmaschine tibo KTE40-1000 wird nachfolgend in **Abbildung 7.7** dargestellt.

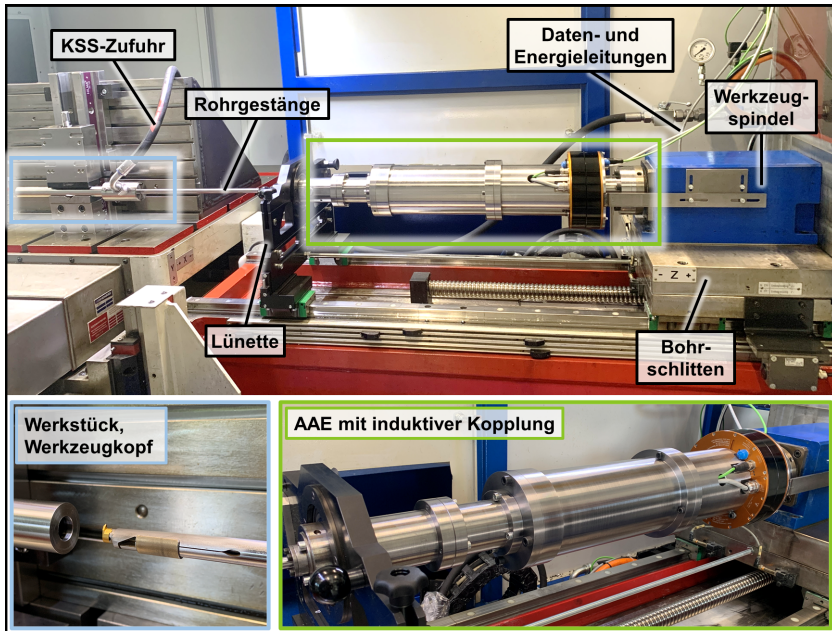


Abbildung 7.7: Aufbau des Werkzeugsystems auf Koordinaten-Tiefbohrmaschine tibo KTE40-1000

Steuerungstechnisch sind die SPS, die analoge Antriebsschnittstelle und eine Stromversorgungseinheit als zusätzliche Komponenten im Schaltschrank der Werkzeugmaschine zu integrieren. In der Energieführungskette werden darüber hinaus die Kabel von der SPS und der Stromversorgung zum Stator zur Daten- und Energieübertragung eingebunden. Um den Linearaktuator ansteuern zu können, ist auch in diesem Fall wieder eine neue Achse in der CNC-Steuerung zu programmieren, welche das Ausstellverhältnis des Schneidelementes in Abhängigkeit der axialen Zustellbewegung des Aktuators berücksichtigt. In dieser Weise wird die Werkzeugmaschine um eine vollwertige Achse erweitert, die zudem über eine Regelung verfügt. **Abbildung 7.8** zeigt den erweiterten Aufbau des Schaltschranks zum Betrieb des entwickelten Werkzeugsystems.

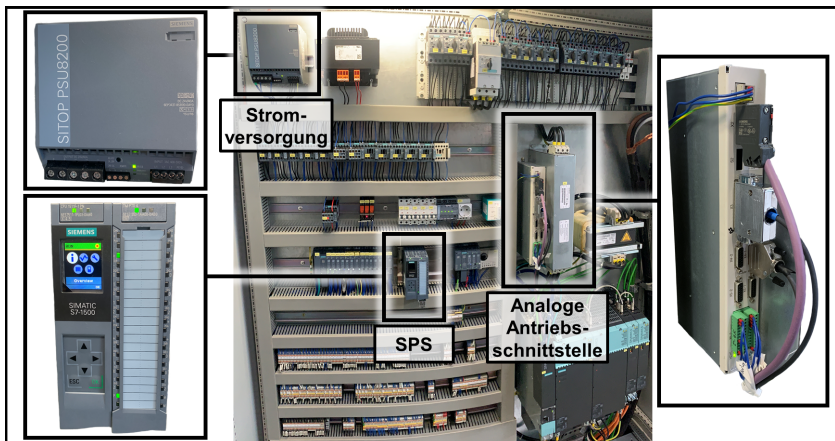


Abbildung 7.8: Steuerungsbezogene Komponenten zum Betrieb des Werkzeugsystems auf einer Werkzeugmaschine

Für den Einsatz des Werkzeugsystems sind das System und die Lünette in Bezug auf den Bohrungsmittelpunkt und die Bohrungsachse des Werkstücks auszurichten. Darüber hinaus müssen die Energie- und Datenleitungen an den Stator angeschlossen werden, dieser ist zudem im definierten Abstand zum Rotor zu montieren. Hiernach können der Linearaktuator referenziert und der Schubstab in Relation zum Werkzeugkopf positioniert werden. Bei einer ersten KSS-Druckbeaufschlagung zur Kontrolle der Dichtheit wurde der Austritt von Öl außerhalb des beabsichtigten Ausflus-

ses am Werkzeugkopf beobachtet. Der Schutz der Elektronik vor Flüssigkeiten, hierbei insbesondere des Servoreglers, ist in jedem Fall anzustreben, weshalb in einem weiteren Schritt eine externe KSS-Zuführung konstruiert und gefertigt wurde. Diese weist die Funktionsweise eines BOZAs auf und dichtet zum Werkstück und zum BTA-Rohr ab. Die Vorgehensweise stellt eine vergleichbare Alternative zur internen KSS-Zuführung auf, so dass die Untersuchungen somit vollumfänglich umgesetzt werden konnten. Zukünftig besteht die Möglichkeit, die innenliegenden KSS-Leitungen zu verändern, indem beispielsweise eine innere Hydraulikleitung im Werkzeugsystem verbaut wird, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer Undichtigkeit reduziert wird.

7.3 Experimentelle Einsatzversuche

Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit des entwickelten rotierenden Werkzeugsystems wurden Einsatzversuche durchgeführt, bei denen unterschiedliche Innenkonturen in tiefgebohrte Proben aus den Werkstoffen 42CrMo4+QT sowie Inconel 718 eingebracht wurden. Hierdurch können Erkenntnisse über den Zerspanungsprozess sowie die Verfahrbewegungen der neuen Achse gewonnen werden. Beispielhaft wurden dafür lange Kammern in unterschiedlichen Durchmesserbereichen in Werkstücken aus dem Vergütungsstahl eingebracht. Darüber hinaus wurde, vergleichend zum Innendrehen sowie erstem Werkzeugsystem, ebenso wieder die komplexe Kontur gefertigt. Zudem wurde eine Innenkonturierung in Proben aus der Superlegierung mit variierenden Vorschüben und Schnitttiefen umgesetzt. **Abbildung 7.9** stellt nachfolgend aufgetrennte Proben im Längsschnitt dar.

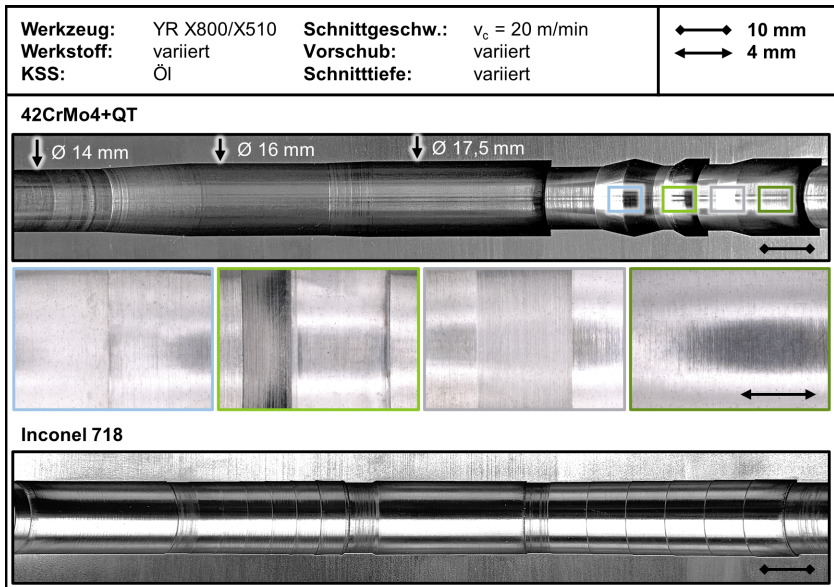


Abbildung 7.9: Konturierte Werkstücke unter Einsatz des rotierenden Werkzeugsystems

Die Konturierung konnte vollumfänglich durch das rotierende Werkzeugsystem umgesetzt werden, sodass die Funktionsfähigkeit des Entwicklungsgegenstandes bestätigt werden kann. Vergleichbar zum ersten Werkzeugsystem sind hierbei komplexe Innenkonturen auch in Tiefbohrungen aus herausfordernd zu bearbeitenden Werkstoffen wie Inconel 718 herstellbar. Zudem sind alle vorgegebenen Verfahrensbewegungen realisierbar, wodurch Einstiche, Kammern und schräge Konturen gefertigt werden können. Die für den Einsatz des Systems angelegte U-Achse ist somit als vollwertige Achse in der Werkzeugmaschine nutzbar. Insbesondere an der komplexen Kontur zeigt sich dabei die Prozessstabilität in Form der hohen Oberflächengüte und der vorgegebenen Linearbewegungen. Die konturierte Oberfläche lässt auf einen schwingungsarmen Prozess schließen, was bedeutet, dass auch bei Rotation des Werkzeugkopfes die Prozesskräfte an die Bohrungswand weitergeleitet werden können. Dabei kann anhand der Oberfläche und der Spanform angenommen werden, dass sich in der Prozesskinematik keine Veränderungen zum stehenden Werkzeugsystem ergeben. Die Wirkbewegung für die Spanabnahme kann in der Folge

beim konstruierten Werkzeugkopf durch Werkstück- oder Werkzeugrotation erreicht werden. Es ist anzumerken, dass Radiusbewegungen aufgrund einer noch zu programmierenden Ebene nicht umsetzbar sind, hierbei handelt es sich jedoch nur um eine steuerungstechnische Limitation. Für einen weiteren Erkenntnisgewinn wurden Untersuchungen zur Spanform für zwei Schneidplattenformen und beide Werkstoffe unter Variation der Schnittdaten durchgeführt. **Abbildung 7.10** zeigt die Späne jeweils in einer Übersicht sowie eine mikroskopische Aufnahme.

Werkzeug:	variiert	Schnittgeschw.:	$v_c = 20 \text{ m/min}$	\longleftrightarrow 8 cm
Werkstoff:	variiert	Vorschub:	variiert	\longleftrightarrow 4 cm
KSS:	Öl	Schnitttiefe:	variiert	$\bullet\text{---}\bullet$ 2 mm
42CrMo4+QT		VR X800	YR X800	
Schruppen $f = 0,05 \text{ mm}$ $a_p = 1,5 \text{ mm}$				
Schlichten $f = 0,01 \text{ mm}$ $a_p = 0,25 \text{ mm}$				
Inconel 718		VR X510	YR X510	
Schruppen $f = 0,05 \text{ mm}$ $a_p = 0,5 \text{ mm}$				
Schlichten $f = 0,04 \text{ mm}$ $a_p = 0,1 \text{ mm}$				

Abbildung 7.10: Einfluss der Schnittparameter, des Werkstoffes und der Schneidplattenform auf die Spanform bei der Auskammerbearbeitung mit einem rotierendem Werkzeugsystem

Es ergibt sich für nahezu alle Versuche eine zum stehenden Werkzeugsystem vergleichbare Spanform, sodass auch beim rotierenden System glatte Spanoberseiten und lange Späne charakteristisch für eine Fließspanbildung sind. Aufgrund der Führungsleiste werden erneut radiale oder tangentielle Werkzeugbewegungen und damit die Ausbildung von Schwingungen unterbunden. Bei der Schruppbearbeitung des Werkstoffes Inconel 718 stellen sich geringfügig rauere Spanoberseiten und engere Wendungen

ein, was sich in einer geringeren eingesetzten Schnittgeschwindigkeit begründen lässt.

Resümierend ist die Rotation des Werkzeugsystems, bei keinen zu erkennenden Unterschieden zur Werkstückrotation, möglich. Hieraus resultieren erweiterte Einsatzmöglichkeiten, indem viele weitere Werkzeugmaschinen eingesetzt und auch außermittige Bohrungen konturiert werden können. Eine technische Neuheit ergibt sich durch die induktive Kopplung und die damit verschleißfreie Daten- und Energieübertragung zum Servoregler bzw. Linearaktuator. In allen durchgeführten Untersuchungen lag eine stabile, geregelte Achsenansteuerung ohne Störungen oder Ausfälle vor, wodurch die Integration der vollwertigen Achse als prozesssicher eingeordnet werden kann. Durch die Herstellung der erforderlichen Tiefbohrung sowie von äußeren Bauteilkonturen mittels rotierender Schneidwerkzeuge, erlaubt das Werkzeugsystem somit die vollumfängliche Bearbeitung von Bauteilen auf einer Werkzeugmaschine wie z.B. einem Dreh-Fräszentrum. Folglich können Innenkonturen hergestellt werden, die mit Hilfe des Innendrehens nicht und über bestehende U-Achssysteme nur in geringen Bearbeitungstiefen gefertigt werden können.

8 Industrielle Einsatzmöglichkeiten

Im Folgenden sollen beispielhafte Anwendungen aufgezeigt werden, in denen das entwickelte Werkzeugsystem eingesetzt werden kann. In dieser Weise sollten ausgehend von vorherigen, auf die Grundlagen fokussierten, Untersuchungen die praktische Anwendung des Systems und die Eignung für einen zukünftigen industriellen Einsatz geprüft werden. Hierfür wurden Konturierungen in zwei Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien und mit variierenden Bohrungsdurchmessern eingebracht. Das erste Beispiel umfasst die Innenkonturierung von Common Rails, die in Einspritzsystemen von Dieselmotoren Verwendung finden. Im zweiten Beispiel sind zylindrische Hohlleiter mit definierten Einstichen korrigiert worden, um die Funktionsfähigkeit von Wellenleitern zu steigern. Der Status Quo bei der konventionellen Herstellung dieser Bauteile wird in **Abbildung 8.1** zusammengefasst. Die Untersuchungen zur industriellen Verwertung wurden mit dem stehenden Werkzeugsystem auf der BTA-Tiefbohrmaschine Giana GGB 560 CNC durchgeführt.

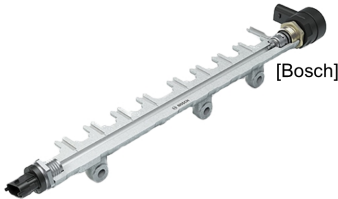
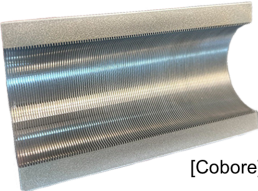
	Common Rails	Hohl-Wellenleiter
Bauteil	 <p>[Bosch]</p>	 <p>[Cobore]</p>
Bisherige Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiefbohrung → Durchgangsbohrung ▪ ECM → Verrundung Querbohrungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bohren → Durchgangsbohrung ▪ Honen/Reiben → Innenmaß ▪ Innendrehen → Korrigationen ▪ Fügen → Längere Wellenleiter

Abbildung 8.1: Anwendungsbeispiele für die tiefe Innenkonturierung

Bei Common Rails wird von einer Hochdruckpumpe Kraftstoff zu einem Verteilerrohr gefördert, um hiervon ausgehend die einzelnen Injektoren der Zylinder versorgen zu können. Die Common Rails fungieren als Druck- und Kraftstoffspeicher und können im Vergleich zu einer separierten Versorgung der Ventile den Kraftstoffverbrauch sowie den Schadstoffausstoß reduzieren. Die bisherige Herstellung sieht einen Tiefbohrprozess für die Durchgangsbohrung vor, weitere Zulaufbohrungen werden für die Zu- und

Abführung des Diesels eingebracht. Diese quer verlaufenden Zulaufbohrungen sind in einem weiteren Schritt mittels elektrochemischem Abtragen zu verrunden, da die Kanten im druckbeaufschlagten Bauteil Schwachstellen darstellen. Durch das Werkzeugsystem können diese Bohrungen spanend verrundet werden, zusätzlich können Kammern in den Zwischenbereichen hergestellt werden, sodass das Kraftstoffvolumen vergrößert wird. **Abbildung 8.2** zeigt die exemplarische Innenkonturierung für ein Common Rail aus dem Werkstoff X5CrNi18-10.

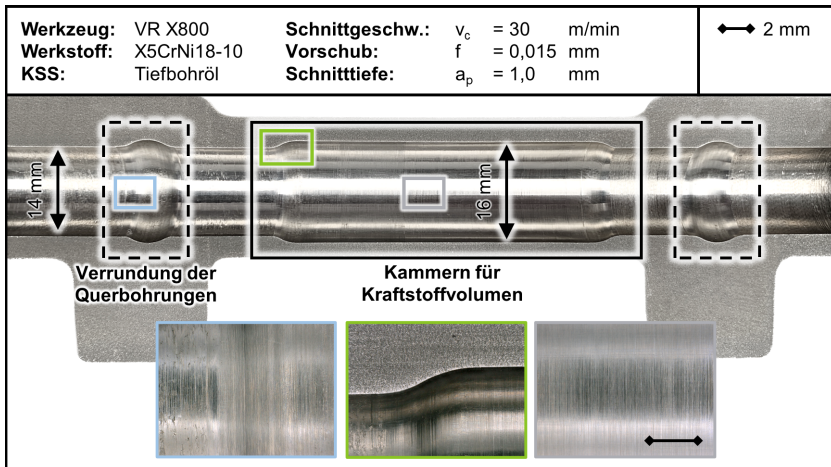


Abbildung 8.2: Innenkonturierung eines Common Rails

Mittels des Werkzeugsystems können Verrundungen in den Bereichen der Querbohrungen erzeugt werden, die eine definierte Radiuskontur bilden. Diese sind in einem durchgehenden Zug und hierdurch zeitlich effizient herstellbar, sodass die Produktionszeit im Vergleich zu einem zeitlich intensiven Prozess wie dem elektrochemischen Abtragen reduziert werden könnte. Weiterhin können die langen Kammern zur Kraftstoffbevorratung mit einer Kammertiefe von $r_k = 1$ mm spanend hergestellt werden. Bei einem beispielhaften Common Rail für einen Vierzylinder könnte in dieser Weise durch drei Zwischenkammern mit einer Länge von $l = 45$ mm eine Erhöhung des Kraftstoffvolumens von 12 % erreicht werden. Hierdurch kann das gesamte Rail belastungsgerechter sowie kleiner ausgelegt werden, sodass Material und Bauraum eingespart werden.

Wellenleiter und die hierzu gehörigen zylindrischen Hohlleiter werden für die Übertragung von elektromagnetischen Wellen benötigt. Diese Hohlleiter, die zumeist aus metallischen Materialien wie Kupfer, Aluminium oder Messing bestehen, werden üblicherweise in verschiedenen Schritten hergestellt. Zunächst erfolgt eine Formgebung durch Walzen, Ziehen oder Pressen. Auch Bohr- sowie Ausdrehprozesse können für die Fertigung des inneren Zylinders eingesetzt werden. Bei höheren Anforderungen an die Oberfläche finden zudem Schleif-, Polier- und Honbearbeitungen Anwendung. Im Hinblick auf die bestehende Innenkontur haben theoretische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen gezeigt, dass Korrugationen, also kleine Einstiche im zylindrischen Profil, die Dämpfung der Wellen reduzieren können. Dies ist insbesondere für hohe Leistungen und große Entfernungen bei der Übertragung sinnvoll. Diese Korrugationen definieren sich durch die Tiefe, die Breite sowie den jeweiligen Abstand und werden in Abhängigkeit der Wellenlänge und -frequenz ausgelegt [Doa08; MKP⁺14; SBB⁺22]. Bei der Herstellung bedarf es hierfür eines Innendrehprozesses mit feinen Einstichen, womit jedoch die bekannten Einschränkungen des Innendrehens einhergehen. Wenn längere Wellenleiter eingesetzt werden, sind diese aus mehreren Teilen herzustellen und die einzelnen Elemente zu fügen. Nachteile ergeben sich bei dieser Vorgehensweise durch Fehlstellen an den Übergängen und die zusätzlichen Arbeitsschritte.

Daher soll das Werkzeugsystem im Folgenden für die Herstellung von Korrugationen in einem langen Wellenleiter verwendet werden (**Abbildung 8.3**). Dieser Wellenleiter mit einer Länge von $l = 300$ mm würde bei einer konventionellen Herstellung aus mindestens fünf Einzelteilen bestehen und dadurch vier Fügstellen aufweisen.

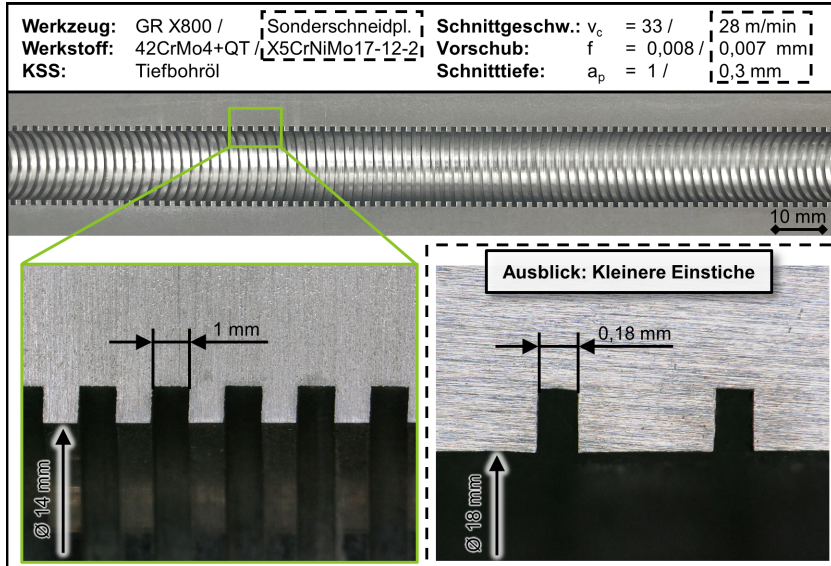


Abbildung 8.3: Herstellung von Wellenleiterkonturen

Ausgehend von einer Bohrung mit einem Führungsdurchmesser von $D = 14$ mm wurden Einstiche mit einer Breite und Tiefe von b bzw. $t = 1$ mm über die gesamte Werkstücklänge unter Verwendung einer Schneidplatte eingebracht. Ein angeschlossenes Auftrennen und Vermessen der Korruptionen zeigt die Maßhaltigkeit sowie die hohe Bauteilgüte, die sich aus den Einstechprozessen ergeben. Im Spezifischen ist zudem positiv zu beurteilen, dass die Einstechbearbeitung keine Gratbildung verursacht. In einem weiteren Versuch wurden Einstiche in einem nichtrostenden, austenitischen Material gefertigt. Hierbei weist die Durchgangsbohrung einen Durchmesser von $D = 18$ mm auf und die Einstechbreite beträgt lediglich $w = 0,18$ mm. Eingesetzt wurde der bereits vorgestellte Werkzeugkopf, jedoch mit einer entsprechend der Bohrung vergrößerten Führungsleiste, wodurch ebenso die Anpassungsfähigkeit des Systems untersucht wird. Es können in diesem Fall einzelne Einstiche realisiert werden, vorzeitige Brüche der filigranen Schneidplatte verhindern aber eine vollständige Konturierung eines Bauteils. Dabei kann angenommen werden, dass sich dies in der Schneidengestalt und der Wirkweise der Ausstellbewegung begründet. Die Bewegung der Schneidplatte erfolgt nicht vollständig in radialer Richtung, sondern weist durch die Aufspreizung der Innenkontur zudem einen

axialen Anteil auf. Bei einer gerade genuteten Schneidplatte unterliegt somit auch die zum Werkzeugsystem gewandte Nebenschneide einem Eingriff in das Werkstück. Für zukünftige Einstechoperationen sind somit Schneidplatten mit einer ausreichend großen Freimachung an den Nebenschneiden zu verwenden.

Die Versuche zeigen zusammenfassend die Einsatzfähigkeit für die Herstellung langer Wellenleiter auf. Mittels des Einsatzes des entwickelten Werkzeugsystems kann das Fügen mehrere Komponenten eingespart werden, womit Fehlstellen vermieden werden und Produktionszeit eingespart wird. Die industrielle Anwendung ist dabei vor allem für die Herstellung von Wellenleitern zweckmäßig, welche Frequenzen im Mikrowellenbereich mit hohen Leistungen übertragen sollen. Bei den potentiellen Anwendungsfeldern können Telekommunikation, Energietechnik sowie Hochfrequenztechnik in Form von Radarsystemen und Messgeräten aufgezählt werden. Die Adaption auf verschiedene Frequenzen wird dabei durch die Stechbreite, die Einstichtiefe und den Einstechabstand erreicht.

Darüber hinaus sind diverse weitere Anwendungsbeispiele vorstellbar und diese können zukünftig exemplarisch untersucht werden. Im Sinne der Gewichtsoptimierung könnten Kurbelwellen von Pedelecs sowie Rotorwellen von Elektroantrieben innenkonturiert werden. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet ergibt sich für die Öl- und Gasexploration und dem hierbei verwendeten Bohrgestänge. In diesem werden Hydraulikkammergehäuse verbaut, welche zwei außermittige Peripheriebohrungen aufweisen, in denen Hydraulikkolben laufen. Zur Funktion der Kolben sind sogenannte Pockets erforderlich, die in unterschiedlichen Bauteiltiefen mit l/D -Verhältnissen bis größer 50 eingebracht werden. Diese Öltaschen werden üblicherweise mittels Konturhonen mit ausstellbaren Honsteinen gefertigt, was sich als ungenau und zeitintensiv darstellt sowie nach dem Tiefbohren den Einsatz einer weiteren Maschine erfordert. Prozesszeit könnte ebenso im Beispiel des Rückwärtssenkens eingespart werden, das bisher in der maximalen Bearbeitungstiefe begrenzt ist. Die neuartige tiefe Innenkonturierung kann potentiell den Senkprozess auch bei tiefen Bohrungen realisieren bzw. einen Umspannprozess des Bauteils einsparen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der Weiterentwicklung der spanenden Fertigung wird mit einem überwiegenden Fokus die Bearbeitung der äußeren Werkstückgestalt analysiert und optimiert. Ein ganzheitlicher Ansatz der Bauteilfertigung setzt jedoch auch komplexe Innenkonturen voraus. In diesem Zusammenhang finden im Spezifischen die Verfahren des Innendrehens und der Auskammerbearbeitung Anwendung. Das Innendrehen eignet sich hierbei für die Konturierung von Bohrungen in allen Durchmesserbereichen, limitierender Faktor ist dabei die maximale Bearbeitungstiefe. Tiefe Bohrungen können hingegen mittels der Auskammertechnologie innen bearbeitet werden, wobei die Bohrung aufgrund des komplexen Aufbaus der Auskammerwerkzeuge einen Mindestdurchmesser aufweisen muss. Der bisherige Stand der Technik erlaubt demnach keine Konturierung von Bohrungen in einem Durchmesserbereich von $D < 35$ mm und Tiefen mit einem Verhältnis von $l/D > 16$. Folgerichtig bedarf es eines Verfahrens, um zukünftig die erreichbaren Durchmesserbereiche und Bearbeitungstiefen der Innenbearbeitung erheblich zu erweitern.

Basierend auf dem aufgezeigten Bedarf wurde in der vorliegenden Arbeit ein neuartiges Werkzeugsystem zur Konturierung kleiner Tiefbohrungen entwickelt, welches die komplexe Innenkonturierung der Bohrungswand ermöglicht. Hierfür wurden zunächst grundlegende Untersuchungen zum konventionellen Innendrehen durchgeführt, die dem Prozessverständnis, der Schneidplatten- und Schnittdatenauswahl für die Auskammerbearbeitung und der Referenzbildung dienen. Hiernach folgte die zweigeteilte Entwicklung des Werkzeugsystems mit jeweiligen Einsatzversuchen. In einer ersten Stufe wurde ein stehendes Werkzeugsystem konstruiert und implementiert, das eine Werkstückrotation zur Schnittbewegung erfordert. Die Weiterentwicklung zu einem rotierenden System stellte die zweite Stufe dar und ergänzt die Anwendungsbereiche des Verfahrens, um weitere Werkzeugmaschinen sowie nicht zentrische Bohrungen.

Die Untersuchungen zum konventionellen Innendrehen erfolgten unter Variation der Schneidplattenform und der Schnittdaten auf einer CNC-Drehmaschine in Proben aus den Werkstoffen 42CrMo4+QT und Inconel 718, welche eine Durchgangsbohrung mit $D_i = 14$ mm aufwiesen. Der untersuchte Innenlängsdrehprozess ist bereits beim eingesetzten l/D -Verhältnis

von $l/D = 4,5$ durch Schwingungen geprägt, was insbesondere in den mechanischen Werkzeugbelastungen, der Oberflächengüte und der sich ergebenden Spanform zu erkennen ist. Die Bewegungen des Werkzeugs bedingen schwankende Zerspankräfte sowie einen variierenden Spanungsquerschnitt, wodurch sich eine Lamellenspanbildung einstellt. Die dominante Schwingungsfrequenz im Bereich von $f_{Schw} = 1\,600 \dots 1\,700$ Hz prägt sich dabei insbesondere in radialer und tangentialer Richtung aus. Axiale Kraftanteile können hingegen durch den Werkzeughalter aufgenommen und an die Werkzeugaufnahme weitergeleitet werden. Die hohe Schwingungsanfälligkeit des Prozesses wurde darüber hinaus an einer beispielhaften Herstellung einer komplexen Innenkontur durch Rattermarken auf der Werkstückoberfläche infolge von überlagerten Werkzeugbewegungen deutlich. Untersuchungen zum Innenlängsdrehen über eine Werkzeugeingriffszeit von $t_h = 30$ min konnten die generelle Eignung der gewählten Schneidplatten für zeitintensive Konturierungsprozesse nachweisen, zudem wurden geeignete Schnittwerte für den Einsatz im darauffolgend entwickelten Werkzeugsystem erarbeitet.

Elementare Anforderungen an dieses System waren ein schwingungsvermeidender Aufbau sowie ein CNC-gesteuerter Ausstellmechanismus, welcher auch in kleinen Tiefbohrungen realisiert werden kann. Hierfür wurde ein neuartiger Ansatz verfolgt und ein Werkzeugsystem entwickelt, bei dem die radiale Schneidenbewegung über eine elastische Aufspreizung des Werkzeugkopfes durch Verfahren eines Schubstabes erzielt wird. Weiterhin umfasst die Konstruktion des Werkzeugkopfes eine aufsteckbare Führungsleiste, sodass eine Abstützung und hierdurch eine geringe, von der Bearbeitungstiefe unabhängige Auskrugung vorliegt. Eine entwickelte Antriebs- und Anbindungseinheit stellt beim Werkzeugsystem die Verbindung zur Werkzeugmaschine dar und integriert einen Linearaktuator, welcher die für die Ausstellbewegung ursächliche Schubstabbewegung generiert. Als verbindendes Element zwischen Werkzeugkopf und Antriebseinheit wurde ein Sonderrohrgestänge vorgesehen, das zudem die Schubstabbewegung überträgt. Durch die nahezu beliebige Länge dieses Gestänges können Innenkonturierungen in Tiefbohrungen mit l/D -Verhältnissen von weit über 100 umgesetzt werden.

Für die Erzielung einer definierten, elastischen Verfahrbewegung der Schneidplatte wurde eine FEM-Simulation des Werkzeugkopfes bei Verfahren des Schubstabes durchgeführt. Mittels einer elastischen Verformungsanalyse sowie einer Spannungsanalyse konnte in iterativen Schritten eine den Anforderungen gerechte Gestalt von Werkzeugkopf und Schubstab entwickelt werden. Ebenjene Gestalt wurde für einen Bohrungsdurchmesser von $D_i = 14$ mm ausgelegt, konstruktive Anpassungen erlauben jedoch auch kleinere und größere Tiefbohrungen. Das auf diesen Erkenntnissen basierende Werkzeugsystem wurde im Anschluss gefertigt und auf einer BTA-Tiefbohrmaschine mechanisch sowie steuerungstechnisch implementiert. Die Werkzeugmaschine wurde dafür um eine virtuelle Achse erweitert, wodurch vergleichbar zur konventionellen Drehbearbeitung eine zweidimensionale Programmierung der Innenkonturen erfolgen kann.

Nach der Implementierung konnten erfolgreiche Einsatzversuche und technologische Untersuchungen unter Variation der Schnittdaten und Schneidplattenform mit rotierenden Werkstücken realisiert werden. Hierdurch wurde erstmalig eine produktive, tiefe Konturierung kleiner Tiefbohrungen durchgeführt, wobei die Konturierung lange Kammern, Einstiche, Gewinde und Radiuskonturen umfasste. Trotz des sehr großen l/D -Verhältnisses des Sonderrohrgestänges von $l/D = 178$ war die Bearbeitung mit einer hohen Konturtreue und Oberflächengüte verbunden. Dies begründet sich auch im schwingungsvermeidenden Aufbau des Werkzeugsystems durch die Abstützung des Werkzeugkopfes in der Führungsbohrung, sodass das System auch in kurzen Bohrungen eine sinnvolle Alternative zum Innendrehen darstellt. Der stabile Zerspanungsprozess zeigt sich zudem in Form einer Fließspannbildung, wohingegen im Vergleich hierzu beim konventionellen Innendrehen mit gleichenden Randbedingungen schwingungsinduzierte Spandickenschwankungen aufgetreten sind. Bei abschließenden Versuchen zur industriellen Verwertung des Werkzeugsystems wurden darüber hinaus Common Rails und Wellenleiter vollumfänglich innenkonturiert.

In der zweiten Entwicklungsstufe ist die Rotationsfähigkeit des Werkzeugsystems erarbeitet worden, wofür zunächst der zu übertragende Leistungsbedarf des Motors untersucht werden musste. Unter der zusätzlichen Kenntnis der zu transmittierenden Steuerungssignale sind nachfolgend

zwei Übertragungskonzepte für den rotierenden Einsatz des Linearaktuators unter Verwendung eines Schleifringes bzw. eines Induktivkopplers entwickelt, gefertigt und eingesetzt worden. Die Ansteuerung des Motors konnte in beiden Varianten realisiert werden, aus Gründen der Verschleißfreiheit und der besseren Einwechselbarkeit auf Werkzeugmaschinen wurde für die weitere Konstruktion einer neuen Antriebs- und Anbindungseinheit der Induktivkoppler gewählt. Nach der Fertigung und Montage dieses Werkzeugsystems erfolgte die Implementierung auf einer Koordinaten-Tiefbohrmaschine, auf welcher in der industriellen Prozesskette ebenso die grundlegende Tiefbohrung eingebracht werden kann. Durch eine Erweiterung der steuerungsbezogenen Komponenten stellt das System hierbei eine vollwertige, geregelte Achse im Steuerungsverbund dar. Ein erster Machbarkeitsnachweis des rotierenden Werkzeugsystems konnte in Form der komplexen Innenkonturierung von Werkstücken aus 42CrMo4+QT und Inconel 718 durchgeführt werden. Vergleichbar zur ersten Entwicklungsstufe wird auch hierbei ein stabiler, prozesssicherer Eingriff der Schneidplatte durch die Abstützung des Werkzeugkopfes erreicht und auch überlagerte Werkzeugbewegungen können konturtreu umgesetzt werden.

Zusammenfassend zeigen sich die Potentiale durch die neuartige Werkzeugentwicklung zur ganzheitlichen Konturierung kleiner Tiefbohrungen. Der konsequente Leichtbau, gesteigerte Bauteilbelastbarkeiten und Funktionserweiterungen werden damit in einem Anwendungsbereich ermöglicht, in welchem mit dem derzeitigen Stand der Technik kein produktives Verfahren zur Innenbearbeitung gegeben war. In dieser Weise wird die bestehende Lücke zwischen konventionellem Innendrehen und Auskammern geschlossen. Als beispielhafte Bauteile können in diesem Zusammenhang Kurbelwellen, Wellenleiter und Common Rails genannt werden, voraussichtlich bestehen aber auch weitere neue Konzepte für Bauteile, für welche bisher jedoch keine Fertigungsoption vorlag. In den zwei Entwicklungsstufen ist das Werkzeugsystem auf unterschiedlichsten Werkzeugmaschinen einsetzbar, wobei sowohl zentrische als auch außermittige Bohrungen konturiert werden können. Neben tiefen Bearbeitungen eignet sich das Verfahren dabei durch den schwingungsvermeidenden Aufbau auch für geringe Bauteiltiefen.

Das grundlegende Werkzeugsystem wurde für die ersten Anwendungen im wissenschaftlichen Kontext ausgelegt und ist zukünftig für einen industriellen Einsatz in einer Produktionsumgebung vorzubereiten. Dabei ist die Anbindung für verschiedenen Werkzeugmaschinen wie Dreh-Fräszentren mit den entsprechenden Schnittstellen anzupassen. Darüber hinaus können weitere Durchmesserbereiche mit dem System erreicht werden, sodass eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile konturiert werden kann. Für eine vollumfängliche Innenbearbeitung ist zudem die Erweiterung des Werkzeugs um eine Walzeinheit denkbar.

10 Literaturverzeichnis

- [AAS13] Ahmed, G.; Ahmed, H.; Samad, S. S.: *Experimental Investigation of Effect of Tool Length on Surface Roughness during Turning Operation and its Optimization*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Nr. 7, 2013, S. 73–80.
- [ABE⁺07] Ast, A.; Braun, S.; Eberhard, P.; Heisel, U.: *Adaptronic Vibration Damping for Machine Tools*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 56, 2007, S. 379–382.
- [ABF07] Achleitner, E.; Bäcker, H.; Funaioli, A.: Direct Injection Systems for Otto Engines. In: *SAE Technical Paper Series*. Warrendale: SAE International, 2007 (SAE Technical Paper Series).
- [AEO08] Altintas, Y.; Eynian, M.; Onozuka, H.: *Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 1, 2008, S. 371–374.
- [Ast14] Astakhov, V.: *Drills: Science and Technology of Advanced Operations*. CRC Press, Boston, 1. Aufl., 2014.
- [AW04] Altintas, Y.; Weck, M.: *Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 2, 2004, S. 619–642.
- [BB21] Böge, A.; Böge, W.: *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 24. Aufl., 2021.
- [BBC02] Bruns, N. A.; Bruns, E. C.; Chamberlain, T. H.: *Fluted electrochemical machining*. *Patentschrift*: US 6,413,407 B1, 2002.
- [BBF94] Buse, B.; Bergmann, K.; Fuß, H.: Flexible Innenbearbeitung mit rechnergesteuerten Bohrwerkzeugen. In: Weinert, K. (Hrsg.): *Spanende Fertigung*. 1. Aufl. Essen: Vulkan Verlag, 1994.

- [BBH⁺18] Biermann, D.; Bleicher, F.; Heisel, U.; Klocke, F.; Möhring, H.-C.; Shih, A.: *Deep hole drilling*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 2, 2018, S. 673–694.
- [Bee16] Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2016.
- [Ber91] Berns, H.: *Stahlkunde für Ingenieure: Gefüge, Eigenschaften, Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1. Aufl., 1991.
- [BF10a] Biermann, D.; Felderhoff, J. F.: *Analyse von Tiefbohrverfahren zur Gussbearbeitung*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 105, 2010, S. 32–36.
- [BF10b] Biermann, D.; Felderhoff, J. F.: *Verfahrensvergleich beim Tiefbohren: Analyse unterschiedlich konzipierter Tiefbohrwerkzeuge bei der Zerspanung schwefelarmer Stähle*. wt Werkstatttechnik online, Nr. 100, 2010, S. 202–206.
- [BFB87] Buse, B.; Fuß, H.; Bolle, D.: *Prozessbegleitende Temperaturmessungen an den Stützleisten von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik der Technischen Hochschulen und Universitäten der Bundesrepublik Deutschland, Nr. 53, 1987, S. 42–43.
- [BG20-1] Bender, B.; Göhlich, D.: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1: Grundlagen und Tabellen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 26. Aufl., 2020.
- [BG20-2] Bender, B.; Göhlich, D.: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 26. Aufl., 2020.
- [BGT24] BGTB GmbH: *Anwendungen*. URL <https://www.bgtb.de/anwendungen> – Überprüfungsdatum 05.02.2024.

-
- [BHK11] Biermann, D.; Heilmann, M.; Kirschner, M.: *Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters*. Procedia Engineering, Nr. 19, 2011, S. 16–21.
- [BK14] Bae, J.; Kim, C.: *A study on integrated design for improving fatigue life of common rail pipe considering stress concentration at complex shape*. Journal of Mechanical Science and Technology, Nr. 9, 2014, S. 3617–3627.
- [BS18] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde*. Springer Vieweg, Berlin, 12. Aufl., 2018.
- [BT08] Berns, H.; Theisen, W.: *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4. Aufl., 2008.
- [BU02] Bottos, R.; Underwood, L.: *Internally Profiled Stator Tube*. Patentschrift: US 2002/0041815 A1, 2002.
- [Büc21] Bücken, M.: *Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2021.
- [CL01] Choi, J. P.; Lee, S. J.: *Efficient Chip Breaker Design by Predicting the Chip Breaking Performance*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 17, 2001, S. 489–497.
- [Cro74] Cronjäger, L.: *Technologie des Tiefbohrens*. Werkzeugmaschine international, Nr. 5, 1974, S. 11–16.
- [Das01] Da Silva, E.: *High frequency and microwave engineering*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [DDS*19] Diniz, A. E.; Da Silva, W. T. A.; Suyama, D. I.; Pederiva, R.; Albuquerque, M. V.: *Evaluating the use of a new type of impact damper for internal turning tool bar in deep holes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 101, 2019, S. 1375–1390.

- [DGE⁺16] Denkena, B.; Grove, T.; Eggemann, K.; Wissel, R.; Pape, O.: *Werkzeugentwicklung für die Statorherstellung*. URL <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/werkzeugentwicklung-fuer-die-statorherstellung-a-545173/> – Überprüfungsdatum 06.02.2024.
- [DIN10020] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle*. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [DIN17022-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Verfahren der Wärmebehandlung: Teil 1: Härten, Bainitisieren, Anlassen und Vergüten von Bauteilen*. Beuth-Verlag, Berlin, 1994.
- [DIN6581] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges*. Beuth-Verlag, Berlin, 1985.
- [DIN68-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung - Grundprofil und Nennprofil - Teil 1: Metrisches Gewinde*. Beuth-Verlag, Berlin, 2023.
- [DIN683-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil 1: Unlegierte Vergütungsstähle*. Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- [DIN683-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil 2: Legierte Vergütungsstähle*. Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- [DIN8580] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Beuth-Verlag, Berlin, 2022.
- [DIN8589-0] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Fertigungsverfahren Spanen, Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN8589-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Fertigungsverfahren Spanen, Teil 1: Drehen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth-Verlag, Berlin, 2003.

-
- [DIN8589-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Fertigungsverfahren Spanen, Teil 2: Bohren, Senken, Reiben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN965-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung - Toleranzen - Teil 1: Prinzipien und Grundlagen*. Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [Doa08] Doane, J. L.: *Design of Circular Corrugated Waveguides to Transmit Millimeter Waves at ITER*. Fusion Science and Technology, Nr. 1, 2008, S. 159–173.
- [DT11] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: *Spanen - Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3. Aufl., 2011.
- [Dus22] Dusold, J.: *Wie eine U-Achse die automatisierte Fertigung verändert*. URL <https://www.fertigung.de/tools-more/werkzeuge/wie-eine-u-achse-die-automatisierte-fertigung-veraendert-382.html> – Überprüfungsdatum 02.02.2024.
- [FBP97] Fuß, H.; Bruchhaus, T.; Psiuk, W. G.: Herstellung nichtzylindrischer Bohrungen auf Tiefbohrmaschinen. In: Weinert, K. (Hrsg.): *Spanende Fertigung*. 2. Aufl. Essen: Vulkan Verlag, 1997.
- [FDZ*10] Fu, S.; Dong, J.; Zhang, M.; Wang, N.; Xie, X.: Research on Inconel 718 Type Alloys with Improvement of Temperature Capability. In: Ott, E. A.; Groh, J. R.; Banik, A.; Dempster, I.; Gabb, T. P.; Helmink, R.; Liu, X.; Mitchell, A.; Sjöberg, G. P.; Wusatowska - Sarnek, A. (Hrsg.): *Superalloy 718 and Derivatives*: Wiley, 2010, S. 281–296.
- [FE13] Fischer, A.; Eberhard, P.: *Improving the dynamic stability of a workpiece dominated turning process using an adaptronic tool holder*. Theoretical and Applied Mechanics Letters, Nr. 3, 2013, 013008-1-013008-8.
- [Fel12] Felderhoff, J. F.: *Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012.

- [FM19a] Fallah, M.; Moetakef-Imani, B.: *Adaptive inverse control of chatter vibrations in internal turning operations*. Mechanical Systems and Signal Processing, Nr. 129, 2019, S. 91–111.
- [FM19b] Fallah, M.; Moetakef-Imani, B.: *Design, analysis, and implementation of a new adaptive chatter control system in internal turning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 104, 2019, S. 1637–1659.
- [FMI+21] Felinks, N.; Metzger, M.; Iovkov, I.; Biermann, D.: *Enhanced Surface Quality of Internal Machined Contours*. Procedia CIRP, Nr. 96, 2021, S. 313–318.
- [Fri18] Fritz, A. H.: *Fertigungstechnik*. Springer Vieweg, Berlin, 12. Aufl., 2018.
- [FSB01] Fuß, H.; Schween, A.; Buse, B.: Außen- und Innendrehbearbeitung von Achsträgern für Flugzeuglandebeine. In: Weinert, K. (Hrsg.): *Spanende Fertigung*. 3. Aufl. Essen: Vulkan Verlag, 2001, S. 151–160.
- [Fuß86] Fuß, H.: *Aspekte zur Beeinflussung der Qualität beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Universität Dortmund, 1986.
- [GG85] 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, Nr. 23, 1985, S. 647–655.
- [GG93] Griffiths, B. J.; Grieve, R. J.: *Modelling Complex Force Systems, Part 2: A Decomposition of the Pad Forces in Deep Drilling*. Journal of Engineering for Industry, Nr. 115, 1993, S. 177–183.
- [Gri75] Griffiths, B. J.: *Deep hole drilling and boring: A review of current processes and their applications*. The Production Engineer, 1975, S. 97–105.
- [Gri93] Griffiths, B. J.: *Modelling Complex Force Systems, Part 1: The Cutting and Pad Forces in Deep Drilling*. Journal of Engineering for Industry, Nr. 115, 1993, S. 169–176.

- [HD19] Hughes, A.; Drury, B.: *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications*. Elsevier, Oxford, 5. Aufl., 2019.
- [HD67] Hennermann, H.; Dix, N.: *Kleine Zerspanungslehre*. Carl Hanser Verlag, München, 1967.
- [HDJ01] Hong, S. Y.; Ding, Y.; Jeong, W.: *Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Nr. 41, 2001, S. 2271–2285.
- [HE91] Heisel, U.; Enderle, K.: *Stand der Technik beim Tiefbohren: Tiefbohren, Verfahren, Werkzeuge, Maschinen*. Tagung der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, 1991, S. 1–10.
- [HKU*14] Heisel, U.; Klocke, F.; Uhlmann, E.; Spur, G.: *Handbuch Spannen*. Carl Hanser Verlag (Editon Handbuch der Fertigungstechnik [3]), München, 2., Auflage, 2014.
- [Jen15] Jensen, T.: *Machining deep holes with damped tools - Silent Tools*. Begleitband zur VDI-Fachtagung "Präzisions- und Tiefbohren aktuell: Technik - Tools - Trends", 2015, S. 145–158.
- [Kir16] Kirschner, M.: *Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmesserern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2016.
- [KLE*10] Klocke, F.; Lung, D.; Essig, C.; Sangermann, H.: *Automatisierte Produktion - ohne Spanbruch undenkbar*. ZWF, Nr. 105, 2010, S. 21–25.
- [Klo18] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 1 - Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 9. Aufl., 2018.
- [Koh96] Kohaupt, B.: Elektrolytische Zersetzung. In: Kohaupt, Burchard (Hrsg.): *Praxiswissen Chemie für Techniker und Ingenieure*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1996, S. 139–143.

- [Kon13] Konradin-Verlag Robert Kohlhammer: *U-Achse im Werkzeug hat sich im Musterbau bewährt*. URL <https://mav.industrie.de/werkzeuge/u-achse-im-werkzeug-hat-sich-im-musterbau-bewaehrt/> – Überprüfungsdatum 02.02.2024.
- [Kro54] Kronenberg, M.: *Grundzüge der Zerspanungslehre: Theorie und Praxis der Zerspanung für Bau und Betrieb von Werkzeugmaschinen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2. Aufl., 1954.
- [KRW03] Krueger, V.; Regener, T.; Walterskoetter, M.: *Methods of making Mud Motors*. Patentschrift: US 6,543,132 B1, 2003.
- [Kue21] Kuester, E. F.: *Theory of Waveguides and Transmission Lines*. CRC Press, Boca Raton, 1. Aufl., 2021.
- [LC03] Lemay, L.; Chopard, J. P.: *Method for making a Moineau Pump Stator and resulting Stator*. Patentschrift: WO 03/08807 A1, 2003.
- [LHI*17] Liedtke, D.; Hoferer, M.; Illgner, K. H.; Pirzl, N.; Stiele, H.: *Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen I: Grundlagen und Anwendungen*. expert verlag, Renningen, 10. Aufl., 2017.
- [Löb03] Löbbe, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2003.
- [LW01] Löbbe, H.; Webber, O.: Einlippentiefbohren auf BAZ. In: Weinert, K. (Hrsg.): *Spanende Fertigung*. 3. Aufl. Essen: Vulkan Verlag, 2001, S. 101–113.
- [Mac12] Machai, C.: *Grundlageruntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012.
- [Met19] Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2019.

- [MKP⁺14] Mistry, J. A.; Kulkarni, S. V.; Patel, S. K.; Kadiya, K. S.: *Design & Simulation of Low Loss Circular Corrugated Waveguide for 42GHz, 200 kW Gyrotron*. International Journal of Research in Engineering and Technology, Nr. 3, 2014, S. 220–224.
- [Pfl76] Pfléggar, F.: *Verbesserung der Bohrungsqualität beim Arbeiten mit Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1976.
- [PHL⁺08] Pauksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 12. Aufl., 2008.
- [Rei10] Reif, K.: *Moderne Diesel-Einspritzsysteme: Common Rail und Einzelzylindersysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1. Aufl., 2010.
- [Rei15] Reich, M.: *Auf Jagd im Untergrund: Mit Hightech auf der Suche nach Öl, Gas und Erdwärme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Aufl., 2015.
- [Ren07] Renhof, L.: *Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Nickellegierung IN 718*. Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [SBB⁺22] Siy, A.; Behdad, N.; Booske, J.; Waldschmidt, G.; Zholents, A.: *Design of a cylindrical corrugated waveguide for a collinear wakefield accelerator*. Physical Review Accelerators and Beams, Nr. 12, 2022, S. 121601.
- [Sch02] Schönherr, H.: *Spanende Fertigung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2002.
- [Sch22] Schlütersche Fachmedien GmbH: *Formbohren verkürzt Fertigungszeit*. NC-Fertigung, Nr. 3, 2022, S. 34–35.
- [Sch23] Schlegel, J.: *Stahl - der Werkstoff*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2023.

- [Sch64] Schaller, E.: *Beitrag zur Untersuchung von Spannungen und dynamischen Vorgängen in der Grenzschicht zwischen Werkzeug und Span bei der Stahlzerspannung mit Hartmetallwerkzeugen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1964.
- [SDP16] Suyama, D. I.; Diniz, A. E.; Pederiva, R.: *The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internal turning of hardened steel*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 86, 2016, S. 2083–2092.
- [Str15] Straffelini, G.: *Friction and Wear: Methodologies for Design and Control*. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [Sui17] Suilmann, F.-H.: *Fertigung von Hydraulikzylindern für die Bergbautechnik*. VDI-Fachtagung – Präzisions- und Tiefbohren aktuell, Stuttgart, 2017, S. 117–128.
- [TDP⁺19] Thomas, W.; Diniz, A. E.; Pederiva, R.; Suyama, D. I.; Albuquerque, M. V.: *A New Type Of Impact Damper With Long Overhangs In The Internal Turning Of Hardened Materials*. Procedia CIRP, Nr. 82, 2019, S. 255–260.
- [Tek24] Tekfor Holding GmbH: *Rotorwelle*. URL <https://tekfor.de/rotorwelle/> – Überprüfungsdatum 05.02.2024.
- [TFS20] Thomas, W.; Fülöp, Z.; Szilágyi, A.: *Comparison between the performances of different boring bars in the internal turning of long overhangs*. Nanomaterials Science & Engineering, Nr. 2, 2020, S. 124–134.
- [thy24] thyssenkrupp AG: *Die perfekte (Rotor)-Welle: Ohne Rotorwelle kein Elektroauto*. URL <https://www.thyssenkrupp.com/de/stories/automotive-and-new-mobility/die-perfekte-rotor-welle> – Überprüfungsdatum 05.02.2024.
- [Tik09] Tikal, F.: *Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden*. Kassel Univ. Press, Kassel, 2009.

- [TJJ*06] Teti, R.; Jawahir, I. S.; Jemielniak, K.; Segreto, T.; Chen, S.; Kossakowska, J.: *Chip Form Monitoring through Advanced Processing of Cutting Force Sensor Signals*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 55, 2006, S. 75–80.
- [TS14] Totis, G.; Sortino, M.: *Robust Analysis of Stability in Internal Turning*. Procedia Engineering, Nr. 69, 2014, S. 1306–1315.
- [Tsc02] Tschätsch, H.: *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 6. Aufl., 2002.
- [VDI3208] Verein Deutscher Ingenieure: *Tiefbohren mit Einlippenbohrern*. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [VDI3209-1] Verein Deutscher Ingenieure: *Tiefbohren mit äußerer Zuführung des Kühlschmierstoffs: BTA- und ähnliche Verfahren - Blatt 1*. Beuth-Verlag, Berlin, 2024.
- [VDI3210-1] Verein Deutscher Ingenieure: *Tiefbohrverfahren: Blatt 1*. Beuth-Verlag, Berlin, 2006.
- [Ves13] Veselovac, D.: *Process and product monitoring in the drilling of critical aero engine components*. Apprimus-Verl., Aachen, 1. Aufl., 2013.
- [VMJ*04] Veprek, S.; Männling, H.-D.; Jilek, M.; Holubar, P.: *Avoiding the high-temperature decomposition and softening of $(Al_{1-x}Ti_x)N$ coatings by the formation of stable superhard $nc-(Al_{1-x}Ti_x)N/a-Si_3N_4$ nanocomposite*. Materials Science and Engineering: A, Nr. 366, 2004, S. 202–205.
- [VPL*19] Vasanth, X. A.; Paul, P. S.; Lawrance, G.; Varadarajan, A. S.: *Vibration control techniques during turning process: a review*. Australian Journal of Mechanical Engineering, Nr. 19, 2019, S. 221–241.
- [War74] Warnecke, G.: *Spanbildung bei metallischen Werkstoffen*. Techn. Verlag Resch, München, 1974.

- [WB06] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [WDJ15] Weißbach, W.; Dahms, M.; Jaroschek, C.: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 19. Aufl., 2015.
- [Wei99] Weinert, K.: *Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung: Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [WIS⁺04] Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J. W.; Wakabayashi, T.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 53, 2004, S. 511–537.
- [Wit07] Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2007.
- [WL98] Wesling, V.; Lange, W.: *Neues Design für BTA Voll- & Kernbohrköpfe: Höchste Betriebssicherheit & Leistung*. Werkzeug-Technik, Nr. 53, 1998, S. 31–33.
- [x-t21] x-technik IT & Medien GmbH: *Mapal TOOLTRONIC: Elektronisches Aussteuerwerkzeug macht Fräs-Drehzentrum zum Alleskönner*. URL https://www.zerspanungstechnik.com/bericht/plan--und-ausdrehkoepfe/tooltronic_elektronisches-aussteuerwerkzeug-macht-fraes-drehzentrum-zum-alleskoenner_2021-10-31 – Überprüfungsdatum 05.02.2024.
- [YNS21] Yuvaraju, B.; Nanda, B. K.; Srinivas, J.: *Investigation of stability in internal turning using a boring bar with a passive constrained layer damping*. FME Transactions, Nr. 49, 2021, S. 384–394.
- [ZHN⁺12] Zhu, L.; Hu, M.; Ni, W.; Liu, Y.: *High temperature oxidation behavior of Ti_{0.5}Al_{0.5}N coating and Ti_{0.5}Al_{0.4}Si_{0.1}N coating*. Vacuum, Nr. 86, 2012, S. 1795–1799.

Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H3 Surmann, T.: *Simulation der Dynamik von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8794-2
- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktions-technische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 978-3-8027-8760-9
- Band 113 Gerken, J.F.: *Technologische Analyse des Ejektortiefbohrers zur Entwicklung strömungsoptimierter Werkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8929-8
- Band 112 Schmidt, R.: *Untersuchung zum Einfluss des thermomechanischen Belastungskollektivs auf die Oberflächenkonditionierung beim BTA-Tiefbohrprozess*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8928-1
- Band 111 Meijer, A.: *Werkzeug- und Prozessentwicklung für das Mikrohartfräsen von pulvermetallurgischem Schnellarbeitsstahl*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8927-4
- Band 110 Alammari, Y.: *Fundamental Investigations on Interrupted Machining of Challenging Materials with MQL*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8926-7
- Band 109 Kipp, M.: *Feinstbearbeitung von Hartmetall unter Einsatz elastisch gebundener Diamantschleifwerkzeuge zur Präparation von Spannuten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2023, ISBN 978-3-8027-8925-0
- Band 108 Nickel, J.: *Analyse und Modellierung der thermomechanischen Beeinflussung der Randzoneneigenschaften beim Einlippentiefbohren von Bauteilen aus Vergütungsstahl*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2023, ISBN: 978-3-8027-8924-3
- Band 107 Zelinko, A.: *Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2022, ISBN 978-3-8027-8923-6

- Band 106 Bücken, M.: Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN 978-3-8027-8922-9
- Band 105 Jaeger, J.-P.: Wendeltiefbohren kleinster Durchmesser in schwer zerspanbare Werkstoffe mit kryogener Minimalmengenschmierung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN: 978-3-8027-8921-2
- Band 104 Bathe, T.: Untersuchungen zur Topographie- und Umfangsgestalt-optimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2020, ISBN: 978-3-8027-8920-5
- Band 103 Hannich, S.: Experimentelle und simulative Untersuchungen zum stirnseitigen Fließbohren von Leichtbauwerkstoffen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019
- Band 102 Kansteiner, M.: Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8918-2
- Band 101 Fuß, M.: Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3802789120
- Band 96 Tiffe, M.: Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschälchleifens. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8914-4

- Band 94 Böhmer, J. C.: Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzschichtstrukturen beim Honen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN: 978-3-8027-8799-7
- Band 93 Hense, R.: Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Verdichterschaufeln. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelemente und funktionaler Oberflächenstrukturen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8797-3
- Band 91 Habermeier, J.: Technologische Untersuchungen der Bearbeitung nickel-reduzierter Stahlgusslegierungen für Turbinengehäuse. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrers. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8795-9
- Band 89 Özkaya, E.: FEM-based software system for the efficient 3D tapping simulation and tool optimization using CFD simulation. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5
- Band 88 Abrahams, H.: Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8792-8
- Band 87 Kirschner, M.: Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Mikrofinishen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4
- Band 85 Iovkov, I.: Technologische Analyse des Tiefbohrers mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8

- Band 83 Hartmann, H.: Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tief-ziehwerkzeuge. 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 Edeldstahls 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 Upmeyer, T.: Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9
- Band 73 Schlenker, J.: Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1

- Band 70 Sacharow, A.: Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4
- Band 69 Baschin, A.: Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- Band 66 Heilmann, M.: Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6
- Band 65 Scheidler, A. V.: Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3
- Band 64 Pantke, K.: Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0
- Band 63 Terwey, I.: Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9
- Band 62 Würz, E.: Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- Band 60 Felderhoff, J. F.: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2
- Band 59 Kessler, N.: Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8

- Band 58 Paffrath, K.-U.: Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1
- Band 57 Faraz, A.: Experimental Study on Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4
- Band 56 Hossam, M.: Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1
- Band 55 Kersting, P.: Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7
- Band 54 Marschalkowski, K.: Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- Band 53 Weckerle, T.: Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0
- Band 52 Kahleyß, F.: Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünffachsignen 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 fünffachsigne 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 Werkzeugund 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 Löbbe, H.: Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- Band 17 Finke, M.: Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X
- Band 16 Liedschulte, M.: Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- Band 15 Buschka, M.: Formgedächtnistechnik – Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3
- Band 14 Meng, J.: Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 13 Bruchhaus, T.: Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 12 Mehnen, J.: Evolutionäre Flächenrekonstruktion. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 11 Schulte, K.: Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 10 Schroer, M.: Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0

- Band 9 Schneider, M.: Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 8 Albersmann, F.: Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9
- Band 7 Mumm, A.: Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6
- Band 6 Gillmeister, F.: Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4
- Band 5 Thamke, D.: Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enselmann, A.: HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, 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

