

# **Hochleistungsprozesskette zur effizienten Massenfertigung von Innengewinden in Aluminiumgussgehäusen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Dr.-Ing.**  
von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

**Nils Felinks M.Sc.**  
aus  
Witten

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2024

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege

**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](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN: 978-3-8027-8931-1

## Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Dem Leiter des Instituts für Produktionsmanagement und -technik (IPTM) der TU Hamburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Hendrik Dege, gilt mein Dank für die Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher, dem Vorstand des Instituts für Fertigungstechnik und Photonische Technologien (IFT) der TU Wien, für die Übernahme des zweiten Koreferats sowie Herrn apl. Prof. PD Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Teile der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts "Technologische Grundlagenuntersuchung eines neuen Hochleistungsprozesses zur Herstellung von Innengewinden und mikrostrukturbasierte Charakterisierung von deren Leistungsfähigkeit" entstanden, für dessen Förderung ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken möchte. Weiterhin danke ich den Technikern, die zur praktischen Umsetzung meiner experimentellen Untersuchungen beigetragen haben.

Den Kollegen der Abteilung Zerspanung danke ich für ihre Unterstützung, die freundliche Arbeitsatmosphäre und den offenen Austausch. Hervorzuheben sind dabei meine Kollegen und Freunde Erik Krumme, Robert Schmidt und Julian Gerken die mir in der entscheidenden Phase Motivation und Unterstützung gaben, um meine Dissertation zu vollenden. Ein besonderer Dank gilt meinem Freund und Bürokollegen Timo Rinschede für die Unterstützung auf dem gemeinsamen Weg zur Promotion und die erfolgreiche Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten. Weiterhin danke ich meinem Freund Marius Hoff und meinem Bruder Jan Felinks für die Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit. Für die Unterstützung bei der Durchführung experimenteller Arbeiten bedanke ich mich bei den Profi-Hiwis Till Overberg, Philip Frank und Erik Krumme. Schließlich gilt mein Dank auch meinen Freunden Max Metzger und Moritz Fuß, die mich seit meinem ersten Tag am ISF sowie darüber hinaus motiviert und unterstützt haben.

Ich möchte besonders meinen Eltern, meinem Bruder sowie meinen Freundinnen und Freunden für den stetigen Rückhalt und die Unterstützung danken, die mir auf meiner akademischen Reise sowie in allen anderen Lebensbereichen Kraft und Selbstvertrauen gegeben haben.

**Nils Felinks**

**Dortmund, Dezember 2024**



## Kurzfassung

In der Automobilindustrie gilt es, Fertigungsprozesse hinsichtlich maximaler Produktivität und Wertschöpfung zu optimieren, um geringe Herstellungskosten und effiziente Produktionsabläufe in der Großserie zu erzielen. Neben der Verringerung der Taktzeit durch neuartige Fertigungsverfahren ist es darüber hinaus möglich, durch den Einsatz von Minimalmengenschmierung den Energiebedarf in der Massenfertigung zu reduzieren. Diese Ansätze zur Prozessoptimierung lassen sich insbesondere bei der Bearbeitung von Aluminiumlegierungen einträglich umsetzen, da diese zum einen sehr gute Bearbeitungseigenschaften besitzen und zum anderen für Kfz-Komponenten, wie bspw. Motorgehäuse, eingesetzt werden, die in sehr hohen Stückzahlen produziert werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wird das Ziel verfolgt, am Beispiel eines Aluminiumguss-Elektromotorgehäuses die Potenziale des Hochvorschubbohrens sowie des helikalen Gewindeformens hinsichtlich Produktivitäts- und Ressourceneffizienzsteigerungen darzustellen. Basierend auf grundlagenorientierten Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Eingangsgrößen wird eine Prozesskette entworfen, die die hohen Anforderungen an Prozess- und Bauteilqualität in der Massenfertigung erfüllt sowie eine signifikante Verringerung der Taktzeit sowie des Energiebedarfs erzielt.

Die experimentellen Untersuchungen zum Hochvorschubbohren in AlSi10Mg zeigten zunächst, wie die Prozessgrößen Vorschub, KSS-Konzept und Werkzeugmodifikationen insbesondere den kritisch zu bewertenden Spanabtransport beeinflussen. Hinsichtlich der Gewindebearbeitung wurde das innovative Helikalgewindeformen analysiert. Es gelang des Weiteren, mittels eines neu entwickelten Versuchsaufbaus den speziellen Formprozess zu analysieren. Weiterhin wurde der Einfluss des Vorbohrdurchmessers, der Drehzahl sowie des Schmierstoffkonzepts auf Prozess- und Gewinde untersucht. Die entwickelte Methodik zur Gewindecharakterisierung ermöglicht es, den Einfluss der genannten Prozessgrößen spezifisch zu analysieren und anderen Verfahrensvarianten gegenüberzustellen. Schließlich wurden die entwickelten Hochleistungstechnologien einer Referenzprozesskette zur Innengewindefertigung eines E-Motorgehäuses gegenübergestellt und in Bezug auf Produktivität und Energiebedarf bewertet.



## **Abstract**

In the automotive industry, manufacturing processes must be optimized with regard to maximum productivity and added value in order to achieve low manufacturing costs and efficient production processes in mass production. In addition to reducing cycle times through innovative manufacturing processes, it is also possible to reduce energy demand in mass production through the use of minimum quantity lubrication. These approaches to process optimization are particularly profitable when used in the machining of aluminum alloys. Such alloys have very good machining properties and are used for automotive components, like engine housings, which are produced in very high quantities.

This dissertation demonstrates the potential of high-feed drilling and helical thread forming to increase productivity and resource efficiency. It uses the example of a cast aluminum electric motor housing. Based on basic research on the influence of different input variables, a process chain is designed that meets the high demands on process and component quality in mass production and achieves a significant reduction in cycle time and energy consumption.

The experimental investigations into high-feed drilling in AlSi10Mg demonstrated how the process variables feed rate, coolant concept and tool modifications particularly influence the critical chip transport. With regard to thread machining, the innovative helical thread forming was analyzed. In this context the special forming process was analyzed using a newly developed test setup. Furthermore, the influence of the pilot hole diameter, the speed and the lubricant concept on the process behavior and thread quality was investigated. The methodology developed for thread characterization allows for a specific analysis of the influence of the aforementioned process variables and a comparison with other process variables. The high-performance technologies developed were then compared with a reference process chain for the internal thread production of an electric motor housing with regard to productivity and energy consumption.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>III</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1 Aluminiumgusskomponenten im Automobilbau .....	5
2.2 Bohrbearbeitung .....	9
2.3 Innengewindebearbeitung .....	14
2.3.1 Grundlagen metrischer ISO-Gewinde .....	14
2.3.2 Gewindebohren .....	18
2.3.3 Gewindefräsen.....	20
2.3.4 Gewindeformen .....	23
2.3.5 Sonderverfahren für Aluminiumwerkstoffe .....	26
2.4 Energie- und Ressourceneinsatz in der spanenden Fertigung.....	31
<b>3 Zielsetzung und Methodik</b> .....	<b>37</b>
<b>4 Experimentelle Randbedingungen</b> .....	<b>41</b>
4.1 Werkstoff .....	41
4.2 Bohrwerkzeuge .....	42
4.3 Gewindewerkzeuge .....	44
4.4 Werkzeugmaschinen und Kühlschmierstoffe .....	48
4.5 Mess- und Analysetechnik .....	52
<b>5 Grundlagenuntersuchungen zum Hochvorschubbohren</b> .....	<b>59</b>
5.1 Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen .....	59
5.2 Analyse der Spanform .....	68
5.3 Analyse der Bohrungsqualität .....	75
<b>6 Grundlagenuntersuchungen zum Helikalgewindeformen</b> .....	<b>85</b>
6.1 Analyse des Gewindeformvorgangs .....	85
6.2 Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen .....	87
6.3 Analyse der Gewindeformqualität.....	93
6.3.1 Gestalt .....	93
6.3.2 Profil.....	96

6.3.3	Flankenoberfläche .....	100
6.3.4	Mikrostruktur .....	104
<b>7</b>	<b>Vergleich konventioneller Innengewinde-Fertigungsverfahren.....</b>	<b>109</b>
7.1	Analyse der Bearbeitungsprozesse.....	110
7.2	Analyse der Gewindequalität.....	116
<b>8</b>	<b>Einsatzversuche zur Innengewindefertigung von E-Motorgehäusen</b>	<b>123</b>
8.1	Auslegung der Bearbeitungsaufgabe .....	123
8.2	Analyse der Fertigungszeiten .....	126
8.3	Analyse des Energieeinsatzes .....	129
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>139</b>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
Al	Aluminium
BAZ	Bearbeitungszentrum
bspw.	beispielsweise
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond-like Carbon
E-Antrieb	Elektroantrieb
ED	Einschaltdauer
E-Motor	Elektromotor
EN	Europäische Norm
FA	Fettalkohol
Fe	Eisen
G 2,5	Auswuchtgüte 2,5
GEW	Gewinde
HM	Hartmetall
HSK	Hohlschaftkegel
HSS	Schnellarbeitsstahl
HSSE	Schnellarbeitsstahl mit 8% Co
HV	Härte nach Vickers
IO	EIN-AUS-Signal
ISF	Institut für Spanende Fertigung
ISO	International Organization for Standardization
KSS	Kühlschmierstoff
Mg	Magnesium
MMS	Minimalmengenschmierung
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MOD	Modifiziert
NC	numerisch gesteuert
O	Sauerstoff
PkW	Personenkraftwagen

---

PM	Pulvermetallurgie
SE	synthetischer Ester
Si	Silizium
Sr	Strontium
STD	Standard
ta-C	tetraedrisch amorpher Kohlenstoff
Ti	Titan
Ti(C,N)	Titancarbonitrid
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiN	Titannitrid
u. a.	unter anderem
V	Vanadium
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Wolfram
WZ	Werkzeug
WZW	Werkzeugwechsel
z. B.	zum Beispiel
Zn	Zink

## Formelzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
A	%	Bruchdehnung
A	mm <sup>2</sup>	Spanungsquerschnitt
a <sub>p</sub>	mm	Schnitttiefe
b	mm	Breite
D	mm	Nenndurchmesser
d	mm	Durchmesser
D <sub>1</sub>	mm	Nennkerndurchmesser
D <sub>2</sub>	mm	Flankendurchmesser
d <sub>KB</sub>	mm	Kernbohrdurchmesser
d <sub>s</sub>	mm	Schaftdurchmesser
d <sub>WZ</sub>	mm	Werkzeugdurchmesser
E	J	Energie
E <sub>E</sub>	kWh/m <sup>3</sup>	Energieäquivalent
El	mm	Grundabmaß
Em		Toleranzklassenfaktor
f	mm	Vorschub
F	Bilder/s	Bildwiederholrate
F <sub>c</sub>	N	Schnittkraft
F <sub>f</sub>	N	Vorschubkraft
f <sub>M</sub>	Hz	Messfrequenz
F <sub>p</sub>	N	Passivkraft
F <sub>x</sub>	N	Radialkraft in x-Richtung
F <sub>y</sub>	N	Radialkraft in y-Richtung
F <sub>z</sub>	N	Axialkraft
f <sub>z</sub>	mm	Zahnvorschub
H	mm	Gewindesteigung
h	mm	Höhe
H <sub>1</sub>	mm	Profilhöhe am Nennprofil
J <sub>s</sub>	mm	Unteres Grenzmaß
l	mm	Länge

$l_{\text{eff}}$	mm	Nutzlänge
$l_{\text{ges}}$	mm	Gesamtlänge
$m$	g	Masse
$M_B$	Nm	Bohrmoment
$M_z$	mm	Axialmoment
$n$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
$n_{\text{max}}$	$\text{min}^{-1}$	Maximaldrehzahl
$P$	mm	Gewindesteigung
$P$	W	Leistungsaufnahme
$p$	bar	Druck
$p_a$	bar	Außendruck
$P_D$	mm	Drallsteigung
$p_i$	bar	Innendruck
$P_{\text{max}}$	W	maximale Antriebsleistung
$p_{\text{max}}$	bar	Maximaldruck
$r$	mm	Radius
$R$		Spanraumzahl
$R$	mm	Nennradius
$R_a$	$\mu\text{m}$	Mittenrauwert
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
$R_t$	$\mu\text{m}$	Maximale Rautiefe
$R_z$	$\mu\text{m}$	Rautiefe
$r_\beta$	mm	Schneidkantenradius
$s$	mm	Sicherheitsabstand
$s_d$	$\mu\text{m}$	Schichtdicke
$t$	s	Zeit
$t$	mm	Bearbeitungstiefe
$T$	$^\circ\text{C}$	Temperatur
$T_D$	mm	Toleranz des Nenndurchmessers
$T_{D2}$	mm	Toleranz des Flankendurchmessers
$T_{d2}$	mm	Toleranz des Werkzeug-Flankendurchmessers
$t_g$	s	Grundzeit

---

$T_g$	s	Gesamtgrundzeit
$t_h$	s	Hauptzeit
$T_h$	s	Gesamthauptzeit
$t_n$	s	Nebenzeit
$T_n$	s	Gesamtnebenzeit
$t_{\text{brems}}$	s	Zeit Bremsen
$t_{\text{stat}}$	s	Zeit stationärer Bereich
$U$	V	Spannung
$\dot{V}$	$\text{m}^3/\text{h}$	Volumenstrom
$v_c$	m/min	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
$v_u$	m/min	Umfangsgeschwindigkeit
$x$	mm	Strecke in x-Richtung
$y$	mm	Strecke in y-Richtung
$z$		Schneidenanzahl
$z$	mm	Strecke in z-Richtung
$\alpha$	°	Flankenwinkel
$\alpha_0$	°	Freiwinkel
$\beta_0$	°	Keilwinkel
$\gamma_0$	°	Spanwinkel
$\delta$	°	Drallwinkel
$\Delta xy$	mm	mittlerer horizontaler Abstand
$\Delta z$	mm	axialer Wegunterschied
$\Delta\varphi$	°	Drehwinkelunterschied
$\eta$	°	Wirkrichtungswinkel
$\nu$	$\text{mm}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität



## 1 Einleitung

Die industrielle Massenfertigung von Kraftfahrzeugen ist aufgrund verschiedener globaler Einflüsse aus Wirtschaft und Gesellschaft einem stetigen Wandel unterworfen. Insbesondere erfüllen auch technische Innovationen seitens der Produkt- und Fertigungstechnologien den Innovationsbedarf in der Herstellung von Fahrzeugkomponenten. Am Beispiel der mechanischen Bearbeitung von Aluminiumgussgehäusen für Pkw-Antriebe zeigt sich, dass konsequente Technologieentwicklungen dazu beitragen, sowohl Energie- und Kosteneffizienz als auch Produktivität und Werkzeugstandzeit signifikant zu steigern [Iov16; PBP\*22]. Innovative Fertigungsprozesse leisten somit speziell unter herausfordernden ökonomischen Bedingungen wie zum Beispiel stark gestiegenen Energie- und Betriebskosten, einen Beitrag dazu, die Fahrzeugproduktion in Europa rentabel fortzuführen. Diesbezüglich stehen derzeit besonders Technologien für die Elektromobilität im Fokus, an die hohe technische und ökologische Anforderungen gestellt werden. Neben einerseits geringen Maß- und Lagetoleranzen im Motorgehäusebau, die den Wirkungsgrad des Elektroantriebs direkt beeinflussen [Mav24], gilt es andererseits den Energiebedarf von Fertigungsprozessen in der gesamten Lieferkette zu senken. Konkret verursacht die Herstellung von Elektrofahrzeugen derzeit in etwa doppelt so viele CO<sub>2</sub>-Emissionen wie die von herkömmlich angetriebenen Pkw, wodurch energieeffiziente Fertigungstechnologien ein hohes Potenzial zukommt [Mer24].

Die industriell gängige Prozesskette zur Herstellung von Innengewinden in Aluminiumgussgehäusen besteht in der Regel aus zwei Prozessschritten, die verschiedene Potenziale zur Steigerung der Produktivität bieten. Zum einen ist bei der initialen Fertigung der Vorbohrung der Vorschub aufgrund der herausfordernden Spannbildung von AlSi-Werkstoffen trotz ihrer vergleichsweise geringen Bruchdehnung begrenzt. Insbesondere bei der Trockenbearbeitung steigern Adhäsionsneigung und unzureichender Späneabtransport den Aufwand zur Prozessauslegung, um die geforderte Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit bei gegebener Prozesssicherheit in der Serienfertigung sicherzustellen. Zum anderen mindern hohe Haupt- und Nebenzeiten beim nachfolgenden Gewindeformen die Gesamtproduktivität.

tät der Prozesskette. Trotz der sehr guten Verformbarkeit von AlSi-Legierungen ist die Umfangsgeschwindigkeit bei der drehzahlsynchronen Vorschubbewegung technisch begrenzt. Durch das Abbremsen am Bohrungsgrund sowie die steigungsgebundene Ausfahrbewegung ergibt sich schließlich der hohe Nebenzeitanteil, wodurch die konventionelle Verfahrensvariante ein hohes Potenzial zur Taktzeitverringerung bietet [Bos16]. Schließlich ermöglicht der Einsatz von Minimalmengenschmierung (MMS) beim Bohren und Gewinden durch kleinste, in Druckluft verdünte Schmierstoffmengen eine signifikante Verringerung des Energieeinsatzes seitens der notwendigen Kühlschmierstoffversorgung. Des Weiteren trägt die MMS-Bearbeitung, insbesondere in der Serienfertigung von Aluminiumkomponenten von Aluminiumgusskomponenten, zur Steigerung der Prozesssicherheit und Produktivität bei [DH07; WB 23; Wei99].

Entsprechend leistet diese Arbeit durch den Transfer von grundlegenden Erkenntnissen zum Hochvorschubbohren sowie zum Helikalgewindeformen von AlSi10Mg über ein Anwendungsbeispiel einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Produktivität und Energieeffizienz in der Gehäusefertigung. Zunächst werden die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eingangsparametern auf das Prozessverhalten sowie die Bauteilgüte experimentell untersucht. Bei der Bohrbearbeitung steht insbesondere das Prozessverständnis bzgl. des Spanabtransports unter MMS im Vordergrund dieser Arbeit. Seitens der Gewindeherstellung wird das übergeordnete Ziel verfolgt, den Helikalgewindeformprozess hinsichtlich unkritischer mechanischer Werkzeugbelastungen auszulegen und gleichzeitig die Gewindequalität zu steigern. Aufbauend auf der dabei entwickelten Methodik werden dem helikalen Gewindeformen vier weitere Gewindefahren gegenübergestellt. Um die identifizierten Potenziale der Hochleistungsprozesskette aus Hochvorschubbohren und Helikalgewindeformen zur Steigerung der Produktivität und Energieeffizienz zu quantifizieren, wird die Leistungsfähigkeit der Prozesskette zur Innengewindeherstellung anhand eines Fertigungsbeispiels eines Elektromotorgehäuses für einen elektrisch angetriebenen Pkw bewertet. Die entwickelten Technologien sollen erweiterte Möglichkeiten zur Optimierung von Serienfertigungsprozessen für die Fahrzeugkomponenten ermöglichen. Mithilfe des erweiterten Prozessver-

ständnisses zum Hochvorschubbohren unter MMS sowie erstmalig durchgeführter Untersuchungen zum Helikalgewindeformen soll der Stand der Technik zur Bearbeitung von AlSi-Legierungen in den genannten Bereichen erweitert werden.



## 2 Stand der Technik

In der industriellen Serienfertigung von Kfz-Komponenten wird im Zusammenhang der Optimierung von Bearbeitungsprozessen in vielen Fällen die Verringerung der Taktzeit als quantifizierbare Größe zur Bewertung herangezogen. Darüber hinaus gilt es jedoch, weitere technische Kriterien zu analysieren, um eine ganzheitliche Betrachtung der Prozessketten durchzuführen. Zur umfassenden Bewertung der Hochleistungsprozesskette zur Innengewindefertigung in Aluminiumgussgehäusen gibt dieses Kapitel zunächst einen Überblick über werkstofftechnische Grundlagen zur betrachteten AlSi10Mg-Legierungsgruppe. Anschließend werden für diese Arbeit relevante Aspekte der Bohrbearbeitung erläutert. Dabei wird neben dem Einsatz von Minimalmengenschmierung insbesondere auf grundlegende Erkenntnisse zum Bohren von Aluminiumgusswerkstoffen eingegangen. Die bestehenden Verfahren zur Innengewindefertigung werden darauffolgend im Kontext der Bearbeitung von Aluminiumgusslegierungen gegenübergestellt. Schließlich wird der Ressourceneinsatz in der spanenden Fertigung diskutiert, um die betrachtete Hochleistungsprozesskette auch unter diesem Gesichtspunkt zu beurteilen.

### 2.1 Aluminiumgusskomponenten im Automobilbau

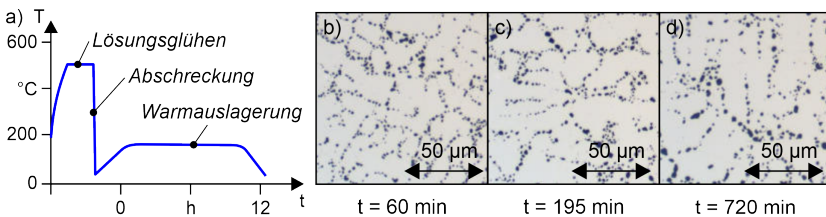
In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Erkenntnisse zur Legierungszusammensetzung, Wärmebehandlung und Zerspanbarkeit von Aluminiumgusswerkstoffen dargestellt. Anschließend werden diese Eigenschaften auf die Anforderungen von Leichtbau-Komponenten in Kraftfahrzeugen übertragen.

#### Eigenschaften von Aluminiumgusswerkstoffen

Das herausragende Festigkeit-Dichte-Verhältnis von aushärtbaren Aluminiumgusswerkstoffen ist, neben den enthaltenen Legierungselementen insbesondere, auf die Prozessbedingungen bei der Urformung sowie der anschließenden Wärmebehandlung zurückzuführen. Die im Automobilbau am häufigsten verwendeten Gruppen werden entsprechend ihrer Hauptlegierungsbestandteile in AlSi-, AlSiMg- und AlSiCu-Varianten unterteilt [DIN21]. Durch den im Vergleich zu den Aluminiumknetlegierungen relativ hohen Siliziumgehalt wird eine gute Gießbarkeit erreicht. Die betrachtete Legierung

AlSi10MnMg wird in der Urformung dünnwandiger, verrippter Gussstücke verwendet. Das inhomogene Gefüge ist durch das feine Si-Eutektikum gekennzeichnet, welches die Dendriten des  $\alpha$ -Mischkristalls umgibt. Mit weiteren intermetallischen Phasen wie z. B.  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$  bilden sie die typische Gefügestruktur [Ost14]. Durch die Zugabe von Mangan bei gegebenem Eisengehalt im Verhältnis 1:2 wird die Verarbeitbarkeit in der Serienfertigung durch Druckguss aufgrund verringerter Klebneigung zusätzlich verbessert [Ruž19]. Die Prozessführung während des Gussvorgangs, bspw. in Form der Temperaturführung bzw. Erstarrungsgeschwindigkeit, beeinflusst in Form von Seigerungen und Porenbildung die grundlegenden Eigenschaften der gegossenen Werkstücke [L11].

Die spezielle Einstellung der anwendungsspezifischen Anforderungen gegenüber dem Gusszustand wird mittels einer Wärmebehandlung erzielt. Dabei werden die Mechanismen der Ausscheidungshärtung im Wesentlichen durch die Beigabe von Magnesium ermöglicht, wodurch sich die für AlSi-Legierungen charakteristisch guten Bruchdehnungs- und Zähigkeitseigenschaften ergeben [SS10]. Bei der vorwiegend angewandten T6-Wärmebehandlung wird zunächst ein Lösungsglühen durchgeführt. Die grundlegenden Prozessschritte bzgl. zeitlicher Temperaturführung sowie verschiedener Stufen der Siliziumausformung in Abhängigkeit der Lösungsglühdauer sind in **Abbildung 2.1** dargestellt.



**Abbildung 2.1:** a) Schematischer Temperaturverlauf zur Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen nach [Ost14]; b)-d) AlSi-Mikrostruktur mit Siliziumausformung bei variierender Lösungsglühdauer nach [War04]

Beim Glühen gehen u. a. die Magnesium- und Siliziumatome bei einer Temperatur von ca.  $T = 530\text{...}550\text{ °C}$  in Lösung. Nachdem der Mischkristall nach

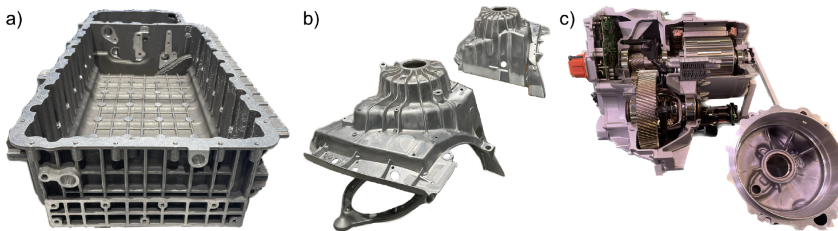
einer Glühdauer von ca. 2 bis 3,5 Stunden (abhängig von der Bauteil-Wandstärke) übersättigt, wird die Diffusion der beweglichen Legierungselemente durch schnelles Abkühlen bspw. in Wasser gestoppt [HB10; MS12]. Anschließend erfolgt die Warmauslagerung des übersättigten Mischkristalls, bei der die Fremdatome aus der  $\alpha$ -Phase gedrängt werden. Es bilden sich  $Mg_2Si$ -Ausscheidungen an Gitterfehlern, wie beispielsweise Leerstellen, Versetzungen bzw. Korngrenzen, wodurch die gewünschte Festigkeitssteigerung herbeigeführt wird [The08]. Die letztendlich erzielbare Festigkeit des Bauteils ist durch die gezielte Anpassung der Auslagerungszeit und -temperatur einstellbar [FMB15; L11]. Entsprechend sind im Druckguss mit anschließender T6-Wärmebehandlung nach DIN EN 1706 Zugfestigkeiten zwischen  $R_m = 200 \dots 270$  MPa und Dehngrenzen von  $R_{p0,2} = 120 \dots 150$  MPa bei Bruchdehnungen im Bereich von  $A = 4 \dots 12$  % zu erreichen [DIN EN 1706].

Die demnach, mittels spezifischer Wärmebehandlung bzw. Legierungszusammensetzung, einstellbaren mechanischen Eigenschaften von Aluminiumgusslegierungen beeinflussen folglich ihre Zerspanbarkeit. In diesem Zusammenhang tragen intermetallische Hartphasen wie  $Al_2O$  oder  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$  zum einen zur Bildung von kurzen Spanformen bei. Dies ist als günstig zu bewerten, da Al-Legierungen bei der spanenden Bearbeitung aufgrund ihrer hohen Duktilität im Allgemeinen zur Langspanbildung neigen [Klo18]. Zum anderen geht im Allgemeinen mit steigendem Siliziumgehalt ein intensiver Abrasivverschleiß bei verringerten mechanischen Werkzeugbelastungen einher. Darüber hinaus macht die ausgeprägte Adhäsivneigung den Einsatz von beschichteten HM-Werkzeugen bzw. keramischen Schneidstoffen zur Hochleistungsbearbeitung erforderlich [Aky16; Ost14].

### **Anwendungsbeispiele aus der Automobilindustrie**

Die Verwendung von Aluminiumlegierungen im Kraftfahrzeugbau ermöglicht es, die Vorteile von Leichtbauwerkstoffen für verschiedene Zwecke zu nutzen. Zum einen tragen Komponenten aus Al-Werkstoffen durch ihr geringes spezifisches Gewicht bei gegebener Festigkeit zur signifikanten Reduzierung des Fahrzeuggewichts bei. Beispielsweise durch die Substitution von Stahl durch verschiedene, vergleichsweise leichte Aluminiumwerkstoffe lässt sich im Karosseriebau bis zu 42 % Gewichtsersparnis erzielen

und somit ein signifikanter Beitrag zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs leisten [Int21]. Zum anderen ist durch die hervorragende Bearbeitbarkeit von Aluminiumlegierungen bereits zu Beginn der Wertschöpfungskette eine effiziente, produktive Massenfertigung von Kfz-Komponenten umsetzbar. Die endkonturnahe Urformung von Druckgussteilen, die ca. ein Drittel aller verarbeiteten Aluminiumprodukte ausmachen, reduziert die Masse des z. B. durch Zerspanung abzutragenden Materials erheblich. So sind ca. 25 % des in der Nachbearbeitung produzierten Ausschusses – überwiegend in Form von Spänen – nicht wertschöpfend nutzbar und werden in den Recyclingkreislauf zurückgeführt [AC12; Her13]. Neben konventionell im Antriebsstrang verbauten Gehäusen aus Aluminiumguss ersetzen einige Automobilhersteller im Karosserierohbau aufwändig gefügte Baugruppen durch einzelne gegossene Großbauteile. **Abbildung 2.2** zeigt beispielhaft Serienbauteile für Elektrofahrzeuge aus Aluminiumgusswerkstoffen.



**Abbildung 2.2:** Beispiele für im Aluminiumdruckgussverfahren hergestellte Serienbauteile: a) Batterie-Gehäusewanne; b) Achsträger und c) E-Motorgehäuse

Die Massenfertigung von Großbauteilen durch das sogenannte Gigacasting gilt für Stückzahlen über 1 Million Bauteile pro Jahr als kosteneffizient. Automobilhersteller wie *Volvo* oder *Tesla* setzen diese Technologie bereits in Serie bei volumenstarken Kfz-Baureihen ein und erzielen dadurch signifikante Effizienzsteigerungen [AUT22; Ciu24]. Beispielsweise lassen sich Karosseriebaugruppen, die sich aus über 300 Einzelkomponenten zusammensetzen, durch ein einzelnes Großbauteil ersetzen. Entsprechend verringert sich der Produktionsaufwand durch substituierte Schweißoperationen etc. [Stö24]. Wärmebehandlung und mechanische Nachbearbeitung von Druckgusshalbzeugen im Kraftfahrzeugbau erfordern effiziente Technologien,

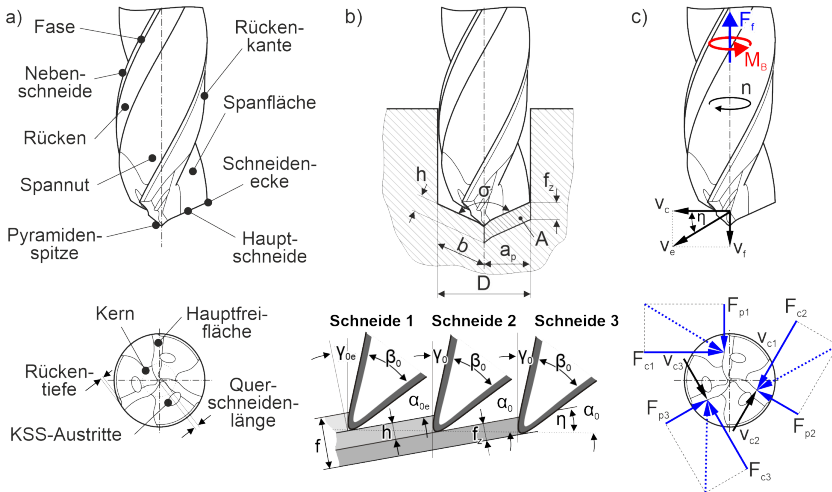
um entsprechende Kosteneffizienzpotentiale zu nutzen. Hochkomplexe Antriebskomponenten aus dem elektrischen Antriebsstrang mit hoher Leistungsdichte stellen bspw. hohe Anforderungen an die Bearbeitungstechnologie, um die Vorgaben bzgl. Maßgenauigkeit, Dichtheit und Oberflächengüten zu erzielen [AUT23; Mas23; SKM\*22]. So erfordern z. B. dünnwandige Strukturen von Batterie- oder Motorgehäusen den Einsatz komplexer Werkzeugsysteme [mav24; WB 23].

## 2.2 Bohrbearbeitung

Im Folgenden werden die Grundlagen des Fertigungsverfahrens Bohren in relevanten Aspekten erläutert. Im Speziellen liegt dabei der Fokus auf den mechanischen Werkzeugbelastungen, der Spanform sowie der Bohrungsgüte im Zusammenhang der spanenden Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen.

Die Schnittbewegung wird beim Bohren durch die Rotation des Werkzeugs um die Bohrungsachse ausgeführt. Dabei ist die effektive Schnittgeschwindigkeit entlang der Schneide linear abhängig vom Radius. Entsprechend ergibt sich an der Schneidenecke die maximale und an der Bohrermitte die minimale Schnittgeschwindigkeit [DIN98]. Die Vorschubgeschwindigkeit ist beim Bohren in Richtung der Werkzeugrotationsachse gerichtet und ergibt sich aus der Multiplikation von Drehzahl und Vorschub. Die getrennten Späne werden durch die Spannut aus der Bohrung heraus transportiert. In der industriellen Anwendung wird die Spanabfuhr in der Regel durch Kühlschmierstoff unterstützt, der bei innengekühlten Bohrern durch Kanäle im Werkzeug zur Wirkstelle zugeführt wird. Eine zusätzliche Aufgabe des KSS-Mediums ist die Kühlung der Schneiden, um bspw. den Verschleiß zu minimieren. Insbesondere an den Schneidenecken und den Führungsfasen treten aufgrund der hohen Wirkgeschwindigkeiten vorwiegend thermisch bedingte Verschleißarten auf [DT11; DIN03a]. **Abbildung 2.3** erläutert den Werkzeugaufbau, Spanungsgrößen sowie Schnittkinematik am Beispiel eines dreischneidigen Bohrwerkzeugs.

Neben thermischen Werkzeugbelastungen tragen die mechanischen Belastungen zum Werkzeugverschleiß bei. Im Zentrum des Bohrers wirken allgemein die größten Axialkräfte auf die dort befindlichen Querschnitten. Der Anteil der Gesamtlast beträgt dort in etwa 65-75 %.



**Abbildung 2.3:** Benennung und Definitionen nach [DIN98], b) Spannungsgrößen und Schnittkinematik nach [Klo18; Koe04] und c) mechanische Werkzeugbelastungen nach [Spu61] für dreischneidige Wendelbohrer







Da das Material bei den dort vorherrschenden geringen Schnittgeschwindigkeiten vorwiegend gequetscht wird, sind die Werkzeugspitzen allgemein mit stark negativen Spanwinkeln geschliffen [Koe04].

Mit der Erhöhung des Vorschubs geht im Allgemeinen die Steigerung der gemessenen Vorschubkräfte einher, da sich der Spannungsquerschnitt ( $A = f \cdot a_p$ ) proportional mit dem Vorschub erhöht. Die Wirksumme der Passivkräfte ergibt sich bei symmetrischen Bohrwerkzeug idealisiert zu Null, wodurch die Torsion nicht beeinflusst wird. Diese wird hauptsächlich durch die Schnittkräfte an den Hauptschneiden sowie Reibkräfte an den Fasen hervorgerufen, welche sich zum Bohrmoment  $M_B$  summieren [Klo18].

Im Zusammenhang der Bohrbearbeitung des Aluminiumgusswerkstoffes AlSi9Cu3 wurde der Einfluss des KSS-Konzepts auf die mechanischen Werkzeugbelastungen analysiert. So wurden beim Einsatz von Wendeltiefbohrern mit Referenz-Schnittwerten ( $v_c = 175 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,3 \text{ mm}$ ) bei der Emulsions- und MMS-Schmierung vergleichbare Bohrmomente ermittelt. Hingegen stieg das Niveau der Vorschubkraft bei der Bearbeitung mit Minimalmengenschmierung um 60 % gegenüber Emulsion an. Dabei sind Materialanhaftungen an den Querschneiden, die sich bei den erhöhten Prozess-temperaturen insbesondere an den Freiflächen anlagern, als Hauptursache für die signifikanten Steigerungen der Vorschubkraft zu nennen. Darauf aufbauende Versuchsreihen zum Einfluss des Vorschubs ( $f = 0,1...4 \text{ mm}$ ) unter MMS zeigten einen proportionalen Anstieg der Vorschubkraft [Iov16]. Vergleichbare Erkenntnisse wurden bei Untersuchungen mit Bohröl und MMS zum Bohren von AlSi7Mg mit DLC-beschichteten Werkzeugen gewonnen. Durch den Einsatz einer Öl-Überflutungsschmierung konnten die Vorschubkräfte insbesondere mit beschichteten Werkzeugen gesenkt werden. Bei Betrachtung der Auswirkungen auf die Verschleißbeständigkeit stellt sich die Wirkung der Kühlschmierstrategie als bedeutend einflussreicher gegenüber der Werkzeugbeschichtung heraus [BDM\*02]. In Untersuchungen zur Bohrbearbeitung verschieden legierter Aluminiumgussvarianten mit gerade genuteten, unbeschichteten Senkbohrern wurde der Einfluss der Legierungselemente Kupfer und Silizium betrachtet. Die Ergebnisse zur Bearbeitung der Legierung AlSi7Mg unter Emulsionsschmierung ergab, dass einerseits durch die abrasiv wirkenden Si-Phasen vergleichsweise hohe Vorschubkräfte und Verschleißerscheinungen auftraten. Andererseits wurde insbesondere im Vergleich zu Cu-legierten Varianten verstärkt eine Aufbauschneidenbildung aufgrund der Magnesium-Zugabe festgestellt [BZS\*19].

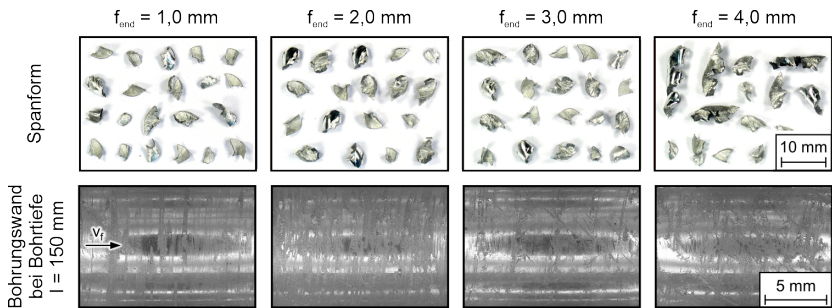
Neben den mechanischen Werkzeugbelastungen gilt die Spanform als weiteres wichtiges Kriterium zur Bewertung der Zerspanbarkeit. Besonders bei der Bohrbearbeitung von Aluminiumlegierungen, die im Allgemeinen als langspanend gelten, ist der prozesssichere Abtransport der Späne aus der Bohrung als essenzielle Voraussetzung für den Einsatz in der Serienfertigung anzusehen. Zur Charakterisierung des Spanvolumens für Werkzeugmaschinenbau, Recycling, Werkzeuggestalt etc. wurden verschiedene

Spanformklassen definiert und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit in der industriellen Praxis bewertet. Als ungünstig gelten demnach Band- und Wirrspäne, die bspw. als Folge der Fließspanbildung in der Aluminiumbearbeitung entstehen. Im Gegensatz dazu sind kurze Spanstücke, trotz des geringen Schüttvolumens, nur als bedingt prozesssicher für Serienprozesse anzusehen, da der Abtransport vom Werkzeug bzw. aus dem Bearbeitungsraum teilweise als herausfordernd gilt [DT11; Klo18]]. Eine Übersicht der Spanformklassen gibt **Abbildung 2.4**.

Spanform	Bandspäne	Wirrspäne	Wendel- späne		Spiralspäne	Spanbruch- stücke
			 <i>lang</i>	 <i>kurz</i>		
Spanraum- zahl R	$\geq 90$		$\geq 50$	$\geq 25$	$\geq 8$	$\geq 3$
Beurteilung	ungünstig		brau- chbar	gut		brauchbar

**Abbildung 2.4:** Spanformen [DT11; PL08]

Im Kontext der Bohrbearbeitung der Aluminiumgusslegierung AlSi12Cu mit Durchluft bzw. MMS wurden signifikante Unterschiede in der Spanform festgestellt. Durch die Schmierung der Kontaktzone durch die MMS wurde die Aufbauschneidenbildung minimiert, wodurch geringere Reibkräfte auftraten. Zusätzlich trägt der hohe Volumenstrom dazu bei, dass ablaufende Späne in Richtung der Bohrungswand geleitet werden. Das hat eine stärkere Krümmung zufolge, die zu kurzen Spänen führt [LTY04]. Eine weitere Methode, um günstige Spanformen zu erzielen, ist die Steigerung des Vorschubs. Beim anspruchsvollen Wendeltiefbohren von AlSi9Cu3 unter Einsatz von MMS werden bei Vorschub  $f = 3$  mm günstige Spanformen bei sehr hoher Produktivität erzielt, wie **Abbildung 2.5** zeigt. Bei weiterer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit wurde eine überproportionale Überhöhung der Spindeltriebsleistung bzw. der Vorschubkraft gemessen [lov16].



**Abbildung 2.5:** Einfluss des Vorschubs auf Spanform und Bohrungswand beim Wendettiefbohren von AlSi9Cu3 [lov16]

Werkzeugseitig kann die Spanform zum einen durch eine gezielt präparierte Werkzeugoberflächen-Topografie beeinflusst werden. So wurden Materialanhaftungen bei der MMS-Bohrbearbeitung von AlSi9Cu3 durch Polierschleifen der Spannuten reduziert, wodurch eine Vorschubkraftverringerung sowie eine günstigere Spanleitung erzielt wurden. Insbesondere hinter der Schneidkante konnte die Reibung verringert und somit ein verbesserter Spanablauf erzielt werden [Kip23]. Zum anderen kann eine diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung (DLC) neben gesteigerten Standzeiten auch zu kleineren Spankrümmungen und somit verbesserter Spanformung beitragen [BDM<sup>+</sup>02; FOO<sup>+</sup>04].

Weitere Zusammenhänge hinsichtlich Spanform und -abtransport sind in Bezug auf die Bohrungsgüte zu ziehen. Beim Hochvorschubbohren von AlSi9Cu3 mit MMS wurden nach Erreichen der Prozessgrenze ( $v_c = 175$  m/min,  $f > 3$  mm) erhebliche Beschädigungen der Bohrungswand festgestellt, welche durch großvolumige Späne verursacht wurden. Im Vergleich dazu wiesen die Bohrungswände unter Emulsions-Schmierung bzw. MMS bei  $f = 0,3$  mm geringe Oberflächenbeschädigungen auf, wie **Abbildung 2.5** zeigt [lov16]. Für den Werkstoff AlSi10Mg wurde in vergleichbaren Untersuchungen zum Tiefbohren ebenfalls festgestellt, dass sich die Rauheit beim MMS-Einsatz gegenüber anderen KSS-Konzepten erhöhte [Pa22]. Gesteigerte Schnittgeschwindigkeiten sowie MMS-Betriebsdrücke wirken sich bei der Aluminiumzerspanung in diesem Zusammenhang hingegen positiv auf Rauheit, Gratbildung und Rundheitsabweichungen aus

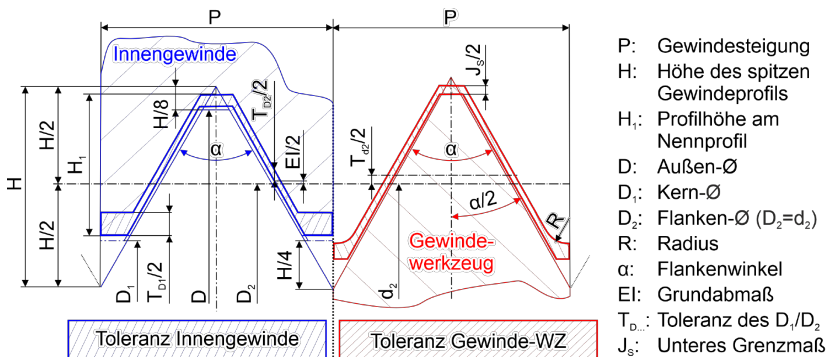
[PBP<sup>+</sup>22]. Der Einsatz von DLC-Beschichtungen in Verbindung mit Minimalmengenschmierung führte im Kontext der Bohrbearbeitung von AlSi7Mg zu gesteigerten Oberflächenqualitäten. Die guten Gleitreibungseigenschaften der Dünnschicht kann nach entsprechender Prozessauslegung den Spanabtransport erleichtern [BDM<sup>+</sup>02].

### 2.3 Innengewindebearbeitung

Zur Herstellung von Innengewinden werden in der industriellen Fertigung verschiedene spanende und umformende Fertigungsverfahren eingesetzt. Sie unterscheiden sich primär durch ihre Werkzeuggestalt sowie die Werkzeugbewegung. In diesem Unterkapitel werden zunächst grundlegende Eigenschaften und Toleranzen von ISO-Gewinden erläutert. Anschließend erfolgt die Beschreibung der gängigsten Verfahrensvarianten zur Innengewindebearbeitung mit Fokus auf die Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen.

#### 2.3.1 Grundlagen metrischer ISO-Gewinde

Zum Fügen von Konstruktionselementen sind lösbare Schraubenverbindung der am häufigsten eingesetzte Verbindungstyp im Maschinenbau. Durch das Eindrehen des Bolzensgewinde in das Muttergewinde entsteht durch die sich berührenden Schraubenflächen sowohl eine kraft- als auch formschlüssige Verbindung [DIN02]. **Abbildung 2.6** erläutert das Innengewinde- sowie das Werkzeugprofil mit den entsprechenden Begriffen.



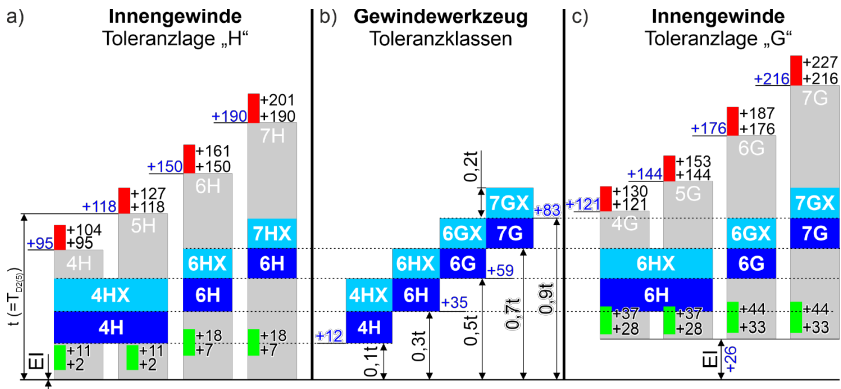
**Abbildung 2.6:** Profil und Begriffe metrischer ISO-Innengewinde (blau) und entsprechende Gewindewerkzeuge (rot) nach [DIN90; DIN17; DIN23]

Die Verbindungselemente werden in der Regel durch spanende oder umformende Fertigungsverfahren aus metallischen Werkstoffen hergestellt. Die dazu geltenden Normen legen die Maße bspw. für metrische ISO-Innengewinde fest. Das Profil des Innengewindes wird z. B. durch Gewindeformen als Schraubenlinie in die Bohrungswand eingebracht. Der Gewindetyp wird im Wesentlichen durch Nennprofil, Steigung und Nenndurchmesser definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird das metrische ISO-Gewinde der Größe M6 betrachtet, dessen Profil und Maße nach DIN ISO 68-1 definiert sind. Demnach beträgt der Flankenwinkel der Gewindegänge  $\alpha = 60^\circ$ , die Steigung am Kerndurchmesser  $P = 1$  und der Nenndurchmesser im Gewindegrund  $D = 6$  mm. Der Flankendurchmesser  $D_2$  wird am theoretischen Flankenzyylinder aufgetragen, dessen Fläche das Gewindeprofil so durchschneidet, dass die Höhe der geschnittenen Gewindetäler und -spitzen identisch ist. Der Kerndurchmesser  $D_1$  wird an den Spitzen des Profils als kleinster Durchmesser des Innengewindes bestimmt [DIN02; DIN23].

Da in der Regel fertigungsbedingte Abweichungen von den erläuterten Nennmaßen entstehen, werden nach DIN ISO 965-1 Toleranzen für metrische ISO-Gewinde definiert. Diese bestehen einerseits aus Toleranzgraden, die durch Ziffern (z. B. 4, 5, 6,...) beschrieben sind. Andererseits werden Toleranzfeldlagen in Form von Buchstaben (z. B. H, G,...) angegeben. Für Innengewinde sind gemäß gebräuchlichen Anforderungen die Grundabmaße EI in den Toleranzfeldlagen H (EI = 0) und G (EI > 0) abhängig von der Steigung angeben. ISO- oder DIN-Toleranzen für Flankenwinkel bzw. Steigung existieren derzeit nicht, wodurch die Spezifikationen als unvollständig beschrieben werden können [MMR<sup>+</sup>17]. **Abbildung 2.7** erläutert die Toleranzfelder für Flankendurchmesser, Gewindelehren und -werkzeuge am Beispiel eines M6-Innengewindes.

Gemäß DIN ISO 965-1 (Tabelle 4) werden die oberen Abmaße der Flankendurchmesser  $T_{D_2}$  abhängig von Toleranzgrad, Außendurchmesser und Teilung angegeben. Das untere Abmaß ist entsprechend des Grundabmaßes der Toleranzlage G zu ermitteln [DIN17]. Zur Prüfung der Innengewinde- maße werden in der Fertigung im Allgemeinen Gewindelehrdorne gemäß DIN EN 1502 eingesetzt. Die Sollmaße der Gutseite (grün) bzw. Ausschussseite (rot) ergeben sich aus den Sollmaßen und Grenzabmaßen gemäß DIN

EN 1502 (Tabelle 4 und 12) [DIN20]. In Abbildung 2.7-b sind die Anwendungsklassen für Gewindewerkzeuge gemäß DIN EN 22857 dargestellt, die in Abhängigkeit des zu fertigenden Muttergewindes unterschieden werden. Zu dessen Unterteilung wird die Toleranzeinheit "t" errechnet, die der Toleranz  $T_{D2}$  der Klasse 5 des Muttergewindes entspricht.



**Abbildung 2.7:** Toleranzen für a) M6-Innengewinde Klasse-"H", b) Gewindewerkzeuge und c) M6-Innengewinde Klasse-"G" nach [DIN90; DIN17]

Die Grenzabmaße ergeben sich aus entsprechenden Klassenfaktoren ( $E_m = 0,1/0,3/0,5/0,7 \cdot t$ ) und der Toleranz des Flankendurchmessers des Gewindebohrers  $T_{d2} = 0,2 \cdot t$  [DIN90].

Die praxisnahe Bestimmung der tolerierten Maße an Gewindespitzen und in den Gewindegründen ebenfalls standardisiert durchgeführt. Nach DIN13-20 - Tabelle 1 sind die Grenzmaße für ISO-Regelgewinde in verschiedenen Toleranzklassen definiert. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten M6-Innengewinde sind die tolerierten Außen- und Kerndurchmesser in **Tabelle 1** in technisch relevanten Klassen dargestellt [DIN00].

**Tabelle 1:** Grenzmaße für M6×1-Innengewinde in Millimeter [DIN00]

Toleranz- klasse	Außendurch- messer D Mindestmaß	Kerndurchmesser D <sub>1</sub>		Toleranz
		Mindestmaß	Höchstmaß	
5H	5,350	4,917	5,107	0,190
6H	5,350	4,917	5,153	0,236
7H	5,350	4,917	5,217	0,300

In den technologischen Grundlagenuntersuchungen zum Gewindeformen sowie den darüber hinaus betrachteten Technologien sind gemäß verschiedener geltender Normen verfahrensspezifische Kernbohrdurchmesser zu fertigen. Der Bohrwerkzeug-Nenndurchmesser der spanend gefertigten M6-Gewinde wird entsprechend DIN 336 mit  $d_{KB} = 5,0$  mm gewählt [DIN03b]. Zur Fertigung von Kernbohrungen für das Gewindeformen ist der Nenndurchmesser des Bohrwerkzeugs im Allgemeinen von Einflussgrößen wie z. B. Werkzeugeigenschaften, Fließverhalten bzw. Schmierstoff abhängig. Entsprechend den genannten Eingangsgrößen wurde der Vorbohrdurchmesser im Rahmen der praktischen Untersuchungen zum Helikalgewindeformen variiert. Der Richtwert für die Wahl des Nenndurchmessers wird in der VDI-Richtlinie 3334 nach Gleichung 2.1 angenähert [VDI15b]. Für die betrachteten M6-Gewinde wird in Gleichung 2.2-2.3 der Nennwertbereich bestimmt.

$$d_{KB} = D - (0,45...0,54) \cdot P \quad 2.1$$

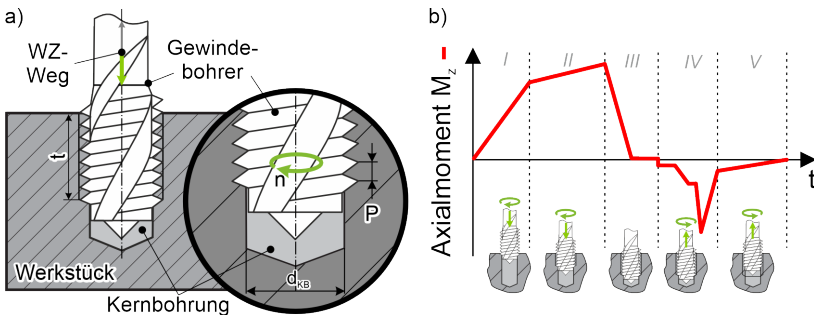
$$d_{KB} = 6 \text{ mm} - (0,45...0,54) \cdot 1 \text{ mm} \quad 2.2$$

$$d_{KB} = 5,46...5,55 \text{ mm} \quad 2.3$$

Aufgrund der vergleichsweise hohen Verformbarkeit der Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg wurden die Werkzeugnenndurchmesser entsprechend der Herstellervorgabe für M6-Gewindewerkzeuge mit  $d_{KB} = 5,50$ ;  $5,55$  bzw.  $5,60$  mm gewählt, um das Verklemmen zwischen Werkzeug und Gewindekern, was ggf. bei zu geringen Bohrungsdurchmessern auftritt, zu vermeiden.

### 2.3.2 Gewindebohren

Zu den industriell am weitesten verbreiteten Fertigungsverfahren zur Innengewindeherstellung zählt das Gewindebohren. Im Zuge des Formbohrprozesses wird ein werkzeuggebundenes Profil durch Spanabtrag an der Bohrungswand der Kernbohrung erzeugt. **Abbildung 2.8** skizziert den Aufbau und den Verlauf des Axialmoments beim Gewindebohren. Nach ISO-Norm wird dieses Verfahren zur Innengewindebearbeitung auch als Schraubbohren mit synchroner Schnitt- und Vorschubbewegung bezeichnet. Das zu fertigende Gewindeprofil wird während des Schneidvorgangs durch synchrone Rotation (Drehzahl  $n$ ) und Translation (Vorschub  $f$ ), die der Steigung  $P$  entspricht, erzeugt [DIN03a], wie **Abbildung 2.8-a** zeigt.



**Abbildung 2.8:** a) Skizze des Gewindebohrens; b) Schematische Darstellung des Axialmoments  $M_z$  während des NC-Zyklus nach [DR.14; VDI15b]

Neben dem Schneidteil an der Werkzeugspitze, auch Anschnitt genannt, besteht der Gewindeteil aus einem Führungsbereich, der den Gewindebohrer im bereits geschnittenen Innengewinde führt. Je nach Werkzeuggestalt bzw. Bearbeitungsaufgabe unterscheidet sich die Anzahl der im Schnitt befindlichen Schneidstollen. Daraus ergeben sich spezifische Schnittkräfte und Spanungsquerschnitte. Zur Fertigung von Grundbohrungen und für langspanende Werkstoffe werden gedrahte Spannuten eingesetzt, um die Späne entgegen der Vorschubrichtung aus der Bohrung zu transportieren. Mit gerade genuteten Gewindebohrern lässt sich eine Spanabfuhr aus dem Austritt einer Durchgangsbohrung erzielen [Klo18]. Nach dem Erreichen der gewünschten Bohrtiefe werden Drehzahl und Axialvorschub synchron um-

gekehrt, um das Werkzeug aus der Bohrung herauszufahren. In diesem kritischen Prozessschritt (siehe Phase IV in **Abbildung 2.9-b**) werden die Spanwurzeln durch den Hinterschliff getrennt und eingeebnet, was zur Überhöhung des Axialmoments führt und ggf. einem Werkzeugbruch hervorrufen kann [VDI15b].

Abhängig von Makro- und Mikrogestalt sowie den Werkstoffeigenschaften ist das axiale Verschneiden während des Gewindebohrns möglich, welches das Gewindeprofil beschädigt bzw. in manchen Fällen zum Bruch des Bohrers führt. Dabei weicht die axiale Ist-Position des Werkzeugs durch eine kritische Überhöhung der Axialkraft von der Soll-Position ab. Als ursächlich dafür gelten gesteigerte Passivkräfte [VDI15b]. Zur Minimierung des axialen Verschneidens tragen zum einen konstruktive Anpassungen an Werkzeug und Werkzeughalter bei. Durch den Einsatz von Ausgleichsfuttern mit axial elastischen Wirkelementen lassen sich Synchronisationsfehler der Werkzeugmaschine ausgleichen, wodurch im Allgemeinen die Axialkraftbeträge minimiert werden und somit die Standzeiterhöhung der Gewindebohrer erzielt wird [OSG22]. Weiterhin ist das Verschneiden durch die gezielte Anpassung der tribologischen Verhältnisse sowie der programmierten Gewindesteigung beeinflussbar [PD17]. Zum anderen ermöglicht die Anpassungen der Achsregelung eine Reduzierung axialer Positionsabweichungen. Mittels simulativer und experimenteller Untersuchungen wurden Modelle entwickelt, mittels derer der axiale Versatz im Gewindebohrprozess im Modell ermittelt und in modifizierte Regelparameter der NC-Steuerung überführt wurde [GWA21]. Entsprechende Technologien sind zur praktischen Umsetzung in sensorintegrierten Werkzeughaltern erfolgreich umgesetzt worden [ÖSW21].

Untersuchungen zum Gewindebohren von Aluminiumgusslegierungen verdeutlichen die Einflüsse der tribologischen Bedingungen auf Prozess- und Gewindequalität. Aufgrund der starken Adhäsionsneigung zwischen Aluminiumwerkstoffen und Schnellarbeitsstahl, der vorwiegend als Schneidstoff eingesetzt wird, gelten Beschichtungen als zwingend erforderlich, um ausreichende Standzeiten zu erzielen. Besonders eignen sich in diesem Zusammenhang DLC-Schichten aufgrund des geringen Reibungskoeffizienten. In Verbindung mit MMS-Einsatz wurden im Vergleich zu unbeschichte-

ten Werkzeugen verringerte mechanische Belastungen und hohe Gewindegüten bei geringem Verschleiß erzielt [BLA10; SIA\*04]. Insbesondere im Zusammenhang der Bearbeitung von Aluminiumgusslegierungen gelten die im Werkstoff enthaltenen Siliziumphasen als besonders verschleißfördernd. Bei Cu-haltigen Legierungsvarianten wurden vergleichsweise geringe Axialkräfte gemessen, die durch Anlagerung der weichen Kupferverbindungen an den Phasengrenzen zwischen Eutektikum und Mischkristall zu begründen sind [BZS\*19]

### 2.3.3 Gewindefräsen

Als weiteres spanendes Fertigungsverfahren wird das Gewindefräsen zur Innengewindebearbeitung angewendet. Dazu sind im Gegensatz zum Gewindebohren zwingend NC-gesteuerte Werkzeugmaschinen erforderlich, um den bahngesteuerten Schraubfräsprozess durchzuführen. Des Weiteren entstehen erhöhte Werkzeugkosten für VHM- oder komplexe Gewindefräser mit Wendeschneidplatten. Es ergeben sich jedoch einige Vorteile:

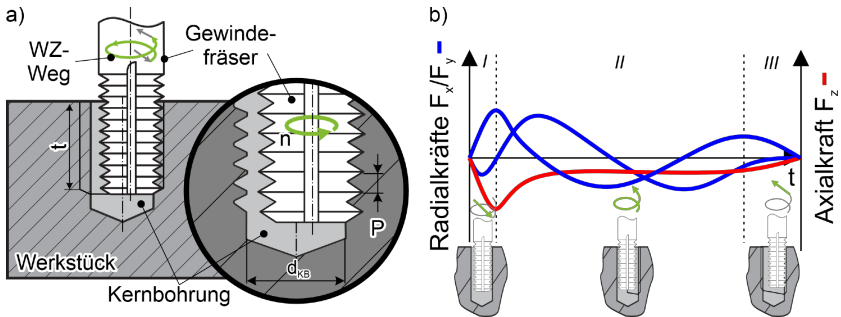
- universelle Einsatzmöglichkeiten (Gewindtyp, Toleranzen)
- geringe Axialkräfte und Spindelleistung bei großen Gewinden ( $A \searrow$ )
- hohe Vorschubgeschwindigkeit ( $z/f_z/v_c \nearrow$ )
- Werkzeugbruch nicht zwingend Ausschusskriterium ( $d_{WZ} < d_{KB}$ )
- günstige Spanform (unterbrochener Schnitt)
- hohe Oberflächen und Profilgüte (geringe  $F_z$ )
- schwer zerspanbare Werkstoffe bearbeitbar (Schnittaufteilung/ $v_c/f$  variabel)

Beim Gewindefräsen wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen zwei Verfahrensvarianten unterschieden, die in den beiden folgenden Abschnitten einzeln erläutert werden.

#### Gwindefräsen in einer Vorbohrung

Zur frästechnischen Herstellung von Innengewinden werden in der Regel beschichtete Vollhartmetallwerkzeuge eingesetzt, deren Schneidengestalt makroskopisch dem Gewindeprofil entspricht. Im Vergleich zu Gewindebohrern sind die Zähne jedoch axial nicht versetzt, wie **Abbildung 2.9-a** zeigt. Beim Gewindefräsen mit zuvor eingebrachter Vorbohrung ist der

Werkzeug-Nenndurchmesser zwingend kleiner als der Kernbohrdurchmesser, welcher vergleichbar zum Gewindebohren, nach DIN 336 zu wählen ist. Im ersten Prozessschritt wird das Werkzeug axial auf Bearbeitungstiefe vorpositioniert. Anschließend erfolgt die radiale Anfahrbewegung zum helikalen Werkzeugweg im Schnitt (siehe Phase I in Abbildung 2.9-b).



**Abbildung 2.9:** Skizze des Gewindefräses; b) Schematische Darstellung der Radialkräfte  $F_x/F_y$  und der Axialkraft  $F_z$  während des NC-Zyklus nach [DR.14; WA14]

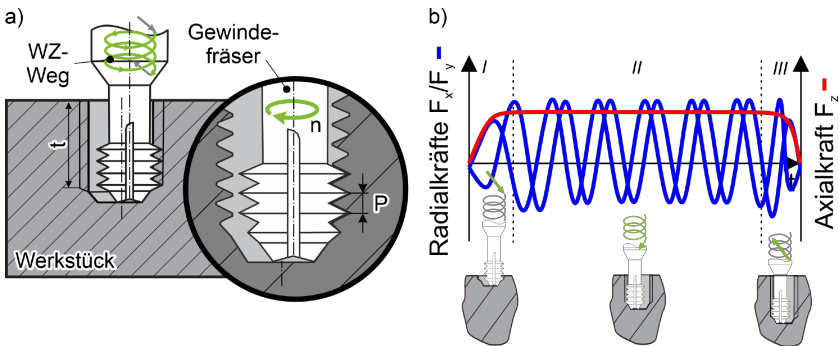
Ausgehend von einem im Gleichlauf gefrästen Rechtsgewinde wird die 360°-Helix gegen den Uhrzeigersinn und aus der Bohrung heraus abgefahren. Schnittgeschwindigkeit und Zahnvorschub sind mit üblicherweise eingesetzten Hartmetallwerkzeugen vergleichsweise hoch, jedoch anpassbar an die Bearbeitungsaufgabe und im Vergleich zum Gewindebohren nicht werkzeugebunden. Nach dem Anschnitt steigt die Axialkraft kurzzeitig auf ein Maximum, bevor sie in Phase II unter günstigen Bedingungen nahezu konstant bleibt. Schließlich verlässt das Werkzeug die Kontur im letzten Prozessschritt mit einer radialen Ausfahrbewegung zur Bohrungsachse. Schließlich fährt es im Eilgang axial aus der Gewindebohrung heraus [DR.14; WA14].

In Bezug auf die dynamische Stabilität des Gewindefräses sind die Schnittbedingungen entsprechend auszulegen, um Axialkräfte bzw. die radiale Abdrängung des Fräsworkzeugs zu minimieren. So sind beispielsweise Zahnvorschübe der Schneidkantenmikrogestalt anzupassen, um bspw. Ploughing zu vermeiden. Weiterhin beeinflussen Drallwinkel und Teilung die Stabilität des Schnittvorgangs, welche mittels numerischer Simulationen

optimiert werden können, um die Prozesssicherheit und Gewindequalität zu steigern [AFP13; WA14].

### Zirkularbohrgewindefräsen ohne Vorbohrung

Als Verfahrensvariante des GewindefräSENS ist der Schnittprozess zur Herstellung der Gewindekontur beim ZirkularbohrgewindefräSEN vergleichbar zur zuvor erläuterten Variante. Der grundlegende Unterschied besteht in der Fertigungsmethode der Kernbohrung, welche beim zirkularen BohrgewindefräSEN durch die Stirnschneiden simultan zum Gewindeprofil gefräST wird, wie **Abbildung 2.10** zeigt.



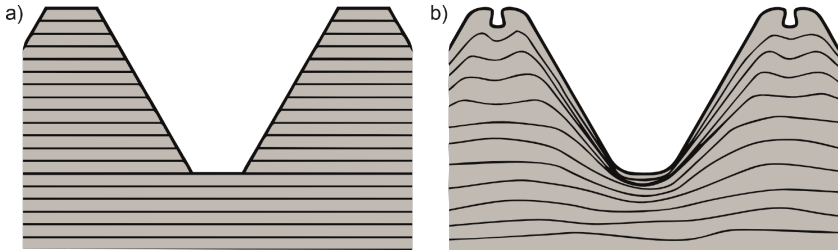
**Abbildung 2.10:** a) Skizze des helikalen BohrgewindefräSENS; b) Schematische Darstellung der Radialkräfte  $F_x/F_y$  und der Axialkraft  $F_z$  während des NC-Zyklus nach [DR.14; DHL\*23]

Dieses Verfahren eignet sich besonders zur Bearbeitung von Werkstoffen mit hoher Härte sowie für schräge Anschnitte. Um Rechtsgewinde zirkular ins Volle zu fräSEN, sind entsprechend dem ISO-Gewindeprofil linkserschneidende Werkzeuge für die Gleichlaufbearbeitung erforderlich. Im Anschluss an die Vorpositionierung bewegt sich das Werkzeug mit dem programmierten Schneidendurchmesser synchron entlang einer Helix-Bahn, deren Steigung der axialen Zahnteilung  $P$  entspricht. Nachdem die Stirnschneiden den Kerndurchmesser vorbearbeitet haben, kommen die profilierten Umfangsschneiden schrittweise in den Eingriff, welche das Gewindeprofil in die Bohrungswand fräSEN. Erreicht die Werkzeugspitze die programmierte Bearbeitungstiefe, wird der FräSER in Richtung der Bohrungsachse zurückgestellt und fährt schließlich aus der Bohrung heraus [DR.14].

Da dieser Prozess in einer kontinuierlichen Bewegung stattfindet, sind die wirkenden Axialkräfte vergleichsweise konstant, wodurch das Verfahren zur Bearbeitung in instabilen Aufspannungen gut geeignet ist. Zur Herstellung lehrenhaltiger Gewinde sind Zahnvorschub und Schnittgeschwindigkeit materialspezifisch anzupassen, um radiale Abdrängungen zu minimieren. Weiter beeinflusst die Werkstoffhärte neben dem Spanungsquerschnitt die mechanischen Werkzeugbelastungen beim Helikalbohrgewindefräsen. Die Nebenzeitverringerung, die sich aufgrund des nicht notwendigen Werkzeugwechsels gegenüber konventionellen Prozessketten ergibt, ist gegenüber der hohen Hauptzeit hinsichtlich einer Produktivitätssteigerung vernachlässigbar [DHL\*23].

#### 2.3.4 Gewindeformen

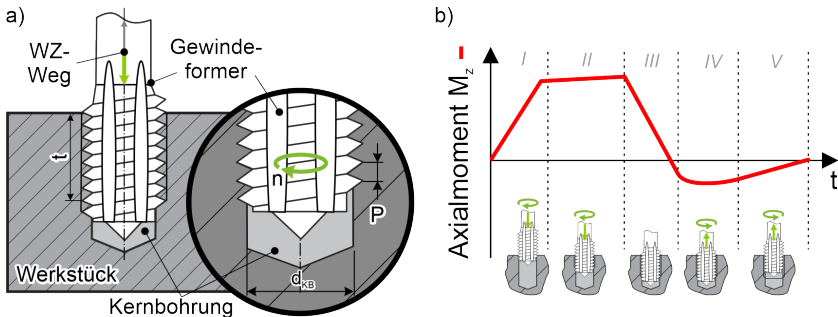
Die zuvor erläuterten Verfahren stellen die Innengewinde durch spanende Formgebung her. Dabei können ungünstige Spanformen bzw. Werkzeugschwingungen zu Prozessbeeinträchtigungen führen. Alternativ werden Innengewinde in der industriellen Fertigung durch Umformverfahren hergestellt. Die am weitesten verbreitete Technologie ist das Gewindeformen, das im Prozessablauf dem Gewindebohren gleicht. Die Werkzeuge bestehen aus schraubenförmigen Wirkflächen, deren Querschnitt aus einem polygonartigen Profil mit abgeflachten Ecken aufgebaut ist. Verfügt der Werkstückstoff über eine ausreichende Verformbarkeit, wird das Gewindeprofil durch das Eindrücken der Formstollen in die Bohrungswand erzeugt. Der Großteil der Umformarbeit wird dabei von der konisch zulaufenden Werkzeugspitze umgesetzt, dessen Gestalt mit dem Anschnitt eines Gewindebohrers vergleichbar ist. Im Gewindegrund tritt dabei starke Kaltverfestigung in Folge der Druckumformbewegung auf. Das verdrängte Material fließt entlang der Formkeile in Richtung des Gewindekerns, wo es die charakteristischen, krallenartigen Gewindespitzen ausformt. Entsprechend ergibt sich im Vergleich zu spanend gefertigten Gewinden eine prozesstypische Verformung der Gefügestruktur der Bohrungswand [Klo18; VD115b], die in **Abbildung 2.11** beispielhaft skizziert ist.



**Abbildung 2.11:** Faserverlauf von a) geschnittenen und b) geformten Gewinden nach [EMU20; VDI15b]

Erreicht das Werkzeug die geforderte Bearbeitungstiefe, werden axialer Vorschub und Spindeldrehung synchron bis zum Stillstand verzögert. Anschließend wird das Werkzeug in entgegengesetzter Rotationsrichtung aus der Bohrung herausgedreht.

Zur Reduzierung der Reibung und Minimierung von Materialanhaftungen werden die Wirkflächen des Gewindeformers durch innere oder äußere Zuführung mit Schmierstoff versorgt. Wie in Abbildung 2.12-a beispielhaft skizziert, tragen axiale Nuten zur notwendigen Schmierung der Formstellen in der Grundbohrung bei [VDI15b].



**Abbildung 2.12:** a) Skizze des Gewindeformers; b) Schematische Darstellung des Axialmoments  $M_z$  während des NC-Zyklus nach [DR.14; EMU13b]

Zur Prozesssicheren Durchführung des Gewindeformens ist eine innere oder äußere Schmierstoffversorgung zwingend erforderlich. Durch die Druckumformung ergeben sich durch die Reibkräfte vergleichsweise hohe Axialmomente, die insbesondere während des Anformvorgangs und bei der

Drehrichtungsumkehr eine starke Torsion des Gewindeformers verursachen. Durch geeignete Schmierstoffe sinkt das Axialmoment und das Risiko eines Werkzeugbruchs wird durch die Schmierung minimiert. Weiterhin sind Gewindeformwerkzeuge in der Regel aus Schnellarbeitsstählen mit hoher Zähigkeit gefertigt, wodurch kritische Torsionsspannungen elastisch aufgenommen werden [Klo18]. Beim Gewindeformen tritt als unerwünschter Effekt häufig Gratbildung an Schließfalten sowie am Bohrungseintritt auf. Dem gegenüber stehen jedoch eine Vielzahl von Vorteilen des Gewindeformens [BSF\*20; VD115b]:

- universelle Anwendungsbereiche und Gewindeprofile möglich
- erhöhte Prozesssicherheit (spanloses Verfahren, stabiler WZ-Kern)
- gesteigerte Gewindefestigkeit (Kaltverfestigung, Maßgenauigkeit)
- hohe Produktivität und Standzeit ( $n \nearrow$ , Verschleiß  $\searrow$ )
- hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte (kein Verschneiden)

Bei spezifischer Auslegung des Vorbohrdurchmessers sowie des Bearbeitungsprozesses an sich stellt das Gewindeformen ein prozesssicheres Verfahren zur Innengewindeherstellung dar. Wie beim Gewindebohren beeinflussen die materialspezifische Auswahl der Spindeldrehzahl sowie die Verwendung eines Ausgleichfutters die mechanischen Werkzeugbelastungen sowie die Gewindegüte [PD17]. Insbesondere die Anpassung des Vorbohrdurchmessers auf die spezifischen Verformungseigenschaften des Werkstückstoffs ist beim Gewindeformen zu berücksichtigen. Bei einem zu groß gewählten Durchmesser der Vorbohrung werden die Gewindespitzen unvollständig ausgeformt, wodurch der erforderliche Traganteil in der Schraubverbindung unterschritten wird. Im Falle eines zu gering ausgelegten Kernbohrungsdurchmessers überformt das Gewinde, wodurch das Axialmoment stark ansteigt und es ggf. zum Werkzeugbruch bzw. zur Rissbildung im Gewinde kommen kann [SSA\*19]. Im Falle einer anforderungsgerechten Anpassung der Prozesstechnologie werden in der industriellen Fertigung signifikante Standzeitsteigerungen bei gesteigerter Prozesssicherheit erreicht [Die16; Hei01].

Die im Allgemeinen gute Verformbarkeit von Aluminiumlegierungen stellt für das Gewindeformverfahren eine sehr gute Voraussetzung dar. In Werk-

stoffen mit einer Zugfestigkeit von bis zu  $R_m \leq 1.200 \text{ MPa}$  und einer Bruchdehnung von bis zu  $A \geq 5 \dots 8 \%$  lassen sich Innengewinde grundsätzlich durch Umformung herstellen [VDI15b]. Im Speziellen beeinflussen jedoch verschiedene Prozessparameter den Gewindeformprozess, beispielsweise in Bezug auf die mechanischen Werkzeugbelastungen während des Bearbeitungsprozesses. Da mit größeren Vorbohrdurchmessern das verformte Materialvolumen sinkt, verringern sich grundsätzlich wirkende Axialkräfte und -momente sowie die Gewindeprofiltiefe [MFL<sup>+</sup>15]. Die Umformgeschwindigkeit, die sich aus der Werkzeugdrehzahl ergibt, wirkt sich in Form von gesteigerter Reibung bzw. Temperatur auf das Fließverhalten des Werkstoffs aus. So sinkt bei hohen Umformgeschwindigkeiten in Aluminiumlegierungen die Vorschubkraft während das Axialmoment steigt. Damit einhergehend wird verstärkte Gratbildung festgestellt [MOA<sup>+</sup>16; ORB19]. Eine stark profilierte Formkeilgestalt beschleunigt wiederum den Materialfluss und führt durch die höhere Reibungsenergie zu starker Ausformung der Gewindespitzen [Sch04]. Äquivalent dazu trägt eine abgeflachte Anformer-Gestalt dazu bei, eine symmetrische Kraftverteilung zu erzielen und dadurch die mechanische Belastung und den Materialfluss in Richtung der Gewindespitzen zu verbessern. Im Gegensatz dazu tragen eine nicht ausreichende Schmierwirkung bzw. ungeeignete Schichtstoffe zu Materialanhaftungen am Werkzeug bei, die die Prozessqualität signifikant verringern [ORB19; Sch04]. Zusammenfassend lassen sich Vorbohrdurchmesser, Umfangsgeschwindigkeit und Reibungsverhältnisse als bedeutendste Einflussfaktoren auf Prozess- und Gewindequalität nennen. Bezüglich des Einsatzverhaltens sind diese anwendungs- und materialspezifisch anzupassen, um hohe Standzeiten zu erzielen. Besonders trägt in diesem Zusammenhang, neben der starken Adhäsivneigung des Aluminiums, der hohe Siliziumgehalt zu Abrasivverschleiß beim Gewindeformen von Gusslegierungen bei [BAP<sup>+</sup>20].

### 2.3.5 Sonderverfahren für Aluminiumwerkstoffe

Nachdem zuvor die allgemein gängigen Verfahren zur Innengewindefertigung in Bezug auf Werkzeuggestalt, Prozessablauf sowie grundlegende Forschungsergebnisse zum Einsatzverhalten erläutert wurden, werden im folgenden Abschnitt Sonderverfahren betrachtet, die speziell zur Gewindeherstellung in Aluminiumbauteilen angewandt werden.

### **Bohrgewindefräsen**

Steht in der Serienfertigung von hohen Stückzahlen die Verringerung von Neben- und Rüstzeiten im Vordergrund, eignet sich besonders die Prozesskombination aus Bohren und Gewindefräsen mit einem einzelnen Sonderwerkzeug. Dessen Gestalt entspricht an der Werkzeugspitze bzw. den Spannuten der eines konventionellen Wendelbohrers. Zunächst wird damit die Kernbohrung inkl. Senkung ins Volle bearbeitet. Im nächsten Schritt wird das Kombinationswerkzeug vom Bohrungsgrund um wenige Millimeter zurückgestellt und das Gewindepotil wird mittels der Fräszähne am Werkzeugumfang vergleichbar wie in Kapitel 2.3.3 spanend erzeugt. Die aufwendig geschliffenen Hartmetallwerkzeuge können ausschließlich in NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen eingesetzt werden und eignen sich aufgrund des dünnen Kerns lediglich zur Bearbeitung von leicht zerspanbaren Aluminiumwerkstoffen [CER24].

### **Bohrgewindeformen**

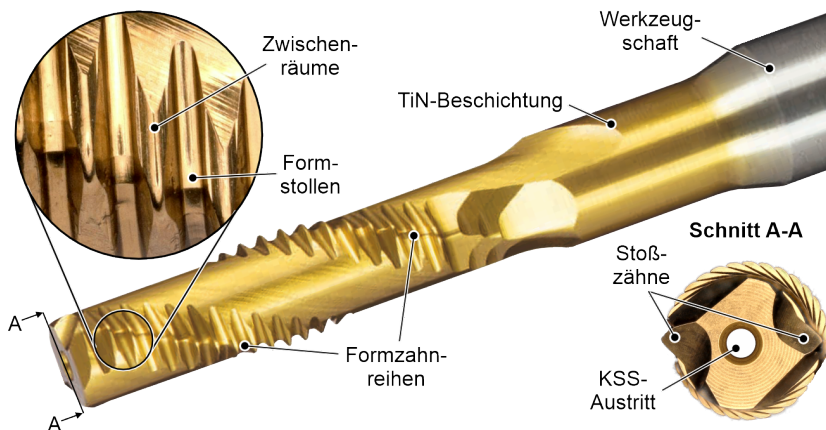
Das Verfahren Bohrwindeformen, welches von den Unternehmen *EMUGE* und *AUDI* unter dem Markennamen "*Taptor*" für die Serienfertigung von Aluminiumgusskomponenten entwickelt wurde, ermöglicht ebenfalls die Herstellung eines Innengewindes mit einem Bearbeitungsschritt. Der grundlegende Aufbau des VHM-Werkzeugs entspricht zunächst dem eines Wendelbohrers. Zur Herstellung des Gewindepotils verfügt es am Umfang der Werkzeugspitze über zwei gegenüberliegende Stollen, die das Gewindepotil in der Bohrungswand zunächst schneiden und schließlich nachformen. Bis zum Erreichen der programmierten Bohrtiefe wird die Drehzahl des Werkzeugs synchron mit der Gewindesteigung geregelt. Im Bohrungsgrund wird die Bewegung im speziellen NC-Zyklus gebremst und das Werkzeug schneidet sich frei bevor es zum Stillstand kommt. Das Ausfahren erfolgt synchron im hergestellten Gewindepotil [EMU19]. Dieses Verfahren wird in der Serienfertigung von Getriebegehäuse und Motorkomponenten aus Aluminiumguss aktuell prozesssicher eingesetzt. Bei der Gewindefertigung von M6- und M8-Gewinden wird neben einer Taktzeitverkürzung auch die Einsparung von Werkzeugplätzen erzielt. Neben einer hochgenauen Lageregelung der Werkzeugspindel ist zum Einsatz dieser Technologie die feine Filterung der Kühlschmierstoffemulsion notwendig [mav23; WB 19].

### Helikalgewindeformen

Bei Gewindevorfahren mit synchroner Spindel- und Vorschubbewegung wie bspw. dem Gewindebohren sind die technischen Nebenzeiten aufgrund der nicht produktiv nutzbaren Ruckstellbewegung im Vergleich zur Hauptzeit relativ hoch. Darüber hinaus ist die Werkzeugdrehzahl aufgrund steuerungstechnischer Grenzen nicht entsprechend der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Schneidstoffe steigerbar. Trotz verfügbarer Methoden zur Minimierung der Taktzeit, bspw. eine gesteigerte Drehzahl beim Herausfahren oder der Einsatz eines Vorsatzgetriebes, ergeben sich beim Gewindebohren und -formen relativ hohe Potenziale zur Verringerung der Taktzeit [Bos16].

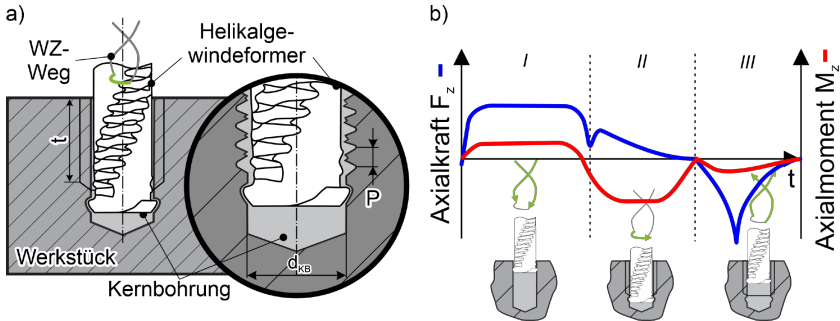
Mit dem Ziel einer signifikanten Steigerung der produktiven Zeitanteile beim Gewindeformen wurde in Kooperation der Unternehmen *AUDI* und *EMUGE* mit wissenschaftlicher Unterstützung des *ISF* eine innovative Technologie zur Innengewindeherstellung entwickelt. Beim daraus entwickelten Helikalgewindeformen wird das Sonderwerkzeug zunächst in die Vorbohrung mit hoher Geschwindigkeit hineingestoßen. Im Anschluss wird das Gewinde in einer halben Umdrehung durch die Zahnreihen am Umfang des Werkzeugs erzeugt. Mit der ersten Verfahrensvariante wurde eine Produktivitätssteigerung von bis zu 65 % erzielt [KHB<sup>+</sup>12]. Durch die Weiterentwicklung der Prozess- und Werkzeugtechnologie konnte die Prozesszeit weiter verringert und dabei Standzeit und Gewindequalität verbessert werden. Bis zur Serieneinführung im *AUDI* Werk Győr konnte die Zykluszeit in Bezug auf die Referenz um bis zu 75 % gesenkt werden. In der Serienfertigung bei der Fa. *AUDI* werden unter Verwendung von MMS ca. 200.000 Stück lehrenhaltige Gewinde mit einem Werkzeug mittels der "Punch Tap"-Technologie gefertigt [WB 20].

Die Werkzeuggestalt eines Helikalgewindeformers unterscheidet sich in verschiedenen Gesichtspunkten grundsätzlich von der eines herkömmlichen Gewindeformers. **Abbildung 2.13** zeigt den Aufbau eines Helikalgewindeform-Werkzeugs.



**Abbildung 2.13:** Werkzeuggestalt eines Helkalgewindeformers nach [EMU20]

Während der helikalen Stoßbewegung in die Vorbohrung erzeugen die stirnseitigen Räumzähne zwei helikale Nuten mit einer Steigung von  $\delta = 30^\circ$ , die schließlich auch zum Rückstellen aus der Gewindebohrung dienen. Darüber befinden sich zwei um  $180^\circ$  versetzte Formzahnreihen am Umfang des zylindrischen Grundkörpers. Diese setzen sich aus einzelnen Formstollen zusammen, die axial um die Gewindesteigung  $P$  versetzt sind. Die helikale Anordnung der Zahnreihen entspricht dem Drallwinkel des Stoßkanals von  $\delta = 30^\circ$ . Während des Gewindeformvorgangs erzeugen die Formstollen das Gewindeprofil ohne Spanabtrag und in einer Werkzeugbewegung. Durch die synchrone Überlagerung von Drehung ( $\Delta\varphi = 180^\circ$ ) und Translation ( $\Delta z = 0,5 \times P$ ) dringen die Zahnreihen aus den Nuten in die Bohrungswand ein. Dabei entstehen durch Druckumformung die Gewindetäler. Gleichzeitig fließt im Zuge das verdrängte Material in die Zwischenräume der Formstollen und bildet die Gewindespitzen aus [EMU20]. **Abbildung 2.14-b** zeigt den zeitlichen Verlauf der mechanischen Werkzeugbelastungen in den drei Hauptphasen des einstufigen Gewindezyklus.



**Abbildung 2.14:** a) Skizze des Helikalgewindeformens; b) Schematische Darstellung der Axialkraft  $F_z$  und des -moments  $M_z$  während des NC-Zyklus nach [EMU18; EMU20; FKB24]

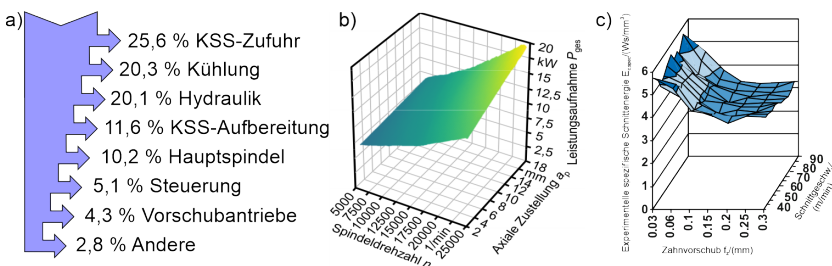
Beim Eindringen des Werkzeugs in die Kernbohrung tritt durch das Stoßen mit hoher Geschwindigkeit eine hohe Druckkraft auf. Die Axialbelastungen betragen im Vergleich zum konventionellen Gewindeformen ca. das 25-fache. Durch zusätzliche Prozessschritte, wie das Zwischenentgraten sowie beim helikale Ausfahren, wirken ebenfalls hohe Zug- bzw. Druckbelastungen auf Werkstück, Werkzeug und Spindel. Aufgrund des verkürzten Werkzeugwegs – der insgesamt ca. um das 15-fache reduziert wird – erfolgt die Formung des Gewindeprofils innerhalb einer halben Werkzeugumdrehung, wodurch das wirkende Drehmoment um den Faktor 10 gegenüber dem konventionellen Gewindeformen steigt [FKB24]. Die resultierende Gewindequalität ist grundsätzlich durch die Anpassung der Prozessparameter beeinflussbar. Entsprechend bekannte Zusammenhänge sind bspw. Unterschiede in der Oberflächenqualität oder die Gewindetiefe durch die Variation des Kernbohrdurchmessers erzielbar [FKB\*22]. Zusammenhänge zwischen variierenden Vorbohrdurchmessern und Verfestigung bzw. Auszugfestigkeit wurden in Untersuchungen des *Lehrstuhls für Werkstoffprüfung* der *TU Dortmund* festgestellt [SFB\*23].

## 2.4 Energie- und Ressourceneinsatz in der spanenden Fertigung

Innerhalb des Wertschöpfungsprozesses im Maschinen- und Fahrzeugbau werden technische Produkte unter Einsatz verschiedener Energieformen und Ressourcen hergestellt. Im Wesentlichen werden neben Rohstoffen große Mengen elektrischer Energie benötigt, um Produktionsprozesse beispielsweise mittels Werkzeugmaschinen durchzuführen. Neben dem wertschöpfenden Anteil, der für Spindel- und Vorschubantriebe eingesetzt wird, geht jedoch ein Teil der eingesetzten Energie in nicht produktiv nutzbare Formen wie z. B. in Abwärme über. In diesem Zusammenhang wird der Energiebedarf als Kenngröße zur Bewertung der wertschöpfend genutzten Anteile verwendet [DHK14]. Im Folgenden wird der Energieeinsatz für spanende Bearbeitungsprozesse mittels Werkzeugmaschinen in Grundsätzen erläutert. Anschließend wird im Speziellen auf Einsparpotentiale bei der energieintensiven Kühlschmierstoffversorgung am Beispiel der Minimalmengenschmierung eingegangen.

### Energiebedarf von Zerspanprozessen

Zum Betrieb von spanenden Werkzeugmaschinen wird im Wesentlichen elektrische Energie eingesetzt. Dabei ist zwischen fixen Verbrauchern, wie der Steuerung oder Kühlaggregate, und variablen Verbrauchern, deren Energiebedarf je nach Betriebsart zusätzlich hinzukommt, zu unterscheiden. **Abbildung 2.15-a** zeigt beispielhaft die Aufteilung der Bedarfe verschiedener Verbraucher einer Werkzeugmaschine.



**Abbildung 2.15:** a) Energiebedarf versch. Systeme von Werkzeugmaschinen nach [BTH\*11]; b) Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine [Wir19]; c) Gemessene spezifische Schnittenergie beim Fräsen nach [SKL11]

Die unmittelbar zur Zerspaltung notwendigen Systeme wie Steuerung, Spindel- und Vorschubantriebe stellen ca. 20 % des Gesamtenergiebedarfs dar. Das Teilsystem der Werkzeugmaschine, das den größten Anteil zum Gesamtumsatz elektrischer Energie darstellt, ist das KSS-System. Neben den Pumpen zur inneren und äußeren Hochdruckzufuhr des Kühlschmierstoffes setzen Nebenaggregate wie Tiefbettfilter oder Bettspülpumpe große Mengen elektrischer Energie zur Aufbereitung des Kühlschmierstoffes um [BTH<sup>11</sup>].

Insbesondere die Verdichtung wassermischbarer Emulsionen auf einen Druck von bis zu  $p = 100$  bar ist sehr energieintensiv. Das KSS-System des im Rahmen dieser Arbeit genutzten Bearbeitungszentrums *GROB BZ 600* benötigt zur Werkzeuginnenkühlung eine elektrische Leistung von  $P = 5,5$  kW, was im betriebsbereiten Zustand etwa 58 % der Gesamtleistung ausmacht. Unter Span verringert sich dieser Anteil auf 37 %. Die hochdynamische 5-Achsfräsmaschine *DMG HSC 75 linear* setzt in der gleichen Betriebsart  $P = 1,9$  kW ins KSS-System um. Aufgrund des unterschiedlichen Maschinenkonzepts ergibt sich eine höhere Grundleistung der NC-Steuerung, wodurch der Anteil des KSS-Systems an der aufgenommenen Gesamtenergie mit 23 % als vergleichsweise gering zu bewerten ist [Iov16; Wir19].

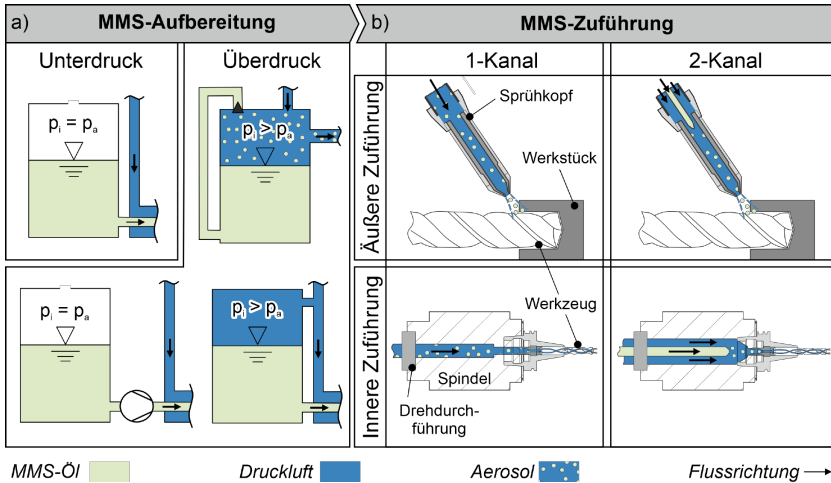
Durch die intensive Kühlung hochbelasteter Zerspaltungswerkzeuge lassen sich bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten im Allgemeinen verbesserter Spanbruch, gesteigerte Standzeiten und höhere Produktivität erzielen [HLM16]. Untersuchungen zum Fräsen mit variierender Schnitttiefe und Drehzahl zeigen, dass die Leistungsaufnahme insbesondere bei hohen Schnittgeschwindigkeiten rapide steigt. Das gesteigerte Schnittmoment bei hohen Schnitttiefen wirkt sich lediglich moderat auf die Maschinenleistung aus, wie Abbildung 2.15-b zeigt [Wir19]. Der Einfluss des Vorschubs ist in Bezug auf die spezifische Schnittenergie in Abbildung 2.15-c dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei hohen Schnittgeschwindigkeiten keine signifikante Verringerung der spezifischen Abtragsleistung erzielen lässt. Die Steigerung des Vorschubs wirkt sich in spezifischen Bereichen jedoch günstig auf den Energiebedarf aus. Eine Optimierung der Energieeffizienz von Bearbeitungsprozessen ist demnach als Kompromiss bzw. als Ergebnis eines aufwändigen Adaptierungsprozesses zu erreichen [SKL11].

### Minimalmengenschmierung

Aufgrund stetig wachsender Leistungsfähigkeit der Steuerungs- und Antriebssysteme von Werkzeugmaschinen bieten diese Maschinenkomponenten lediglich geringes Potential zur Steigerung der Energieeffizienz. Wie zuvor beschrieben, wird ein signifikanter Anteil der aufgewendeten Energie während des Bearbeitungsprozesses für die Versorgung der Werkzeuge mit Kühlschmierstoffen sowie dessen Aufbereitung eingesetzt. In diesem Zusammenhang ist durch den technologiegerechten Einsatz von Minimalmengenschmierung signifikante Verringerung der elektrischen Leistungsaufnahme bei gegebener Produktivität und Prozesssicherheit zu erzielen.

Hinsichtlich der Einflüsse der MMS auf die Zerspanbarkeit sind zunächst grundlegende Eigenschaften dieses KSS-Konzepts zu erläutern. Im Kontext der Minimalmengenschmierung erfolgt die Zuführung von sehr geringen Öl-Mengen mittels Druckluft als Trägermedium. Aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft wird die Kühlung der Wirkstelle lediglich durch Verdampfung des Öls sowie vernachlässigbaren Wärmeabtransport durch die Luft erzielt. Im Kontext verschiedener Kühlschmierstoffkonzepte wird der Effekt der MMS auf den Zerspanvorgang daher primär auf veränderte tribologische Bedingungen zurückgeführt [Klo18; Wei99].

Die Zuführung des MMS-Aerosols wird mittels spezieller Anlagentechnik umgesetzt, die sich im Wesentlichen in Einzelsysteme zur Aerosol-Aufbereitung und -Zuführung unterteilen lässt. Unterschiedliche Bauweisen der Komponenten sind in **Abbildung 2.16** dargestellt. Dazu werden Druckluft und Öle als Rohstoffe dem Gesamtsystem zugeführt und schließlich als Gemisch an die Wirkstelle abgegeben. Bei der Erzeugung des Aerosols ist zwischen verschiedenen Aufbereitungssystemen zu unterscheiden. Zur wirkstellennahen Mischung in zweikanaligen Zuführungssystemen werden Öl und Druckluft in getrennten Leistungen zur Mischdüse gefördert, die sich bspw. an der Drehdurchführung der Werkzeugspindel befindet. Der Schmierstoff kann einerseits mittels einer Pumpe aus dem drucklosen Behälter gefördert werden. Dadurch ist die exakte Dosierung der Durchflussmenge regulierbar. Andererseits ist es möglich, den Schmierstofftank durch einen Bypass mit Druckluft zu beaufschlagen, um den Öl-Fluss in Richtung der Auslass-Düse zu erreichen.



**Abbildung 2.16:** Übersicht der Dosier- und Zuführungssysteme für MMS nach [Klo18; Wei99]

In drucklosen Systemen wird das Öl durch die Sogwirkung an der Düse aus dem Behälter gefördert. Bei dieser Aufbereitungsart wird die Öl-Menge über die Einstellung der Düse reguliert. Gleiches gilt für Überdrucksysteme, in denen die Aerosolpartikel in den Tank verdüst werden. Mit dieser Aufbereitungsmethode können sich erheblich kleinere Partikelgrößen erzielt werden, die sich durch 1-Kanal-Zuführungen auch durch rotierende Spindeln zur Wirkstelle transportieren lassen [Wei99].

Neben der Partikelgröße tragen weitere Eigenschaften des Aerosols wie bspw. die Schmierwirkung des Öls zur prozesssicheren Bearbeitung mit MMS bei. In diesem Kontext werden in der industriellen Fertigung zum einen Öle auf Basis von natürlichen oder synthetischen Estern eingesetzt. Diese zeichnen sich durch eine vergleichsweise niedrige Verdampfungsneigung aus, wodurch sie über hervorragende Schmierungseigenschaften bei erhöhten Temperaturen verfügen. Dies begünstigt z. B. beim Bohren die Spanabfuhr, da Esteröle die Spanoberflächen auch bei hohen Temperaturen benetzen und somit Materialanhaftungen an den Spannuten minimieren [WIS\*04; Wei99]. Zum anderen kommen zur MMS-Bearbeitung Fettalkohol-Öle zum Einsatz, die sich gegenüber den esterbasierten Ölen durch

eine niedrigere Viskosität auszeichnen. Neben der guten Benetzung wirkt sich die geringe Verdampfungstemperatur positiv auf die Kühlwirkung aus. MMS-Öle auf Fettalkoholbasis werden in der Praxis bei hohen Schnittgeschwindigkeiten bzw. für die Gussbearbeitung eingesetzt [PGS22; Tha99].

Zur Quantifizierung der Vorteile von MMS-Systemen in Bezug auf Betriebskosten und Energiebedarfs gegenüber konventioneller Überflutungsschmierung mit wassermischbaren Emulsionen oder Öl sind unterschiedliche Einflussfaktoren zu beachten. So bestimmen variable Größe wie Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschine, Bearbeitungsaufgabe etc. den Energiebedarf des KSS-Systems. Beispielsweise wurden bei der Fa. *Ford* Einsparungen von 10...17 % anteilig an den Fertigungskosten ermittelt [TSF\*17]. Da die MMS eine Verlustschmierung ist, fallen keine Anschaffungs- und Betriebskosten zur KSS-Aufbereitung an. Durch das Abdampfen des MMS-Mediums entfallen meist die Kosten für Bauteilreinigung und Schmierstoff-Entsorgung, die bis zu 11 % der laufenden Kosten von KSS-Systemen verursachen [Tha99]. Ein weiterer signifikanter Kostenfaktor, der mittels MMS-Bearbeitung reduziert werden kann ist die Bearbeitungszeit. Beispielsweise gelingt es beim Hochvorschubtiefbohren von Aluminiumguss, zum einen die elektrische Leistung des Bearbeitungszentrums signifikant zu verringern. Zum anderen wurde die Produktivität durch eine deutlich erhöhte Vorschubgeschwindigkeit maximiert, sodass gegenüber dem Referenzprozess unter Emulsion 90 % weniger Energie pro Bohrung benötigt wurde [lov16].

Bezogen auf konkrete Bearbeitungsprozesse in der Massenfertigung konnten Kostensenkungen durch den Einsatz von MMS auch in der Praxis quantifiziert werden. Die Umstellung gesamter Fertigungslinien von konventioneller Überflutungsschmierung gelingt in einem Beispiel durch standardisierte Ansätze in Maschinen und Werkzeugtechnologie [FSS07]. Durch MMS-gerechte Werkzeuggestaltung und zuverlässige Systemtechnik wurden beispielsweise in der Zylinderkopffertigung bis zu 17 % Kosten eingespart [DH07]. Durch den Einsatz hochproduktiver Bearbeitungszentren mit MMS können die Energiekosten auf Maschinenebene beispielsweise um bis zu 40 % gegenüber bei vergleichbaren Werkzeugmaschinen unter KSS-Emulsion gesenkt werden.

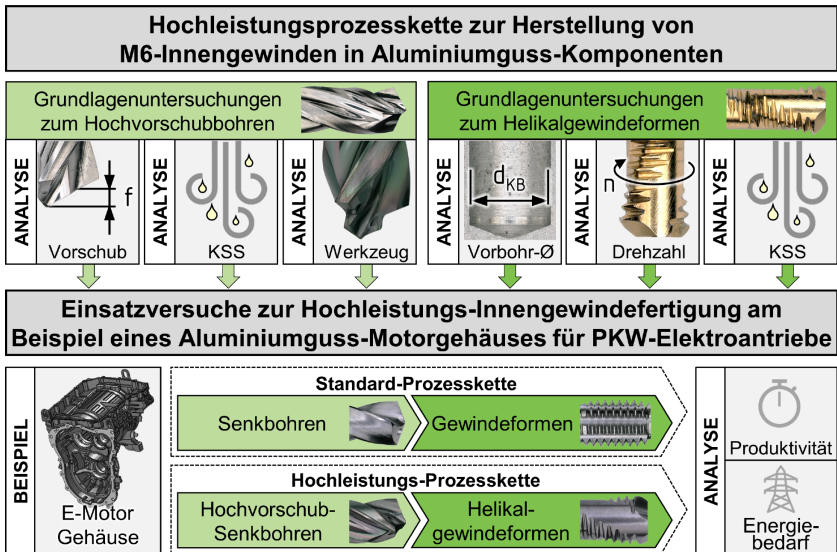


### 3 Zielsetzung und Methodik

In der industriellen Massenfertigung von Gehäusekomponenten für Verbrennungs- und Elektromotoren aus Aluminiumgusswerkstoffen stellt die Gewindebearbeitung einschließlich des notwendigen Vorbohrprozesses einen der wesentlichen Prozessschritte dar. Zur Herstellung lösbarer Schraubenverbindungen werden in ein einzelnes Gusshalbzeug bis zu 50 Innengewinde eingebracht, um die hochbeanspruchten Motorgehäuse kraft- und formschlüssig zu fügen. Wie in Kapitel 0 erläutert, existieren dazu etablierte Fertigungsverfahren, die zur industriellen Herstellung von Innengewinden der Größe M6 angewandt werden. Dabei gilt einerseits der sichere Abtransport von Spänen aus den vergleichsweise kleinen Spanräumen als fertigungstechnische Herausforderung. Andererseits ergibt sich durch die technisch begrenzte Synchrondrehzahl des Werkzeugs bspw. beim Gewindeformen bzw. -bohren eine vergleichsweise hohe Prozesszeit. Hinsichtlich des Vorbohrprozesses eröffnen wiederum Sonderwerkzeuge zur Hochvorschubbearbeitung Potenziale zur Verringerung der Hauptzeit. Darüber hinaus sinkt gegenüber der Nassbearbeitung von Aluminium der Energiebedarf der Werkzeugmaschine durch Einsatz von MMS signifikant, wodurch die Quasi-Trockenbearbeitung als besonders energieeffizient gilt. Hochleistungstechnologien zur Bohr- und Gewindebearbeitung stellen daher in der Massenfertigung von Innengewinden in Aluminiumgehäusen einen bedeutenden Faktor zur Steigerung der Produktivität sowie der Ressourceneffizienz dar. Durch die wissenschaftliche Weiterentwicklung des innovativen Helikalgewindeformverfahrens sowie den Einsatz des Hochvorschubbohrens am Beispiel der Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg sollen im Rahmen dieser Arbeit grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden. Ziel ist, die Potenziale dieser Hochleistungsprozesskette am Beispiel eines Elektromotorgehäuses speziell in Bezug auf mögliche Steigerungen der Ressourceneffizienz und der Produktivität zu erarbeiten und zu bewerten.

Um die beiden betrachteten Bearbeitungsschritte anwendungsspezifisch auszulegen, erfolgen zunächst Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss signifikanter Prozessparameter auf die Prozess- und Bauteilqualität. Hinsichtlich des Hochvorschubbohrens wird experimentell analysiert, inwiefern sich die Eingangsgrößen Vorschubgeschwindigkeit, KSS-Strategie und

Werkzeugmodifikationen auswirken (vgl. **Abbildung 3.1**). Dabei werden insbesondere die Minimierung der Bearbeitungszeit sowie der prozesssichere Abtransport der Späne als Teilziele definiert. Das Helikalgewindeformen ist bis dato noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen und wird daher insbesondere mithilfe von erweiterten Methoden zur Prozess- und Gewindecharakterisierung betrachtet. Die Schwerpunkte dieser Analysen liegen auf den Einflüssen des Vorbohrdurchmessers, der Gewindedrehzahl sowie des KSS-Konzepts. Im Speziellen bilden dabei die neuartige Kinematik des Gewindeformprozesses sowie die entwickelte Methodik zur fertigungstechnischen Bewertung der Gewindequalität die Kernaspekte dieser Arbeit. Zusammen mit der Gegenüberstellung mit konventionellen Innengewindeverfahren stellt die Minimierung der Prozesskräfte bei gleichzeitig Gewährleistung der üblichen Gewindequalität ein Teilziel der Untersuchungen zur Gewindeherstellung innerhalb der Prozesskette dar.



**Abbildung 3.1:** Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Auf Basis der Erkenntnisse aus den grundlagenorientierten Analysen zum Hochvorschubbohren und Helikalgewindeformen (Kapitel 5 und 6) wird im

dritten Teil der Arbeit eine Bearbeitungsstrategie für eine Hochleistungsprozesskette entworfen und in Einsatzversuchen unter praxisnahen Bedingungen realisiert. Am Beispiel eines AlSi-Elektromotorgehäuses wird die Bearbeitungsaufgabe mit definierter Gewindeanzahl und Werkzeugwegen festgelegt. Die Prozesstechnologie der beiden Bearbeitungsschritte wird gemäß den im Rahmen der zuvor umgesetzten Meilensteine ausgelegt. Um die Potenziale der Sonderwerkzeuge und -technologien hinsichtlich Produktivität und Energiebedarf schließlich vergleichend zu quantifizieren, dienen Einsatzversuche mit einer Standardprozesskette (Senkbohren und Gewindeformen) unter vergleichbaren Bedingungen als Referenz.



## 4 Experimentelle Randbedingungen

Dieses Kapitel enthält die Erläuterung der im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden experimentellen Randbedingungen. Zunächst erfolgt die Darstellung von werkstofftechnischen Details der betrachteten Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg. Darauffolgend werden die eingesetzten Bohr- und Gewindewerkzeuge bzgl. ihrer technischen Eigenschaften vorgestellt. Schließlich wird auf die experimentelle Durchführung der Versuche anhand der verwendeten Werkzeugmaschinen sowie die eingesetzten Messgeräte und Analysetechniken eingegangen.

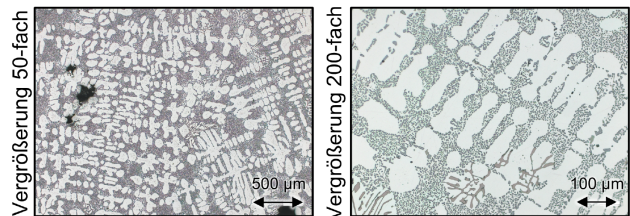
### 4.1 Werkstoff

Die technologischen Grundlagenversuche sowie die Einsatzversuche zur Bohr- und Gewindebearbeitung wurden am Beispiel der aushärtbaren Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg durchgeführt. **Abbildung 4.1** zeigt ausgewählte technische Eigenschaften der verwendeten Legierungsvariante.

#### Werkstoff

#### AlSi10MnMg (trimal®-05)

Mikrostruktur:



Chemische Zusammensetzung nach Herstellerangaben Fa. TRIMET ALUMINIUM SE :

%	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr
min.		9,5		0,03	0,4	0,15			
max.	bal.	11,5	0,25	0,05	0,8	0,45	0,07	0,07	0,027

T6-Wärmebehandlung in Dienstleistung durch Fa. ATC ALUVATION GmbH:

Lösungsglügen	Glühtemperatur T = 530 °C bei Haltezeit t = 5 h
Abschrecken	Wasser und Abkühlen auf T < 40 °C
Warmauslagern	Auslagertemperatur T = 165 °C bei Haltezeit t = 8 h; anschließende Ofenabkühlung auf T < 100 °C

Mechanische Eigenschaften (T6) \*Herstellerangaben Fa. TRIMET ALUMINIUM SE:

Dehngrenze*	R <sub>p0,2</sub> = 200...270 MPa	Bruchdehnung*	A = 6...13 %
Zugfestigkeit*	R <sub>m</sub> = 290...350 MPa	Härte	123 ± 1,8 HV10






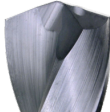




**Abbildung 4.1:** Technische Eigenschaften des Werkstoffs AlSi10MnMg [TRI20]

Mit dem Ziel, die Hochleistungsprozesskette zur Innengewindefertigung am Beispiel eines Serienprozesses aus der Automobilindustrie abzubilden, wurde die Legierungsvariante  $\text{AlSi10MnMg}$  (EN AC-43500; *trimal*<sup>®</sup>-05) ausgewählt, die neben hervorragender gießtechnischer Verarbeitbarkeit über gute dynamische und statische Festigkeitseigenschaften verfügt. Ein ausgewogenes Mangan-Eisen-Verhältnis ermöglicht die Urformung im hochproduktiven Druckgussverfahren [DIN21; TRI20]. Aufgrund der verringerten Adhäsionsneigung zwischen der Gussform aus Warmarbeitsstahl und den MnFe-legierten Aluminiumgusslegierungen können Gleichteile in hohen Stückzahlen und gesteigerten Werkzeugstandzeiten gefertigt werden [Ges07]. Die bei der Fa. *TRIMET* gegossenen Masseln wurden zunächst frästechnisch vorbearbeitet (Querschnitt 60 × 50 mm) und anschließend in Probenstücke mit einer Dicke von 12 mm gesägt. Durch die T6-Wärmebehandlung bei der Fa. *ALUVATION* wurde die entsprechende Steigerung der mechanischen Festigkeit erzielt, welche u. a. als Anforderung für tragende Karosserieteile im Kraftfahrzeugbau gilt. Des Weiteren bilden die Halbzeuge bei stirnseitiger Bearbeitung eine Aufspannung von dünnwandigen Gehäusebauteilen im Versuchsaufbau ab.

## 4.2 Bohrwerkzeuge

Der erste Schritt innerhalb der Prozesskette zur Innengewindefertigung ist im Allgemeinen ein Vollbohrprozess. Ziel dieses Bearbeitungsschritts ist die Herstellung einer Grund- bzw. Durchgangsbohrung, deren technische Eigenschaften gemäß des Gewindetyps bzw. dessen Fertigungsverfahren zu wählen sind. Dazu werden in der industriellen Fertigung für die betrachteten M6-Gewinde in der Regel Wendelbohrwerkzeuge aus Vollhartmetall eingesetzt. **Abbildung 4.2** zeigt ausgewählte technische Details der im Rahmen der praktischen Versuche (Kapitel 5-8) verwendeten Werkzeugvarianten. Die Durchmesservarianten ( $d = 5 - 5,5 - 5,55 - 5,6$  mm) des Standardwerkzeugs Typ *EMUGE SteelDrill* sind TiAlN-beschichtet und für Bohrtiefen von bis  $t = 5 \times D$  einsetzbar. Der Universalbohrer wird nach Herstellerangaben zur Bearbeitung verschiedener ISO-Werkstoffgruppen empfohlen. Im Speziellen gelten für die Bearbeitung von siliziumhaltigen Aluminiumgusslegierungen eine Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 180$  m/min und ein Vorschub  $f = 0,2$  mm als prozesssichere Richtwerte. Im Zuge der Grundlagen-

versuche zum Gewindebohren und -fräsen in Kapitel 8 wurde ein Vorbohrwerkzeug mit Nenndurchmesser  $d = 5$  mm verwendet. Die Gewindekernbohrungen für die spanlosen Gewindevverfahren wurden mittels der Durchmesservarianten  $d = 5,5; 5,55$  bzw.  $5,6$  mm gefertigt [EMU24].

Bohrwerkzeuge	<i>EMUGE Steel Drill SD102</i>	<i>MAPAL Drill Tritan Alu</i>			
		STD	STD + ta-C	MOD	MOD + ta-C
					
					
Typ:	Universal-Wendelbohrer	← Hochleistungs-Wendelbohrer →			
Nenn-Ø:	$d = 5 \dots 5,6$ mm	← $d = 5,5$ mm →			
Spitzenwinkel:	$\sigma = 140^\circ$	← $\sigma = 140^\circ$ →			
Drallwinkel:	$\delta = 22^\circ$	← $\delta = 30^\circ$ →			
Schneiden:	$z = 2$	← $z = 3$ →			
Fasen:	2	← 3 →			
Schicht:	TiAlN	ta-C		ta-C	
Modifikation:		← Stufe →			
Länge:	← →	← $l_{\text{ges}} = 82$ mm →			
Nutzlänge:	← →	← $l_{\text{eff}} = 35$ mm →			
Schaft-Ø:	← →	← $d_s = 6$ mm →			

**Abbildung 4.2:** Technische Eigenschaften des Universalbohrers [EMU24] (links) und der Varianten des Hochleistungsbohrwerkzeugs [MAP24] (rechts)

Zur signifikanten Steigerung der Produktivität bei der Bohrbearbeitung wurde ein dreischneidiges Bohrwerkzeug der Fa. MAPAL Typ Tritan Alu Drill eingesetzt. Neben der Schneidanzahl unterscheidet sich der Hochvorschubbohrer im Speziellen durch einen verringerten Drallwinkel sowie geringere Schneidkantenradien ( $r_\beta = 20 \mu\text{m}$ ) gegenüber dem Referenzwerkzeug. Die unbeschichtete Variante wird zunächst als Standardmodifikation

(STD) im Rahmen der technologischen Grundlagenuntersuchungen zum Hochvorschubbohren (siehe Kapitel 5) eingesetzt. Weiterhin wird dort der Einfluss einer ta-C-Beschichtung auf das Einsatzverhalten untersucht. Die Bohrwerkzeuge (STD + ta-C) wurden von der Fa. *Oerlikon Balzers* beschichtet. Aufgrund der geringen Dicke der tetraedrischen amorphen Kohlenstoff-Schicht (0,7  $\mu\text{m}$ ) wurde keine signifikante Veränderung der Schneidkantenmikrogestalt festgestellt. Infolge der durchgeführten Schichtvorbehandlung konnte die Oberflächenrauheit gegenüber der Standardmodifikation verringert werden. Zur Verringerung der Spangröße wurde im Projektverlauf von der Fa. *MAPAL* eine Werkzeugmodifikation (MOD) entwickelt, die sich durch eine gestufte Werkzeugspitze gegenüber dem Standardwerkzeug (STD) unterscheidet. Zusätzlich wurden weitere Stufenbohrer (STD + ta-C) zusammen mit den Serienwerkzeugen in einer Charge beschichtet.

### 4.3 Gewindewerkzeuge

Innerhalb der betrachteten Prozesskette folgt auf die Herstellung der Kernbohrung die eigentliche Innengewindebearbeitung. Abhängig vom angewandten Fertigungsverfahren weisen die Werkzeuge spezifische Eigenschaften wie z. B. Makro- und Mikrogestalt, Beschichtung etc. auf. Im Folgenden werden die dazu eingesetzten Werkzeuge für konventionell etablierte Verfahren sowie die Spezialwerkzeuge zum Helikalgewindeformen technisch erläutert.








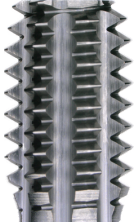
#### Gewindebohrer, -fräser und -former

In der industriellen Fertigung sind die Verfahren Gewindebohren, -fräsen und -formen allgemein am weitesten verbreitet. **Abbildung 4.3** zeigt entsprechend die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (Kapitel 8) eingesetzten Werkzeuge und stellt relevante technische Eigenschaften gegenüber.

Zum Gewindebohren wurde ein anwendungsspezifisch ausgelegtes Werkzeug des Typs *EMUGE Rekord 1D-GAL/E* verwendet. Speziell für die Herstellung von 2xD-Grundgewinden in AlSi-Gusslegierungen sind bspw. die kurze Anschnittform E und Titancarbonitrid-Beschichtung zu nennen. Zur prozesssicheren Spanabfuhr tragen ein geringer Drallwinkel von  $\delta = 10...15^\circ$  so-

wie die innere KSS-Zufuhr bei. Nach Herstellerangaben wird eine Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 22...36$  m/min zur Bearbeitung von Aluminiumgusswerkstoffen empfohlen [EMU13a; EMU24].

Beim Gewindefräsen werden im unterbrochenen Schnitt zum einen sehr günstige Spanformen erzeugt und zum anderen ist aufgrund der prozesstypischen Radialbelastung bei vergleichsweise kleinem Nenndurchmesser eine gesteigerte Biegefestigkeit erforderlich. Aufgrund dieser Anforderungen wurde der Universal-Gewindefräser Typ AT-1 durch den Hersteller Fa. OSG mit einem massiven Kern aus Ultrafeinkornhartmetall sowie ohne Innenkühlkanal ausgelegt.

Gewinde- werkzeug	<i>EMUGE</i> <i>Rekord</i> <i>1D-GAL/E</i>	<i>OSG</i> <i>AT-1</i>	<i>OSG</i> <i>DLC-O-</i> <i>EM-PNC</i>	<i>EMUGE</i> <i>InnoForm 1</i> <i>GAL/E-SN</i>
				
				
<i>Typ:</i>	Gewindebohrer	Gewindefräser	Bohrgewindefräser	Gewindeformer
<i>Gewindetyp:</i>	M6 × 1	M6 × 1	M6 × 1	M6 × 1
<i>Schneiden:</i>	z = 3	z = 4	z = 2	z = 7 (Stollen)
<i>Nenndurchm.:</i>	d = 6 mm	d = 4,5 mm	d = 4,6 mm	d = 6 mm
<i>KSS-Zufuhr:</i>	intern	extern	intern	intern
<i>Spitzengestalt:</i>	Typ E	-	Typ B	Typ E
<i>Schneidstoff:</i>	HSSE	VHM	VHM	HSSE-PM
<i>Beschichtung:</i>	Ti(C,N)	CrSi	DLC	Ti(C,N)
<i>Gesamtlänge:</i>	$l_{ges} = 80$ mm	$l_{ges} = 75$ mm	$l_{ges} = 50$ mm	$l_{ges} = 80$ mm
<i>Nutzlänge:</i>	$l_{eff} = 30$ mm	$l_{eff} = 14$ mm	$l_{eff} = 18,5$ mm	$l_{eff} = 30$ mm

**Abbildung 4.3:** Technische Eigenschaften der eingesetzten Gewindewerkzeuge [EMU24; OSG19; OSG23]

Zur Steigerung der dynamischen Stabilität des Fräsprozess weist das Werkzeug links gedallte Spannuten sowie eine ungleiche Teilung der vier Schneiden auf. Die Schnittwertempfehlung ist laut Hersteller für AlSi-Gusswerkstoffe mit  $v_c = 200$  m/min und  $f_z = 0,06$  mm angegeben [OSG19].

Als Sonderwerkzeug für die Innengewinde-Komplettbearbeitung für Aluminiumwerkstoffe erfüllt der Helikalbohrgewindefräser aus VHM spezielle Anforderungen zur Bearbeitung von ISO-N-Werkstoffgruppe. Durch die Komplettbearbeitung von Kernbohrung und Gewinde in einem Arbeitsgang wurde der Werkzeugtyp *DLC-O-EM-PNC* mit zwei vergleichsweise großen Spannuten konstruiert. Die Profilhähne an der Spitze des linksschneidenden Fräswerkzeugs wurden zur Reduzierung der Schnittkräfte mit einem langen Anschnitt (4-5 Gänge) gestaltet. Zur Steigerung des Verschleißschutzes und zum leichtem Spanabtransport liefert der Hersteller Fa. OSG das Werkzeug in Serie mit Innenkühlung sowie DLC-Beschichtung aus. Als Richtwerte für Aluminiumgussbearbeitung empfiehlt er eine Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 200$  m/min bei Zahnvorschub  $f_z = 0,06$  mm [OSG23].

Durch die vergleichsweise hohe Verformungsfähigkeit von Aluminiumgusslegierungen eignet sich das Gewindeformen besonders als Fertigungsverfahren. Das Gewindeformwerkzeug Typ *Innoform 1 GAL/E-SN* stellt mit Ti(C,N)-Beschichtung und Anformkegel Typ E das entsprechende Pendant zum zuvor beschriebenen Gewindebohrer der Fa. *EMUGE* dar. Aufgrund des starken Adhäsivverschleiß beim Gewindeformen von AlSi-Legierungen wird die Schmierstoffversorgung der sieben Formstollen durch eine interne KSS-Zufuhr und breite Schmiernuten sichergestellt. Um dem prozessspezifisch hohen Axialmoment sowie der damit verbundenen Wechselbelastung bei der Richtungsumkehr zu begegnen, ist der Werkzeuggrundkörper aus pulvermetallurgisch hergestelltem Schnellarbeitsstahl gefertigt, der gegenüber Stranggussmaterial über eine gesteigerte Zähigkeit verfügt. Als spezifische Umfangsgeschwindigkeit im Anwendungsbereich ISO-N gibt die Fa. *EMUGE* eine Umfangsgeschwindigkeit von  $v_u = 20...40$  m/min an. [EMU13b; EMU24; K1018].

### **Helikalgewindeformer**

Die experimentellen Versuche zum innovativen Helikalgewindeformen (siehe Kapitel 6 und 8) werden mit der Werkzeugvariante *PunchTap Form F*

IKZ-TIN-T26 durchgeführt. Das Referenzwerkzeug wird durch den Werkzeughersteller Fa. *EMUGE* für die Herstellung von M6-Innengewinden in Al-Guss- und Knetlegierungen empfohlen, welche durch die maximale Nutzlänge des Werkzeugs von  $l_{\text{eff}} = 20$  mm (siehe **Abbildung 4.4**) mit einem  $l/D$ -Verhältnis von bis zu  $3 \times D$  gefertigt werden können.

Helikalgewindeform	<i>EMUGE PunchTap Form F IKZ-TIN-T26</i>	<i>EMUGE PunchTap IKZ-TIALN-T10</i>
Gewindetyp	M6 × 1	M6 × 1
KSS-Zufuhr	intern (IKZ)	intern (IKZ)
Drallsteigung	$P_D = 31,5$ mm	$P_D = 31,5$ mm
Drallwinkel	$\delta = 30^\circ$	$\delta = 30^\circ$
Schneidstoff	HSSE-PM	HSSE-PM
Beschichtung	TiN	TAIN
Gesamtlänge	$l_{\text{ges}} = 120$ mm	$l_{\text{ges}} = 155$ mm
Nutzlänge	$l_{\text{eff}} = 20$ mm	$l_{\text{eff}} = 20$ mm



**Abbildung 4.4:** Technische Eigenschaften der Helikalgewindeformwerkzeuge in Standard- (links) sowie Serienvariante (rechts)

Die synchrone Werkzeugbewegung zum Stoßen der Helikalnut erfordert einen entsprechenden Drallwinkel der Formzahnreihen von  $\delta = 30^\circ$ . Für die genutzte M6-Werkzeugvariante entspricht das einer Drallsteigung von  $P_D = 31,5$  mm. Die notwendige Schmierstoffversorgung der Formkeile mittels KSS-Emulsion oder MMS erfolgt werkzeugseitig durch eine axiale Durchgangsbohrung mit Durchmesser  $d = 1,1$  mm. Diese trifft im Sonderwerkzeughalter formschlüssig auf ein axial einstellbares Dichtelement, welches über ein DIN-69895-Übergaberohr mit den verschiedenen KSS-Medien durch die Motorfrässpindel versorgt wird [EMU20].

Entsprechend den Anforderungen zur Bearbeitung von Aluminiumlegierungen sind die Formelemente des Gewindewerkzeugs zur Minderung von Materialanhaftungen im PVD-Verfahren mit Titanitrid (TiN) beschichtet. Die Schichtdicke von  $s_d = 2$   $\mu\text{m}$  wurde mittels REM-Analyse eines Querschliffs bestimmt. Entsprechend den speziellen Anforderungen des Helikalgewin-

deformens weist die Formzahn-Oberfläche nach Messung mittels Konfokalmikroskop ( $R_a = 0,285 \mu\text{m}$ ;  $S_a = 3,76 \mu\text{m}$ ) eine für Gewindeformer vergleichsweise hohe Rauheit auf.

Das als Referenztyp eingesetzte Werkzeug ist aufgrund der hochdynamischen Torsions- und Zugbelastungen während des Helikalgewindeformprozesses aus hochlegiertem, pulvermetallurgisch erzeugtem Schnellarbeitsstahl gefertigt. Die für Zerspanungswerkzeuge ausgelegte HSS-Legierungsvariante weist entsprechend eine seigerungsfreie Mikrostruktur mit homogener Karbidstruktur für hohe Druckfestigkeit im Einsatz auf. Durch den Härteprozess und das mehrfache Anlassen wird eine hohe Härte (830 HVO,1) bei gesteigerter Zähigkeit erreicht, wodurch die erforderlichen Eigenschaften von Hochleistungs-Gewindewerkzeugen erzielt werden.

Im Rahmen der experimentellen Einsatzversuche mit Hochleistungstechnologien zur Innengewindefertigung, die in Kapitel 8 behandelt werden, wird der Werkzeugtyp *PunchTap IKZ-TIALN-T10* eingesetzt. Dieses Sonderwerkzeug wird derzeit in der industriellen Massenfertigung von AlSi-Gehäusekomponenten verwendet und ist entsprechend den Anforderungen und Erfahrungen aus Serienprozessen in verschiedenen technischen Details optimiert. Im Speziellen ermöglicht die gesteigerte Schaftlänge ( $l_{\text{ges}} = 155 \text{ mm}$ ) Störkonturen mit einer Tiefe von bis zu  $l = 65 \text{ mm}$  zu überbrücken. Darüber hinaus ist die Makrogestalt der Stoßzähne angepasst, um Verschleiß an der besonders belasteten Werkzeugspitze zu minimieren. Zur Steigerung der Standzeit gilt insbesondere die verwendete Ti(Al,N)-Beschichtung im Zusammenhang der Bearbeitung von Aluminiumgusslegierungen mit erhöhtem, abrasiv wirkenden Si-Gehalt als vorteilhaft.

#### **4.4 Werkzeugmaschinen und Kühlschmierstoffe**

Die experimentellen Untersuchungen zur Bohr- und Innengewindebearbeitung wurden im Versuchsfeld des *Instituts für Spanende Fertigung (ISF)* der *Technischen Universität Dortmund* durchgeführt. Die technischen Details zu den verwendeten Werkzeugmaschinen sowie der eingesetzten Kühlschmierstoff-Konzepte werden im Folgenden erläutert.

## Bearbeitungszentren

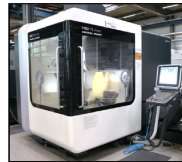
Zur technologiegerechten Durchführung der Einsatzversuche zu verschiedenen Bohr- und Gewindevverfahren wurden entsprechend geeignete Werkzeugmaschinen im *ISF*-Versuchsfeld ausgewählt. **Abbildung 4.5** zeigt die eingesetzten Bearbeitungszentren (BAZ) mit technischen Eigenschaften.

### Maschine

#### GROB BZ 600



#### DMG HSC 75 linear



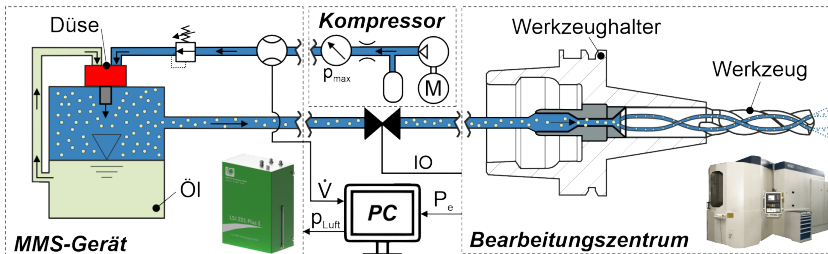
<i>Typ:</i>	4-Achs-Bearbeitungszentrum	5-Achs-Bearbeitungszentrum
<i>Bauweise:</i>	Fahrständer	Linearantriebe
<i>Spindelanordnung:</i>	Horizontal	Vertikal
<i>Werkzeugschnittstelle:</i>	HSK-A80	HSK-A63
<i>Arbeitsweg (x/y/z-Achse):</i>	800/700/630 mm	885/600/600 mm
<i>Vorschubgeschw. max. (x/y/z-Achse):</i>	60/60/70 m/min	90/90/90 m/min
<i>Drehzahl max.:</i>	$n_{\max} = 10.000 \text{ min}^{-1}$	$n_{\max} = 28.000 \text{ min}^{-1}$
<i>Antriebsleistung max.:</i>	$P_{\max} = 62 \text{ kW (40 \% ED)}$	$P_{\max} = 55 \text{ kW (43,5 \% ED)}$

**Abbildung 4.5:** Werkzeugmaschinen zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen im *ISF*-Versuchsfeld

Zur beispielhaften Abbildung der Bearbeitungsprozesse für Kfz-Gehäusekomponenten in der industriellen Serienfertigung wurde das 4-Achs-BAZ des Typs *GROB BZ600* ausgewählt. Es eignet sich zunächst aufgrund der verbauten Horizontalspindel zur prozesssicheren Aluminiumzerspannung mit hohen Abtragsraten und hohem Automatisierungsgrad. Durch den großen Bearbeitungsraum mit Palettenwechsler wird ein automatisierter Werkstückwechsel sowie der Abtransport großer Spanmengen ermöglicht. Im Speziellen verfügt die Werkzeugmaschine der Fa. *GROB* über mechanisch verstärkte Spindellager und eine HSK-A80-Werkzeugschnittstelle, wodurch das BAZ für hohe axiale Zugbelastungen im Dauerbetrieb ausgelegt ist. Weiterhin ist die Umrüstung zwischen Emulsions- und MMS-Versor-

gung mit geringem Aufwand möglich. Werkzeugseitig werden G 2,5-gewichtete Schrumpfaufnahmen für die Bohrwerkzeuge verwendet. Die Gewindewerkzeuge werden mittels eines Minimallängen-Ausgleichsfutters (Typ *EMUGE Softsynchro*) bzw. eines starren Sonderwerkzeughalters für Helikalgewindeformer (Typ *EMUGE PT Synchro*) in der HSK-A80-Schnittstelle gespannt. Für die MMS-Bearbeitung wurden spezielle Dicht- und Übergabelemente in den Werkzeugaufnahmen gerüstet.

Zur Durchführung der praktischen Untersuchungen mit Minimalmengenschmierung wurde das einkanalige Überdruck-Dosiergerät Typ *LSJ Z01 Plus S* der Fa. *HPM Technologie* in den Versuchsaufbau integriert, wie **Abbildung 4.6** schematisch zeigt.



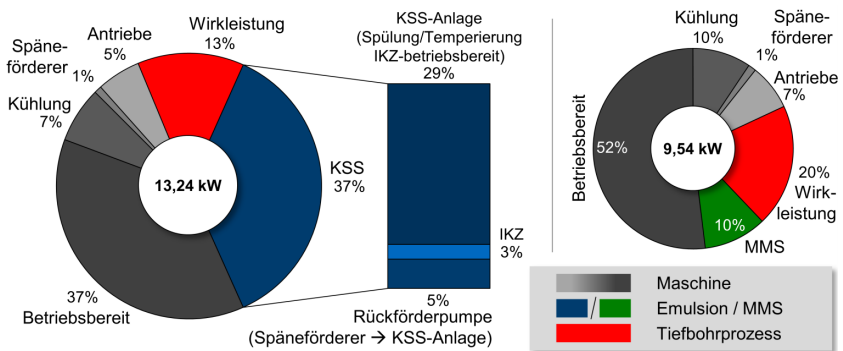
**Abbildung 4.6:** Schematischer Aufbau des MMS-Systems

Das innerhalb des Behälters erzeugte Aerosol wurde mittels einer druckfesten Kunststoffrohrleitung zur Drehdurchführung des BAZ geleitet. Um eine gleichbleibend hohe Aerosol-Qualität sicherzustellen, wurden spezielle MMS-Übergabelemente und ein NC-geschaltetes Magnetventil verwendet. Zur Druckluftversorgung wurde ein Hochdruckkompressor-System genutzt. Der Betriebsdruck des MMS-Geräts ist über ein Regelventil zwischen  $p = 2 \dots 16$  bar einstellbar.

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Minimalmengenschmierstoffe wurden ein esterbasiertes Produkt sowie ein Öl auf Basis von Fettalkohol eingesetzt. Das auf synthetischen Estern basierende Öl vom Typ *Quaker Houghton GARIA® SL 860* ist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, somit chlor- und schwermetallfrei und wird in der verarbeitenden Industrie aufgrund der hohen Schmierfähigkeit für anspruchsvolle Gewinde- und Tiefbohrbearbeitungsprozesse verwendet. Mit einer kinematischen

Viskosität von  $\nu = 70 \text{ mm}^2/\text{s}$  ist es als vergleichsweise zähflüssig zu bewerten. Eine sehr gute Fließfähigkeit besitzen im Allgemeinen fettalkoholbasierte Öle, wie der ebenfalls eingesetzte Produkttyp *Quaker Houghton CUT-MAX ML 501* ( $\nu = 27 \text{ mm}^2/\text{s}$ ). Der schwermetall- und mineralölfreie Schmierstoff wurde u. a. für die Bohrungsbearbeitung von Aluminiumlegierungen entwickelt. Durch das rasche Abdampfen von den bearbeiteten Oberflächen wird das Produkt in der Serienfertigung zur Trockenbearbeitung eingesetzt, da der Reinigungsaufwand vernachlässigbar ist.

Als Kühlschmierstoff-Referenz wird die wassermischbare Emulsion Typ *Quaker Houghton HOCUT® 4646* verwendet. Das borfreie Konzentrat wird mit einem Gehalt von 9 % im KSS-Kreislauf des BAZ aufbereitet und mittels der maschineninternen Hochdruckpumpe mit einem Druck von bis zu  $p = 60 \text{ bar}$  den Bohr- und Gewindewerkzeugen zugeführt. Die Leistungsaufnahme des Bearbeitungszentrums für die verschiedenen KSS-Konzepte stellt **Abbildung 4.7** beispielhaft dar.



**Abbildung 4.7:** Leistungsaufnahme der GROB BZ 600 bei der Bearbeitung mit KSS-Emulsion ( $p = 40 \text{ bar}$ ) bzw. MMS ( $p = 10 \text{ bar}$ ) nach [lov16]

Im Zuge der Tiefbohrbearbeitung mit wassermischbarer Emulsion setzt das GROB BZ 600 Bearbeitungszentrum bei einem Druck von  $p = 40 \text{ bar}$  in etwa 37 % der elektrischen Leistung in die KSS-Versorgung des Werkzeugs um. Der größte Anteil wird für die Aufbereitung und Rückförderung eingesetzt. Die elektrische Leistungsaufnahme des BAZ im MMS-Betrieb sinkt im vergleichbaren Bearbeitungsprozess durch die ausgeschaltete KSS-Anlage

um 28 %. In diesem Betriebszustand werden etwa 10 % der elektrischen Leistung zur Luftdruckversorgung benötigt [Iov16].

Zum Gewindefräsen wurde die Hochleistungsfräsmaschine *DMG HSC 75 linear* eingesetzt. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Maximaldrehzahl der Spindel von  $n_{\max} = 28.000 \text{ min}^{-1}$  konnte die empfohlene Schnittgeschwindigkeit beim Gewindefräsen erreicht werden. Zur Kühlschmierstoffversorgung der Fräser wurde die 7 % KSS-Emulsion von innen mittels feingewuchteter Hochpräzisions-Werkzeughalter zur Wirkstelle gefördert.

Der energetische Vergleich zwischen den eingesetzten Bearbeitungszentren zeigt, dass die hochdynamische 5-Achsfräsmaschine *DMG HSC 75 linear* zur Bearbeitung mit KSS-Emulsion und Innenkühlung ca. 16 % weniger elektrische Leistung aufnimmt als das BAZ des Typs *GROB BZ 600*. Die Werkzeugmaschine benötigt aufgrund des geringen KSS-Tankvolumens einen vergleichsweise geringen Anteil der Energie zur KSS-Aufbereitung. Die Hochleistungssteuerung arbeitet hingegen sehr energieintensiv [Wir19].

#### **4.5 Mess- und Analysetechnik**

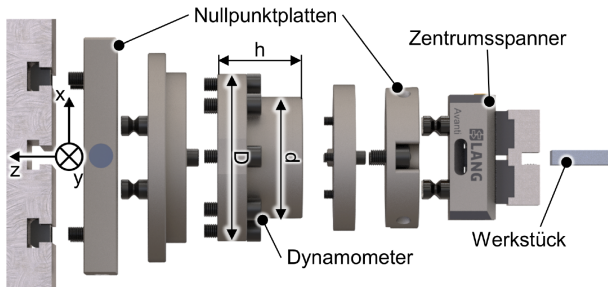
Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einflüsse unterschiedlicher Eingangsgrößen auf die Prozesseigenschaften sowie die Bohrungs- und Gewindequalität untersucht. Mit dem Ziel, spezifische Zusammenhänge sowohl in situ als auch ex situ zu analysieren, wurden verschiedene Versuchsaufbauten konstruiert und spezielle Analysemethoden zur Bestimmung der Gewindequalität entwickelt. Anhand der gewonnenen Messergebnisse werden signifikante Kriterien der Bearbeitbarkeit bewertet. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die prozessbegleitend eingesetzte Messtechnik vorgestellt, gefolgt von den Analysemethoden zur Beurteilung der Bearbeitungsqualität.

#### **Mechanische Werkzeugbelastungen**

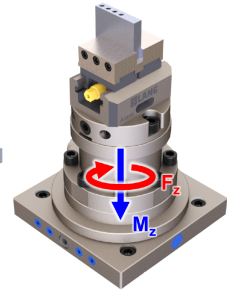
Dass vergleichsweise hohe mechanische Belastungen während des Helikalgewindeformprozesses auf Bauteile und Werkzeuge wirken, ist aus der Entwicklungsphase und Einsatzerfahrungen aus der Serienfertigung grundsätzlich bekannt [KHB\*12; WB 14]. Zur wissenschaftlichen Bewertung des Einflusses der betrachteten Prozessgrößen, wie z. B. variierende Vorbohrdurchmesser, wurde ein spezieller Versuchsstand zur Analyse gesteigerter

mechanischer Werkzeugbelastungen entwickelt. **Abbildung 4.8** zeigt dessen Aufbau sowie ausgewählte technische Daten der Sensorik zur Bestimmung der mechanischen Werkzeugbelastungen.

**Explosionszeichnung :**



**Isometrisch:**



**Technische Daten** (Dynamometer):

*Dynamometer:* Kistler 9272

*Abmessungen:* D = 140 mm;

d = 100 mm

h = 70 mm

*Gewicht:* m = 4,2 kg

*Messverstärker:* Kistler 5011

*Vorfilterung:* Tiefpass 3kHz

*Funktionsprinzip:* piezoelektrisch

*Messgrößen:*  $F_x, F_y, F_z, M_z$

*Messbereich:*  $F_{x,y} = -5 \dots 5$  kN

$F_z = -20 \dots 20$  kN

*Empfindlichkeit:*  $F_{x,y} = \pm 7,65$  pC/N

$F_z = \pm 3,62$  pC/N

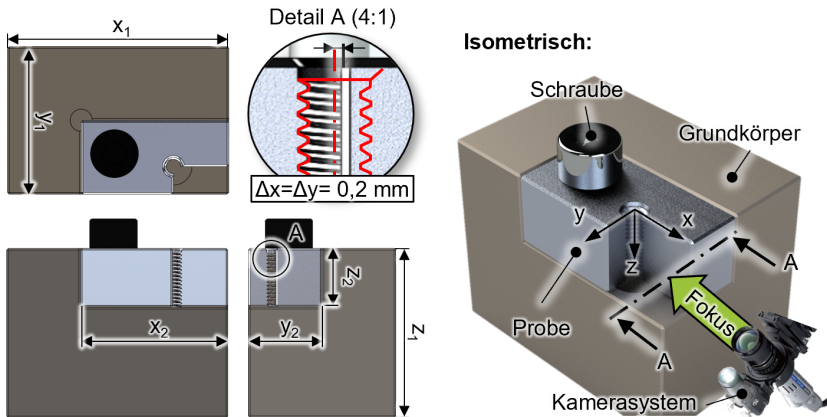
*Messfrequenz:*  $f_M = 50$  kHz

**Abbildung 4.8:** Messaufbau zur Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen mit technischen Daten des Bohrdynamometers [Kistler]

Zur Messung von Axialkraft und -moment wurde ein stationäres Dynamometer Typ Kistler 9272 ausgewählt, welches über ausreichend hohe Messbereiche der Axialkraft  $F_z$  und des Axialmoments  $M_z$  verfügt. Um dem Messsystem eine ausreichende Festigkeit in Zug- und Druckrichtung zu verleihen, wurde formschlüssig montierte Nullpunktspanntechnik verwendet sowie großzügig ausgelegte Schraubverbindungen konstruiert.

## Gewindeformvorgang

Die signifikante Produktivitätssteigerung durch das Helikalgewindeformen wird im Wesentlichen durch die Verringerung des Werkzeugwegs beim Ein- und Ausfahren aus der Bohrung sowie dem einstufigen Formprozess erzielt [WB 20]. Zur visuellen Darstellung des Gewindeformvorgangs wurde ein Versuchsstand zur Hochgeschwindigkeitsmikroskopie entwickelt, dessen Aufbau in **Abbildung 4.9** skizziert ist.



### Abmessungen:

<i>Grundkörper:</i>	$x_1 = 60 \text{ mm}$
	$y_1 = 40 \text{ mm}$
	$z_1 = 46 \text{ mm}$
<i>Probe:</i>	$x_2 = 40 \text{ mm}$
	$y_2 = 20 \text{ mm}$
	$z_2 = 16 \text{ mm}$

### Technische Daten (High-Speed-Kamera):

<i>Kamerasystem:</i>	Keyence VW-9000
<i>Bildwiederholrate:</i>	F = 12.000 Bilder/s
<i>Bildgröße:</i>	320 × 240 Pixel
<i>Objektiv:</i>	Keyence VH-Z50L
<i>Vergrößerung:</i>	50-fach
<i>Objektastand:</i>	85 mm

**Abbildung 4.9:** Versuchsaufbau zur High-Speed-Mikroskopie des Gewindeformvorgangs mit technischen Eigenschaften der Kamera [KEY11]

Mit dem Ziel, die Formung des Gewindefprofils in situ zu analysieren, wurde ein Segment der Gewindegewindebohrung aus dem Aluminiumgusswerkstück herausgetrennt, um mittels einer High-Speed-Kamera die Querschnittsfläche der Bohrungswand zu fokussieren. Die orthogonale Ausrichtung der Kamera erlaubt es, während der trocken durchgeführten Bearbeitung das Ausformen der Gewindegspitzen und -gründe in verlangsamer Darstellung

zu betrachten. Das verwendete High-Speed-Kamerasystem vom Typ *Keyence VW-9000* zeichnet monochrom mit einer Bildwiederholrate von 12.000 Bildern/s auf. Mittels des Sonderobjektivs mit 50-facher Vergrößerung konnte ein Bildausschnitt von etwa  $4 \times 3$  mm aufgenommen werden.

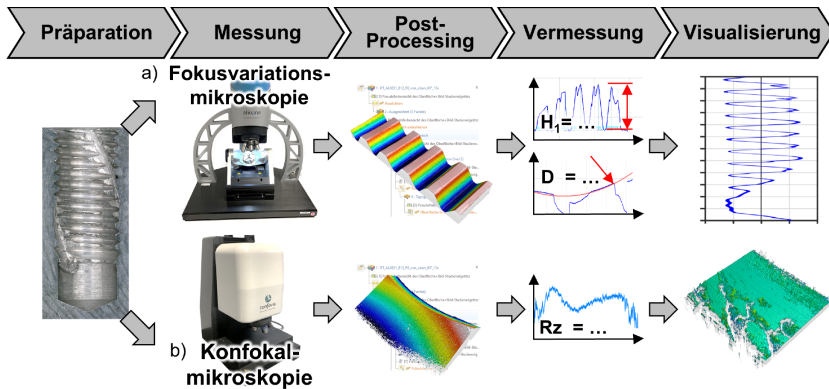
### **Bohrungs- und Gewindequalität**

Anhand verschiedener Analysemethoden sollen im Rahmen dieser Arbeit Zusammenhänge zwischen den betrachteten Prozessparametern und der resultierenden Bearbeitungsqualität geschlossen werden. Diese werden im Folgenden detailliert erläutert.

Die Maße der Bohrungen werden mittels eines 3D-Koordinatenmessgeräts (Typ *ZEISS Prismo 3D*) taktil vermessen. Im Anschluss werden die Proben in Querrichtung aufgetrennt, um die Detailanalyse der Oberflächen durchzuführen. In Bezug auf die Oberflächengestalt werden mittels eines 3D-Mikroskops vom Typ *Keyence VHX-5000* lichtmikroskopische Aufnahmen der offenen Bohrungswände erstellt. Durch die bis zu 200-fache Vergrößerung sowie dreidimensionale Kachelaufnahmen gelingt es, die makroskopische Struktur der Bohrungswand- und Gewindeflankenoberflächen aufzunehmen. Um die Oberflächenqualität der Bohrungswände nach ISO-Standard 4287 zu analysieren, wurde das taktile Rauheitsmessgerät *Mahr XR20* verwendet. Die Messstrecken wurden entsprechend den periodischen Profilabständen gemäß DIN EN ISO 4288 gewählt.

Zur umfangreichen Analyse der Gewindequalität wird in dieser Arbeit eine erweiterte Methodik angewandt, die am *ISF* im Verlauf des Promotionsvorhabens entwickelt wurden. Dabei stehen die Gewindezähne am Anfang, Mitte und Ende im Vordergrund der Messungen, um die lokalen Eigenschaften der Gewindeflanken vergleichend zu analysieren. Zum einen wird das Mikroskop *Alicona Infinite Focus G5* eingesetzt, um mittels der Fokusvariations-Messung Form und Maße der dreidimensionalen Gewindeflächen zu bestimmen. Die mehrstufige Messung mit zehnfacher Vergrößerung erfasst die Oberflächengestalt der Gewindezähne entlang der Bohrungsachse. Aus den aufgezeichneten Rohdaten des betrachteten Messbereichs von  $16 \times 1,6$  mm werden im Nachbearbeitungsprozess mit der Software *µsoft Analysis* die Profilhöhe  $H_1$ , der Außendurchmesser  $D$  sowie der Kern-

durchmesser  $D_1$  ermittelt. Neben diesen durch Mehrfachmessungen statistisch verifizierten Messwerten wird ein gemitteltes 2D-Profil zur Visualisierung der Gewindegestalt erstellt. Zum anderen beinhaltet die Methodik die Konfokalmikroskopie, um die Oberflächentopografie der Gewindeflanken bspw. hinsichtlich Anhaftungen, Strukturveränderungen etc. zu analysieren. Die halbierten Proben werden zur Aufnahme um  $30^\circ$  angestellt, um die Flankenoberfläche senkrecht mit zehnfacher Vergrößerung zu fokussieren. Anschließend erfolgt die Erfassung der Messwerte im Messbereich von  $1,25 \times 0,75$  mm. Die Post-Processing-Software *μsoft Analysis* wird genutzt, um umfangreiche Nachbearbeitung der Rohdaten hinsichtlich Filterung, Kennwert-Berechnung und Visualisierung durchzuführen. Die erläuterten Schritte zur Gewindeanalyse sind in **Abbildung 4.10** dargestellt.



**Abbildung 4.10:** Analysemethodik zur Post-Prozess-Analyse des Gewindeprofils (a) und der Oberflächeneigenschaften (b)

Darüber hinaus wurden im letzten Schritt der Gewindeanalyse metallografische Untersuchungen durchgeführt, um mikrostrukturelle Veränderungen der Randzone mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen zu analysieren. Zur Vorbereitung der Oberflächenpräparation wurden die Aluminiumproben zunächst in Epoxidharz eingebettet. Die Querschliffflächen wurden anschließend mittels des halbautomatischen Präparationsgeräts vom Typ *Struers Tegramin-25* geschliffen (SiC-Schleifpapier Körnung bis 1.200) und mit Diamantsuspension poliergeschliffen (Korngröße bis  $1 \mu\text{m}$ ). Um die unterschiedlichen Phasen des AlSi-Gefüges deutlich sichtbar zu machen,

wurde eine Ätzung nach Barker durchgeführt. Dazu kam das elektrolytische Polier- und Ätzgerät der Fa. *Struers* vom Typ *LectroPol-5* zum Einsatz. Die Gewindeproben wurden bei einer Flussrate von 15, einer Spannung von  $U = 20\text{ V}$  und einer Dauer von  $t = 30\text{ s}$  in konzentrierter Tetrafluorborsäure geätzt. Wie **Abbildung 4.11** zeigt, wurden im letzten Schritt der Mikrostrukturanalyse die lichtmikroskopischen Gefügebildungen der Gewindespitzen und -gründe mittels des Auflichtmikroskops *ZEISS Imager M1m* angefertigt.



**Abbildung 4.11:** Methodik zur Mikrostrukturanalyse der Gewindeproben

### Elektrische Leistung

Um die verschiedenen Prozessketten zur Innengewindefertigung aus energetischer Perspektive zu betrachten, wurde die elektrische Leistungsaufnahme des Bearbeitungszentrums *GROB BZ 600* prozessbegleitend gemessen und aufgezeichnet. Dazu wurde ein digitales Leistungsmessgerät (Fa. *YOKOGAWA*; Typ *WT500*) mit entsprechenden Stromzangen (Fa. *Fluke*; Typ *i 200s*) verwendet. Die Messung der Wirkleistung wurde mit einer Abtastrate von  $f_M = 1\text{ Hz}$  durchgeführt. Insbesondere im Rahmen der vergleichenden Analyse der Prozessketten wird der Einfluss des KSS-Konzepts auf den Energiebedarf fokussiert. Zur Bestimmung der verbrauchten Druckluftmenge des Überdruck-MMS-Systems wurde ein Volumenstromsensor des Typs *ifm SD5000* eingesetzt. Die Bestimmung des spezifischen Druckluftverbrauchs bei variierenden Werkzeugtypen und Luftdrücken wurde mittels einer prozessbegleitenden Messung durchgeführt. Die Ermittlung des Energiebedarfs für die Druckluftherzeugung wird nach *Züst et. al* durchgeführt. Für ein hocheffizientes Kompressorsystem mit Heizwärmekopplung werden die Energieäquivalente  $E_E = 0,08\text{ kWh/m}^3$  (4 bar) bzw.  $E = 0,13\text{ kWh/m}^3$  (12 bar) angenommen [ZGW13].

**Bearbeitungszeit**

Neben der Bewertung der spezifischen Energieverbräuche der Bohr- und Gewindeformprozesse im Rahmen der verschiedenen Prozessketten zur Innengewindefertigung, wurde die Bearbeitungszeit zur Bewertung der Produktivität ermittelt werden. Dazu kam eine Spezialkamera zur Prozessüberwachung in Werkzeugmaschinen (Typ *Rotoclear C2*) zum Einsatz. Durch die Rotation der Deckscheibe nimmt die Digitalkamera die Werkzeugbewegungen störungsfrei insbesondere unter Vollstrahlkühlung mit einer Bildwiederholrate von  $F = 30$  Bilder/s auf. Im Anschluss wurden die Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte mittels der Videobearbeitungssoftware *Camtasia* ermittelt.

## 5 Grundlagenuntersuchungen zum Hochvorschubbohren

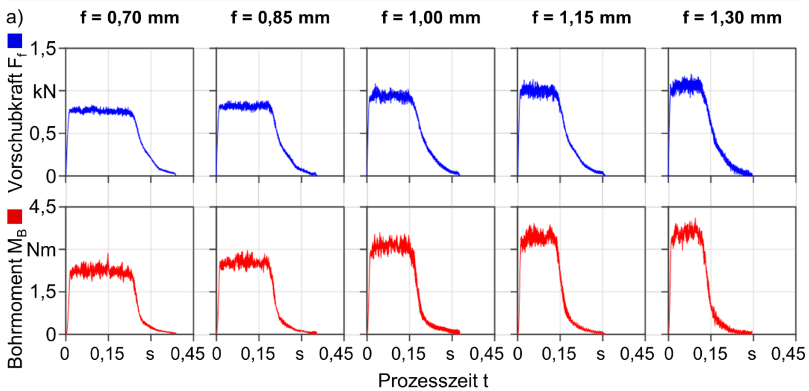
Der erste Bearbeitungsschritt der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Hochleistungsprozesskette ist die Herstellung einer Grundbohrung. Um die Produktivität des Bohrprozesses zu maximieren, wurden dreischneidige Sonderwerkzeuge eingesetzt, deren technische Eigenschaften auf die Hochvorschubbearbeitung von Aluminiumlegierungen ausgelegt wurden. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Versuche zur Hochvorschubbohrbearbeitung von AlSi10Mg hinsichtlich der gemessenen mechanischen Werkzeugbelastungen sowie der erzielten Spanform erläutert. Des Weiteren werden unterschiedliche Methoden zur Beurteilung der Bohrungsqualität angewendet. Ziel der entwickelten Methodik ist es, die Einflüsse variierender Vorschübe sowie KSS-Konzepte und Werkzeuggestalten auf die beschriebenen Kriterien der Zerspanbarkeit herauszuarbeiten. Anhand der gewonnenen Kenntnisse wird ein Bearbeitungsprozess ausgelegt, dessen technologische Bedingungen hinsichtlich der hochproduktiven, prozesssicheren Herstellung von M6-Gewindekernbohrungen in AlSi10Mg optimiert wurde.

### 5.1 Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen

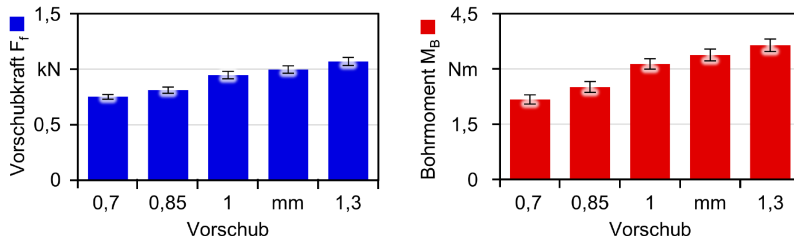
Zur Bewertung des Einflusses variierender Vorschübe auf die mechanischen Werkzeugbelastungen wurden im Rahmen der technologischen Untersuchungen Messungen zur Bestimmung der Vorschubkraft und des Bohrmoments durchgeführt. Um den Bohrprozess auch bei gesteigerten Spanungsquerschnitten unter technisch günstigen Voraussetzungen durchzuführen, wurde eine Hochdruck-Emulsionskühlung eingesetzt. Bei konstanter Schnittgeschwindigkeit ( $v_c = 165 \text{ m/min}$ ) wurde der Vorschub im Rahmen der Versuchsreihe schrittweise von  $f = 0,7 \text{ mm}$  um  $\Delta f = 0,15 \text{ mm}$  auf  $f = 1,3 \text{ mm}$  erhöht. Die mittels eines stationären Dynamometers erfassten Verläufe der Vorschubkraft  $F_f$  bzw. des Bohrmoments  $M_B$  sind in **Abbildung 5.1-a** dargestellt. Im Allgemeinen zeigen diese im Anschluss an den sprunghaften Anstieg der Axialkraft beim Anbohren zunächst ein konstantes Lastniveau. Vor dem Erreichen der maximalen Bohrtiefe von  $l = 27,5 \text{ mm}$  war in allen Versuchen ein Absinken der Vorschubkraft zu beobachten. Diese Verläufe können auf die Verzögerung der Spindel vor der Richtungs-umkehr am Bohrungsgrund zurückgeführt werden und werden nachfolgend

analysiert. Da der Spanungsquerschnitt linear mit dem Vorschub steigt, ergibt sich grundsätzlich eine proportionale Steigerung der gemessenen Axialkraft. Ebenfalls wächst das Schnittmoment in diesem Zusammenhang. Im Speziellen sind ab einem Vorschub von  $f \geq 1 \text{ mm}$  erhöhte Vorschubkraftabweichungen festzustellen. Im Plateau schwanken die axialen Kräfte zudem stärker, was auf einen erschwerten Spanabtransport hindeutet. Abbildung 5.1-b zeigt gemittelte Werte für  $F_f$  und  $M_B$  aus drei Einzelversuchen.

Maschine: GROB BZ600	Werkzeug: Tritan Alu	Werkzeug-Ø: $d_{WZ} = 5,5 \text{ mm}$
Werkstoff: AlSi10MnMg	Beschichtung: unbeschichtet	Schnittge.: $v_c = 165 \text{ m/min}$
KSS-Typ: Emulsion	Bohrtiefe: $l = 27,5 \text{ mm}$	<b>Vorschub: <math>f \rightarrow</math> variiert</b>



b) gemittelte Werte mit Abweichung



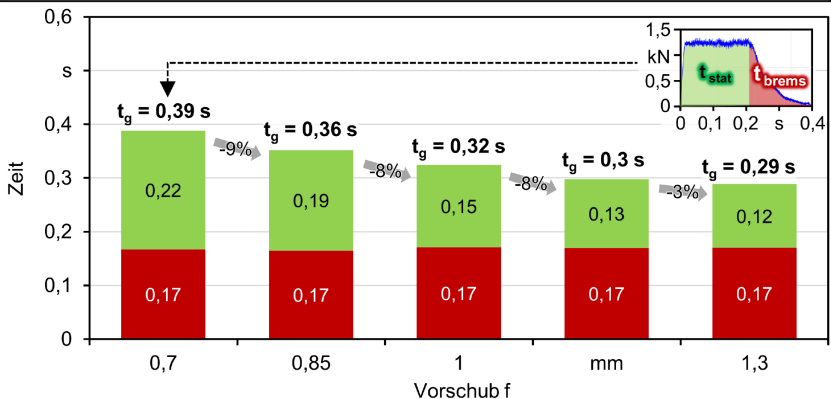
**Abbildung 5.1:** Einfluss des Vorschubs auf Vorschubkraft und Bohrmoment

In Bezug auf die gemessenen Bohrmomente ist ebenfalls eine Überhöhung der mechanischen Werkzeugbelastungen bei hohen Vorschüben zu erkennen. Durch das gesteigerte Spanvolumen wird der Abtransport der Späne durch die Spannuten erschwert und Spanklemmer treten auf, die zu gesteigerten

gerten Torsionsbelastungen führen. Zudem kommt es in Folge größer werdender Spanvolumina zu Spanklemmern, die das Bohrmoment erhöhen und die Oberfläche der Bohrungswände beschädigen. Aufgrund eines Werkzeugbruchs bei  $f = 1,3$  mm sowie erläutelter Überhöhungen der mechanischen Lasten ist der Bohrprozess unter den gegebenen Bedingungen lediglich bis zu einem Vorschub von  $f \leq 1$  mm als prozesssicher zu bewerten.

Wie zuvor beschrieben, ist der regressive Verlauf der Vorschubkraft zum Ende des Bohrprozesses durch die Abbrems- und Rückzugbewegung der Spindelachse zu begründen. Bei den vorherrschenden Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu  $v_f = 12.350$  mm/min bei einer Bohrtiefe von  $l = 27,5$  mm ergibt sich ein vergleichsweise hoher Anteil der Verzögerungsdauer an der Gesamtprozesszeit. Der Vergleich der Zeitanteile mit stationären bzw. abfallenden Kraftwerten bei variierenden Vorschubwerten ist in **Abbildung 5.2** dargestellt.

Maschine: GROB BZ600	Werkzeug: Tritan Alu	Werkzeug-Ø: $d_{WZ} = 5,5$ mm
Werkstoff: AlSi10MnMg	Beschichtung: unbeschichtet	Schnittge.: $v_c = 165$ m/min
KSS-Typ: Emulsion	Bohrtiefe: $l = 27,5$ mm	<b>Vorschub: <math>f \rightarrow</math> variiert</b>

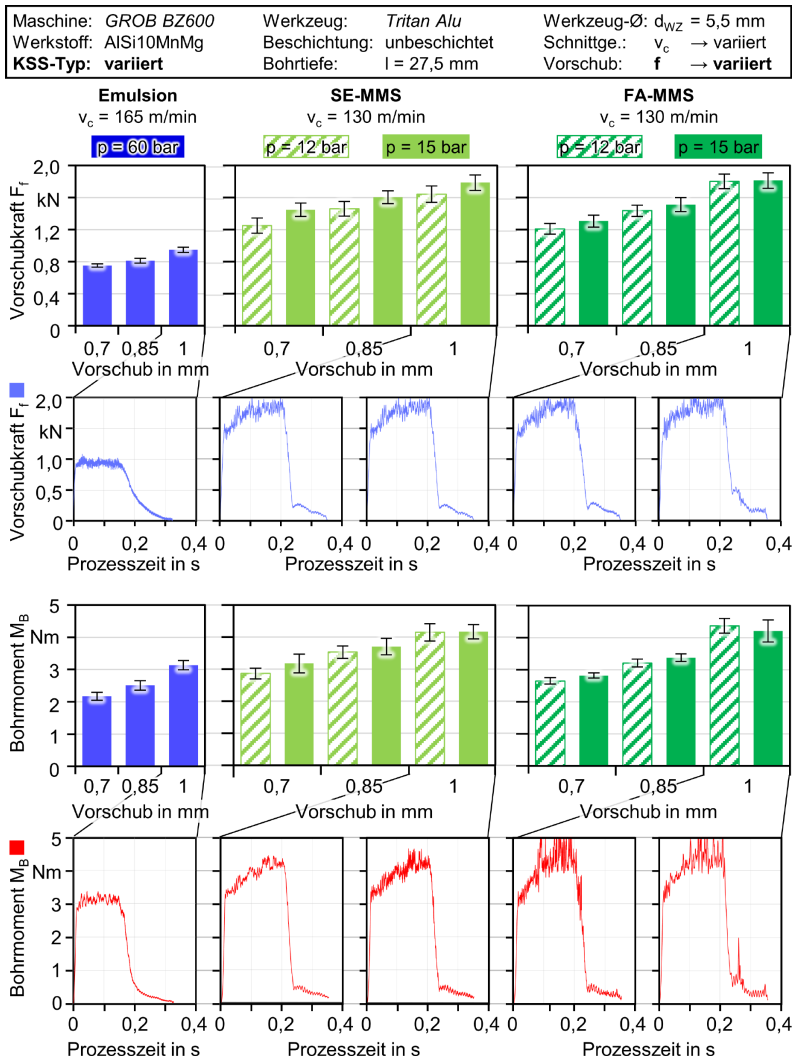


**Abbildung 5.2:** Zeitanteile der konstanten ( $t_{stat}$ ) und gebremsten Vorschubbewegung ( $t_{brems}$ ) beim Hochvorschubbohren

Anhand der Detailanalyse der Vorschubkraftverläufe ergibt sich, dass die Zeitanteile der gebremsten Zustellbewegung für alle betrachteten Vorschubwerte vergleichbar sind. Nachdem das Bohrwerkzeug bspw. bei einem Vorschub von  $f = 0,7$  mm ins Material eintritt, wurde eine konstante

Axialkraft für  $t = 0,22$  s gemessen. Dabei wirken die Zerspankraftkomponenten sowie der statische KSS-Druck auf das Werkstück bzw. Werkzeug. Anschließend fällt die Vorschubkraft innerhalb von  $t = 0,17$  s ab. In diesem Zeitraum werden zwei Prozessschritte unterschieden: Um das Werkzeug vor Erreichen der programmierten Bohrtiefe zum Stillstand zu bringen, regelt die NC-Steuerung zunächst die Vorschubgeschwindigkeit vom Sollwert gegen null herunter. Da die Antriebe des Bearbeitungszentrums für mittlere bis schwere Zerspanungsoperationen im Dauerbetrieb ausgelegt wurden, ist die dynamische Leistungsfähigkeit der soliden Kugelgewindetriebe begrenzt, woraus ein vergleichsweise langer Verzögerungsweg resultiert. Mit dem Beginn der Rückzugsbewegung kommen die drei Schneiden im Anschluss aus dem Schnitt – und das Bohrmoment sinkt abrupt. Das mit Soll-drehzahl und vollem KSS-Druck rotierende Werkzeug verfährt in Eilganggeschwindigkeit auf den gewählten Sicherheitsabstand. Dabei wirkt zum einen der stetig sinkende KSS-Druck als Axialkraft auf das werkstückseitig montierte Dynamometer. Zum anderen ist ein monoton fallendes Axialmoment messbar, das durch den Kontakt zwischen Führungsfasen und Bohrungswand verursacht wird. Wie die  $M_B$ -Verläufe in Abbildung 5.1 zeigen, nimmt das Moment linear mit der Kontaktlänge zum Ende der Bearbeitung ab. Bei variierenden Vorschüben ergibt sich die Prozesszeit unter den gegebenen Bedingungen demnach aus dem fixen Anteil der Brems- und Rückzugsbewegung sowie dem variablen Zeitanteil während des Bohrens mit Sollvorschub. Deren Anteil an der Prozessdauer nimmt mit steigendem Vorschub stetig ab, sodass die Produktivitätssteigerung ab einem Vorschub von  $f > 1$  mm bei Bohrungen mit einem  $l/D$  von 5 nicht mehr signifikant steigt.

Die weitere Prozessanalyse des Hochvorschubbohrens wird im Folgenden daher unter Betrachtung eines Vorschubs von  $f \leq 1$  mm fortgeführt. Unter den vorliegenden Bedingungen gilt dieser als Schwellenwert für eine prozesssichere Durchführung des Bohrprozesses bei hoher Produktivität. Zur Analyse der Einflüsse des Kühlschmierstoffkonzepts beim Hochvorschubbohren wurde das BAZ im Rahmen der nachfolgend betrachteten Versuchsreihen zur MMS-Bearbeitung umgerüstet. **Abbildung 5.3** zeigt den Einfluss auf Vorschubkraft und Bohrmoment bei variierenden KSS-Konzepten.



**Abbildung 5.3:** Mechanische Werkzeugbelastungen bei variierenden Vorschüben und KSS-Konzepten

Zur Betrachtung relevanter Einflussgrößen bei der anspruchsvollen MMS-Bearbeitung wurden bei den Einsatzversuchen sowohl der Öl-Typ als auch

der Systemdruck variiert. Da das MMS-Aerosol bei hohen Drehzahlen nicht in ausreichender Qualität zur Werkzeugspitze gefördert werden konnte, wurde die Schnittgeschwindigkeit um ca. 20 % reduziert, um Verwirbelungen innerhalb des Spindelrohrs zu verringern. Als Referenz zeigt Abbildung 5.3 die Analyseergebnisse zu den mechanischen Werkzeugbelastungen aus der bereits zuvor erläuterten Versuchsreihe mit KSS-Emulsion. Grundsätzlich sind vergleichbare Beobachtungen bzgl. der Brems- und Rückstellbewegung mittels der Axialkraftverläufe zu treffen. Die Verringerung der Werkzeugdrehzahl führt zu einer geringfügigen Verlängerung der Prozesszeit um etwa  $t = 0,03$  s. Weiterhin geht im Allgemeinen eine Steigerung der mechanischen Belastungen mit größer werdendem Spannungsquerschnitt einher.

Im Speziellen lassen sich aus der Analyse der zeitlichen Verläufe der gemessenen Axialkräfte zunächst grundlegende Erkenntnisse zum MMS-Bohren von Aluminiumguss bestätigen. Unter Verwendung von KSS-Emulsion wurde bspw. bei einem Vorschub von  $f = 1$  mm eine mittlere Vorschubkraft von  $F_f = 1$  kN ermittelt. Bei Einsatz von MMS liegt die gemittelte Vorschubkraft für die betrachteten Parameterkombinationen bei etwa  $F_f = 1,5$  kN, was durch Materialanhaftungen im Bereich der Querschneiden zu begründen ist [Iov16]. Der Anstieg der Bohrmomente beim Bohrungseintritt ist vergleichsweise gering, was den Ergebnissen des aktuellen Erkenntnisstands entspricht. In Bezug auf die verwendeten Öl-Sorten ist zu beobachten, dass sich durch Einsatz des fettalkoholbasierten Mediums sowohl Vorschubkraft als auch Bohrmoment im begrenzten Maße verringern. Bei den betrachteten Vorschubgeschwindigkeiten trägt demnach die größere Verdampfungsneigung des dünnflüssigen MMS-Öls auf Fettalkoholbasis eher zu einer verbesserten Kühlwirkung bei als das esterbasierte Öl.

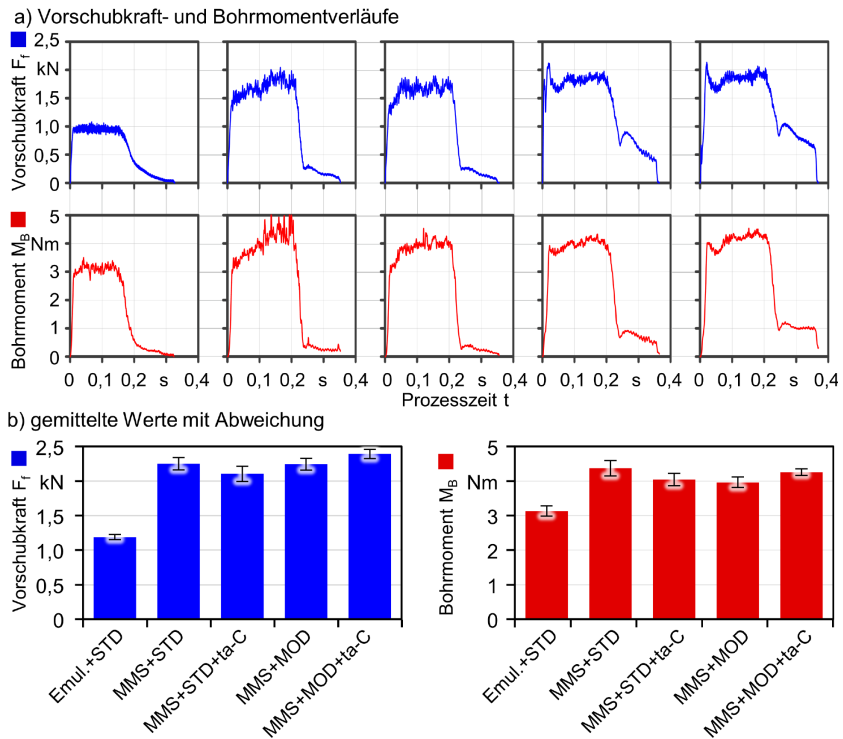
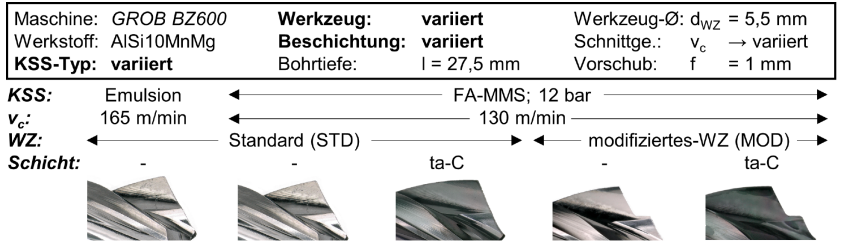
Der direkte Vergleich der Mittelwerte und Abweichungen bringt jedoch die Erkenntnis, dass die mechanischen Belastungen bei der MMS-Bearbeitung in deutlich größerer Höhe von den Referenzwerten abweichen. Anhand der Vorschubkraft- und Bohrmomentverläufe bei  $f = 1$  mm sind deutlich steigende Niveaus sowie Abweichungen mit zunehmender Bohrtiefe zu erkennen, die auf einen gehemmten Späneabtransport deuten. Dabei wirkt sich der gesteigerte MMS-Druck lediglich bei gesteigerten Vorschüben  $f \geq 0,85$  positiv auf die Bohrmomente bzw. die Spanabfuhr aus. Bei vergleichsweise

großen Spanvolumina und Vorschubgeschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass eine Erhöhung des Luftdrucks auf  $p = 15$  bar im Ansatz zu einer höheren Prozesssicherheit beiträgt. Grundsätzlich ist die Überhöhung der mechanischen Werkzeugbelastungen während des Bohrprozesses um ca. 25 % jedoch als Herausforderung in Bezug auf Prozessgrenzen des MMS-Bohrens unter den betrachteten Bedingungen anzusehen.

Im Rahmen der Werkzeugentwicklung wurden gemäß der Herausforderung einer nicht prozesssicheren Spanabfuhr unter MMS zwei verschiedene Ansätze zur Prozessoptimierung umgesetzt. Zum einen wurden die Hochvorschubbohrer beschichtet, um die Adhäsion und Reibung zwischen Span und Schneide zu verringern. Zum anderen wurde eine modifizierte Spitzengehalt konstruiert. Mittels einer Stufe soll die Spangröße verringert werden, wodurch der verbesserte Abtransport durch die Spannuten gelingen soll. Anhand der Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen folgt zunächst die Erkenntnis ob Spänestau und Spanklemmer zur Überhöhung des Axialkraft bzw. -moment führen. **Abbildung 5.4** zeigt die zeitlichen Verläufe sowie einen quantitativen Vergleich zwischen den Werkzeugtypen bei Vorschub  $f = 1$  mm unter MMS (FA-MMS bei  $p = 12$  bar) sowie der Referenz bei Bearbeitung unter KSS-Emulsion.

Die im vorigen Abschnitt gezeigten Ergebnisse zum Hochvorschubbohren unter MMS zeigen, dass das Bohrmoment beim Einsatz des Standardwerkzeugs nach dem Anbohren stark ansteigt. Im Axialmomentverlauf in **Abbildung 5.4-a**, welcher in den Versuchen mit ta-C beschichtetem Bohrer aufgezeichnet wurde, ist eine derartige Überhöhung nicht mehr feststellbar. Im Mittel kann das Bohrmoment demnach durch die Beschichtung um ca. 10 % gesenkt werden. Weiterhin wurden 6 % geringere Vorschubkräfte im Vergleich zum unbeschichteten Bohrwerkzeug gemessen. Im Einsatzversuch des modifizierten Werkzeugtyps ist beim Anbohren zunächst ( $t < 0,05$  s) ein sprunghaften Anstieg der Axialkraft zu erkennen. Dieser Peak ist mit einer gesteigerten Instabilität des Werkzeugs zu begründen. In den Versu-

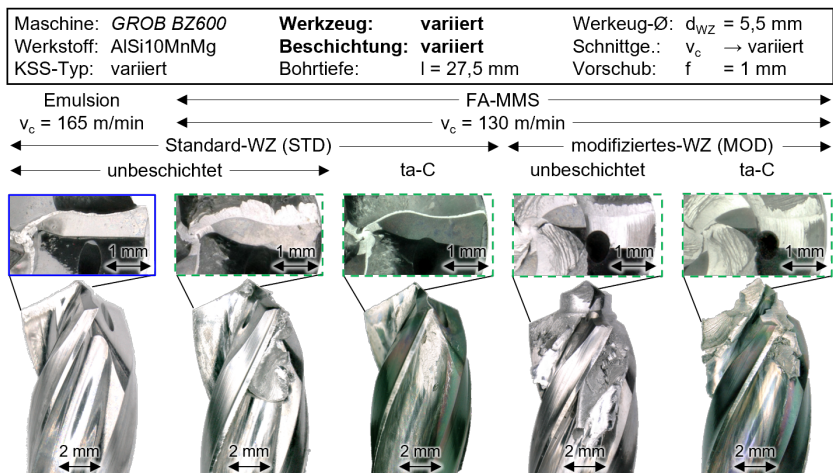
chen wurden im Vergleich zum Standardwerkzeug leicht verringerte Axialmomente ermittelt. Diese Hypothese ist im weiteren Verlauf dieses Kapitels anhand der Spanformanalyse zu überprüfen.



**Abbildung 5.4:** Einfluss der Werkzeugvariante auf die mechanischen Werkzeugbelastungen

Der direkte Vergleich zum Referenzversuch unter KSS-Emulsion zeigt, dass die Bohrmomente unter MMS auch mit angepasster Werkzeugtechnologie in etwa ein Drittel höher sind. Jedoch wurde durch die beschichteten Werkzeugtypen geringe Abweichungen bzw. Ausreißer beobachtet, die auf einen verbesserten Spanabtransport hindeuten.

Zur Bewertung des Einflusses der Werkzeuggestalt bzw. -beschichtung auf Adhäsivneigung und der Spanformung werden in **Abbildung 5.5** die initialen Verschleißzustände nach jeweils zehn Bohrungen gegenübergestellt. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Werkzeugspitze sowie vergrößerter Freiflächenansicht zeigen zunächst die Ergebnisse des Referenzprozesses unter Emulsion. Sowohl im Bereich der an die Schneiden angrenzenden Spanfläche, als auch an der Freifläche haften nur sehr geringe Mengen von Werkstoffrückständen. An den Querschnitten der Pyramidenspitze lagert sich aufgrund der hohen Querkräfte und Axialkräfte verdichtetes Material an. Bei Einsatz des Standardwerkzeugs unter MMS kommt es zu erheblicher Aufbauschneidenbildung sowie Verschweißungen zwischen Spanunterseiten und dem aufgeschmiertem Al-Werkstoff an den Spannuten.



**Abbildung 5.5:** Werkstoffanhaftungen an Spanfläche und -nut bei den untersuchten Werkzeugvarianten

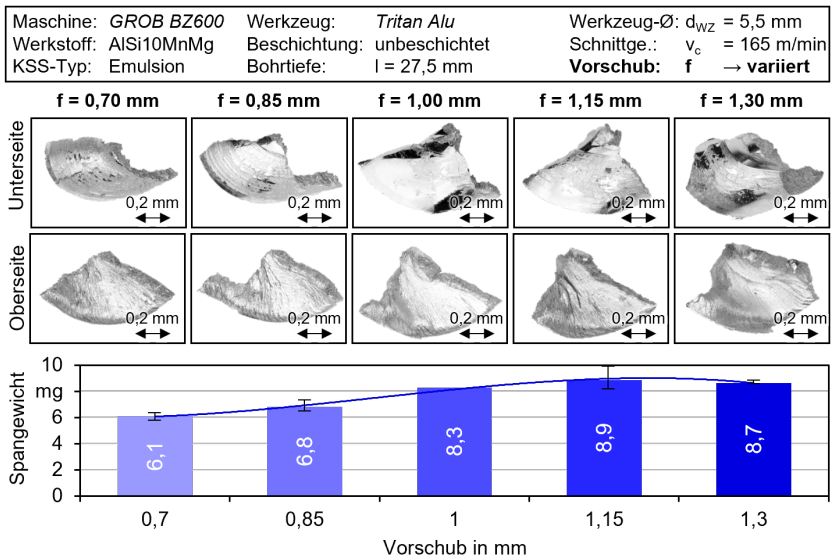
Das modifizierte, unbeschichtete Werkzeug zeigt vergleichbare Erscheinungen sowie vollständig verschlossene Spanräume an der Schneidenspitze. Aufgrund der dadurch erschwerten Spanabfuhr sind die Überhöhungen der Axialkraft in der ersten Phase des Bohrprozesses zu begründen.

Der Einfluss der ta-C-Beschichtung in Bezug auf die Adhäsion zwischen AlSi-Werkstoff und Werkzeugoberflächen unter MMS ist im Allgemeinen als sehr positiv zu bewerten. Zum einen können durch die Dünnschicht Aufbauschneiden fast vollständig vermieden werden. Zum anderen wird der Spanablauf u. a. durch die glatte Schichtfläche der Spannut begünstigt, infolge dessen sich die Prozesssicherheit aufgrund des unterbundenen Spänebaus bedeutend erhöht. In Bezug auf die zugesetzten Spanräume der modifizierten Werkzeugschneidspitze konnte durch die Beschichtung keine Verbesserung erzielt werden. Als ursächlich ist die hohe Kaltverfestigung des Aluminiumwerkstoffs bei geringen Relativgeschwindigkeiten und hohen Druckkräften zu nennen.

## 5.2 Analyse der Spanform

Nachdem die mechanischen Werkzeugbelastungen beim Hochvorschubbohren von AlSi10Mg hinsichtlich der Einflussfaktoren Vorschub, KSS-Konzept und Werkzeuggestalt analysiert wurden, werden in diesem Unterkapitel die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Spanform ergänzt. Dabei werden zuvor getroffene Hypothesen unter Betrachtung der zuvor betrachteten Prozessvariablen bewertet und in Bezug auf die Zusammenhänge zur resultierenden Spanform überprüft.

Die im Anschluss an die Bearbeitung entnommenen Spanproben wurden zunächst gereinigt. Anschließend wurden repräsentativ für die Gesamtstichprobe einzelne Späne mittels Lichtmikroskop und Feinwaage analysiert. In **Abbildung 5.6** sind die Spanaufnahmen aus der Versuchsreihe unter KSS-Emulsion mit variierenden Vorschubwerten ( $f = 0,7 \dots 1,3$  mm) in Ansichten der Ober- und Unterseite dargestellt.

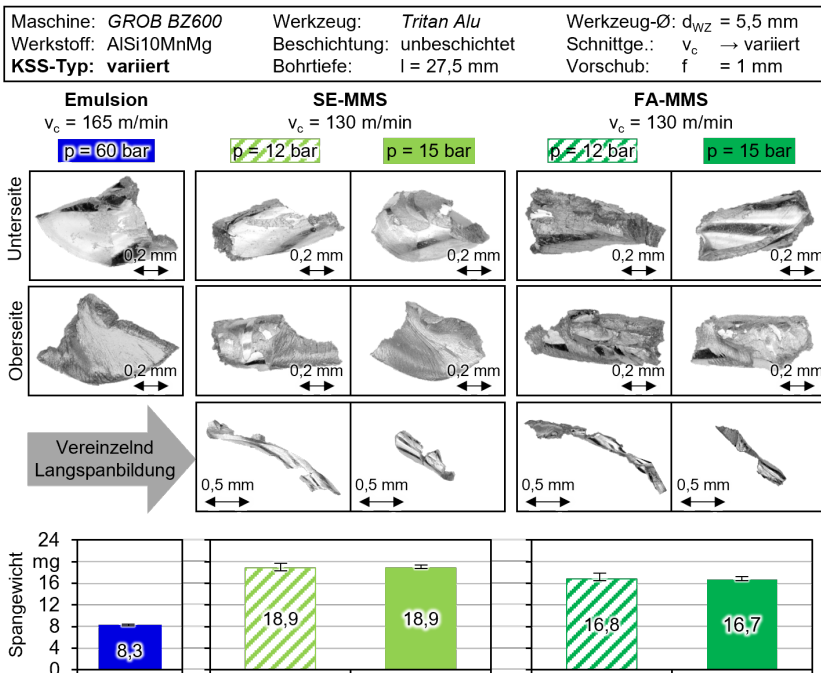


**Abbildung 5.6:** Einfluss des Vorschubs auf Spanform und -gewicht

Dabei sind im Allgemeinen auf den Oberflächen der Spanunterseiten Riefen in Ablafrichtung zu erkennen. Insbesondere bei Vorschüben von  $f = 0,7$  bzw.  $0,85 \text{ mm}$  sind die Mikroschädigungen über die gesamte Breite der Späne verteilt. Diese werden durch Mikropflügen von verfestigtem Werkstückmaterial erzeugt, das sich aufgrund der starken Adhäsivneigung an der Spanfläche anlagert. Weiterhin weisen die Späne eine längliche Form auf, die charakteristisch beim Bohren von Werkstoffen erzeugt werden, die zur Fließspanbildung neigen. Im Zusammenhang der Bearbeitung von allgemein gut verformbaren AlSi-Werkstoffen gelten derartig flache Späne als prozesssicher, da sie im KSS-Strom zuverlässig durch die Spannuten der Werkzeuge abtransportiert werden. Mit steigendem Spanungsquerschnitt entstehen Späne, die zum einen über ein deutlich größeres Volumen verfügen, wie der Vergleich zwischen dem ermittelten Spangewicht verdeutlicht. Die aus zehn Spänen gemittelte Masse steigt ab einem Vorschub  $f \geq 1 \text{ mm}$  auf  $8,3 \dots 8,9 \text{ mg/Spän}$  an. Zum anderen weist die Struktur der Spanoberseiten deutlich ausgeprägte Verformungsmerkmale wie Knicke oder Scherfalten auf. Aufgrund dessen lassen sich gesteigerten Vorschüben die Überhöhungen der Vorschubkraft und insbesondere des Bohrmoments begründen.

Die großvolumigen Späne stauen sich bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten in den Werkzeugnuten auf, wodurch starke Reibung und spröde Bruchflächen hervorgerufen werden. Grundsätzlich werden diese Spanformen durch den hohen Druck der KSS-Emulsion aus der Bohrung herausgespült, was durch zeitlich konstante Bohrmomente während des Werkzeugengriffs (siehe Abbildung 5.1) messbar ist.

Die Wirkung des KSS-Drucks auf die Spanform und den Abtransport wurde im Rahmen der Versuchsreihe beim kritischen Vorschub  $f = 1 \text{ mm}$  mit verschiedenen Kühlschmierstoffkonzepten ebenfalls analysiert. Als Referenz zeigt **Abbildung 5.7** Spanproben, die beim Bohren unter Emulsion erzeugt wurden.



**Abbildung 5.7:** Einfluss des KSS-Konzepts auf die Spanform

Des Weiteren sind bei der MMS-Bearbeitung entstandene Späne, unterschieden nach Öltyp und Luftdruck, abgebildet. Zusätzlich werden die mittleren Spangewichte mittels Säulendiagrammen dargestellt. Der Vergleich der makroskopischen Gestalt lässt zunächst darauf schließen, dass die Spanraumzahl der unter MMS erzeugten Späne geringer ist als die Referenz. Weiterhin zeigen die Spanunterseiten einerseits sehr glatte Oberflächen, was auf verringerte Aufbauschneidenbildung und verringerte Spanflächenreibung hindeutet. Andererseits ist die Oberflächentopografie von starken Kontaktsuren, bspw. bedingt durch Verschweißungen bzw. mechanischen Druck zwischen ungenügend ablaufenden Spanstücken, geprägt.

Im Zuge der detaillierten Analyse ist zu erkennen, dass die Späne bei der MMS-Bearbeitung stark zusammengedrückt und ineinander gefaltet werden, wodurch der kompakte Querschnitt zustande kommt. Insbesondere im Zusammenhang der ansteigenden Axialmomente ist diese Form als Folge eines Spänestaus auszulegen. Bei vergleichsweise geringem Luftdruck brechen die Späne beim Bohren mit hohem Vorschub zum einen vergleichsweise lang und werden zum anderen durch den Luftvolumenstrom nur unzureichend durch die Spannut aus der Bohrung entfernt. Diese Beobachtung lässt sich durch die Gegenüberstellung des mittleren Spangewichts quantifizieren. Die Masse der MMS-Späne beträgt zum Teil mehr als das Zweifache der Referenzwerte, was auf die positive Wirkung der Hochdruckzuführung auf den Spanbruch hindeutet. Im Gegensatz dazu wurden teilweise lange, aus mehreren zusammenhängenden Fragmenten bestehende Spanproben entnommen. Im Zusammenhang des beobachteten Spänestaus sind diese der freien Spanbildung während der Anbohrphase zuzuordnen. Gesteigerte MMS-Systemdrücke führen dabei zu geringeren Gesamtlängen der verschweißten Segmente, wie Abbildung 5.7 weiterhin zeigt. Insbesondere beim Einsatz des auf Fettalkohol basierenden Mediums konnte bei  $p = 15$  bar eine vergleichsweise günstige Spanform erzielt werden. Im Vergleich zum Esteröl wurde im Zuge dessen eine um ca. 10 % geringere Masse der Späne gemessen, was durch die bessere Benetzung der Spanflächen aufgrund höherer Viskosität des FA-basierten Öls zu begründen ist. Unter den betrachteten Bedingungen werden durch den Einsatz des SE-MMS-Mediums bei  $p = 12$  bar vergleichsweise günstige Späne

erzielt. Die Spanform ist im Ansatz mit der Gestalt der im Referenzprozess erzeugten Späne vergleichbar. Wie der Bohrmomentverlauf in Abbildung 5.3 verdeutlicht, treten unter diesen Bedingungen nur geringe, durch Spanklemmer bedingte Überhöhungen auf. Aufgrund des hohen Spanungsquerschnitts bei vergleichsweise geringem KSS-Druck sind die unter MMS erzielten Spanformen im Allgemeinen jedoch als herausfordernd bezüglich des prozesssicheren Abtransports zu bewerten.

Zur technischen Bewältigung dieser Herausforderung wurden verschiedene Werkzeugvarianten im Rahmen der erweiterten Versuche mit Minimalmengenschmierung zum Hochvorschubbohren bei  $f = 1 \text{ mm}$  eingesetzt. Mit dem Ziel eine deutlich günstigere Spanform zu erzielen wurden im Rahmen dessen Werkzeuge mit einer Stufengestalt eingesetzt. **Abbildung 5.8** zeigt die resultierenden Spanformen sowie die ermittelten Spangewichte für die eingesetzten Werkzeugvarianten des dreischneidigen Hochvorschubbohrers. Als Ergebnis der Referenzversuche unter Emulsion wurde mit einem mittleren Gewicht von  $m = 8,3 \text{ mg}$  ein sehr günstiger Spanbruch erzielt. Zusätzlich sind die Außenkanten der Späne mit gleichmäßiger Rundung geformt, was für einen sehr guten Spanabtransport durch die mit Hochdruck zugeführte Emulsion hindeutet. Die unter MMS und mit unbeschichteten Standardwerkzeug erzeugten Späne sind wie bereits zuvor beschrieben stark gestaucht, woraus eine Verdopplung des Spangewichts resultiert. Verschweißungen zwischen den Spanunterseiten und den Hartmetalloberflächen hemmen den Spanablauf. Als Folge ergibt sich die kompakte Spangestalt, die jedoch aufgrund der Haftimpulse sicher bricht.

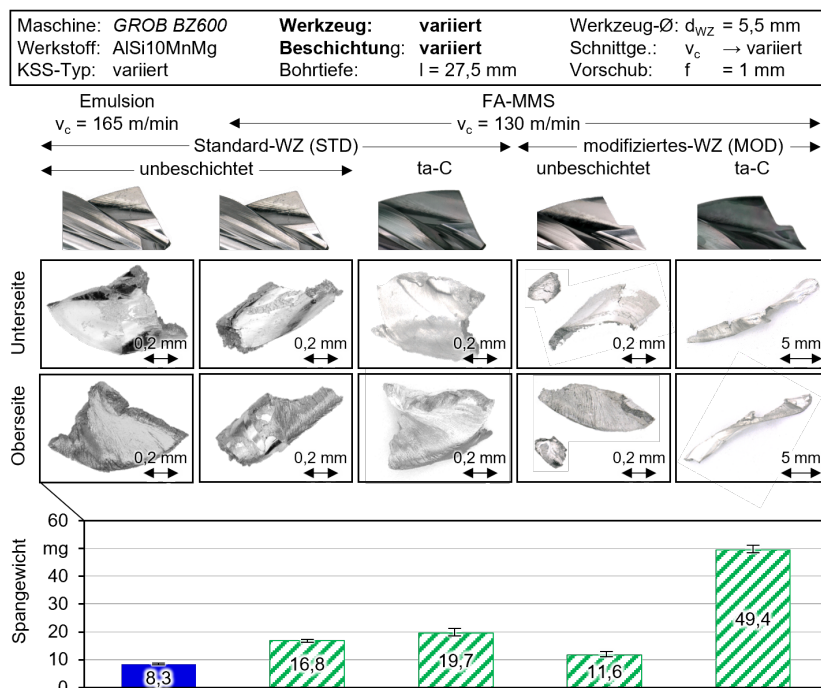


Abbildung 5.8: Einfluss der Werkzeugvariante auf die Spanform

Durch den geringen KSS-Druck und hohe Ablaufgeschwindigkeit des getrennten Materials entsteht ein Spänestau, der die überhöhten Bohrkräfte bedingt. Die Beschichtung unterstützt den Spanablauf und minimiert die Aufbauschneidenbildung (siehe Abbildung 5.8), wodurch die großvolumigen Späne sicher aus der Bohrung transportiert werden. Das gemittelte Spangewicht ist aufgrund der gleichen Schneidengestalt sowie des geringen KSS-Drucks von  $p = 12 \text{ bar}$  vergleichbar zum MMS-Referenzversuch. Bezüglich der Spangestalt ist festzustellen, dass das beschichtete Werkzeug, vergleichbar zur prozesssicheren Referenz unter Emulsion, Späne mit runder Außenkante formt. Diese Spanform ist im Allgemeinen als sehr günstig zu bewerten. Durch die modifizierte Spitze erfolgt wie beabsichtigt eine Teilung des Spanquerschnittes. Entsprechend der unter-

schiedlichen Spangrößen sinkt das mittlere Spangewicht beim unbeschichteten Werkzeug auf  $m = 11,6$  mg. Im Versuch mit einer beschichteten Variante des Stufenbohrers wurden sehr lange Bandspäne erzeugt. Aufgrund des geraden und durch die ta-C-Beschichtung verbesserten Spanablaufs von der Außenschneide bleibt der Kontakt mit Werkzeug oder Bohrungswand, welche in der Regel zum Bruch des Spans führt, aus. Die erzeugten langen Bandspäne sind im Kontext der Bohrbearbeitung als ungünstig zu bewerten. Daher stellt sich die Standardvariante des dreischneidigen Bohrwerkzeugs mit ta-C-Beschichtung als prozesssicherer Werkzeugtyp zur MMS-Bearbeitung heraus.

### 5.3 Analyse der Bohrungsqualität

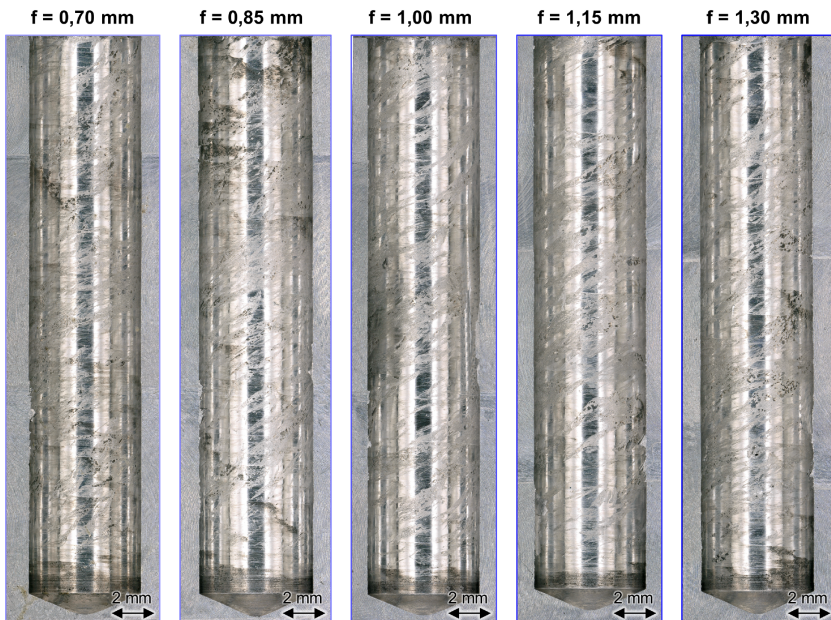
Nachdem in den beiden vorangegangenen Kapiteln Zerspanbarkeitskriterien analysiert wurden, die unmittelbar mit der Prozessführung in Zusammenhang stehen und durch verschiedene Eingangsparameter beeinflussbar sind, folgt anschließend die Betrachtung der erzielten Bohrungsgröße. Diese wird im Folgenden anhand einer verfahrensspezifischen Methodik analysiert, die im Speziellen die Bewertung der makroskopischen Oberflächengestalt der Bohrungswand, ihrer Oberflächenrauheit sowie die Bohrungsdurchmesser beinhaltet.

#### Gestalt

Zunächst wird der grundlegende Einfluss variierender Vorschübe auf die Oberflächengüte der Bohrungswand betrachtet. Die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen unter Emulsion gebohrten Proben wurden zur lichtmikroskopischen Analyse in Längsrichtung halbiert, wie **Abbildung 5.9** zeigt. Im Allgemeinen weisen die Oberflächen der Bohrungswände verschiedene Beschädigungsformen auf, deren Ausprägung lediglich in geringem Maße dem Einfluss des Vorschubs zuzuordnen ist. Zunächst sind auf den Aufnahmen insbesondere an Bohrungseintritt und -grund dunkle Verfärbungen erkennbar, die als Rest verkockten Schmierstoffs gedeutet werden. In besonders beanspruchten Bereichen verursacht starke Reibung zwischen den Führungsfasen und der Bohrungswand einen lokalen Temperaturanstieg, der zum Verkoken der umgebenen KSS-Emulsion führt. Zum einen steigt am Bohrungseintritt die Werkzeugtemperatur durch den Eintritt der Führungsfasen lokal sprunghaft an [Büc21], wodurch der Wasseranteil der Emulsion schnell verdampft. Zusätzlich ist die Kühlwirkung im Versuchsaufbau nach *Bücker* vergleichsweise gering, wodurch der Temperaturunterschied zwischen der Bohrungswand und den Führungsfasen zudem erhöht ist. Zum anderen wirken bei der Richtungsumkehr der Werkzeugbewegung am Bohrungsgrund hohe thermomechanische Belastungen, die ebenfalls zum Verkoken des KSS führen. Das Belastungskollektiv setzt sich aus geringen Spannungsdicken, hohen Geschwindigkeitsgradienten und veränderten Strömungsverhältnissen zusammen und ist als Ursache des dunkel verfärbten Bohrungsgrunds zu nennen. Daneben weisen die Oberflächen insbesondere mit steigender Bohrtiefe Riefen in der Bohrungswand auf, die durch den Kontakt mit ablaufenden Spänen erzeugt werden. Durch

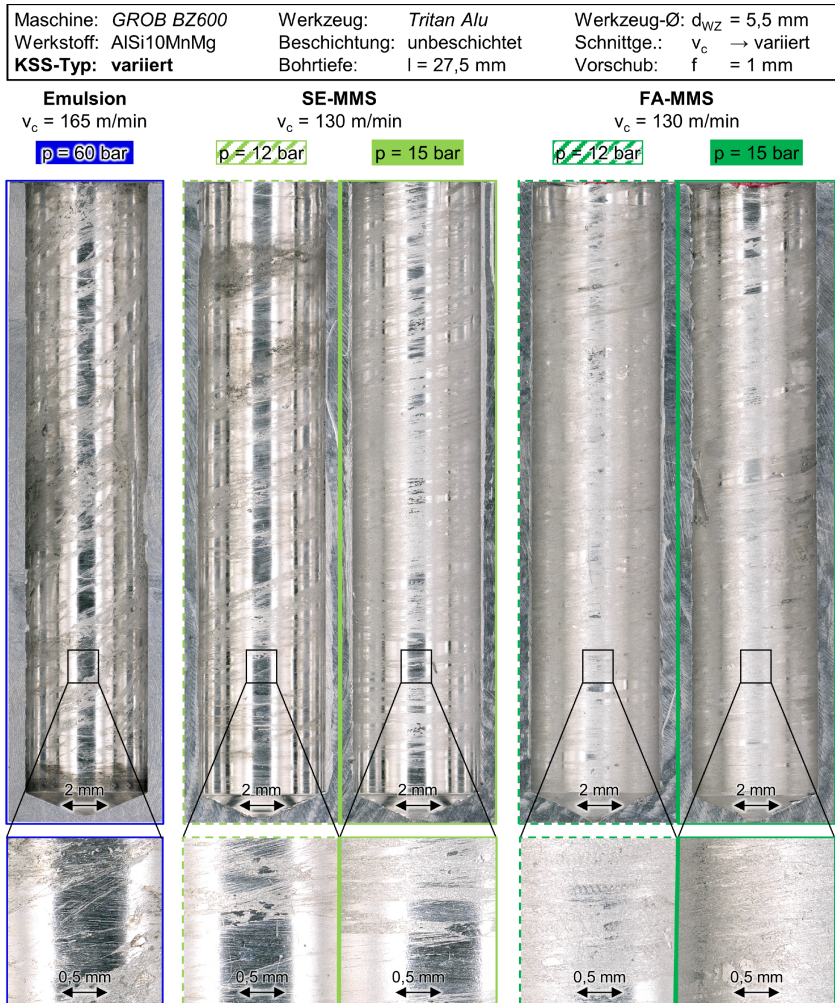
die scharfen Kanten der Späne, deren Querschnitt aufgrund der vergleichsweise hohen Spandicke nur unter hoher mechanischer Krafteinwirkung verformbar ist, werden die gedrahten Riefen durch Adhäsion erzeugt. Durch die relativ geringe Größe der Spannuten des dreischnedigen Werkzeugs tritt konstruktionsbedingt ein beengter Abtransport der Späne ein. Schließlich sind speziell bei Vorschub  $f = 0,7$  bzw.  $0,85$  mm mattete Bereiche der Bohrungswände auf den lichtmikroskopischen Aufnahmen erkennbar. Vergleichbar zu den Spanunterseiten treten bei den vorherrschenden Vorschubgeschwindigkeiten Materialverschweißungen zwischen dem AlSi-Werkstoff und den unbeschichteten Hartmetalloberflächen der Führungsfasen auf, die entsprechende Erscheinungen hervorrufen, wie Abbildung 5.9 zeigt.

Maschine: GROB BZ600	Versuche: Vorversuche-Bohren	Werkzeug-Ø: $d_{WZ} = 5,5$ mm
Werkstoff: AlSi10MnMg	Werkzeug: Tritan Alu	Schnittge.: $v_c = 165$ m/min
KSS-Typ: Emulsion	Beschichtung: unbeschichtet	<b>Vorschub: <math>f \rightarrow</math> variiert</b>



**Abbildung 5.9:** Einfluss des Vorschubs auf die Oberflächengestalt der Bohrungswand

Zur Bewertung des Einflusses des Kühlschmierstoffs auf die Oberflächen-gestalt der Bohrungswand werden, entsprechend den zuvor durchgeführten Analysen, lichtmikroskopische Aufnahmen der geöffneten Probenkörper betrachtet. Der Vergleich der Bohrungswände wird bei einem Vorschub von  $f = 1 \text{ mm}$  durchgeführt, wie **Abbildung 5.10** zeigt.

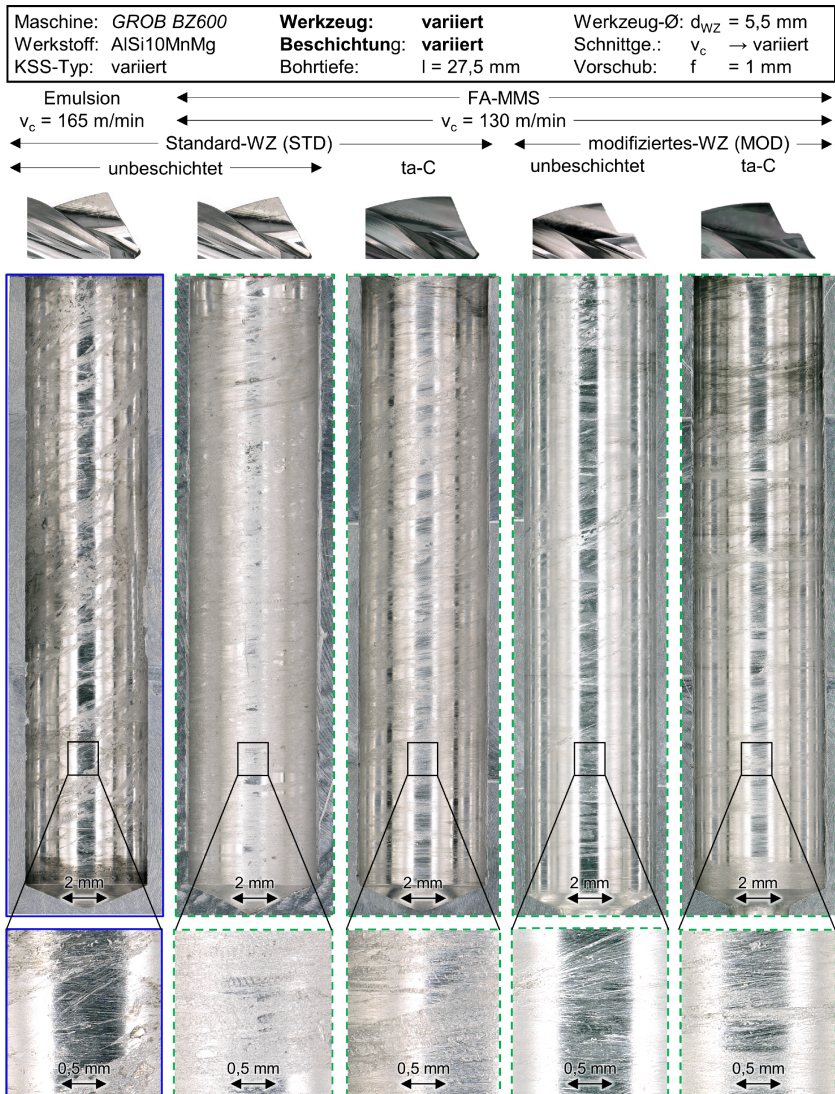


**Abbildung 5.10:** Einfluss des KSS auf die Oberflächen-gestalt der Bohrungswand

Als Referenz wird die Bohrungswand der unter Emulsion durchgeführten Versuchsreihe in Übersichts- und Nahaufnahme dargestellt. Die charakteristischen Verfärbungen in Folge von verkokter KSS-Emulsion an Bohrungseintritt und -grund sind unter MMS nicht festzustellen. Als vergleichbare Merkmale der Oberflächengestalt sind helikale Riefen in der Bohrungswand zu nennen. Die Drallsteigung ist unter MMS jedoch deutlich geringer, was auf einen gehemmten Späneabtransport hindeutet. Insbesondere beim Einsatz des fettalkoholbasierten MMS-Mediums sind die tiefer liegenden Oberflächen durch Anhaftungen und Mikroriefen stark beschädigt. Durch die im Vergleich zum esterbasierten Öl geringere Schmierwirkung führt dies zu stärker ausgebildeten Materialanhaftungen an den Führungsfasern, welche die Oberflächenbeschädigungen durch Adhäsivverschleiß hervorrufen. Wie bereits im Zusammenhang zwischen den mechanischen Werkzeugbelastungen und der Spanform erläutert wurde, bilden sich unter MMS größere Späne, die durch den Luftstrom nicht prozesssicher aus der Spannut aus der Bohrung evakuiert werden.

Als Ansätze zur Verbesserung des Spanabtransports wurde seitens der Werkzeugtechnologie zum einen eine ta-C-Werkzeugbeschichtung in den praktischen Versuchen eingesetzt. Zum anderen wurde der Einfluss eines Spanteilers in Form einer Stufengestalt auf das Prozessverhalten untersucht. Nachdem im Laufe dieses Kapitels bereits spezifische Einflüsse der genannten Eingangsgrößen auf die Prozesskräfte sowie die Spanform bewertet wurden, folgt die Analyse zur Bohrungswandgestalt. Wie **Abbildung 5.11** zeigt, lassen sich eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Prozessverhalten und dem makroskopischen Zustand der Bohrungswand erkennen.

Während beim Referenzprozess unter KSS-Emulsion vorwiegend Verkokungen und lokale Oberflächenschädigungen vorliegen, zeigen sich unter MMS umfassende Beschädigungen, die speziell durch den festgestellten Späne-stau hervorgerufen werden. Bei der Bearbeitung mit beschichtetem Standardwerkzeug sind aufgrund der günstigeren Spanform und dem daraus resultierenden prozesssicherem Spanabtransport erheblich geringere, lokale Beschädigungen der Bohrungswand zu erkennen. Eine weitere Verbesserung der Oberflächengestalt wird durch die signifikante Verringerung der Spangrößen durch die gestufte Werkzeugschneidkante erzielt.

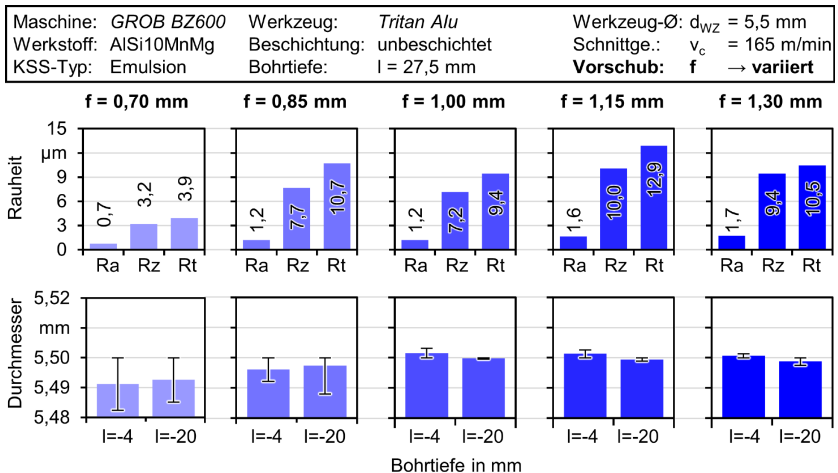


**Abbildung 5.11:** Einfluss des Werkzeugs auf die Oberflächengestalt der Bohrungswand

Mit der ta-C-beschichteten Variante treten am Bohrungseintritt aufgrund der langen Späne vermehrt Beschädigungen auf. Da in diesem Bereich insbesondere für die Gewindeherstellung eine hohe Qualität erforderlich ist, lässt das Analyseergebnis der Bohrungsgüte zu diesem Zeitpunkt keine positive Bewertung der beschichteten Werkzeugmodifikation zu.

### Rauheit und Durchmesser

Nachdem die Bohrungswandgestalt zuvor hinsichtlich makroskopischer Beschädigungen, Verfärbungen etc. betrachtet wurde, folgt in diesem Unterkapitel die Analyse der resultierenden Oberflächenrauheit sowie des Bohrungsdurchmessers. Diese Kennwerte wurden durch verschiedene taktile Messverfahren in den gereinigten Bohrungen ermittelt. In **Abbildung 5.12** sind die Rauheitskennwerte und Bohrungsdurchmesser dargestellt, die im Rahmen der Versuchsreihe zu variierenden Vorschüben bei der Bohrungsbearbeitung von AlSi10Mg unter Emulsion gemessen wurden. Hinsichtlich der Oberflächengüte wurde bei einem Vorschub von  $f = 0,7$  mm eine vergleichsweise hohe Qualität der Bohrungswand ( $R_z = 3,2 \mu\text{m}$ ) erzielt. Da die maximale Rautiefe lediglich geringfügig höher ist als die mittlere Rautiefe, ist von einem gleichmäßigen Rauheitsprofil auszugehen. Bei gesteigerten Vorschüben erhöht sich die mittlere Rautiefe sprunghaft auf über  $7 \mu\text{m}$ . Insbesondere vor den zuvor getroffenen Schlüssen zum Einfluss des Vorschubs auf die Spanform (Abbildung 5.6) sowie die makroskopische Bohrungswandgestalt (Abbildung 5.9) kann ein Zusammenhang zwischen herausforderndem Spanabtransport und herausfordernder Spangestalt und den Oberflächenbeschädigungen getroffen werden. Das mit der Steigerung des Vorschubs korrelierende Spanvolumen führt unter den betrachteten Prozessbedingungen zu signifikanten Beschädigungen der Bohrungswand, die durch die Rauheitskennwerte quantifizierbar sind. Nach weiterer Erhöhung des Vorschubs auf  $f = 1,15$  bzw.  $1,30$  mm wurden Mittenrauwerte von über  $R_z = 10 \mu\text{m}$  gemessen, die auf tiefe Mikrobefschädigungen der Bohrungswände hindeuten. Hinsichtlich des erzielten Bohrungsmaßes nähert sich bei hohen Vorschüben  $f \geq 1,0$  mm der Durchmesser dem Nennwert des Werkzeugs an. Mit steigenden Vorschubkräften erhöht sich die Last der Führungsleisten auf die Bohrungswand, woraus gesteigerte Durchmesser bei geringeren Rundheitsabweichungen resultieren.

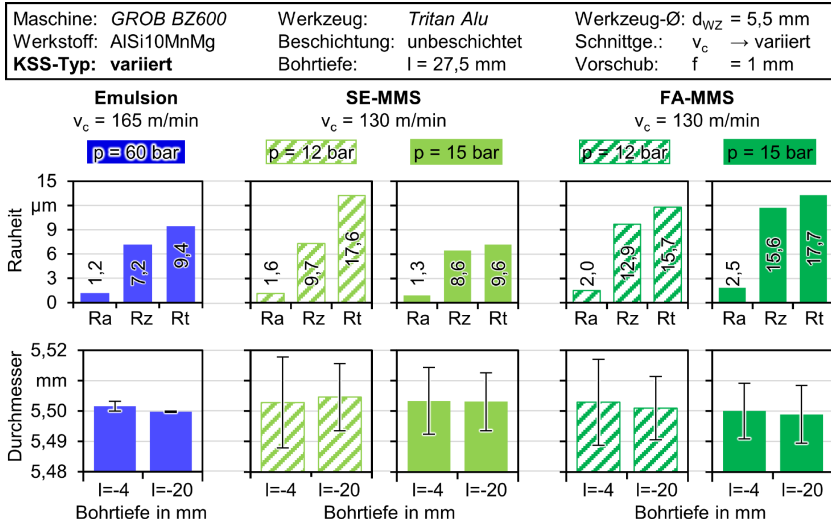


**Abbildung 5.12:** Einfluss des Vorschubs auf Rauheit und Durchmesser

Bei gesteigerten Vorschüben minimiert sich diese insbesondere am Bohrungsgrund, was auf eine gute Zentrierung des dreischneidigen Werkzeugs durch die Pyramidenspitze hindeutet. Die Prozessbedingungen bei der Emulsionsbearbeitung stellen trotz der herausfordernden Spanform daher gute Voraussetzungen für eine prozesssichere Bearbeitung dar.

Zur Bewertung des Einflusses verschiedener Schmiermedien auf die Oberflächengüte zeigt **Abbildung 5.13** die entsprechenden Auswertungen zu Rauheitskennwerten und Durchmessern bei der MMS-Bearbeitung sowie dem Vergleich zum Bohren unter Emulsion bei Vorschub  $f = 1 \text{ mm}$ . Die hohe Schmierwirkung des SE-Mediums führt im Allgemeinen zu geringeren Rauheiten als das fettalkoholbasierte Öl. Neben Beschädigungen der Bohrungswand durch ungenügenden Spanabtransport wird die Oberflächengüte maßgeblich durch den Reibkontakt zwischen Führungsleisten und Bohrungswand bestimmt. Die Bohrungsbearbeitung mit dem FA-basierten Öl führt, wie die Aufnahmen der Bohrungswände in **Abbildung 5.9** zeigen, zu Anhaftungen und flächendeckenden Oberflächenfehlern. Infolge dessen wurden im Vergleich zur Emulsions- bzw. SE-MMS-Bearbeitung signifikant erhöhte gemittelte Rautiefen ermittelt. Wie im Kapitel 5.1 und 0 erläutert

wurde, treten aufgrund des herausfordernden Spanabtransports im Zusammenhang der MMS-Bearbeitung hohe Bohrmomente auf, die die dynamische Stabilität des Bohrprozesses signifikant verringern.

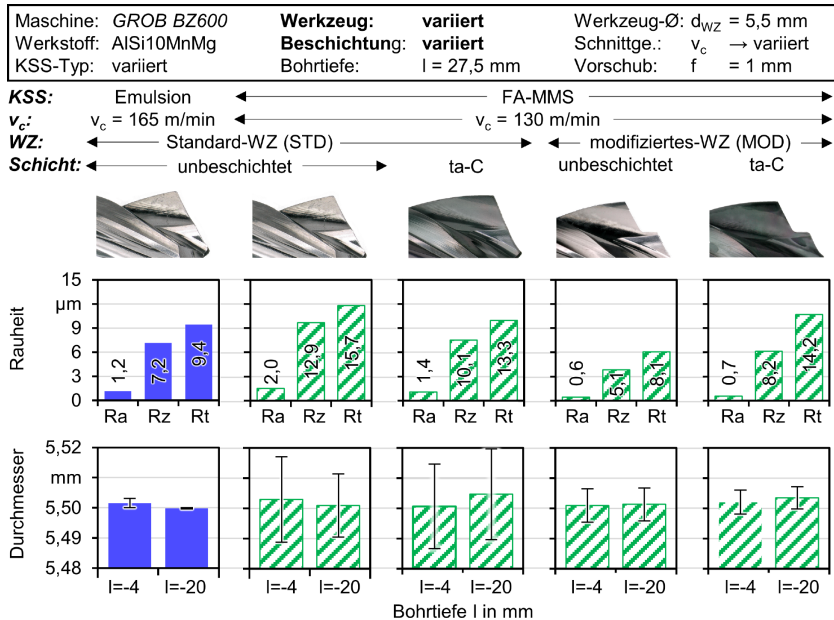


**Abbildung 5.13:** Einfluss des KSS auf Rauheit und Durchmesser

Im Gegensatz zur Bearbeitung unter KSS-Emulsion weichen die Bohrungsmaße dadurch minimal höher vom Sollwert ab. Als weiterer Grund dafür sind Materialanhaftungen an den Querschnitten zu nennen, die zu radialen Schwingungen des Werkzeugs führen können.

Zur Steigerung der Prozessqualität wurden in der abschließenden Versuchsreihe zum Hochvorschubbohren von Aluminiumguss angepasste Werkzeugkonzepte zur MMS-Bearbeitung betrachtet. Nachdem die makroskopische Analyse der Bohrungswand-Oberflächen einerseits einen positiven Einfluss der beschichteten Standardwerkzeuge ergab, konnte andererseits gezeigt werden, dass sich mittels einer Stufengestalt das Spanvolumen verringern lässt. Um die Bohrungsqualität abschließend auf mikroskopischer Ebene zu bewerten, sind in **Abbildung 5.14** die ermittelten Oberflächenkennwerte sowie Bohrungsmaße dargestellt. Nachdem im Rahmen der Referenz-Versuchsreihe unter Emulsion mit steigendem Vorschub eine

geringere Oberflächenqualität festgestellt wurde, zeigten die Untersuchungen mit MMS, dass ein ungenügender Spanabtransport zu signifikant erhöhten Rauheiten führt.



**Abbildung 5.14:** Einfluss des Werkzeugvariante auf die Rauheit und Durchmesser

Mittels der beschichteten Werkzeugvariante kann die mittlere Rautiefe unter MMS um 20 % reduziert werden. Die Teilung der Späne mittels gestufter Werkzeugspitze wirkt sich ebenfalls in Bezug auf Mikroschädigungen als positiv aus, da es aufgrund des geringeren Volumens nicht zum Spänestau in der Spannut kommt. Insbesondere konnte die maximale Rautiefe gegenüber dem vergleichbaren Prozess in etwa halbiert werden. Wie bereits in Abbildung 5.11 gezeigt, beschädigen die Bandspäne, die mit dem beschichteten Stufenbohrer erzeugt wurden, die Bohrungswand überdurchschnittlich (vgl. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.5).

Hinsichtlich der ermittelten Bohrungsdurchmesser stellt sich heraus, dass die modifizierte Werkzeugspitze zu geringeren Rundheitsabweichungen führt. Die verbesserte Führung des Werkzeugs durch die Stufengestalt

trägt sowohl für das unbeschichtete als auch die ta-C-Variante zu hohen Maßgenauigkeiten bei. In Bezug auf die Standard-Gestalt ist kein signifikanter Einfluss der Beschichtung auf den gemessenen Bohrungsdurchmesser zu ermitteln.

## 6 Grundlagenuntersuchungen zum Helikalgewindeformen

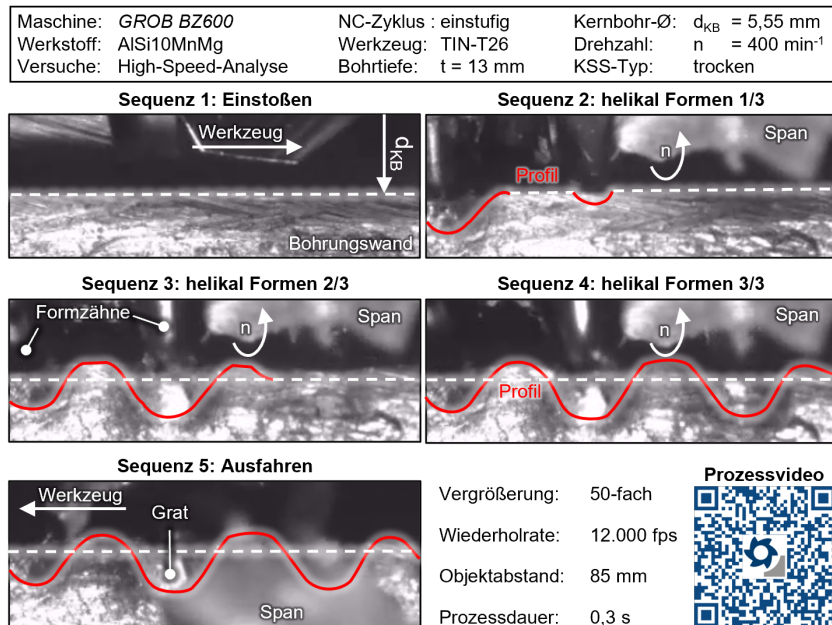
Das folgende Kapitel erläutert die Ergebnisse der durchgeführten Grundlagenuntersuchungen zum Helikalgewindeformen in AlSi10Mg anhand der Analyse des Gewindeformvorgangs, der mechanischen Werkzeugbelastungen sowie der Gewindequalität. Die Bewertung der resultierenden Qualität wird speziell in Bezug auf die Gestalt, das Profil, die Flankenoberfläche und die Mikrostruktur der Innengewinde getroffen. Schließlich folgt die Einordnung der Prozess- und Bauteileigenschaften gegenüber herkömmlich angewandten Gewindefverfahren am Beispiel der Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg.

### 6.1 Analyse des Gewindeformvorgangs

Der Helikalgewindeformprozess unterscheidet sich aufgrund des spezifischen Werkzeugwegs grundlegend vom konventionellen Gewindefverfahren. Wie in Kapitel 2.3.5 erläutert, wird das Innengewinde anstatt durch schrittweise Materialverdrängung während der synchronen Einschraubbewegung in einer halben Werkzeugumdrehung geformt. Da dieser Vorgang innerhalb der Bohrung vollzogen wird, sind bspw. Materialfluss und Gratbildung nicht sichtbar. Zur Erlangung eines tieferen Prozessverständnisses wurde ein Versuchsstand (siehe Kapitel 4.5) entwickelt, der die charakteristischen Phasen des Gewindeformvorgangs in einer offenen Bohrung mittels High-Speed-Mikroskopie visuell erkennbar darstellt.

Im ersten Schritt des Bearbeitungszyklus tritt das Sonderwerkzeug in die Vorbohrung ein und erzeugt zwei helikale Nuten. Wie in der ersten Sequenz in **Abbildung 6.1** erkennbar, berühren die Formstollen in diesem Prozessschritt die Bohrungswand nicht. Durch die helikale Einstoßbewegung, welche durch die NC-Steuerung synchron mit Steigung  $P_D = 31,5 \text{ mm}$  ausführt wird, erfolgt lediglich die Herstellung der Nuten durch die Räumzähne an der Werkzeugschneide. Die um  $180^\circ$  versetzten Nut-Kanäle dienen in verschiedenen Prozessschritten, wie z. B. dem Einfahren, zur freien Werkzeugbewegung ohne Eingriff in das Gewindeprofil. Dabei wird Material aus der Bohrungswand getrennt, das ab Sequenz 2 als Span erkennbar ist. Im folgenden Prozessschritt beginnt der spezielle Formvorgang, in dem das Gewindeprofil durch eine synchronen Bewegung, bestehend aus einer halben Rotation ( $\Delta\phi = 180^\circ$ ) und Translation um

$\Delta z = 0,5 \times P$ , hergestellt wird. Dabei dringen die beiden Zahnreihen aus den Nuten in die Bohrungswand ein. In der zweiten Sequenz ist erkennbar, wie der erste Formstollen den Aluminiumwerkstoff plastisch verformt und den Gewindegund ausformt. Im weiteren Verlauf greifen weitere Formzähne in die Bohrungswand ein und bringen das Material durch den Gegendruck zum Fließen. Die Standbilder der dritten und vierten Sequenz zeigen wie sich das Gewindepotil im Längsschnitt schrittweise ausbildet. Aufgrund des unterbrochenen Werkstückprofils zeigt sich, wie sich Gratmaterial in den Freiräumen anlagert. Dementsprechend wird durch die Hochgeschwindigkeitsanalyse ein Pflügen durch Formstollen visualisiert. Die so verdichteten Materialanteile drücken sich zum einen in die Flankenoberflächen und lagern sich zum anderen in den Helikalnuten ab. Durch die helikale Ausfahrbewegung schert der Grat an den Übergängen ab.

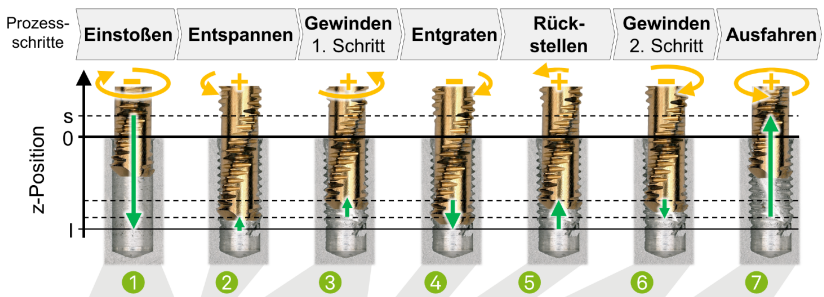


**Abbildung 6.1:** Hochgeschwindigkeitsanalyse des einstufigen Helikalgewindeformvorgangs (vgl. Abbildung 2.14) in Darstellung der charakteristischen Prozessschritte Einstoßen, helikal Formen und Ausfahren

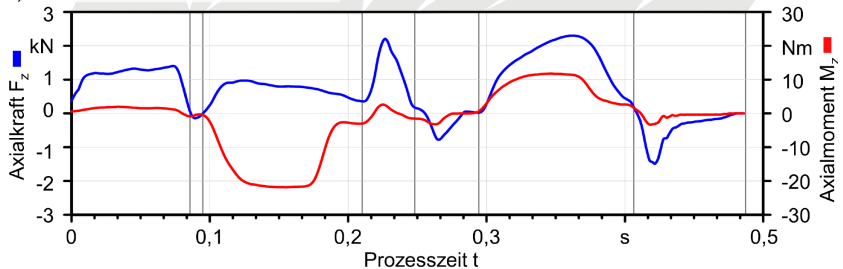
## 6.2 Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen

Nachdem die drei grundlegenden Phasen der Formung des Innengewindeprofils detailliert mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen dargestellt wurden, wird im folgenden Unterkapitel das Prozessverhalten beim Helikalgewindeformen betrachtet. Zu diesem Zweck werden die mechanischen Werkzeugbelastungen in Form der Axialkraft sowie des Axialmoments analysiert. Die Lastverläufe wurden in Einsatzversuchen aufgezeichnet, in denen ein in der Praxis genutzter NC-Zyklus (PT2) programmiert wurde. Dieser enthält neben der zuvor betrachteten Einfahr-, Form- und Ausfahrbewegung die zusätzlichen Prozessschritte, die zur Minimierung von Zugbelastungen dienen und im Folgenden anhand **Abbildung 6.2** erläutert werden.

a) Axiale **Werkzeugbewegung z** und **Spindelrotation  $\varphi$**



b) Axialkraft- und Axialmomentverlauf

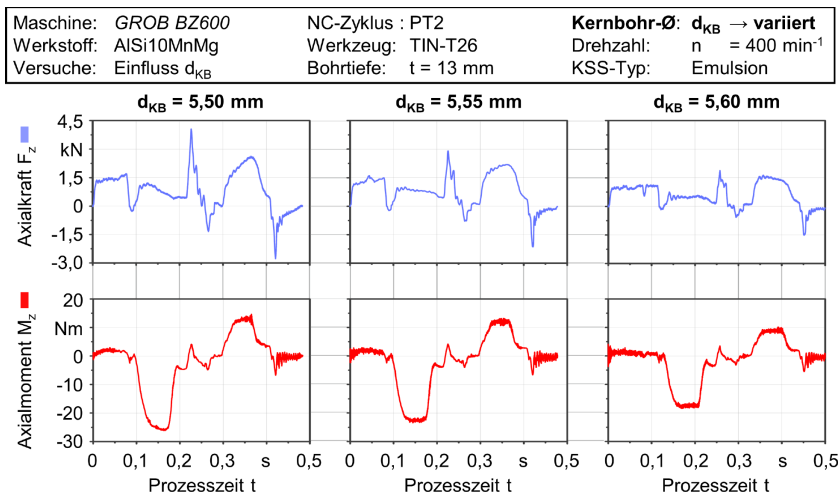


**Abbildung 6.2:** a) Erläuterung der Prozessschritte des industriell eingesetzten, zweistufigen NC-Zyklus mit b) beispielhafter Darstellung des Axialmoment bzw. der Axialkraft

Im ersten Schritt stößt das Werkzeug helikal in die Kernbohrung ein und räumt mittels der Stoßzähne zwei um  $180^\circ$  versetzte Nuten aus der Bohrungswand. Die helikale Werkzeugbewegung wird vom Bohrungseingang bis zur Bearbeitungstiefe mit einem Drall von  $\delta = 30^\circ$  bzw.  $P_{\text{Drall}} = 31,5 \text{ mm}$  ausgeführt. Entsprechend steigt zu Prozessbeginn zwischen  $t = 0 \dots 0,09 \text{ s}$  die Axialkraft sprunghaft bis zu einem Scheitelwert. Es folgt eine kurze Bewegung, um das tordierte Werkzeug zu entspannen. Anschließend folgt der erste Formvorgang, in dem das Werkzeug um  $180^\circ$  in positiver Richtung dreht und synchron um die Hälfte der Gewindesteigung aus der Bohrung heraus bewegt wird. Während der Zeitspanne  $t = 0,1 \dots 0,2 \text{ s}$  wirken bei erzielter Nenndrehzahl ein hohes Axialmoment und eine axiale Druckbelastung auf den Gewindeformer, bis die Formstollen in der gegenüberliegenden Nut zum Stillstand kommen. In der vierten Phase des Prozesses ( $t = 0,22 \dots 0,3 \text{ s}$ ) wird in die Helikalnut gedrücktes Gratmaterial durch eine Helix-förmige Bewegung, in der das Werkzeug innerhalb der Nut zurück auf maximale Bearbeitungstiefe fährt, abgeschert. Durch das Abscheren kommt es zu einer Materialtrennung entlang der gesamten Tiefe, infolgedessen das Gewindeprofil an den Übergängen einseitig abgeflacht wird. Dabei entstehen außergewöhnlich hohe Druckkräfte, die jedoch in die Hauptbelastungsrichtung der Spindellagerung orientiert sind und daher gegenüber vergleichbaren Zugkräften als günstig anzusehen sind. Zur Steigerung der Gewindegüte folgt zwischen  $t = 0,3 \dots 0,4 \text{ s}$  ein zweiter Gewindeformschritt in negativer Drehrichtung, wofür das Werkzeug zunächst helikal zurückgestellt wird und anschließend die bereits zuvor erläuterte Synchronbewegung ( $\Delta\varphi = -180^\circ + \Delta z = -0,5 \times P$ ) ausführt. Da beim Nachformen Gratmaterial zwischen Werkzeug und Gewindeprofil gequetscht wird, wirkt eine gesteigerte Druckkraft bei geringerem Axialmoment. Schließlich wird das Werkzeug durch die Helikalnuten im Eilgang aus der Bohrung herausgefahren. Währenddessen scheren zuvor gebildete Grate ab, wodurch das Werkzeug zunächst sprunghaft belastet wird.

Nachdem zuvor die erweiterten Phasen des industriell angewandten Helikalgewindeform-Zyklus am Beispiel der mechanischen Werkzeugbelastungen detailliert erläutert wurden, folgt die Analyse zum Einfluss variierender Kernbohrdurchmesser ( $d_{\text{KB}} = 5,50; 5,55; 5,60 \text{ mm}$ ) auf die mechanischen Werkzeugbelastungen unter Emulsion. Da mit sinkendem Durchmesser der

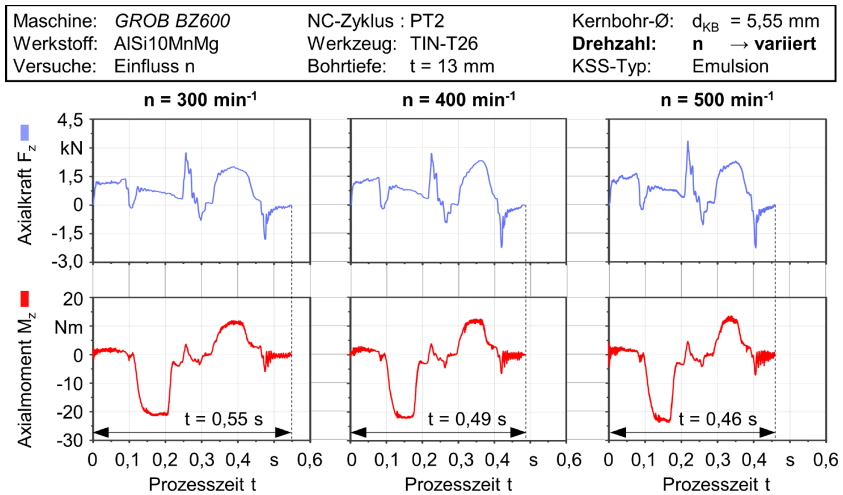
Vorbohrung das zu verdrängende Materialvolumen proportional steigt, wirken grundsätzlich steigende mechanische Belastungen auf das Gewindeformwerkzeug. Im Speziellen ist ein starker Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf die beim Entgraten entstehende Druckkraft festzustellen. Gegenüber dem geringsten betrachteten Vorbohrdurchmessers sinkt die Axialkraft von  $F_z = 4,3 \text{ kN}$  um 31,7 % auf  $F_z = 3,0 \text{ kN}$  bei  $d_{KB} = 5,55 \text{ mm}$ . Bei weiterer Steigerung des Kernbohrdurchmessers um 0,05 mm wurde eine weitere Verringerung der gemessenen Kraft auf  $F_z = 1,9 \text{ kN}$  gemessen, was einem Anteil von 35,4 % entspricht. Vergleichbare Zusammenhänge sind bzgl. der beim Ausfahren auftretenden Zugkräfte zu treffen. Ein moderater Einfluss des Durchmessers der Kernbohrung ist anhand **Abbildung 6.3** hinsichtlich der bei der Zahnformung auftretenden Axialmomente zu erkennen.



**Abbildung 6.3:** Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf Axialkraft und -moment

Mit steigendem Kernbohrdurchmesser nehmen diese um 14,8 % bzw. 20,5 % ab. Die dabei auftretenden Axialkräfte nehmen entsprechend in gleichen Anteilen ab. Die als Druckkraft wirkenden Belastungen, hervorgerufen durch das Räumen der Helikalnuten, sinken mit steigendem Kernbohrdurchmesser jeweils um ca. 20 %.

Nachdem gezeigt wurde, dass das zu verformende Materialvolumen, quantifiziert durch den Kernbohrdurchmesser, zu einer Veränderung der mechanischen Werkzeugbelastungen um ca. 20...30 % führt, wird im Folgenden der Einfluss der Form-Nenn Drehzahl analysiert. **Abbildung 6.4** stellt die zeitlichen Verläufe der Axialkraft und des -moments bei variierenden Drehzahlen zwischen  $n = 300; 400; 500 \text{ min}^{-1}$  dar. Dabei ist ein direkter Zusammenhang zwischen Prozesszeit und Solldrehzahl während der beiden Umformschritte festzustellen. Infolge der um jeweils 100 Umdrehungen pro Minute gesteigerten Umfangsgeschwindigkeiten sinkt die Prozesszeit von  $t = 0,55 \text{ s}$  bei  $n = 300 \text{ min}^{-1}$  auf  $t = 0,49 \text{ s}$  bzw.  $t = 0,46 \text{ s}$ . Neben der Anpassung des Zyklusablaufs bzw. der Prozessschritte ist die Nenn Drehzahl der einzige Parameter, der die Hauptzeit direkt beeinflusst.



**Abbildung 6.4:** Einfluss der Werkzeugdrehzahl auf Axialkraft und -moment

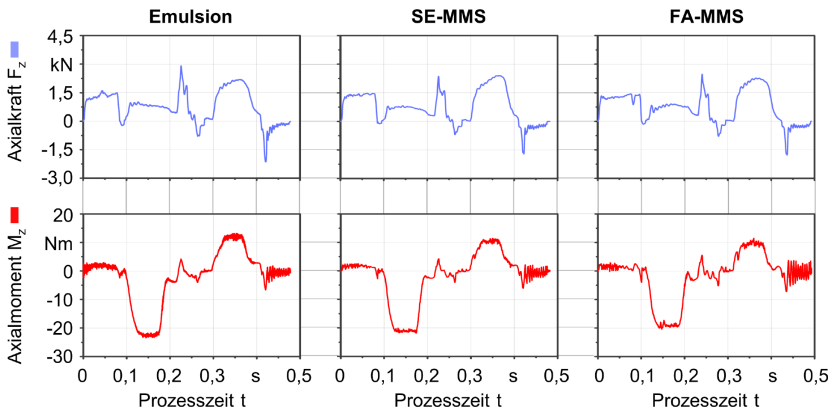
Im Vergleich zu den im vorherigen Abschnitt betrachteten Kernbohrdurchmesser nimmt die Drehzahl beim Helikalgewindeformen unter Emulsion vergleichsweise moderaten Einfluss auf die mechanischen Werkzeugbelastungen beim Helikalgewindeformen. Zum einen ist in diesem Zusammenhang eine Steigerung der Axialmomente beim Vor- und Nachformen des Gewindeprofils um je 5 % zu beobachten. Zum anderen werden durch die hö-

here Umformgeschwindigkeit ca. 9 % höhere Entgrat-Kräfte hervorgerufen. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die Gratbildung tendenziell mit steigender Drehzahl zunimmt. Ursächlich resultieren bei gleichbleibenden Reibverhältnissen während der Druckumformung gesteigerte Reibkräfte infolge der erhöhten Relativgeschwindigkeit. Qualitative Einflüsse der Drehzahl auf die zeitlichen  $F_z$ - bzw.  $M_z$ -Verläufe sind nicht feststellbar.

Entsprechend den zuvor gewonnenen Ergebnissen zum Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit bei der Bearbeitung unter Emulsion wurden bei den betrachteten Drehzahlen nur geringfügige Effekte auf die mechanischen Werkzeugbelastungen ermittelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus Versuchen bei konstantem Kernbohrdurchmesser und konstanter Drehzahl analysiert, um den Effekt von Minimalmengenschmierung auf Axialkräfte bzw. -momente zu bewerten. **Abbildung 6.5** zeigt neben der bereits zuvor betrachteten Versuchsreihe unter Emulsion die Kraft- und Momentverläufe aus Untersuchungen mit MMS-Ölen zum einen auf Basis von synthetischen Estern (SE-MMS) und zum anderen auf Basis eines auf Fettalkohol (FA-MMS) basierten Mediums. Beide Gemische wurden dem Werkzeug mittels des 1-Kanal-Systems bei einem Systemdruck von  $p = 7$  bar intern zugeführt. Hinsichtlich der verhältnismäßig hohen Axialkräfte wird ein Einfluss des deutlich unterschiedlichen KSS-Drucks nicht berücksichtigt. Im Allgemeinen sind bezüglich der qualitativen  $F_z$ - bzw.  $M_z$ -Verläufe keine Auswirkungen der verschiedenen KSS-Konzepte feststellbar. Der anhand der mechanischen Belastungen interpretierte Prozessverlauf entspricht den anfänglich erläuterten Phasen einschließlich seiner charakteristischen Merkmale. Hinsichtlich der maximalen Beträge in charakteristischen Prozessphasen ist der Einfluss der veränderten tribologischen Verhältnisse auf die Werkzeugbelastungen zu erkennen. Im Hinblick auf das Vor- und Nachformen des Gewindefils sind aufgrund des MMS-Einsatzes keine signifikanten Veränderungen bzgl. der Axialkräfte zu beobachten. Der Vergleich der auf das Werkzeug wirkenden Momente bei variierenden KSS-Konzepten zeigt indes eine Verringerung der Torsion während der Drehung mit Solldrehzahl. Beim Einsatz des SE-MMS-Öls sinken die Spitzenwerte der Axialmomente gegenüber den Versuchsreihen unter Emulsion um 5 % beim ersten und um

10 % beim zweiten Gewindeformschritt. Das Aerosol, das mit fettalkohol-basierendem MMS-Öl angereichert wurde, erzielt vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Reduzierung der Formmomente. In den praktischen Versuchen konnte das Axialmoment beim initialen Formen des Gewindeprofils gegenüber der Referenz ( $M_z = -22,8 \text{ Nm}$ ) um 12 % reduziert werden.

Maschine: GROB BZ600	NC-Zyklus : PT2	Kernbohr-Ø: $d_{KB} = 5,55 \text{ mm}$
Werkstoff: AlSi10MnMg	Werkzeug: TIN-T26	Drehzahl: $n = 400 \text{ min}^{-1}$
Versuche: Einfluss KSS	Bohrtiefe: $t = 13 \text{ mm}$	<b>KSS-Typ: variiert</b>



**Abbildung 6.5:** Einfluss des KSS-Konzepts auf Axialkraft und -moment

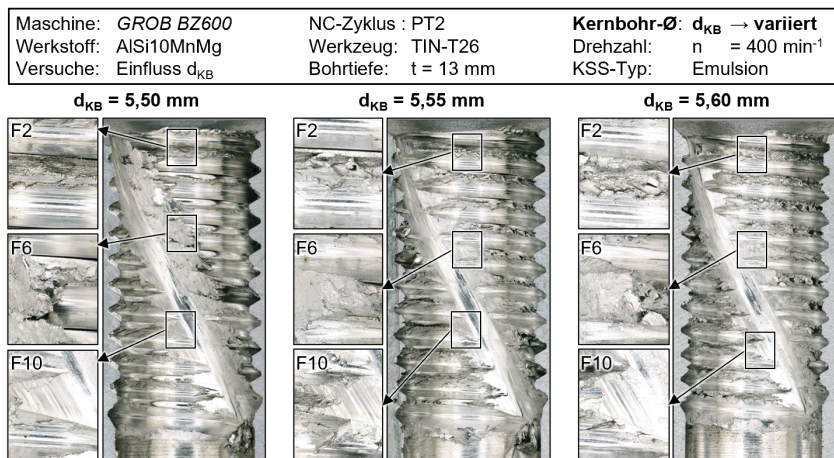
Des Weiteren trägt die im Vergleich zu KSS-Emulsionen gesteigerte Schmierwirkung der Minimalmengenschmierstoffe zu deutlich geringeren Axialkräften beim helikalen Entgraten bei. Aufgrund der sehr guten Schmierwirkung des SE-Öls wurden 28 % geringere Druckkräfte und um 21 % verminderte axiale Zugbelastungen gemessen. Der Einsatz des dünnflüssigen MMS-Mediums auf Fettalkohol-Basis führte zur Minderung der Entgrat-Belastungen um jeweils 23 %. Diese Ergebnisse sind im weiteren Verlauf der Analysen zur Gewindequalität hinsichtlich der grundsätzlichen Wirkung auf die Gratbildung zu überprüfen.

### 6.3 Analyse der Gewindequalität

Im Anschluss an die Analysen zum Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf das Prozessverhalten folgt in diesem Unterkapitel die kritische Bewertung der resultierenden Gewindequalität. Zu diesem Zweck wird eine Methodik angewendet, die zunächst die makroskopischen Eigenschaften der aufgetrennten Innengewinde betrachtet und schließlich die Mikroanalyse der Flankenoberflächen sowie der darunterliegenden Randzone beinhaltet.

#### 6.3.1 Gestalt

Die Analyse der Gewindegestalt mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen zielt zum einen auf die Bewertung der Gratbildung an den Gewindespitzen in Abhängigkeit variierender Eingangsgrößen des Helikalgewindeformprozesses ab. Zum anderen wird die prozesstypische Krallenbildung in Abhängigkeit des Kernbohrdurchmessers, der Umfangsgeschwindigkeit sowie des eingesetzten Kühlschmierstoffs detailliert betrachtet. Die makroskopische Gestalt der Flankenoberflächen wird im Folgenden u. a. in Bezug auf Riefen untersucht. In **Abbildung 6.6** sind Übersichtsbilder sowie Detailaufnahmen der zweiten, sechsten und zehnten Gewindeflanke für variierende Vorbohrdurchmesser dargestellt.



**Abbildung 6.6:** Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf die Gewindegestalt

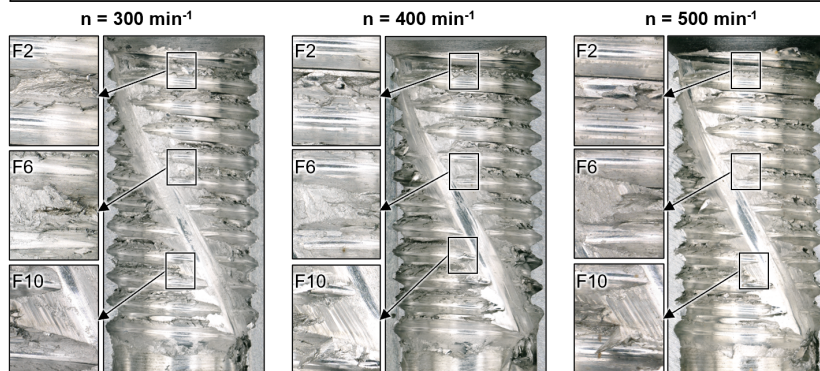
Auf den Übersichtsaufnahmen der drei Gewindehälften sind zunächst die Helikalnuten innerhalb des Gewindeprofils sichtbar. Mit steigendem Vorbohrdurchmesser wird eine Verbreiterung des Räumkanals feststellbar, die aufgrund der geringeren radialen Spannungstiefe flacher und breiter ist. Analog dazu verbleibt unter den betrachteten Bedingungen lediglich ein geringer Anteil des vor der Stirnschneide gestauten Materials am Bohrungsgrund zurück. Entsprechend tritt bei einem Vorbohrdurchmesser von  $d_{KB} = 5,60$  mm das Ablösen von Gratmaterial, welches bspw. rotierende Komponenten beschädigen könnte, mit geringerer Wahrscheinlichkeit auf. Hinsichtlich der Gestalt der Gewindespitzen ist beim betrachteten Kernbohrdurchmesser eine ausgeprägte Gratbildung erkennbar. Der Aluminiumwerkstoff ist während der Umformung nicht vollständig in Richtung des Werkzeugkerns geflossen. Infolge dessen ist die Gewindespitze unvollständig ausgeformt und die Furchen weisen eine zerklüftete Gestalt auf. Die Nahaufnahmen der zweiten Gewindeflanke der mit  $d_{KB} = 5,50$  mm vorbearbeiteten Kernbohrung deuten im Gegensatz dazu auf eine nahezu vollständig geschlossene Gewindekralle hin. Die von Gratmaterial umgebene Furche an der Gewindespitze bildet sich beim minimalen Vorbohrdurchmesser deutlich schmaler aus, was hinsichtlich der hohen Axialmomente (siehe Abbildung 6.3) auf Überformen hindeutet.

Die Analyse der Innengewindeggestalt in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit während der Gewindeformung erfolgte im Rahmen der Versuchsreihen bei konstantem Kernbohrdurchmesser von  $d_{KB} = 5,55$  mm. **Abbildung 6.7** zeigt die lichtmikroskopischen Aufnahmen der geöffneten Gewindeproben für die betrachteten Drehzahlen von  $n = 300; 400; 500 \text{ min}^{-1}$ .

Durch die Detailaufnahmen der zweiten und sechsten Gewindeflanken wird sichtbar, dass bei  $n = 300 \text{ min}^{-1}$  eine verstärkte Gratbildung beim Helikalgewindeformen festzustellen ist. Insbesondere an den Gewindespitzen haftet ein Teil des verdrängten Materials an, sodass das Hereinschrauben eines Gewindebolzens erschwert werden könnte. Mit steigender Gewindedrehzahl nimmt die Gratbildung ab, wie die vergrößerten Aufnahmen in Abbildung 6.7 verdeutlichen. Infolge steigender Umfangsgeschwindigkeiten wird ein verbesserter Materialfluss beobachtet, woraus sich höhere Gewindegqualitäten ergeben. Materialanhaftungen und Riefen an den Übergängen

zwischen den Räumkanälen und dem Gewindeprofil treten insbesondere im Bereich der zehnten Gewindeflanken auf.

Maschine: <i>GROB BZ600</i>	NC-Zyklus : PT2	Kernbohr-Ø: $d_{KB} = 5,55 \text{ mm}$
Werkstoff: AISI10MnMg	Werkzeug: TIN-T26	<b>Drehzahl:</b> $n \rightarrow \text{variiert}$
Versuche: Einfluss $d_{KB}$	Bohrtiefe: $t = 13 \text{ mm}$	KSS-Typ: Emulsion

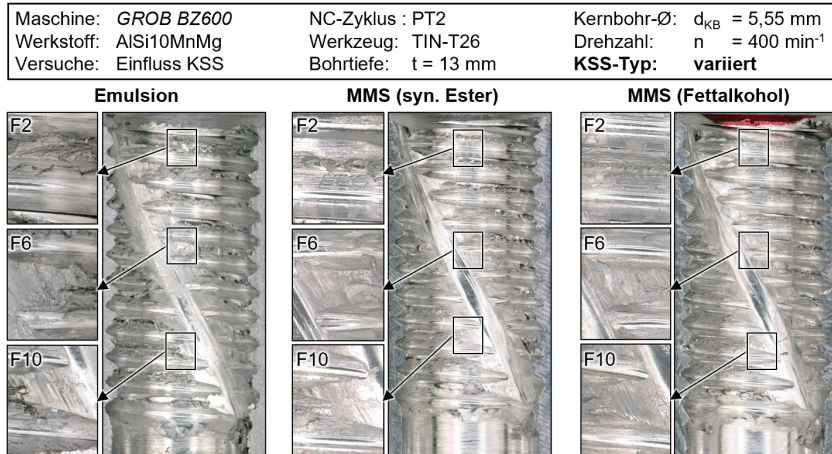


**Abbildung 6.7:** Einfluss der Werkzeughdrehzahl auf die Gewindegestalt

Bei gesteigerten Geschwindigkeiten findet der radiale Materialfluss in Richtung der Gewindespitze demnach verzögert statt. In diesem Zusammenhang ist eine ausreichende Schmierung sowie ausreichender Abtransport von Gratmaterial erforderlich, um die gewünschte Bauteilqualität zu erzielen.

Zur Analyse des Einflusses des Schmierstoffs auf die Gewindegestalt wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verschiedene KSS-Konzepte angewandt. In Bezug auf die mechanischen Werkzeugbelastungen konnte zuvor bereits gezeigt werden, dass die notwendigen Axialmomente und -kräfte durch den Einsatz von MMS signifikant verringert werden können. Neben den unter Überflutungsschmierung mit KSS-Emulsion gefertigten Referenz-Proben werden in **Abbildung 6.8** die präparierten Gewindequerschnittsflächen gezeigt, die unter MMS gefertigt wurden. Beim Vergleich der Übersichtsaufnahmen zeigen sich bzgl. der äußeren Gewindegestalt keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen den KSS-Konzepten. Beispielsweise zeigen die Oberflächen der Gewindeflanken z. B. im Bereich der helikalen Nuten keine Verfärbungen oder grobe Beschädigungen.

Die Gewindeprofile entsprechen makroskopisch der Gestalt des ISO-Gewindes, wodurch MMS grundsätzlich zum Helikalgewindeformen eingesetzt werden kann. Weiterhin sind die gezeigten Gewinde während der Versuchsdurchführung ohne Beanstandungen mit einem Lehrdorn überprüft worden.



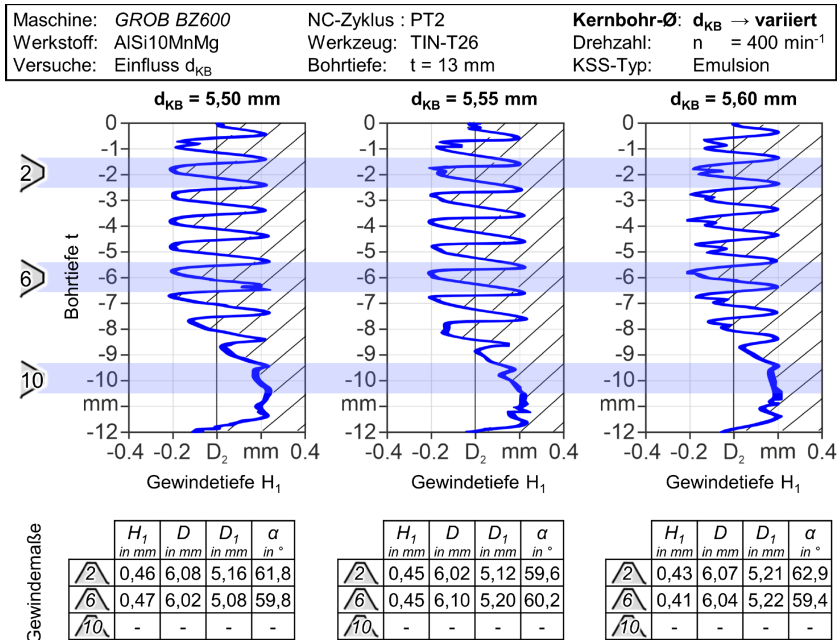
**Abbildung 6.8:** Einfluss des KSS-Konzepts auf die Gewindegestalt

Im Speziellen wirkt sich der MMS-Einsatz positiv auf die Ausformung der Gewindespitzen aus. Mittels der vergrößerten Bildausschnitte zeigt sich, dass insbesondere bei Verwendung des fettalkoholbasierten Minimalmengenschmierstoffs nur gering ausgeprägte Gratbildung stattfindet. Die Gewindekrallen formen sich prozesstypisch und gleichmäßig aus, wodurch die äußere Qualität der unter MMS gefertigten Gewinde als vergleichsweise gut zu bewerten ist.

### 6.3.2 Profil

Im Anschluss an die Analyse zu den Einflüssen verschiedener Prozessgrößen auf die makroskopische Gewindegestalt werden in diesem Unterkapitel die Kriterien für Gewindeprofil und -maße betrachtet. Zum einen dienen die aus der Fokusvariations-Mikroskopie stammenden Messdaten zur graphischen Darstellung des Gewindeprofils. Zum anderen wurden aus den 3D-Daten die Maße für Außen- und Kerndurchmesser ermittelt sowie die

Flankenwinkel der Gewinde ermittelt. Zur Betrachtung lokaler Unterschiede wurden die Gewindemaße am Eingang (Flanke 2), in der Mitte (Flanke 6) sowie am Grund (Flanke 10) des Gewindes ausgewertet, wie **Abbildung 6.9** zeigt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, wie sich variierende Kernbohrdurchmesser u. a. auf die Gestalt des Gewindeprofils auswirken.

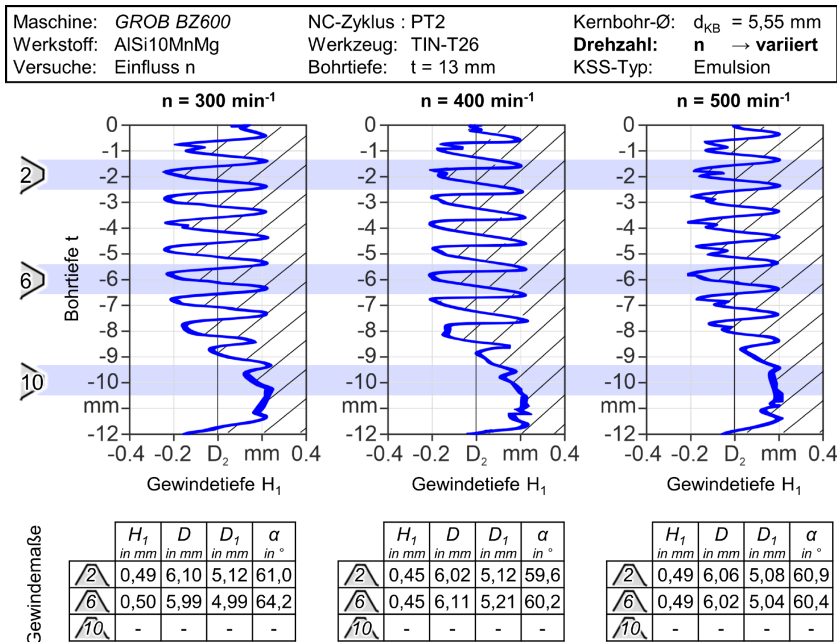


**Abbildung 6.9:** Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf Gewindeprofil und -maße

Die Gewindeprofile zeigen, dass die Gewindezähne beim Helikalgewindeformen in einem Bereich (hier  $t < 7 \dots 12 \text{ mm}$ ) unvollständig ausgeformt werden, bzw. das Profil durch die gestoßenen Nuten unterbrochen wird. Des Weiteren beeinflusst der Kernbohrdurchmesser, vergleichbar zum konventionellen Gewindeformen, die Gestalt der Gewindespitzen signifikant. In den abgebildeten Profilausschnitten sind die krallenförmigen Spitzen in verschiedenen Ausprägungen zu erkennen. Wie bereits in Kapitel 6.2 im Zusammenhang des Axialmoments erläutert, nimmt das Volumen des ver-

formten Materials mit steigendem Kernbohrdurchmesser ab. Infolge des­sen sinken die erforderlichen mechanischen Belastungen. Parallel nimmt der Gewindegewindedurchmesser durch unvollständige Ausbildung der Gewin­despitzen zu, wie mittels der in Abbildung 6.9 aufgeföhrt­en Gewindemaße gezeigt wird.

Nachdem der Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausformung des Gewin­des mittels digitalisierter 3D-Profile ermittelt wurde, folgt im Rah­men der methodischen Auswertung die Bewertung der Zusammenhänge zu variierenden Umfangsgeschwindigkeiten. **Abbildung 6.10** zeigt die ermittel­ten Gewindeprofile bei  $d_{KB} = 5,55$  mm und Werkzeugdrehzahlen von  $n = 300; 400; 500$  min<sup>-1</sup> unter Emulsion.

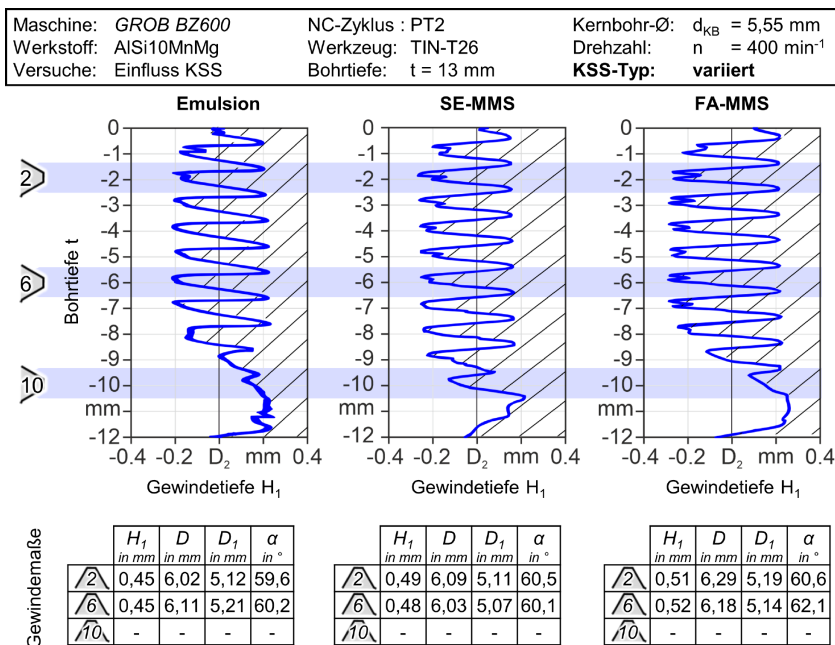


**Abbildung 6.10:** Einfluss der Werkzeugdrehzahl auf Gewindeprofil und -maße

Im Rahmen der Analysen zum Einfluss der Werkzeugdrehzahl auf die me­chanischen Werkzeugbelastungen wurde in Kapitel 6.2 nachgewiesen, dass

lediglich ein schwacher Zusammenhang festzustellen ist. Die zuvor getroffene Hypothese zum Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf Axialkräfte und -momente sowie die Profilausformung wird durch die in Abbildung 6.10 dargestellten Ergebnisse bestätigt. Durch den Vergleich der Gewindeprofile sowie der ermittelten Maße ist kein direkter Zusammenhang zwischen Drehzahl und Ausformung festzustellen.

Im Folgenden wird die Verbindung zwischen KSS-Konzept und Gewindequalität anhand der Betrachtung der Gewindeprofile bei Bearbeitung unter MMS weiter erläutert. Dazu zeigt **Abbildung 6.11** die im Rahmen der Auswertung ermittelten Maße und Profile der unter Emulsion sowie verschiedenen MMS-Ölen gefertigten M6-Gewinde.



**Abbildung 6.11:** Einfluss des KSS-Konzepts auf Gewindeprofil und -maße

Die als Referenz aufgeführten Ergebnisse aus Einsatzversuchen unter Verwendung von KSS-Emulsion zeigen im Bereich der Gewindespitzen nur eine

gering ausgeprägte Krallenbildung. Die unter MMS gefertigten Proben weisen dagegen, für das Gewindeformen typisch (siehe Abbildung 2.11), offene Gewindespitzen auf. Neben der qualitativen Feststellung mittels des Querschnittsprofils kann die vergleichsweise ausgeprägte Ausformung der Gewindespitzen anhand des Vergleichs der Gewindehöhe  $H_i$  in Zahlen nachgewiesen werden. Durch den Einsatz des Syntheseester-Öls konnte die Höhe um bis zu 0,04 mm gesteigert werden. Die Verwendung des auf dünnflüssigen Fettalkohol basierten MMS-Mediums führte zu einer Steigerung der Profilhöhe um bis zu 0,07 mm. Aufgrund der sehr guten Schmierwirkung bei gleichzeitig verringerten Bearbeitungskräften ist der Einsatz des Fettalkohol-Mediums in diesem Stadium der ganzheitlichen Analyse als besonders vorteilhaft anzusehen.

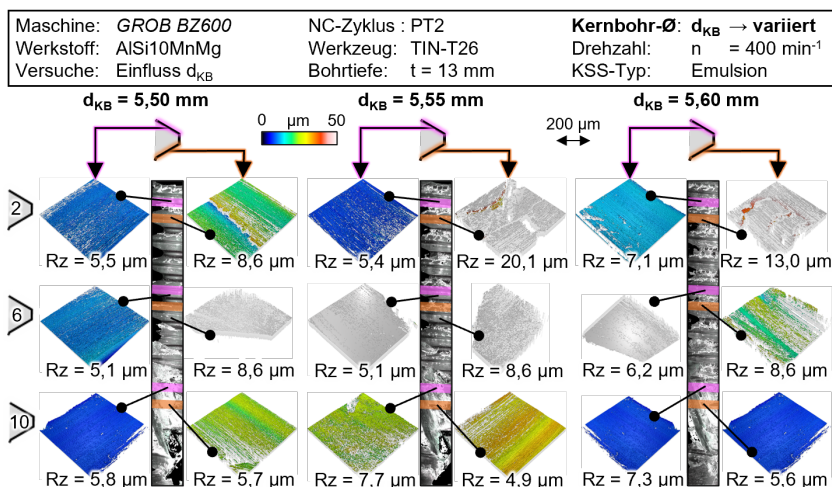
### 6.3.3 Flankenoberfläche

Die Analyse der Gewindeprofilgestalt in Kapitel 6.3.2 zeigte, dass bezüglich der betrachteten Prozessparameter signifikante Einflüsse auf die makroskopische Profilgestalt festzustellen sind. Im nächsten Schritt der ganzheitlichen Gewindeanalyse wird im Folgenden die Oberflächentopografie mittels konfokal-lichtmikroskopischer Aufnahmen bewertet.

Zur Analyse des Einflusses des Kernbohrdurchmessers auf die Oberflächenqualität der Gewindeflanken zeigt **Abbildung 6.12** die in diesem Zusammenhang ermittelten 3D-Oberflächen sowie entsprechende Rautiefen-Kennwerte. Mit dem Ziel, die Oberflächeneigenschaften lokal zu bewerten, werden nach der im Rahmen dieser Arbeit angewandten Methode die zweite, sechste und zehnte Gewindeflanke an Ober- sowie Unterseite analysiert.

Zunächst ist ein systematischer Unterschied in der Oberflächentopografie des Bohrungseintritts und -grunds festzustellen. Aus den Aufnahmen in Abbildung 6.12 ist abzuleiten, dass die der Stirnfläche zugewandten Gewindeflanken im Allgemeinen keine nennenswerten Mikrobeschädigungen aufweisen. Entsprechend wurden vergleichsweise geringe Rautiefen auf den Flankenoberflächen erzeugt. Die zum Bohrungsgrund orientierten Gewindeflanken weisen im Vergleich deutlich rauere Oberflächen auf, die durch Aufschmierungen sowie schuppige Querriefen gekennzeichnet sind. Bei detaillierter Betrachtung im Hinblick auf variierende Vorbohrdurchmesser

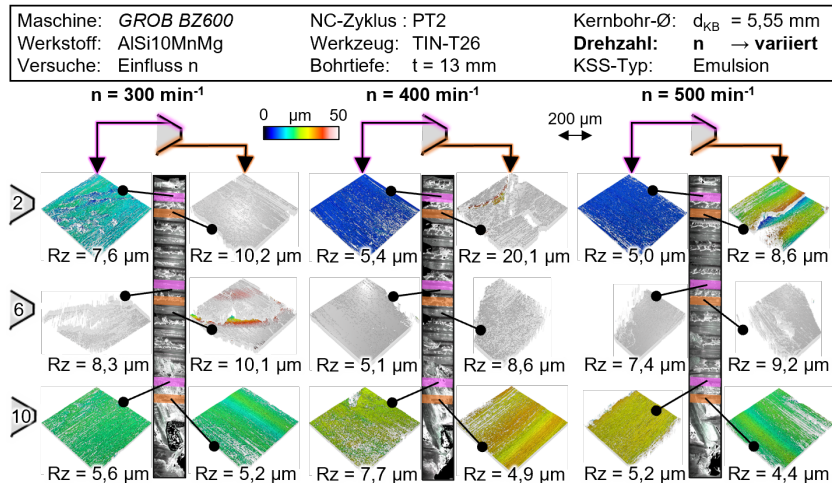
nimmt die Oberflächengüte mit steigendem  $d_{KB}$  ab. Aufgrund der hohen Flächenpressungen durch gesteigerte Axialmomente (siehe Kapitel 6.2) wird anhaftendes Gratmaterial etc. an der Oberfläche eingeebnet, wie mittels der lichtmikroskopischen Aufnahmen gezeigt wurde. Zudem kommt es bei starker Materialverdrängung zur Einebnung von Rauheitsspitzen, die zur Verringerung des Setzbetrages in der Schraubenverbindung führen [VDI15a]. Da in den experimentellen Untersuchungen ein Nachformen in axialer Richtung (siehe Abbildung 6.2) im NC-Zyklus programmiert wurde, ist an den oberen Gewindeflanken eine allgemein geringere Rauheit feststellbar.



**Abbildung 6.12:** Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf die Oberflächenqualität der oberen bzw. unteren Gewindeflanken

Im Folgenden werden die erzielten Oberflächengüten hinsichtlich des Einflusses der Umfangsgeschwindigkeit während des Gewindeformens analysiert. Nachdem u. a. hinsichtlich der mechanischen Werkzeugbelastungen lediglich geringe Zusammenhänge zwischen Werkzeugdrehzahl und Oberflächengüte festgestellt wurden, erweitern die Analysen die Bewertungsmethodik um die mikroskopische Betrachtung.

Wie zuvor erläutert, sind zunächst verschiedene lokale Unterschiede in Bezug auf die Oberflächenrauheit sowie die Topografie festzustellen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächengüte in axialer Richtung vom Bohrungseintritt zum Bohrungsgrund steigt. Im Bereich der zehnten Gewindeflanke wurden im Rahmen der betrachteten Messungen sehr gute Flankenoberflächen mit einer mittleren Rautiefe um  $Rz = 5 \mu\text{m}$  erzielt. Darüber wurden an der fünften Flanke neben der makroskopischen Schädigung durch den Räumkanal kleinere Ausbrüche in den angrenzenden Teilen der Gewindeflanke festgestellt. Die Oberflächenqualität am Bohrungseintritt schwankt drehzahlabhängig zwischen  $5 \dots 20 \mu\text{m}$ . In diesem Bereich wird Gratmaterial aus dem Bohrungsaustritt insbesondere im zweiten Gewindeformschritt in die Flankenoberfläche gequetscht, wodurch tiefe Riefen entstehen, wie auf den unteren Flanken bei Drehzahl  $n = 400$  bzw.  $500 \text{ min}^{-1}$  in **Abbildung 6.13** zu sehen ist. Ein signifikanter Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit, die sich während der beiden Umformschritte durch variierende Drehzahlen ergibt, ist mittels der konfokal-mikroskopischen Aufnahmen nicht zu ermitteln.



**Abbildung 6.13:** Einfluss der Werkzeugdrehzahl auf die Oberflächenqualität der oberen bzw. unteren Gewindeflanken

Im Anschluss an die Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der Oberflächengüte und dem Materialvolumen bzw. der Umfangsgeschwindigkeit beim Helikalgewindeformen folgt die Analyse zum Einfluss des Schmiermediums. Im Rahmen der zugrundeliegenden experimentellen Versuche wurden bei konstantem Vorbohrdurchmesser und konstanter Gewindedrehzahl verschiedene KSS-Konzepte und -medien eingesetzt. Neben der als Referenz betrachteten Schmierstoffemulsion wurde, wie **Abbildung 6.14** zeigt, die Minimalmengenschmierung mit einem synthetischen und einem fettalkoholbasierten Öl betrachtet.

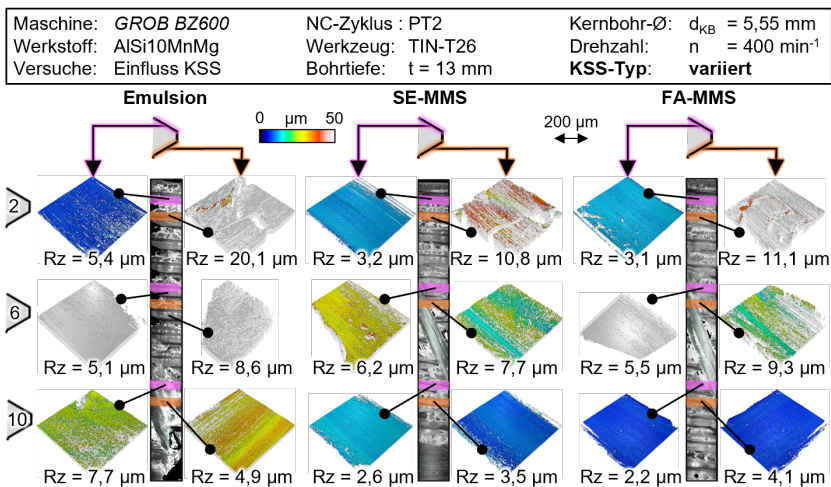


Abbildung 6.14: Einfluss des KSS-Konzepts auf die Oberflächenqualität der oberen bzw. unteren Gewindeflanken

Die MMS gilt gegenüber wassermischbaren Kühlschmierstoffen aufgrund der vergleichsweise hohen Schmierwirkung des Öls als sehr gut geeignet für das Gewindeformen [Wei99]. Nach den Ergebnissen in **Abbildung 6.14** zeigt sich insbesondere im unteren Bereich des Innengewindes eine Steigerung der Oberflächenqualität durch den MMS-Einsatz. Der Mittenrauwert konnte gegenüber der Referenz halbiert werden. Da das MMS-Aerosol an der Werkzeugspitze axial austritt, werden die dem Bohrungsgrund nahen Wirkflächen des Werkzeugs besonders gut mit Öl benetzt.

Die Oberflächentopografien der zehnten Gewindeflanken zeigen entsprechend sehr glatte Oberflächenstrukturen an Ober- und Unterseite der mit MMS gefertigten Gewinde. Auch die oberen Flankenoberflächen am Gewindeeingang weisen mit  $R_z = 3,2$  bzw.  $3,1 \mu\text{m}$  eine geringere Rautiefe als die der unter Emulsion gefertigten Proben auf. Entsprechend dieser Messwerten ist kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen MMS-Medien auf die Oberflächenqualität zu ermitteln. Die zum Bohrungsgrund gerichteten Gewindeflanken weisen, wie bereits in den vorherigen Abschnitten erläutert, eine schuppige Oberfläche auf. Vergleichbar zur Emulsions-Schmierung sind die unteren Gewindeflanken am Gewindeeingang durch Gratmaterial, Mikrorisse und -ausbrüche geschädigt.

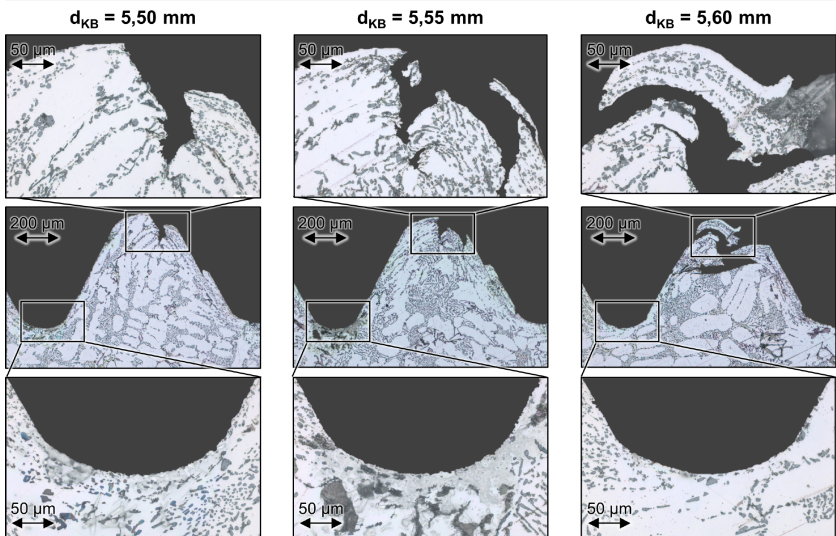
#### 6.3.4 Mikrostruktur

Die hochauflösenden Konfokalmikroskop-Aufnahmen dienen im vorherigen Unterkapitel zur Topografieanalyse der mittels Helikalgewindeformen hergestellten Flankenoberflächen. Im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung der Gewindequalität in Kapitel 6.3 wird, gemäß der entwickelten Methodik, der nächste Detaillierungsgrad durch die Mikrostrukturanalyse von Gewindequerschliffen erreicht. Um strukturelle Veränderungen der AlSi-Matrix im randzonennahen Bereich zu erfassen, wurden die Gewindeproben in Längsrichtung halbiert, eingebettet und metallografisch präpariert. Die in **Abbildung 6.15** gezeigten lichtmikroskopischen Aufnahmen tragen insbesondere dazu bei, den Einfluss der im Rahmen dieses Kapitels betrachten Prozessparameter auf die Gestalt der Krallen, der Randzonenmikrostruktur an den Gewindeflanken sowie im Grund des Innengewindes vergleichend zu bewerten.

Im Laufe dieses Kapitels zur Analyse der Gewindequalität beim Helikalgewindeformen konnte bereits festgestellt werden, dass die Profilhöhe und die Gestalt der Gewindespitze durch den Kernbohrdurchmesser beeinflusst wird. Mittels gezeigter Bilder der Profilquerschliffe in **Abbildung 6.15** kann diese Hypothese in Bezug auf die prozesstypische Krallenbildung bestätigt werden. Mit sinkendem Materialanteil bei der Umformung wird die geringer werdende Ausformung der Gewindespitzen festgestellt. Der Vergleich der Krallen-Gestalt bei variierenden Kernbohrdurchmessern zeigt,

dass die Gewindespitzen bei  $d_{KB} = 5,50$  mm fast vollständig durch die Umformung ausgebildet wurden. Bei steigenden Vorbohrdurchmessern ist zu erkennen, dass weniger Material in Richtung des Gewidekerns fließt. Bei  $d_{KB} = 5,60$  mm besteht das Innengewinde oberhalb des Flankendurchmessers lediglich aus nicht zusammenhängenden Materialanteilen. In diesem Fall entspricht das Gewinde nicht dem Normprofil und wurde als nicht lehrerhaltig geprüft.

Maschine: <i>GROB BZ600</i>	NC-Zyklus : PT2	KSS-Typ: Emulsion
Werkstoff: AISi10MnMg	Werkzeug: TIN-T26	<b>Kernbohr-Ø:</b> $d_{KB} \rightarrow$ variiert
Versuche: Einfluss $d_{KB}$	Bohrtiefe: $t = 13$ mm	Drehzahl: $n = 400$ min <sup>-1</sup>

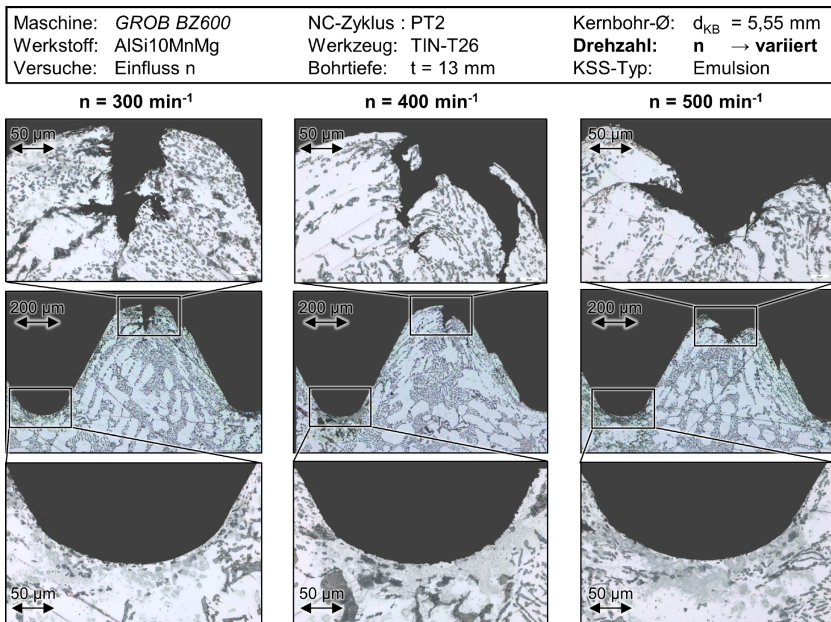


**Abbildung 6.15:** Einfluss des Kernbohrdurchmessers auf die Mikrostruktur der Gewindeflanken

In Bezug auf die Mikrostruktur zeigen die Querschliffe, dass sich die weiche  $\alpha$ -Matrix im Gewindegrund durch das Eindringen der Formzähne länglich verformt. Entsprechend ergibt sich in randzonennahen Bereichen im Gewindegrund und an den Flanken eine Kornfeinung, die im Allgemeinen zur vergleichsweise hohen Festigkeit von geformten Gewinden beiträgt. Lokal beträgt die Tiefe der Verfestigungen bis zu  $100 \mu\text{m}$ . Die im Rahmen der Oberflächenanalyse festgestellten Materialanhaftungen an den unteren

Flanken sind im Querschliff ebenfalls in Form vom länglichen Graten feststellbar. Diese treten beim Helikalgewindeformen typischer Weise unterhalb des Flankendurchmessers auf und stehen unter den betrachteten Bedingungen nicht mit dem Kernbohrdurchmesser in Verbindung.

Insbesondere bei hohen Umformgeschwindigkeiten bei  $n \geq 400 \text{ min}^{-1}$  tritt die Gratbildung an den unteren Gewindeflanken auf, wie **Abbildung 6.16** zeigt. Mit steigender Drehzahl beim Gewindeformen ist dieser Grat stärker ausgeprägt. Gleichzeitig nimmt die Profilhöhe der Gewinde ab, sodass die Gewindespitzen bspw. bei  $n = 500 \text{ min}^{-1}$  weit geöffnet sind.



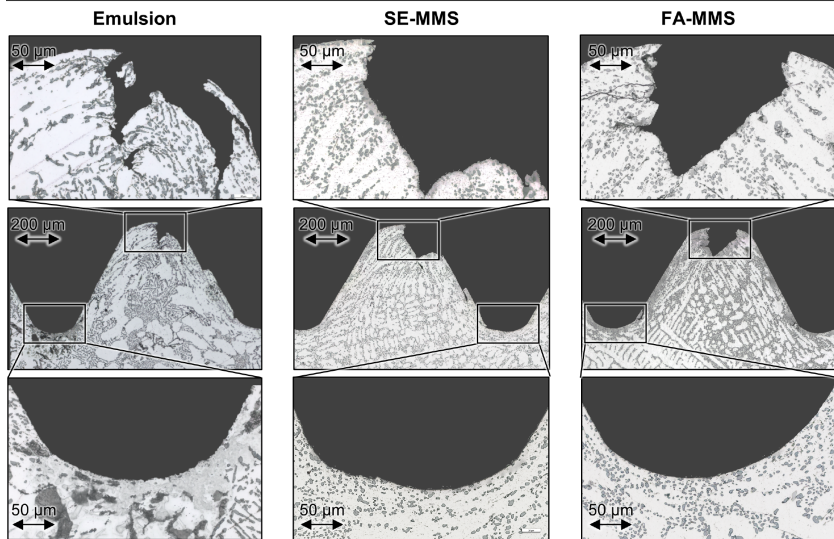
**Abbildung 6.16:** Einfluss der Werkzeugdrehzahl auf die Mikrostruktur der Gewindeflanken

Diese beiden Beobachtungen lassen darauf schließen, dass sich die Gewindequalität durch geringere Wirkgeschwindigkeiten steigern lässt. Während des technologiespezifischen Gewindeformprozesses wirken hohe Scherkräfte, die in Form von gesteigerten Axialmomenten gemessen wurden. Wirken gleichzeitig vergleichsweise hohe Relativgeschwindigkeiten, steigt

die Haftreibung, wodurch der Haftgleiteffekt verstärkt wird. Entsprechend den periodisch auftretenden Anhaftungen entlang der Flankenoberflächen (siehe Kapitel 6.3.1 und 6.3.3) ist unter den beschriebenen Bedingungen von einer Reibschwingung zwischen Formstollen und Gewindeflanken auszugehen.

Unter anderem wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen die Minimalmengenschmierung zur Verringerung der Reibung zwischen Werkzeug- und Werkstückoberflächen eingesetzt. Nachdem in den vorherigen Unterkapiteln bereits der Einfluss des KSS-Konzepts auf die mechanischen Werkzeugbelastungen, Oberflächenqualität usw. betrachtet wurde, soll im Folgenden die Wirkung der MMS auf die mikrostrukturellen Eigenschaften der Innengewinde eingegangen werden. Dazu zeigt **Abbildung 6.17** die Querschliffe der sechsten Gewindeflanken, die gegenüber der Referenz mit verschiedenen MMS-Ölen anstatt KSS-Emulsion gefertigt wurden.

Maschine: GROB BZ600	NC-Zyklus : PT2	Kernbohr-Ø: $d_{KB} = 5,55 \text{ mm}$
Werkstoff: AISi10MnMg	Werkzeug: TIN-T26	Drehzahl: $n = 400 \text{ min}^{-1}$
Versuche: Einfluss KSS	Bohrtiefe: $t = 13 \text{ mm}$	<b>KSS-Typ: variiert</b>



**Abbildung 6.17:** Einfluss des KSS-Konzepts auf die Mikrostruktur der Gewindeflanken

Neben den bereits zuvor erläuterten Beobachtungen zur lokalen Verfestigung des Aluminiumgussgefüges im Bereich von Gewindegrund und -flanken zeigt sich im Rahmen der MMS-Bearbeitung mit synthetischem Öl die bekannte Gratbildung an der unteren Flanke. Durch die sehr gute Schmierwirkung dieses MMS-Mediums sind die Anhaftungen deutlich geringer ausgeprägt als unter Emulsion. Der dadurch gehemmte Materialfluss entlang der Formstollen ist auch in der einseitig geöffneten Gewindespitze zu erkennen.






Das auf Fettalkohol basierende MMS-Öl, welches über eine relativ hohe kinematische Viskosität verfügt, trägt zur symmetrischen Ausformung des Gewindeprofils bei. Entsprechend der beim Gewindeformen bekannten Gestalt (siehe Abbildung 2.11) entstehen glatte Flankenoberflächen, verfestigte Gewindegründe sowie vollständig ausgeformte, leicht geöffnete Gewindespitzen.

## 7 Vergleich konventioneller Innengewinde-Fertigungsverfahren

Nachdem im vorangegangenen Kapitel grundlegende Aspekte zum innovativen Fertigungsverfahren Helikalgewindeformen erläutert wurden, sollen die erzielten Prozess- und Bauteileigenschaften mit denen konventionell etablierter Gewindefertigungsverfahren verglichen werden. Dazu werden am Beispiel eines M6-Gewindes unterschiedliche spanende und formende Bearbeitungsprozesse in AlSi10Mg experimentell untersucht. Anschließend erfolgt die Analyse der resultierenden Gewindequalität anhand der in Kapitel 6.3 angewandten Methodik.

Da sich die Gewindefertigungsverfahren teils grundlegend unterscheiden, werden anhand von **Tabelle 2** zunächst Werkzeuge und Prozessparameter gegenübergestellt. Neben den angewandten Schnittwerten werden auch die verwendeten Werkzeugmaschinen, Bearbeitungszyklen sowie Kühlschmierstoffe aufgeführt. Als identische Bearbeitungsaufgabe wurde die Herstellung eines M6-Gewindes mit einer Tiefe von  $t = 2 \times D$  in den Aluminiumgusswerkstoff AlSi10MnMg definiert.

**Tabelle 2:** Eigenschaften der betrachteten Gewindefertigungsverfahren

Verfahren	GEW-Bohren	GEW-Fräsen	helikal Bohr-GEW-Fräsen	GEW-Formen	helikal GEW-Formen
Maschine	GROB BZ600	DMG MORI HSC75		GROB BZ600	
NC-Zyklus	CYCLE84	Zyklus 262	Zyklus 265	CYCLE84	PT 2
Werkstoff	AlSi10MnMg				
Werkzeug	EMUGE 1D-GAL/E 	OSG AT-1 	OSG DLC-O-EM 	EMUGE GAL/E-SN 	EMUGE TIN-T26 
Schneiden z	3 Schneiden	4 Schneiden	2 Schneiden	7 Zahnreihen	2 Zahnreihen
Kernbohr-Ø $d_{KB}$	5,00 mm	5,00 mm	-	5,55 mm	5,55 mm
Schnittges. $v_c$	30 m/min	200 m/min	200 m/min	30 m/min	7,5 m/min
Drehzahl n	1.591 min <sup>-1</sup>	14.147 min <sup>-1</sup>	13.992 min <sup>-1</sup>	1.591 min <sup>-1</sup>	400 min <sup>-1</sup>
Vorschub f	1 mm	0,24 mm	0,12 mm	1 mm	1 mm
Vorschubges. $v_f$	1.591 mm/min	3.395 mm/min	1.698 mm/min	1.591 mm/min	400 mm/min
KSS-Typ	Emulsion 9 %	Emulsion 6 %		Emulsion 9 %	

Als spanendes Fertigungsverfahren wird das Profil beim Gewindefräsen durch Spanabtrag in der Bohrungswand erzeugt. Dabei sind in Aluminiumlegierungen vergleichsweise hohe Schnittgeschwindigkeiten zu erzielen. In

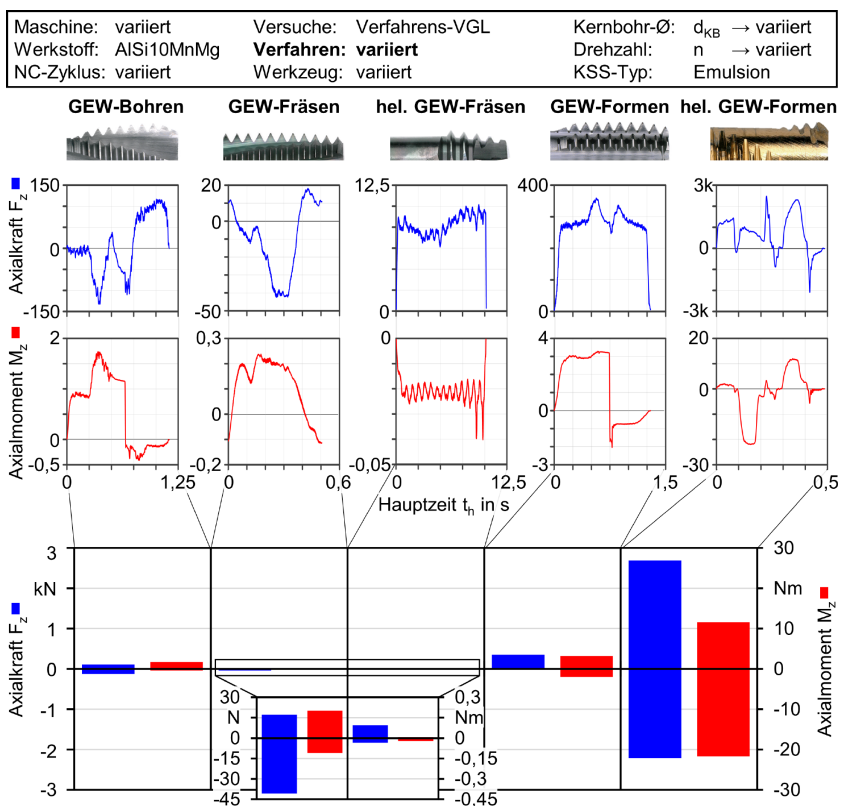
Verbindung mit den geringen Werkzeugdurchmessern für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten M6-Innengewinde resultieren relativ hohe Spindeldrehzahlen. Um die hohen Vorschubgeschwindigkeiten in Einsatzversuchen unter industrienahen Bedingungen umzusetzen, wurde das Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum *DMG HSC 75 linear* genutzt. Das vierschneidige HM-Fräswerkzeug zum konventionellen Gewindefräsen wird mit einer Nenndrehzahl von  $n = 14.147 \text{ min}^{-1}$  eingesetzt. Die KSS-Emulsion wurde durch Spritzdüsen in der Werkzeugaufnahme extern zugeführt. Beim helikalen Bohrgewindefräsen wird der vorgelagerte Vorbohrprozess durch die Stirnschneiden am Gewindewerkzeug substituiert. Bei vergleichbarer Drehzahl erreicht das Werkzeug mit  $z = 2$  Schneiden eine deutlich geringere Vorschubgeschwindigkeit von  $v_f = 1.698 \text{ mm/min}$ . Als drittes spanendes Verfahren wurde das Gewindebohren auf dem BAZ Typ *GROB BZ 600* untersucht. Die Bearbeitung mit interner KSS-Zuführung, *SINUMERIK*-Gewindebohrzyklus und Minimallängen-Ausgleichsfutter entspricht ebenfalls industriellen Randbedingungen. Das beschichtete HSS-Werkzeug erreicht bei einer Umfangsgeschwindigkeit von  $v_u = 30 \text{ m/min}$  eine maximale Drehzahl von  $n = 1.591 \text{ min}^{-1}$ . Unter denselben Bedingungen wurde das Gewindeformen durchgeführt. Zum Helikalgewindeformen wurde das in Kapitel 6 eingesetzte TiN-beschichtete Werkzeug bei Form-Drehzahl  $n = 400 \text{ min}^{-1}$  verwendet. Aufgrund des einstufigen Formprozesses wird trotz der geringsten Vorschubgeschwindigkeit eine hohe Produktivität erzielt.

### 7.1 Analyse der Bearbeitungsprozesse

Im Anschluss an die Gegenüberstellung der Werkzeug- und Prozesseigenschaften der verschiedenen Gewindef Verfahren folgt in diesem Unterkapitel die Analyse des Prozessverhaltens. Dabei werden zunächst die gemessenen mechanischen Werkzeugbelastungen der betrachteten Verfahren bewertet. Anschließend folgt der Vergleich der Spanformen, die beim Gewindefräsen und -bohren erzeugt wurden. Schließlich werden die ermittelten Haupt- und Nebenzeiten aller betrachteten Innengewindef Verfahren zur Herstellung von M6-Gewinden in Al-Gusswerkstoffen dargestellt und vergleichend analysiert.

### Mechanische Werkzeugbelastungen

Zur Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen werden Daten aus in-situ-Messung der Axialkraft  $F_z$  sowie des Axialmoments  $M_z$  betrachtet. Diese wurden mittels des werkstückseitig, in Bohrungsachse montierten Dynamometers des Typs *Kistler 9272* aufgezeichnet. **Abbildung 7.1** stellt zum einen die zeitlichen  $F_z$ - bzw.  $M_z$ -Verläufe für die verschiedenen Fertigungsverfahren dar. Zum anderen werden die positiven und negativen Spitzenwerte der Messungen gegenübergestellt, um bspw. die axialen Belastungen auf die Werkzeugspindel vergleichend zu bewerten.



**Abbildung 7.1:** Einfluss des Gewindefertigungsverfahrens auf die mechanischen Werkzeugbelastungen

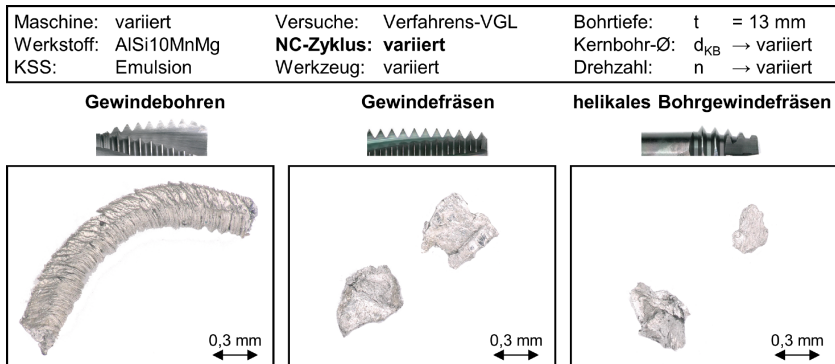
Im Allgemeinen wurden bei der Analyse der drei spanenden Fertigungsverfahren aufgrund der guten Zerspanbarkeit von Aluminiumgusslegierungen im Vergleich zum Gewindeformen geringere Werkzeugbelastungen ermittelt. Beim Gewindefräsen verteilen sich die Axialkräfte aufgrund des geringen Zahnvorschubs auf die vier Schneiden. Zusätzlich trägt der Linksdrall sowie die Ungleichteilung der Zahnreihen zu den geringen Axialbelastungen von  $F_z < -40$  N bei [OSG19]. Unmittelbar nach dem radialen Anschnitt ins Profil erreicht das Axialmoment beim Fräsen des Gewindes einen stationären Bereich, wodurch eine hohe Prozessstabilität erzielt wird. Beim helikalen Bohrgewindefräsen treten ebenfalls nahezu konstante Axialbelastungen ( $F_z = 8 \dots 10$  N;  $M_z = -0,02$  Nm) auf. Durch die geringere Vorschubgeschwindigkeit, den flachen Anschnitt sowie die großen Spannuten werden die Späne prozesssicher aus der Bohrung transportiert. Das axial und radial abgetragene Material wird durch den intern zugeführten KSS-Strom aus der Bohrung gespült und es treten keine messbaren Überhöhungen der Axialbelastungen durch Spanklemmer auf. Im Laufe des Gewindebohrprozesses wurde hingegen eine kurzzeitige Steigerung der mechanischen Werkzeugbelastungen gemessen. Diese Beobachtung lässt aufgrund des hohen Spannungsquerschnitts beim Gewindebohren sowie des duktilen Werkstoffs auf eine ungünstige Spanform schließen.

Der zeitliche Verlauf des Axialmoments, der während des Gewindeformens eines M6-Gewindes gemessen wurde, entspricht qualitativ den Literaturangaben zur prozesssicheren Bearbeitung (siehe Abbildung 2.12-b; [ORB19]). Im Vergleich zum Gewindebohren treten dabei jedoch um den Faktor 2 gesteigerte Axialkräfte und -momente auf. Aufgrund der schrittweisen Ausformung des Gewindeprofils beim Hereindreihen des Werkzeugs sind die mechanischen Belastungen im Vergleich zum Helikalgewindeformen jedoch als vergleichsweise gering zu bewerten. Wie bereits ausführlich in Kapitel 6.2 erläutert, treten bei dieser neuartigen Verfahrensvariante insbesondere durch den hohen Umformgrad sowie die entstehenden Grate hohe Axialkräfte auf. Diese betragen mit bis zu kurzzeitig gemessenen  $F_z = 2,7$  kN ca. das 9-fache der maximalen Axialkraft der konventionellen Verfahrensvariante. Durch die rasche, in einer halben Werkzeugumdrehung

durchgeführte Formung des Gewindeprofils aus dem Vollen ergibt sich entsprechend eine sehr hohe Umformarbeit. Das maximale Drehmoment erreicht dabei ca. das 6-fache im Vergleich zum Gewindeformen.

### Spanform

Im Zusammenhang mit spanenden Fertigungsverfahren stellt die Analyse der Spanform einen Teil der ganzheitlichen Bewertung der Zerspanbarkeit dar [Toe14]. In **Abbildung 7.2** werden daher für die betrachteten Verfahren Gewindebohren- und Fräsen entnommene Spanproben in Bezug auf Größe und Gestalt verglichen.



**Abbildung 7.2:** Spanformen der spanenden Gewinde-Fertigungsverfahren

Beim Gewindebohren wird das Nennprofil durch die Schneiden an der Werkzeugspitze aus der Bohrungswand getrennt. Bei diesem Formbohrprozess entspricht der Vorschub der Gewindesteigung, woraus ein vergleichsweise großer Spanungsquerschnitt resultiert. Der in **Abbildung 7.2** dargestellte Span weist eine entsprechend große Querschnittsfläche bei vergleichsweise geringer Krümmung auf. Daraus resultiert – im Gegensatz zu anderen Aluminiumwerkstoffen – eine vergleichsweise kurze Spanform. In den drei rechtsgedrehten Spannuten ( $\delta = 25^\circ$ ) laufen die Späne zunächst in Richtung des Bohrungseingangs ab und brechen durch den hohen Drallwinkel nach Kontakt mit dem Gewinderücken. Durch den KSS-Druck werden die kurzen Späne in der Regel gut ausgespült, jedoch kann es insbesondere bei großen Profilverwinkeln zum Verklemmen kommen, was die Überhöhung

des Axialmoments bedingt oder ggf. auch einen Werkzeugbruch zur Folge hat.

Beim Gewindefräsen kann der Zahnvorschub variiert werden, woraus unter den vorliegenden Bedingungen bei  $f_z = 0,06$  mm/z ein deutlich verringertes Spanungsquerschnitt und somit eine geringere Spandicke resultiert. Aufgrund des hohen Si-Gehalts und gesteigerter Werkstofffestigkeit des T6-behandelten AlSi10MnMg-Werkstoffes ergeben sich vergleichbar zur Bohrbearbeitung relativ günstige Spanformen. In Abbildung 7.2 dargestellte Spanproben weisen neben der geringen Größe auch eine gleichbleibende Form auf. Durch den geringen Querschnitt sind sie auch durch extern zugeführten KSS leicht aus der Bohrung zu transportieren und beeinträchtigen die Prozesssicherheit nicht.

Beim zirkularen Bohrgewindefräsen entstehen zum einen aufgrund des geringen Anschnittwinkels und zum anderen durch die zwei verschiedenen Schneidteile an Umfang und Spitze des Werkzeugs heterogene Spanformen. Die Größe der Späne ist mit der des konventionellen GewindefräSENS vergleichbar bzw. geringer, wodurch die Späne gut durch die interne KSS-Zufuhr aus der Bohrung gespült werden.

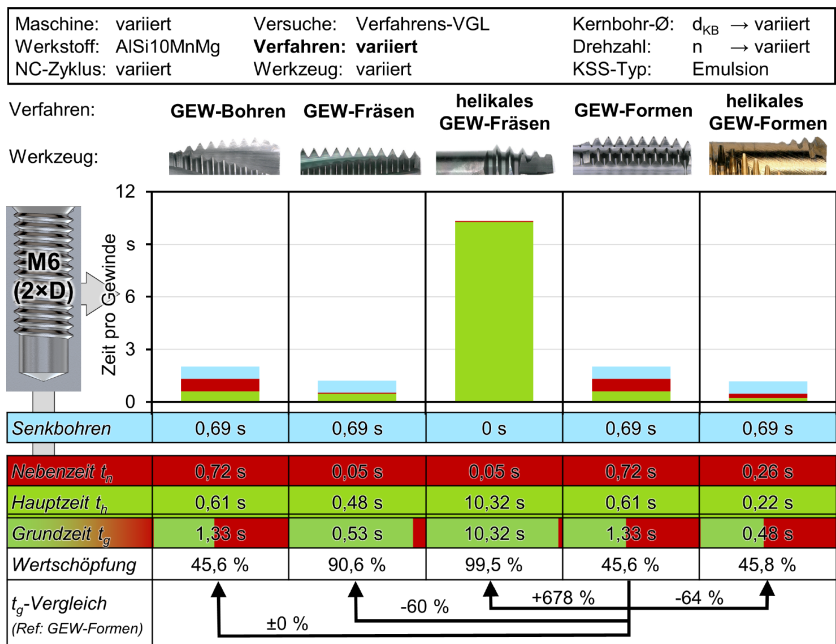
### **Bearbeitungszeit**

Neben der Betrachtung der mechanischen Werkzeugbelastungen und der Spanform wird im Folgenden auf die Unterschiede in der Bearbeitungszeit für die betrachteten Gewindefverfahren eingegangen. In **Abbildung 7.3** werden die ermittelten Haupt- und Nebenzeiten aufgeführt und grafisch dargestellt. In Ergänzung zu den Bearbeitungszeiten der im Rahmen dieses Kapitels betrachteten Fertigungsverfahren zur Herstellung eines M6-Gewindes mit einer Tiefe von  $t = 13$  mm wird die Hauptzeit zur Herstellung der größtenteils notwendigen Kernbohrungen mit  $t = 0,69$  s aufgeführt. Da das Gewinde beim helikalen Bohrgewindefräsen ins Volle bearbeitet wird, entfällt hier das Vorbohren. Gleichzeitig wurde für dieses Verfahren jedoch mit  $t_h = 10,32$  s die längste Hauptzeit ermittelt.

Die Gewindeherstellung durch konventionelles Gewindefräsen ist aufgrund der geringen Grundzeit von  $t_g = 0,53$  s als sehr produktiv zu bewerten. Eine

weitere spanende Fertigungstechnologie ist das Gewindebohren dem gegenüberzustellen. Aufgrund der hohen Nebenzeit und der begrenzten Synchrondrehzahl im Schnittvorgang wird mit diesem Verfahren die geringste Produktivität erreicht. Gleiches gilt für das Gewindeformen, was unter denselben Bedingungen durchgeführt wurde.

Durch den einstufigen Formprozess beim Helikalgewindeformen verringert sich die Hauptzeit gegenüber der konventionellen Verfahrensvariante ca. um das 3-fache. Die Nebenzeiten beim Helikalgewindeformen ergeben sich aus dem Ein- und Ausfahren sowie den Werkzeugbewegungen zum Entgraten bzw. zur Zwischenpositionierung. Entsprechend addieren sich die Zeitanteile zu einer Grundzeit von  $t_g = 0,48$  s pro Gewinde. Daraus resultiert im Vergleich eine Steigerung der der wertschöpfenden Prozesszeit um 177 % gegenüber dem konventionellen Gewindeformen.



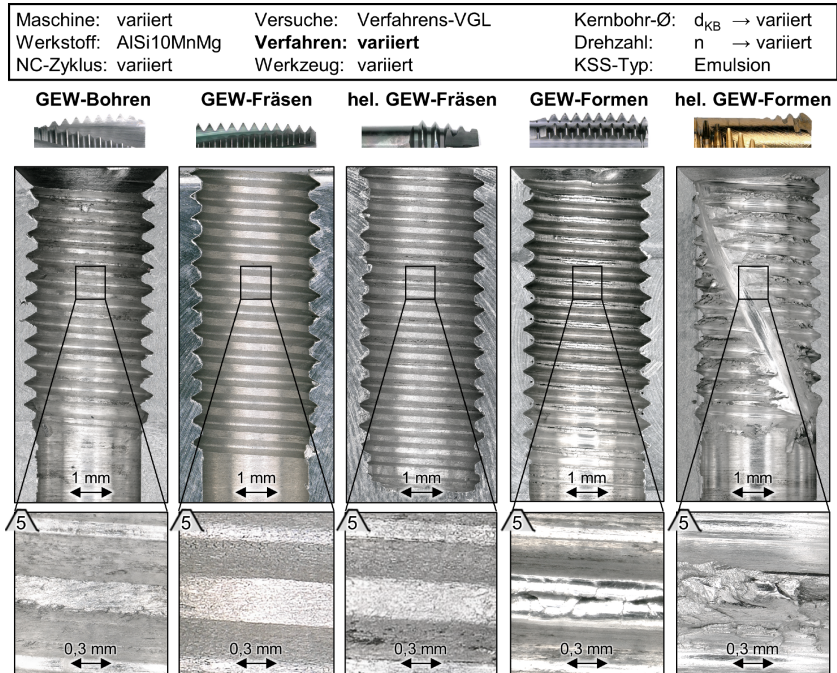
**Abbildung 7.3:** Vergleich der Haupt- und Nebenzeiten zur Fertigung eines M6-Gewindes

### 7.2 Analyse der Gewindequalität

Nachfolgend an die Betrachtung des Prozessverhaltens verschiedener Fertigungsverfahren soll die spezifisch erzielte Qualität der Innengewinde mittels der in Kapitel 6.3 angewandten Methodik vergleichend analysiert werden.

#### Gewinde-Gestalt

Aufgrund der unterschiedlichen Werkzeug- und Prozesseigenschaften der Verfahren zur Herstellung von M6-Innengewinden in Aluminiumguss ergeben sich triviale Unterschiede in der makroskopischen Gestalt. **Abbildung 7.4** zeigt dazu lichtmikroskopische Übersichts- und Detailaufnahmen der längs halbierten Proben zur Bewertung der spezifischen Details.



**Abbildung 7.4:** Einfluss des Gewindefertigungsverfahrens auf die Gewindegestalt

Allgemeines Kennzeichen der spanenden Verfahren ist die normgerechte Gestalt der Gewindespitzen. Im Gegensatz zu den geformten Innengewinden ist der Kern eben und weist keine Formkralle auf, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. An den Spitzen des gebohrten Gewindes sind vereinzelt kleinere Gratanhafungen angelagert, die auf anspruchsvolle Schnittbedingungen hindeuten. Aufgrund des Anschnitts an der Spitze des Gewindebohrers sowie -formers resultieren unvollständige Gewindegänge am Bohrungsgrund. Zum Erzielen der gewünschten Gewindetiefe ist bspw. eine Erhöhung der programmierten Bohrtiefe notwendig, woraus eine minimale Steigerung der Prozesszeit resultieren würde. Gleiches ergibt sich aufgrund des flachen Anschnitts (4-5-Gänge) des Bohrgewindefräsers. Da sich das Gewindefräswerkzeug über die gesamte Schnitttiefe im Eingriff befindet, ist das gefertigte Gewinde über die gesamte Bohrtiefe nutzbar. Im Helikalgewindeformprozess stößt das Werkzeug bis auf die maximale Bearbeitungstiefe und formt dort in einem Schritt das Gewindeprofil, wodurch ein Gewinde ohne einen Auslaufbereich entsteht. Gemäß den in Kapitel 6.3.1 durchgeführten Analysen weisen diese Innengewinde im Vergleich zum konventionell geformten einen Räumkanal auf und Gratmaterial haftet an den Spitzen bzw. Übergangsbereichen.

### Profil

Signifikante Unterschiede in Bezug auf die Spitzengestalt wurden im vorangegangenen Abschnitt bei den formend hergestellten Gewinden bestimmt. Entsprechend sind Maßabweichungen beim Kerndurchmesser im Zuge der Vermessung der Innengewinde plausibel. Darüber hinaus werden nachfolgend – auch zur detaillierten Analyse der spezifischen Eigenschaften aller weiteren betrachteten Verfahren – mittels **Abbildung 7.5** die Gewindeprofile sowie die daraus abgeleiteten Maße vergleichend bewertet.

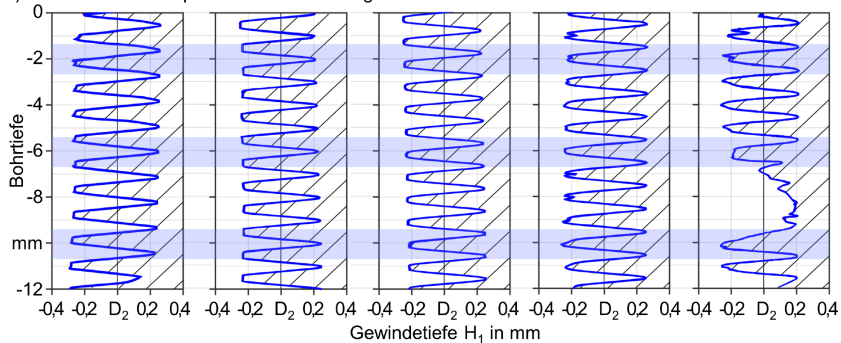
Das digitalisierte Profil der durch Gewindebohren hergestellten Probe sind an den Gewindespitzen kleinere Konturfehler erkennbar. Diese sind aufgrund der zuvor bildlich festgestellten Gratbildung zu deuten. Entsprechend ist in Anbetracht der geforderten Qualitätseigenschaften der Aluminiumgusskomponenten eine Grat-Prüfung durchzuführen, um ggf. unerwünschte Partikel in der Qualitätskontrolle zu detektieren. Entsprechend

dem überhöhten Axialmoment, den kurzen Spänen und der intensiven Gratbildung ergeben sich signifikante Maßabweichungen im Gewindegewand und -grund. Insbesondere der Außendurchmesser am Gewindeeintritt ist mit  $D = 6,24$  mm vergleichsweise groß. Die Profilgestalt des gefrästen Gewindes weist makroskopisch keine ausgeprägten Abweichungen auf. Parallel zur in Richtung der Werkzeugspitze ansteigenden Durchbiegung bei Schnitttiefe  $a_p = t = 13$  mm nimmt die Gewindetiefe ab. In allen drei Messwerten erfüllt das Innengewinde die Toleranzklasse 5H. Ebenso entsprechen die Kerndurchmesser beim helikalen Bohrgewindefräsen der höchsten Toleranzklasse nach DIN 13-20, wie Tabelle 1 zeigt.

Maschine: variiert	Versuche: Verfahrens-VGL	Kernbohr-Ø: $d_{KB} \rightarrow$ variiert
Werkstoff: AISi10MnMg	<b>Verfahren: variiert</b>	Drehzahl: $n \rightarrow$ variiert
NC-Zyklus: variiert	Werkzeug: variiert	KSS-Typ: Emulsion



a) Skalierte 2D-Profilquerschnitte der Innengewinde



b) Errechnete Maße der Innengewinde nach DIN 13-1

	$D_1$	$H_1$	$D$	$D_1$	$H_1$	$D$	$D_1$	$H_1$	$D$	$D_1$	$H_1$	$D$	$D_1$	$H_1$	$D$
$\sqrt{2}$	5,06	0,59	6,24	5,07	0,52	6,11	5,03	0,51	6,05	5,11	0,53	6,17	5,14	0,44	6,02
$\sqrt{6}$	5,01	0,58	6,17	5,09	0,50	6,09	5,07	0,51	6,09	5,09	0,53	6,15	-	-	-
$\sqrt{10}$	4,88	0,58	6,04	5,05	0,49	6,03	5,01	0,51	6,03	5,07	0,53	6,13	5,21	0,45	6,11

**Abbildung 7.5:** Einfluss des Gewindefertigungsverfahrens auf a) Profil und b) Maße der Gewinde

Für geformte Innengewinde gilt bei Kern- und Flankendurchmesser ebenfalls Toleranzfeldlage H, jedoch ist der Kern nach DIN 13-50 aufgrund der

prozessspezifischen Krallenbildung mit Toleranzgrad 7 definiert. Die erzielten Gewindetiefen unterscheiden sich  $H_1 = 0,53$  mm nicht signifikant von denen der spanend gefertigten Innengewinde. Im abgebildeten Profil sind die charakteristischen, offenen Gewindespitzen klar zu erkennen. Gemäß dem ermittelten Kerndurchmesser  $D_1 = 5,07...5,11$  mm ist das Gewindeprofil – bspw. aufgrund eines zu gering gewählten Kernbohrdurchmessers – nicht überformt und entspricht der Toleranzklasse 6H. Aufgrund des helikalen Stoßkanals ist das Profil des mittels des Helikalgewindeform-Verfahrens erzeugten Gewindes in axialer Richtung in drei bis vier Gängen unvollständig. Im Vergleich zum konventionell geformten Gewinde wird bei identischem Vorbohrdurchmesser eine geringere Gewindetiefe erzielt. Die gemessenen Kerndurchmesser erfüllen mit  $D_1(\text{Flanke } 2) = 5,14$  mm bzw.  $D_1(\text{Flanke } 10) = 5,21$  mm die Anforderungen der DIN 13-50 nach Klasse 7H.

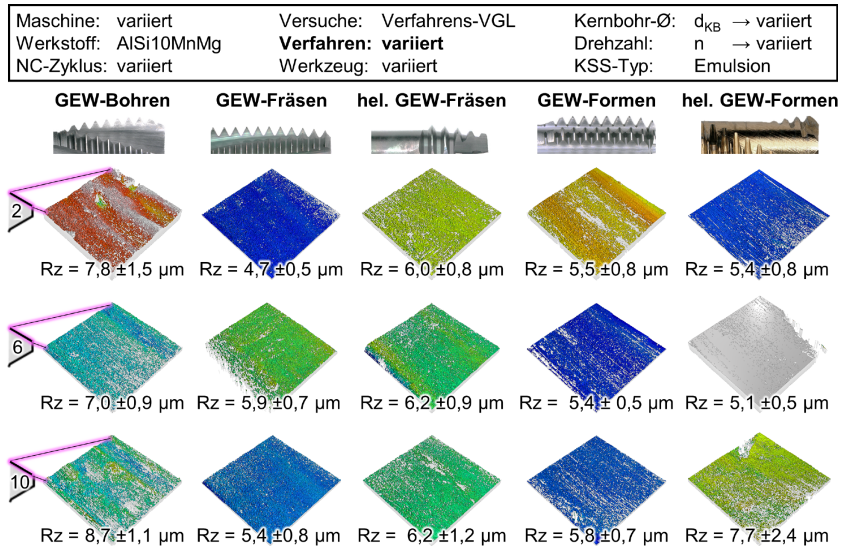
### Flankenoberfläche

Mit steigendem Detaillierungsgrad der Betrachtungsebene gelangen mikroskopische Eigenschaften im Laufe dieses Kapitels weiter in den Fokus der Analysen. Im Folgenden werden Konfokalmikroskop-Aufnahmen der oberen Gewindeflanken zur Bewertung der mikroskopischen Oberflächenqualität verwendet. **Abbildung 7.6** zeigt die aufbereiteten Profilausschnitte ( $400 \times 400 \mu\text{m}$ ) der zum Bohrungseingang gerichteten (kurz: oberen-) Gewindeflanken. Zur Betrachtung lokaler Einflüsse sind die Ergebnisse für die zweite, sechste und zehnte Flanke inkl. der entsprechenden gemittelten Rautiefen dargestellt.

Die Oberflächenqualität des gebohrten Innengewindes ist im Vergleich zu den gefrästen sowie geformten Flankenoberflächen als gering zu bewerten. Die Oberflächen zeigen vermehrt mikroskopische Beschädigungen. Weiterhin deuten ungünstige Spanform sowie die gesteigerten Abweichung der Bohrmomente auf eine Mikroschädigung der Flanken hin. Im Gegensatz dazu tragen beim Gewindefräsen eine gleichmäßige, geringe Axialkraft sowie der gute Spanabtransport zu sehr hohen Oberflächenqualitäten bei. Diese sind qualitativ mit den durch Gewindeformen erzeugten Güten vergleichbar. Nach der detaillierten Betrachtung der Oberflächentopografie ist festzuhalten, dass im unterbrochenen Schnitt keine erkennbaren Querriefen auf der Oberfläche entstehen. Bedingt durch harte Silizium-Partikel sowie

hohen Druck beim Gewindeformen wird an den Wirkflächen Abrasivverschleiß hervorgerufen, der entsprechende Beschädigungen auf der Flankenoberfläche verursacht [BAP\*20; BPA\*21]. Auf Mikroebene zeigen die konventionell und mittels Helikalgewindeformens gefertigten Flanken nur geringfügige Unterschiede in Bezug auf die Oberflächentopografie. Aufgrund der gesteigerten Axialmomente beim Helikalgewindeformen werden Rauheitsspitzen zwar lokal eingeformt, jedoch kommt es an den Gewindespitzen zu intensiver Gratbildung (siehe Kapitel 6.3.3) wodurch die Gewindequalität allgemein sinkt.

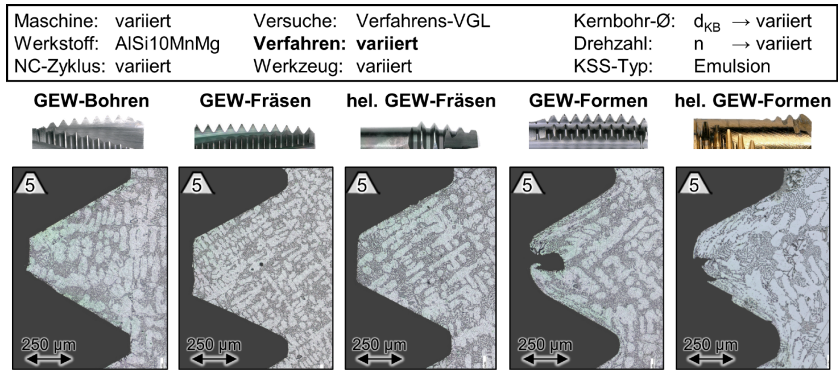
Zusammenfassend sind unter den betrachteten Bedingungen sehr hohe Oberflächengüten mittels der eingesetzten Fertigungstechnologien erzielt worden. Nach VDI-Richtlinie 2230 erhöht sich bei Schraubenverbindungen der Setzbetrag der Fügeverbindung ab einer mittleren Rautiefe von  $R_z > 10 \mu\text{m}$ . Entsprechend ist ein positiver Einfluss der erzielten Fertigungsqualität auf die Einsatzeigenschaften von Aluminiumgusskomponenten zu erwarten.



**Abbildung 7.6:** Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die Oberflächenqualität der oberen Gewindeflanken

### Mikrostruktur

Abschließend erfolgt die Analyse der Randzoneneigenschaften mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen von Querschliffproben. Mit dem Ziel, mikroskopische Veränderungen der Gefügematrix zu analysieren, sind in **Abbildung 7.7** die Aufnahmen der fünften Gewindeflanken für die verschiedenen gefertigten Proben dargestellt.



**Abbildung 7.7:** Einfluss des Gewindefertigungsverfahrens auf die Mikrostruktur

Durch die Erzeugung des Gewindepfils durch Materialabtrag sind bei den drei spanend hergestellten Gewinden keine Verformungen der Kornstruktur erkennbar. Sowohl an den Gewindespitzen als auch an den -flanken sowie im Gewindegrund ist die Struktur aus Eutektikum und  $\alpha$ -Matrix durch den Schnittprozess nicht beeinflusst worden. Gemeinsames Merkmal der gebohrten bzw. gefrästen Gewinde sind ebene Gewindespitzen und sehr geringe Radien im Gewindegrund bzw. stumpfe Übergänge zur Flanke. Besonderes Merkmal des durch Gewindebohren hergestellten Innengewindes ist, wie bereits in den vorherigen Abschnitten festgestellt, ein Grat an der Gewindespitze. Mittels der Detailbetrachtung im Querschliff ist zu erkennen, dass sich dieser am Übergang zur unteren Flanke aufwirft und durch die Rückzugbewegung zum Bohrungseingang verformt wird. Die Spitze des mittels konventionellen Gewindeformens gefertigten Gewindezahns zeigt im Querschliff anschaulich die aus der Literatur bekannte offene Krallenform, die durch den radialen Materialfluss zum Werkzeugkern entsteht. Im

Randzonenbereich der Flanken sowie des Grunds sind Verfestigungsmerkmale wie z. B. die verformte Struktur des Si-Eutektikums erkennbar. Gleiches ist beim helikal geformten Gewinden zu beobachten. Die Spitzen und Flanken des Gewindes unterscheiden sich durch vermehrte Gratanhaftungen.

## 8 Einsatzversuche zur Innengewindefertigung von E-Motorgehäusen

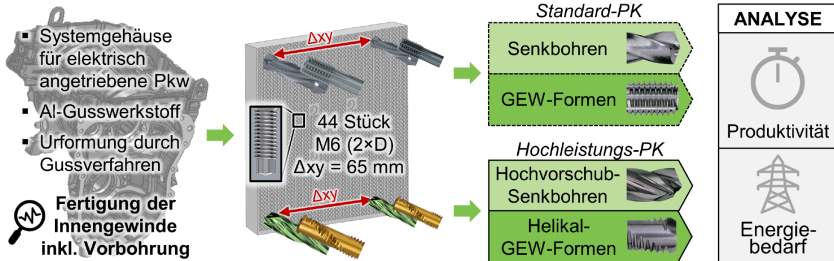
Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Grundlagen zum Hochvorschubbohren und Helikalgewindeformen detailliert betrachtet wurden, soll im folgenden Abschnitt die Leistungsfähigkeit dieser Technologien anhand eines Fertigungsbeispiels aus der Automobilherstellung bewertet werden. Mit dem Ziel, die Fertigungszeit und den Energiebedarf der Hochleistungsprozesskette mit einer konventionellen Herstellungsrouten für Innengewinde zu vergleichen, wird die Gewindefertigung eines Elektromotorgehäuses unter industrienahen Bedingungen abgebildet. Im Folgenden wird die Versuchsstrategie zunächst im Detail erläutert, bevor im Anschluss die technologischen Eigenschaften der beiden Prozessketten vorgestellt werden. Schließlich erfolgt die vergleichende Analyse der Einsatzversuche mit besonderem Fokus auf Energieumsatz und Produktivität.

### 8.1 Auslegung der Bearbeitungsaufgabe

Die Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials in Bezug auf eine Hochleistungsprozesskette zur Innengewindefertigung soll mittels eines Bearbeitungsbeispiels aus der Kfz-Serienfertigung quantifiziert werden. Dabei wird eine Elektrofahrzeug-Komponente als Beispiel herangezogen, um aktuelle Herausforderungen der Mobilitätswende zu adressieren. Konkret leitet sich die Bearbeitungsaufgabe der Einsatzversuche aus einem Systemgehäuse eines Elektrofahrzeugs ab, das neben dem Elektromotor auch die Elektronikkomponenten sowie die Getriebestufe innerhalb einer dünnwandigen Leichtbaukonstruktion vereint. In das Halbzeug des gegossenen AlSi-Gehäuses werden im Serienfertigungsprozess des deutschen Automobilzulieferers insgesamt 44 Stück M6-Innengewinde eingebracht. Auf Basis des vorliegenden CAD-Modells wurde ein mittlerer Abstand von  $\Delta_{xy} = 65 \text{ mm}$  ermittelt, woraus sich das Bohrmuster für die Einsatzversuche im ISF-Versuchsfeld ableiten lässt. Entsprechend wird ein NC-Programm erstellt, in dem das BAZ einen Werkzeugweg entsprechend der Anzahl und dem mittleren Abstand  $\Delta_{xy}$  des Systemgehäuses abfährt. Dazu werden vorbearbeitete AlSi10Mg-T6 Werkstücke ( $l \times b \times h = 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ ) verwendet, die wie in **Abbildung 8.1** gezeigt zeilenförmig bearbeitet werden.

Mit dem Ziel die Leistungsfähigkeit der innovativen Hochleistungs-Prozesskette zu bewerten, dient das Gewindeformen unter KSS-Emulsion als Referenztechnologie. Die erforderliche Vorbohrung inkl. einer 90°-Senkfase wird gemäß dem Stand der Technik mittels eines konventionellen Stufenbohrwerkzeug erzeugt.

**Fertigungsbeispiel** → **Bearbeitungsaufgabe** → **Einsatzversuche** → **Vergleich**



**Abbildung 8.1:** Definition, fertigungstechnische Auslegung und Analyse des Bearbeitungsbeispiels





Im Rahmen der hochproduktiven Fertigungsstrategie wird ein dreischneidiges Stufenbohrwerkzeug verwendet und auf Basis der in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse zur Bearbeitungstechnologie unter MMS eingesetzt. Die Innengewinde werden im Anschluss ebenfalls unter Minimalmengenschmierung durch Helikalgewindeformen erzeugt. Nachdem insbesondere die Prozess- und Gewindequalität der beiden Technologien zur Innengewindefertigung bereits im Rahmen des Kapitels 7 gegenübergestellt wurde, wird der Fokus der Analysen auf den Vergleich der erforderlichen Bearbeitungszeit sowie der währenddessen durch das Bearbeitungszentrum aufgenommenen elektrischen Energie gelegt. Die abschließende Bewertung ermöglicht, Potenziale zur Verringerung der Taktzeit sowie des Ressourceneinsatzes für den betrachteten Bearbeitungsschritt in der Massenfertigung von E-Motorgehäusen zu quantifizieren.

Um die technologischen Randbedingungen der beiden Prozessketten gemäß dem Stand der Technik bzw. den Erkenntnissen der Kapitel 5 und 6 auszulegen, werden Werkzeuge, Schnittwerte und NC-Programmierung ausgewählt. Im Rahmen der Standard-Prozesskette wird ein Senkbohrer

$d = 5,6$  mm eingesetzt, um die für das Gewindeformen erforderliche Grundbohrung inkl. einer  $D6,6 \times 90^\circ$ -Senkung am Bohrungseingang herzustellen. Die gestufte Variante des in Kapitel 6 genutzten Werkzeugs wird nach Herstellerangaben mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 170$  m/min und einem Vorschub von  $f = 0,2$  mm eingesetzt. Im Bearbeitungsprogramm wird der Bohrzyklus Typ *CYCLE81* mit einer Bohrtiefe von  $t = 17$  mm, einem Sicherheitsabstand von  $s = 5$  mm sowie einem KSS-Druck von  $p = 60$  bar aufgerufen. Anschließend erfolgt die Gewindebearbeitung mit Minimallängen-Ausgleichsfutter über den NC-Befehl *CYCLE84*. Der gespannte Gewindeformer wird durch die axiale Zuführungsbohrung mit KSS-Emulsion ( $p = 20$  bar) versorgt. Aus der herstellerseitig für AlSi-Legierungen empfohlenen Umfangsgeschwindigkeit  $v_u = 30$  m/min ergibt sich für das M6-Werkzeug eine Solldrehzahl von  $n = 1.591 \text{ min}^{-1}$ , wie in **Abbildung 8.2** aufgeführt. Die drehzahlsynchrone Vorschubbewegung beginnt ebenfalls  $s = 5$  mm vor der Bohrung und stoppt bei einer Bohrtiefe von  $t = 13$  mm, woraus sich die geforderte Gewindetiefe von  $2 \times D$  ergibt.

Maschine:	GROB BZ600	Werkzeug:	variiert	Kernbohr-Ø:	$d_{KB} \rightarrow$ variiert
Werkstoff:	AlSi10Mg	Gewinde:	M6×1	Drehzahl:	$n \rightarrow$ variiert
Versuche:	Einsatzversuche	Bohrtiefe:	$t = 17/13$ mm	KSS-Typ:	variiert

	Standard-Prozesskette		Hochleistungs-Prozesskette	
	Senkbohren	GEW-Formen	Hochvorschub-Senkbohren	Helikal-GEW-Formen
Werkzeug:	EMUGE EF-STEEL-TiAIN	EMUGE InnoForm1 GAL/E-SN-IKZ-TiCN	MAPAL Tritan Drill Alu Step (ta-C)	EMUGE PunchTap IKZ-TiAIN-T10
				
Schneiden:	$z = 2$	$z = 7$ (Reihen)	$z = 3$	$z = 2$ (Reihen)
Durchmesser:	$d = 5,6$ mm	$d = 6$ mm	$d = 5,55$ mm	$d = 6$ mm
Drehzahl:	$n = 9.750 \text{ min}^{-1}$	$n = 1.591 \text{ min}^{-1}$	$n = 7.455 \text{ min}^{-1}$	$n = 400 \text{ min}^{-1}$
Vorschub:	$f = 0,2$ mm	$f = 1$ mm	$f = 1$ mm	$f = 1$ mm
Zyklus:	CYCLE81	CYCLE84	CYCLE81	PT2.0
Bohrtiefe:	$t = 17$ mm	$t = 13$ mm	$t = 17$ mm	$t = 13$ mm
KSS:	Emulsion 9 %	Emulsion 9 %	FA-MMS	FA-MMS
KSS-Druck:	$p = 60$ bar	$p = 20$ bar	$p = 12$ bar	$p = 4$ bar

**Abbildung 8.2:** Übersicht zur Werkzeug- und Prozesstechnologie der Einsatzversuche

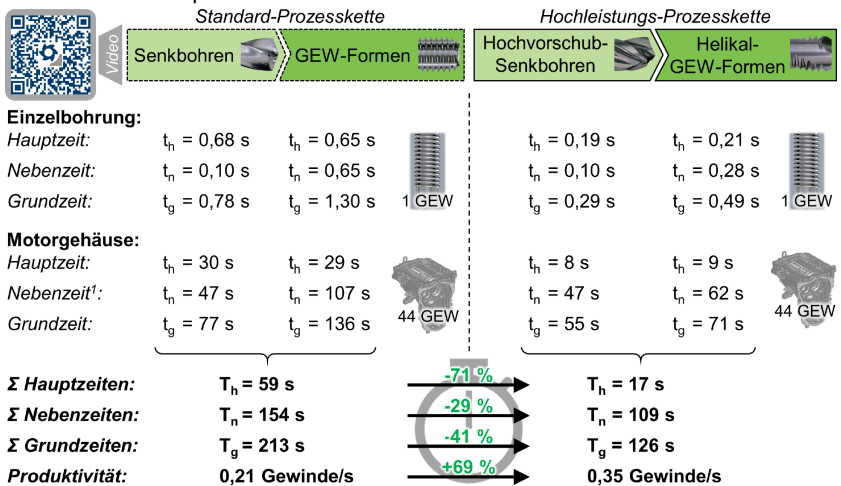
Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Hochleistungs-Prozesskette beinhaltet als ersten Bearbeitungsschritt ebenfalls einen Bohrprozess zur Herstellung einer 90°-Senkbohrung. Vergleichbar zur zuvor erläuterten Prozessroute wird der NC-Zyklus *CYCLE81* der *SINUMERIK 840D*-Steuerung mit identischem Sicherheitsabstand  $s$  und Bohrtiefe  $t$  programmiert. Um eine gesteigerte Vorschubgeschwindigkeit zu erzielen sowie die energieintensive Hochdruck-KSS-Zufuhr zu substituieren wird eine Stufenbohrer-Variante des dreischneidigen Hochvorschubbohrers Typ *Mapal Tritan Alu Drill* verwendet. Der zylindrische Werkzeugteil besitzt einen Nenndurchmesser von  $d = 5,55$  mm und eine Länge von  $l = 16,5$  mm, an die eine 90°-Stufe am Schaftübergang eingearbeitet wurde. Gemäß den in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnissen wird der Bohrer zur prozesssicheren MMS-Bearbeitung des AlSi-Werkstoffs mit einer ta-C-Dünnschicht versehen. Das Aerosol aus Fettalkohol-Öl und Druckluft strömt mit einem Systemdruck von  $p = 12$  bar vom Dosiergerät über den Spindeldurchlass in die MMS-Sonderwerkzeugaufnahme. Durch die drei Kühlkanäle des Werkzeugs wird es schließlich schneidnah an die Wirkstelle geleitet. Wie aus den Grundlagenuntersuchungen hervorging, wird bei  $v_c = 130$  m/min und Vorschub  $f = 1$  mm die erforderliche Prozesssicherheit bei maximaler Produktivität erzielt. Hinsichtlich der Gewindebearbeitung werden diese Voraussetzungen mittels Helikalgewindeformen erzielt. Dazu kommt im zweiten Prozessschritt das Sonderwerkzeug Typ *EMUGE PunchTap IKZ-TiAlN-T10* (technische Details, siehe Kapitel 4.3) im Bearbeitungszyklus PT2.0 mit Gewindedrehzahl  $n = 400$  min<sup>-1</sup> zum Einsatz. Der Anfahrweg  $s$  und die Bearbeitungstiefe  $t$  werden identisch zur Standard-Prozesskette programmiert. Zur bedarfsgerechten MMS-Versorgung wird das Öl-Luft-Gemisch der Wirkstelle intern mit  $p = 4$  bar zugeführt.

## 8.2 Analyse der Fertigungszeiten

Im Anschluss an die Durchführung der Einsatzversuche zur beispielhaften Innengewindefertigung für ein Elektromotorgehäuse, erfolgte die Auswertung der ermittelten Fertigungszeiten sowie der gemessenen Wirkleistungsdaten der Werkzeugmaschine. Neben den verschiedenen Technologiekonzepten zur Bohr- und Gewindebearbeitung unterscheiden sich die betrachteten Prozessketten insbesondere in Bezug auf die eingesetzten Kühlschmierstoff-Konzepte.

Anhand der herkömmlichen, industriell eingesetzten Prozessroute, bestehend aus dem Senkbohren und Gewindeformen unter Emulsion, sollten Referenzwerte u. a. in Bezug auf die Fertigungszeiten ermittelt werden. Hinsichtlich der Herstellung einer gesenkten Bohrung mittels des in Kapitel 8.1 erläuterten Technologiekonzepts wurde eine Grundzeit von  $t_g = 0,78$  s ermittelt. Bezogen auf das Anwendungsbeispiel mit insgesamt 44 Bohrungen, welche mit einem mittleren Abstand von  $\Delta xy = 65$  mm gefertigt wurden, ergibt sich eine gemessene Gesamtfertigungszeit von  $t_g = 77$  s. Die errechnete Grundzeit ergibt sich aus der wertschöpfenden Hauptzeit von  $t_h = 30$  s sowie der unproduktiven Nebenzeit von  $t_n = 47$  s, welche sich aus den Positionierbewegungen und dem initialen Werkzeugwechsel ergibt.

Beim konventionellen Gewindeformen setzt sich die Grundzeit zur Herstellung einer einzelnen Gewindebohrung aus gleichen Teilen aus Haupt- und Nebenzeit ( $t_h = t_n = 0,65$  s) zusammen, da das Werkzeug mit identischer Drehzahl in die Bohrung ein- und ausfährt. Die im Rahmen der Einsatzversuche für das Bearbeitungsbeispiel eines Elektromotors ermittelten Nebenzeiten (siehe **Abbildung 8.3**) vervierfachen sich hingegen gegenüber der bestimmten Hauptzeit  $t_h$ .



<sup>1</sup>Prozesse inkl. WZW (Span-zu-Span-Zeit  $t = 11$  s)

**Abbildung 8.3:** Gegenüberstellung der Fertigungszeiten für die betrachteten Prozessketten am Beispiel eines Elektromotorgehäuses

Durch die Auswertung der Videoaufnahmen aus dem Arbeitsraum des BAZ werden dabei hohe Nebenzeitanteile durch Spindelvorpositionierung und axiale Anfahrbewegung im Gewindezyklus als produktivitätsmindernd identifiziert. Entsprechend wurde eine Gesamtgrundzeit von  $t_g = 136$  s für das Gewindeformen der 44 Stück M6-Gewinde gemessen. Zusammen mit dem zuvor erläuterten Anteil der Fertigungszeit zum Bohren ergibt sich für die Standard-Prozesskette eine Gesamtfertigungszeit von  $T_g = 213$  s. Aus wirtschaftlicher Sicht werden entsprechend 0,21 Gewinde pro Sekunde gefertigt.

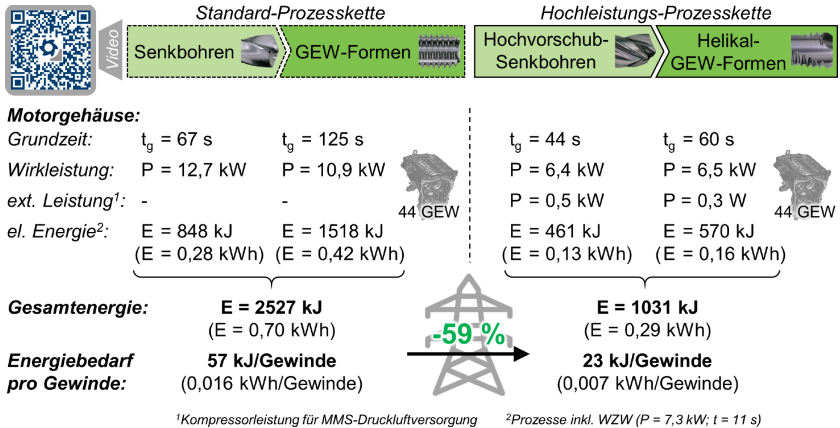
Mittels der erweiterten Prozessstrategie, die aus den im Rahmen dieser Arbeit umfänglich betrachteten Technologien Hochvorschubbohren und Helikalgewindeformen abgeleitet ist, wurde eine signifikant gesteigerte Produktivität erzielt. Zum einen trägt der vierfache Nennvorschub beim Senkbohren zu einer Verringerung der Prozessgrundzeit um ca. ein Drittel auf  $t_g = 55$  s bei. In Bezug auf eine einzelne Bohrung ergibt sich durch den Einsatz des dreischneidigen Werkzeugs bei maximierter Vorschubgeschwindigkeit eine Zeitersparnis von allein 60%, wie der Vergleich der in Abbildung 8.3 aufgeführten Grundzeiten zum Bohren verdeutlicht. Zum anderen werden durch den Einsatz der Technologie des helikalen Gewindeformens sowohl eine Verringerung der benötigten Haupt- als auch der Nebenzeit erzielt. So wird am Beispiel der in Kapitel 8.1 definierten Fertigungsaufgabe deutlich, dass durch den Einsatz der Hochleistungstechnologie die Grundzeit zur Innengewindebearbeitung auf  $t_g = 71$  s sinkt. Im direkten Vergleich zum Einsatz des konventionellen Gewindeformens kann in etwa eine Halbierung der Prozessdauer festgestellt werden, die sich insbesondere aus der Minimierung der nicht wertschöpfenden Zeitanteile durch das Helikalgewindeformen errechnet. Im direkten Vergleich der beiden betrachteten Prozessketten wird durch den Einsatz der beiden Hochleistungstechnologien, bezogen auf das Fertigungsbeispiel eines ALSi-Motorgehäuses für ein Elektrofahrzeug, die Herstellungszeit schließlich um 41 % reduziert. Die erzielte Steigerung der Produktivität für den beispielhaft betrachteten Prozessschritt der Innengewindeherstellung in der Massenfertigung von Motorgehäusen beträgt insgesamt 69 %. Entsprechend sind mittels dieser Hochleistungsprozesskette wirtschaftliche Potenzial bezüglich gesteigerter Produktionskapazitäten bzw. minimierter Taktzeiten zu erzielen.

### 8.3 Analyse des Energieeinsatzes

Nachdem im vergangenen Unterkapitel die Leistungsfähigkeit der Hochleistungstechnologien zur Bohr- und Gewindeherstellung bzgl. signifikant gesteigerter Produktivität quantifiziert wurde, folgt nachfolgend die Gegenüberstellung des Energiebedarfs am gewählten Beispiel des betrachteten Aluminiumgussgehäuses für elektrisch angetriebene Pkw. Zur Bewertung der spezifischen Energieverbräuche wurden die Wirkleistung des BAZ bzw. der Druckluftverbrauch des MMS-Systems prozessbegleitend im Rahmen der verschiedenen Einzelversuche gemessen.

Die als Referenz definierte Herstellungsrouten, bestehend aus Senkbohren mit vergleichsweise geringer Vorschubgeschwindigkeit sowie konventionellem Gewindeformen, trägt zu einem durch ihre hohen Grundzeiten zu einem energieintensiven Bearbeitungsprozess bei. Ohne die erforderlichen Werkzeugwechsel beträgt die Prozessdauer  $t_g = 67$  s (Bohren) bzw. 125 s (Gewinden). Zum anderen nimmt die Werkzeugmaschine währenddessen, primär aufgrund der hohen Leistungsaufnahme der KSS-Hochdruckpumpe, eine relativ große Menge elektrischer Leistung auf. Konkret beträgt die gemessene Wirkleistung bei einem KSS-Druck von  $p = 60$  bar zur Herstellung der 44 Stück Grundbohrungen  $P = 12,7$  kW. Da beim herkömmlichen Gewindeformen zum einen ein Teil der Leistung durch das starke Verzögern der z-Achse im Servo-Zwischenkreis gespeichert wird und zum anderen ein veringertes KSS-Druck ( $p = 20$  bar) verwendet wurde, ist anhand der Messdaten festzustellen, dass die Wirkleistungsaufnahme mit  $P = 10,9$  kW im Vergleich zum Bohren ca. um ein Drittel sinkt. Aufgrund der hohen Prozesszeit steigt jedoch der Energieumsatz deutlich an. Zur beispielhaften Herstellung der 44 Innengewinde der Elektromotor-Variante entnimmt die eingesetzte Werkzeugmaschine insgesamt  $E = 2.527$  kJ elektrische Energie aus dem Netz. Das Potenzial veringertes Prozesszeiten in der Gewindeherstellung trägt, wie **Abbildung 8.4** zeigt, in hohem Maße zu deren Energiebilanz bei. Demnach wird zur Herstellung eines M6-Innengewindes anhand der Standard-Prozesskette im vorliegenden Beispielprozess der spezifische Betrag von 57 kJ bzw. 0,016 kWh elektrische Energie durch die Standard-Prozesskette umgesetzt.

Die Energiebilanz der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hochleistungs-Technologien zum Bohren und Gewindeformen profitiert von den bereits erwähnten und von Iovkov identifizierten Potenzialen der verringerten Bearbeitungszeit bzw. des minimierten Leistungsbedarfs (Abbildung 4.7) der MMS [Iov16].



**Abbildung 8.4:** Gegenüberstellung des elektrischen Energiebedarfs für die betrachteten Prozessketten am Beispiel eines Elektromotorgehäuses

Während der für das Hochvorschubbohren ermittelten Netto-Bearbeitungszeit von  $t_g = 44 \text{ s}$  bzw.  $t_g = 60 \text{ s}$  für das Helikalgewindeformen entnimmt das Bearbeitungszentrum lediglich eine Wirkleistung von etwa  $P = 6,4$  bzw.  $6,5 \text{ kW}$  aus dem Stromnetz. Diese Ergebnisse verdeutlichen den hohen Energiebedarf des KSS-Systems zur Förderung und Aufbereitung des Emulsionsschmierstoffs. Neben der vernachlässigbaren Leistungsaufnahme des im MMS-Gerät verbauten Industrie-PCs steigert die Kompressorleistung als extern zugeführte Energieform den Energiebedarf lediglich geringfügig. Mittels des installierten Durchflusssensors wurde während des Bohrprozesses bei einem Betriebsdruck von  $p = 12 \text{ bar}$  ein mittlerer Luftdruck-Verbrauch von  $2,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  gemessen. Der parallel zum Helikalgewindeform-Prozess ermittelte Druckluftverbrauch bei  $p = 4 \text{ bar}$  betrug aufgrund des vergleichsweise hohen Kühlmittelquerschnitts im

Durchschnitt  $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Um die elektrische Leistung zur Luftverdichtung unter industrienahen Bedingungen in der Massenfertigung von Gehäusekomponenten zu berechnen, wurden die in Kapitel 8.1 aufgeführten Näherungswerte herangezogen. Entsprechend erhöht sich der Leistungsbedarf der Fertigungszelle beim Hochvorschubbohren um  $P = 0,5 \text{ kW}$  bzw.  $0,3 \text{ kW}$  beim Einsatz des Helikalgewindeformens unter den betrachteten Bedingungen, wie in Abbildung 8.4 gezeigt.

Schließlich folgt die Energiebilanz der innovativen Prozesskette zur Innengewindeherstellung aus den Prozesszeiten und den ermittelten Leistungsbedarfen inkl. der zwei Werkzeugwechsel. Zur Fertigung der 44 Gewindebohrungen des beispielhaft betrachteten Elektromotorgehäuses wurde eine mittlere Energiemenge von  $E = 1.031 \text{ kJ}$  im Rahmen der Einsatzversuche ermittelt. Insbesondere der direkte Vergleich zur Standard-Prozesskette zeigt die Potenziale minimierter Taktzeiten sowie des Einsatzes der energieeffizienten MMS-Technologie auf. Durch die Gegenüberstellung der spezifischen Energieverbräuche der untersuchten Prozessrouten konnte gezeigt werden, dass es im konkreten Beispiel möglich ist, 65 % der elektrischen Energie durch eine gezielte Auslegung der Werkzeug- und Prozesstechnologie einzusparen. Entsprechend sinkt der Energiebedarf von  $57 \text{ kJ}$  pro gefertigter Gewindebohrung auf  $23 \text{ kJ}/\text{Gewinde}$ . Das dadurch erschlossene Potenzial trägt zu einer signifikanten Steigerung der Wirtschaftlichkeit in der Gewindeherstellung bei, da Durchlaufzeit und Energiekosten minimiert werden können. Zum anderen trägt die gesteigerte Ressourceneffizienz zur nachhaltigen Produktion von Fahrzeugkomponenten bei. Der deutlich geringere Bedarf an elektrischer Energie sowie verminderte Aufwand für Teilereinigung und Schmierstoffentsorgung stellen weitere ökologischen Vorteile der entworfenen Hochleistungsprozesskette dar.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Zur hocheffizienten Fertigung von Aluminiumgusskomponenten in sehr hohen Stückzahlen leisten innovative Bearbeitungstechnologien mit hoher Produktivität aufgrund des hohen Skalierungseffekts einen besonderen Beitrag zur Reduzierung der Produktionskosten. Speziell durch die aktuell stark vorangetriebene Entwicklung emissionsfreier Antriebssysteme werden hohe Anforderungen in Bezug auf gesteigerte Prozess- und Energieeffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette gestellt. Dazu ermöglicht bspw. die Minimalmengenschmierung den Energiebedarf von spanenden Fertigungsverfahren, und damit schon zu Beginn des Produktlebenszyklus signifikant zu verringern. Weiterhin trägt die konsequente Minimierung unproduktiver Fertigungszeitanteile bspw. in der Gewindefertigung zur Verringerung des Energiebedarfs bei gesteigerter Kosteneffizienz bei. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Hochleistungsprozesskette zur Gewindefertigung entwickelt, die gegenüber konventionell eingesetzten Technologien einen messbaren Beitrag zur ressourceneffizienten Produktion leistet.

Mit dem Ziel, sowohl eine hochproduktive Vorbohrbearbeitung als auch einen Hochleistungsprozess zur Herstellung des Gewindeprofils in Aluminiumguss mittels innovativer Technologien zu entwickeln, wurden die beiden Prozessschritte zunächst in gesonderten Versuchsreihen wissenschaftlich untersucht. Um die Bearbeitungszeit des Bohrprozesses zu minimieren, bildete die experimentelle Ermittlung der Prozessgrenze hinsichtlich des technischen Vorschubmaximums des eingesetzten, dreischneidigen Bohrwerkzeugs den ersten Schritt der Analysen zum Bohren. Unter KSS-Emulsion konnte ein prozesssicherer Vorschubwert von maximal  $f = 1 \text{ mm}$  ermittelt werden. Bei weiterer Vorschuberrhöhung auf  $f = 1,15$  bzw.  $1,3 \text{ mm}$  traten unter den betrachteten, günstigen Bedingungen der Hochdruckversorgung wiederkehrend Spanklemmer auf, die u. a. zur kritischen Überhöhung des Bohrmoments führten. Da unter MMS besonders Materialanhafungen an den Querschneiden sowie der vergleichsweise geringere Luftstrom zur Evakuierung der Späne als Herausforderung identifiziert wurden, wurden zusätzlich verschiedene Systemdrücke sowie MMS-Öle untersucht, um den Späneabtransport zu optimieren. Es konnte im zweiten

Schritt der Grundlagenuntersuchungen zum Hochvorschubbohren festgestellt werden, dass es bereits bei geringerem MMS-Systemdruck ( $p = 12 \text{ bar}$ ) möglich ist die  $5 \times D$  Bohrungen mit dem zuvor ermittelten Maximalvorschub ( $f = 1 \text{ mm}$ ) zu fertigen. Bezüglich der mechanischen Werkzeugbelastungen sowie der Oberflächenrauheiten wurden mit dem esterbasiereten MMS-Medium zunächst geringfügig bessere Ergebnisse erzielt. Aufgrund der höheren dynamischen Viskosität zeigte sich wiederum beim Einsatz des zweiten MMS-Öls, das aus organischen Fettalkoholen hergestellt wird, eine günstigere Spanform, die bedeutend zur Steigerung der Prozesssicherheit beitrug. Um Spanflächenreibung sowie Aufbauschneidenbildung zu minimieren und somit insgesamt eine gesteigerte Qualität der Spanabfuhr zu erreichen, stellte sich schließlich eine ta-C-Beschichtung als besonders wirkungsvoll heraus. Konkret sank das Bohrmoment in den Einsatzversuchen um 7 %, und es wurde eine deutlich kompaktere Spangestalt erzielt. Weiterhin konnten Materialanhaftungen, die unter MMS mit unbeschichteten Werkzeugen an Quer- und Hauptschneide auftraten, durch die Oberflächeneigenschaften der ta-C-Schicht minimiert werden. Mit der Erfüllung des Teilziels, die Produktivität des Bohrprozesses durch die anwendungsspezifische Auslegung des Vorschubs, des KSS-Konzepts und der Werkzeugbeschichtung zu maximieren, ergibt sich ein Teil des Technologiekonzepts der zu entwickelnden Hochleistungsprozesskette.

Im zweiten Bearbeitungsschritt zur hocheffizienten Innengewindeherstellung wurden Grundlagenuntersuchungen zum neuartigen helikalen Gewindeformverfahren durchgeführt und analysiert. Da das Gewinde dabei nicht wie konventionell in einer gleichförmigen Schraubenbewegung geformt wird, sondern das Profil durch eine  $180^\circ$ -Drehung mit synchroner Translation um die halbe Steigung erzeugt wird, wurde zunächst ein Versuchsaufbau zur Visualisierung des Formvorgangs konstruiert. Neben der hohen Umformgeschwindigkeit wird mittels der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sichtbar, dass die signifikante Gratbildung an Gewindegrund und -spitzen als besonders charakteristisch für dieses Verfahren zu betrachten ist. Um die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Prozess- und Bauteilqualität des Gewindeformens auf die innovative Verfahrensvariante zu übertragen, wurden die experimentellen Untersuchungen mit drei variierenden

Eingangsgrößen durchgeführt. Als erstes stellte sich heraus, dass die Axialkräfte insbesondere bei den Entgratbewegungen mit steigendem Kernbohrdurchmesser um bis zu 20 % sinken. Bei geringen Bohrungsdurchmessern hingegen überformen die Gewindespitzen, vergleichbar zur konventionellen Variante. Gleichzeitig wird Gratmaterial durch das hohe Axialmoment in die Oberflächen eingeebnet, woraus die hohen Oberflächengüten der Gewindeflanken resultieren. Als weitere Eingangsgröße wurde die Umformgeschwindigkeit in Form der Nenndrehzahl während der Gewindeformung betrachtet. Dabei war bis zu einer Drehzahl von  $n = 400 \text{ min}^{-1}$  eine hohe Gewindegüte bei konstanten mechanischen Belastungen feststellbar. Bei einer weiteren Steigerung der Relativgeschwindigkeit traten auf den Flankenoberflächen Furchen auf, wodurch die Bearbeitungskräfte stark anstiegen. Eine signifikante Verringerung der Hauptzeit wurde bei  $n = 500 \text{ min}^{-1}$  aufgrund der begrenzten Maschinendynamik nicht erzielt. Letztlich konnte durch den Einsatz von MMS die Prozess- und Gewindegüte im Vergleich zu den Referenzversuchen unter KSS-Emulsion erheblich gesteigert werden. Es gelang aufgrund verringerter Reibung die Gratbildung die mechanischen Werkzeugbelastungen um bis zu 30 % zu senken. Insbesondere im Bereich der unteren Gewindeflanken konnte eine geglättete Oberflächentopografie mit verringerten Rautiefen erzielt werden, was dem Setzen von Schraubenverbindungen allgemein verringert. Schließlich resultierte aus dem verbesserten Materialfluss eine sehr gleichförmige Mikrogestalt der Gewindespitzen. Gleichzeitig wird die für das Gewindeformen definierte Maß-Toleranzklasse 7H erzielt. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Bearbeitungsqualität beim Helikalgwindeformen durch die spezifische Anpassung der betrachteten Prozessparameter verlässlich beeinflussbar ist. Insbesondere durch den Einsatz von MMS sowie der anwendungsgerechten Anpassung des Vorbohrdurchmessers sind hohe Gewindegüten bei minimaler Prozesszeit zu erzielen.

Als prozessspezifische Merkmale des Helikalgwindeformens sind einerseits die hohen mechanischen Werkzeugbelastungen sowie andererseits das durch die Räumnuten unterbrochene Gewindefprofil zu nennen. Um das innovative Gewindefahren mit etablierten Fertigungstechnologien am Beispiel der M6-Innengewindeherstellung in AlSi10Mg gegenüberzustellen, wurden Analogieversuche durchgeführt und die entwickelte Methodik zur

Gewindecharakterisierung angewandt. Dabei stellte sich heraus, dass die Prozesssicherheit beim Gewindebohren aufgrund herausfordernder Spannbildung am geringsten zu bewerten ist. Mit vergleichbarer Hauptzeit, jedoch hoher Prozess- und Gewindefertigkeit eignet sich das konventionelle Gewindeformen erheblich besser für Serienfertigungsprozesse. Die geringe Hauptzeit des Gewindefräses stellt neben der hohen Beherrschbarkeit der Fräsbearbeitung einen wichtigen Vorteil der spanenden Verfahrensvariante dar. Mittels Bohrgewindefräsen sind die Gewindetoleranzen ebenfalls einstellbar. Des Weiterhin entfällt durch die Herstellung der Kernbohrung durch die Stirnschneiden ein Vorbohrprozess einschließlich eines Werkzeugwechsels. Aufgrund der vergleichsweise hohen Prozessdauer von über 10 s ist der Einsatz des helikalen Bohrgewindefräses in der Serienfertigung jedoch als unproduktive Variante zur Gewindefertigung einzustufen.

Nachdem beide Schritte der Hochleistungsprozesskette durch experimentelle Untersuchungen grundlegend analysiert und hinsichtlich der geforderten Prozesssicherheit ausgelegt wurden, folgte die Quantifizierung der Produktivität und Energieeffizienz gegenüber einer konventionellen Herstellungsrouten für Innengewinde. Um die Technologiekonzepte hinsichtlich relevanter Anwendungen gegenüberzustellen, wurde die Gewindefertigung eines Elektromotorgehäuses in Einsatzversuchen abgebildet. Darin konnte zum einen die Bearbeitungszeit für das Bohren durch das erarbeitete Konzept zum Hochvorschubbohren um 34 % gesenkt werden. Im nächsten Prozessschritt konnten mittels helikalen Gewindeformens 52 % der Taktzeit gegenüber der herkömmlichen Verfahrensvariante eingespart werden. Am Beispiel des AlSi-Motorgehäuses für einen elektrisch angetriebenen Pkw wurde ermittelt, dass durch den Einsatz hocheffizienter Bearbeitungstechnologien eine Produktivitätssteigerung in der Innengewindefertigung von insgesamt 69 % erzielbar ist. Zum anderen konnte neben der verkürzten Prozessdauer durch den Einsatz der MMS eine signifikante Verringerung der benötigten Energie erzielt werden. Die Leistungsaufnahme des Bearbeitungszentrums halbierte sich bspw. beim Bohren unter MMS gegenüber der leistungsintensiven Hochdruck-Emulsionsschmierung. Schließlich ist im betrachteten Beispiel aus der E-Motor-Fertigung eine Reduzierung des Energiebedarfs um 59 % erzielbar.

Diese Bilanzierung ist im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten auf weitere Fertigungsschritte in der Gehäusebearbeitung sowie den gesamten Wertschöpfungsprozess der Kfz-Herstellung zu übertagen, da beispielsweise auch in Werkzeugen und Hilfsstoffen Energie gebunden ist. Dadurch wird ein Beitrag zur Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs und somit auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Herstellung von Fahrzeugen geleistet. Des Weiteren ist aus wissenschaftlicher Sicht die Weiterentwicklung der Gewindecharakterisierung bezüglich anderer Werkstoffgruppen bzw. Gewindegrößen von großem Interesse. Durch die Erweiterung der Methodik im Hinblick auf werkstofftechnische Aspekte wird die Möglichkeit eröffnet die Gewindequalität zusätzlich anhand prüftechnischer Analysen vergleichbar zu machen.



## 10 Literaturverzeichnis

- [AC12] Allwood, J.; Cullen, J. M.: *Sustainable materials: With both eyes open ; [future buildings, vehicles, products and equipment - made efficiently and made with less new material.* UIT Cambridge, Cambridge, 2012.
- [AFP13] Araujo, A. C.; Fromentin, G.; Poulachon, G.: *Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, S. 28–34.
- [Aky16] Akyüz, B.: *EFFECT OF SILICON CONTENT ON MACHINABILITY OF Al-Si ALLOYS.* Advances in Science and Technology Research Journal, Nr. 31, 2016, S. 51–57.
- [AUT22] AUTOMOBIL-Produktion: *Lukrative Leichtigkeit.* AUTOMOBIL-Produktion, Nr. 2, 2022, S. 30–32.
- [AUT23] AUTOMOBIL-Produktion: *Abschiedsklänge.* AUTOMOBIL-Produktion, Nr. 3, 2023, S. 24–27.
- [BAP+20] Barooh, R. K.; Arif, A.; Paiva, J. M.; Oomen-Hurst, S.; Veldhuis, S. C.: *Wear of form taps in threading of Al-Si alloy parts: Mechanisms and measurements.* Wear, 2020, S. 203153.
- [BDM+02] Braga, D. U.; Diniz, A. E.; Miranda, G. W.; Coppini, N. L.: *Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys.* Journal of Materials Processing Technology, Nr. 1, 2002, S. 127–138.
- [BLA10] Bhowmick, S.; Lukitsch, M. J.; Alpas, A. T.: *Tapping of Al–Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication.* Journal of Materials Processing Technology, Nr. 15, 2010, S. 2142–2153.
- [Bos16] Bosch, T.: *Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in der spanenden Fertigung.* Dissertation Stuttgart, Universität Stuttgart, Fraunhofer IPA, 2016.

- [BPA<sup>+</sup>21] Baroah, R. K.; Paiva, J. M.; Arif, A.; Rawal, S.; Bose, B.; Veldhuis, S. C.: *Investigation on wear mechanisms of PVD coatings for form taps in threading of Al–Si alloy*. *Wear*, 2021, S. 203528.
- [BSF<sup>+</sup>20] Brandão, G. L.; Silva, Pedro Márcio do Carmo; Freitas, S. A. de; Pereira, R. B. D.; Lauro, C. H.; Brandão, L. C.: *State of the art on internal thread manufacturing: a review*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 11, 2020, S. 3445–3465.
- [BTH<sup>+</sup>11] Brecher, C.; Tannert, M.; Heyers, C.; Bäumlner, S.; Breitbach, T.: *Ressourceneffizienz im Werkzeugmaschinenbau*. 2011 (Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen RWTH-CONV-105316)
- [Büc21] Bücken, M.: *Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Dissertation Essen, Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung, 2021.
- [BZS<sup>+</sup>19] Barakat, H.; Zedan, Y.; Samuel, A. M.; Doty, H. W.; Valtierra, S.; Samuel, F. H.: *Effect of metallurgical parameters on the drilling and tapping characteristics of aluminum cast alloys*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 1, 2019, S. 1357–1370.
- [CER24] CERATIZIT GROUP: *Der e-Katalog 2024: 6 Gewindebohrer und -former*. URL <https://cuttingtools.ceratizit.com/de/de/download.html>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [Ciu24] Ciupek, M.: *Die Karosserie neu denken*. VDI-Nachrichten Heft 2/2024, Nr. 2, 2024, S. 13.
- [DH07] Dürr, H.; Hanke, M.: *Trockenbearbeitung von Aluminiumzylinderköpfen in der Großserie*. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 7-8, 2007, S. 442–445.

- [DHK14] Duflou, J.; Herrmann, C.; Kara, S.: Energy Efficiency. In: Laperrière, Luc; Reinhart, Gunther (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 461–462.
- [DHL+23] Dzulfikri, Z.; Huang, C.-Y.; Lin, J.-T.; Chien, Y.-J.: *Experimental investigation of novel internal thread fabrication: A drill thread milling*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, S. 126–137.
- [Die16] Diethard, T.: *Gewinde bohren oder formen? – Ein Vergleich: Was ist wirtschaftlicher?* Maschinenmarkt MM 2016, 2016-12-01, S. 24–26.
- [DIN00] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung: Teil 20: Grenzmaße für Regelgewinde mit bevorzugten Toleranzklassen; Gewinde-Nenn-durchmesser von 1 mm bis 68 mm*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000-08.
- [DIN02] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Gewinde - Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde*. Beuth Verlag GmbH, 2002-05.
- [DIN03a] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fertigungsverfahren Spanen: Teil\_2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003-09.
- [DIN03b] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Durchmesser für Bohrer für Gewindekerndurchmesser von geschnittenen Gewinden*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003-07.
- [DIN17] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung: Toleranzen - Teil\_1: Prinzipien und Grundlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017-05.
- [DIN20] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fahrzeuge der Binnenschifffahrt: Außenbordtreppen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020-05.

- [DIN21] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Aluminium and aluminium alloys – Castings: Chemical composition and mechanical properties*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 01.10.2021. URL <https://www.beuth.de/en/standard/din-en-1706/318051540>
- [DIN23] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung - Grundprofil und Nennprofil: Teil 1: Metrisches Gewinde*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2023-04.
- [DIN90] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Geschliffene Gewindebohrer für metrische ISO-Gewinde mit Toleranzfeld von 4H bis 8H und 4G bis 6G für Regel- und Feingewinde: Fertigungstoleranzen des Gewindeteiles*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990-07.
- [DIN98] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Spiralbohrer - Benennungen, Definitionen und Formen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1998-06.
- [DR.14] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH: *Benutzer-Handbuch Zyklenprogrammierung iTNC 530: iTNC 530*. URL [https://content.heidenhain.de/doku/tnc\\_guide/html/de/index/1242135142456/1242135142480/1242135142481/1242135142481.html](https://content.heidenhain.de/doku/tnc_guide/html/de/index/1242135142456/1242135142480/1242135142481/1242135142481.html). – Aktualisierungsdatum: 2024-05-29 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [DT11] Denkena, B.; Toenshoff, H. K.: *Spanen: Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch), Berlin, Heidelberg, 3. Aufl. 2011, 2011.
- [EMU13a] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *Gewindebohren: Technisches Handbuch*. 2013.
- [EMU13b] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *Gewindeformen: Technisches Handbuch*. 2013.
- [EMU18] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *Punch Tap: Informationen zur Inbetriebnahme*. Lauf an der Pegnitz, 2018.
- [EMU19] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *EMUGE Taptor: Vorbohren und Gewindefertigung in einem Arbeitsschritt*

- [EMU20] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *Punch Tap: Helikales Gewindeformen - The Shortes Way*
- [EMU24] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG: *Katalog 160: Gewindetechnik · Bohrtechnik · Spanntechnik*
- [FKB\*22] Felinks, N.; Krumme, E.; Beer, C.; Hechtle, D.; Sarafraz, Y.; Walther, F.; Biermann, D.: *Influence of core hole diameter on thread quality for a high-performance tapping technology in AlSi10MnMg cast Alloys*. Procedia CIRP, 2022, S. 42–47.
- [FKB24] Felinks, N.; Krumme, E.; Biermann, D.: *Advanced Process Analysis for High Performance Tapping Technology in Aluminum Cast Alloy AlSi10Mg*. In: Bauernhansl, Thomas; Verl, Alexander; Liewald, Mathias; Möhring, Hans-Christian (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 707–716.
- [FMB15] Fischer, S.; Mennen, G.; Bührig-Polaczek, A.: *Festigkeits- und kosteninduzierte Optimierung der T6 Wärmebehandlung einer gekornfeinten veredelten AlSi7Mg0.3*, 2015, S. 29–47.
- [FOO\*04] Fukui, H.; Okida, J.; Omori, N.; Moriguchi, H.; Tsuda, K.: *Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys*. Surface and Coatings Technology, Nr. 1, 2004, S. 70–76.
- [FSS07] Furness, R.; SEBASTIAN, A.; STOLL, A.: *Ford in den USA setzt auf umweltfreundliche Fertigungssysteme*. WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 9, 2007, S. 80–85.
- [Ges07] Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: *Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen: Merkblatt W7*. 2007.
- [GWA21] Geßner, F.; Weigold, M.; Abele, E.: *Investigation on Tool Deflection During Tapping*. Uncertainty in Mechanical Engineering, 2021, S. 104–114.
- [HB10] H. Zak; B. Tonn: *Optimierung der Wärmebehandlung von Zylinderköpfen aus AlSi10Mg(Cu)*. Giesserei-Praxis, 2010, Nr. 61, S. 105–111.

- [Hei01] Heiler, R.: *Spanloses Verfahren ersetzt Gewindeschneiden*. In: *Industrieanzeiger*, Nr. 21, 2001
- [Her13] Herrmann, C., Pries, Helge (Mitarb.); Hartmann, Götz (Mitarb.): *Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Aufl. 2013, 2013.
- [HLM16] Habrat, W.; Laskowski, P.; Markopoulos, A.: *Machining with High-Pressure Cooling*. In: Davim, J. P. (Hrsg.): *Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2016, S. 60–75.
- [Int21] International Transport Forum: *ITF Transport Outlook 2021*, 2021.
- [Iov16] Iovkov, I. V.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs*. Dissertation Essen, Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung, 2016.
- [KEY11] KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH: *High-Speed Microscope VW-9000: User's Manual*. 2011.
- [KHB<sup>+</sup>12] Kopton, P.; Hechtle, D.; Biermann, D.; Liu, Y.; Iovkov, I.: *Innovative Gewindefertigung im Automobilbau: Ein Beitrag zur energieeffizienten Produktion*. Vulkan-Verlag (Spanende Fertigung 6), Essen, 2012.
- [Kip23] Kipp, M.: *Feinstbearbeitung von Hartmetall unter Einsatz elastisch gebundener Diamantschleifwerkzeuge zur Präparation von Spannuten*. Dissertation Dortmund, Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung, 2023.
- [Klo18] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch), Berlin, Heidelberg, 9. Aufl. 2018, 2018.
- [Koe04] Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2004. Vulkan-Verl. (Schriftenreihe des ISF 28), Essen, 2004.

- [L11] Lumley, R. N.: *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. Woodhead Pub (Woodhead Publishing in materials), Oxford, Philadelphia, 2011.
- [LTY04] Liu, M.; Takagi, J.; Yanagida, K.: *A Study of the Chip Formation and Chip Removal in Dry Drilling of Aluminum Cast Alloy*. Key Engineering Materials, 2004, 575-0.
- [MAP24] MAPAL Dr. Kress KG: *Tritan-Drill-Alu*. URL <https://mapal.com/de-de/produkt-neuheiten-2023/tritan-drill-alu>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [Mas23] MaschinenMarkt: *Sonderwerkzeuge: Anspruchsvolle Bauteile aus Aluminium fertigen*. Maschinenmarkt, Nr. 010, 2023, S. 30.
- [mav23] mav - Innovation in der spanenden Fertigung: *Werkzeug gespart, Taktzeit gedrückt: Innengewindebearbeitung von Aluminium-Getriebegehäusen im Serieneinsatz*. mav - Innovation in der spanenden Fertigung, 2023, Nr. 5, S. 96–98.
- [mav24]: *Bearbeitungslösungen für Elektromobilität, Verbrennungsmotoren und Aluminiumbauteile: Werkzeuglösungen von Mapal für die automobile Zukunft*. URL <https://mav.industrie.de/werkzeuge/bearbeitungsloesungen-fuer-elektromobilitaet-und-aluminiumbauteile/#>
- [Mer24] Mercedes-Benz Group: *Nachhaltigkeitsbericht 2023*. Stuttgart, 01.08.2024.
- [MFL\*15] Maciel, D. T.; Filho, Sérgio Luiz Moni Ribeiro; Lauro, C. H.; Brandão, L. C.: *Characteristics of machined and formed external threads in titanium alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 5, 2015, S. 779–792.
- [MMR\*17] Meß, T.; Manske, E.; Raßbach, H.; Kniel, K.: *Der Paarungsflankendurchmesser - Untersuchung des begrifflichen Umfeldes, der Einflussgrößen und der Bedeutung für die Funktion, Spezifikation, Fertigung und Prüfung von Gewinden*. Dissertationllmenau, Technischen Universität Ilmenau, 2017.

- [MOA\*16] Moni Ribeiro Filho, Sérgio Luiz; Oliveira, J. A. de; Arruda, É. M.; Brandão, L. C.: *Analysis of burr formation in form tapping in 7075 aluminum alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 5, 2016, S. 957–967.
- [MS12] Mohamed, A.; Samuel, F.: "A review on the heat treatment of Al-Si-Cu/Mg casting alloys", in *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*, F. Czerwinski, Ed. Intech, 2012, S. 54–72.
- [ORB19] Oliveira, J. d.; Ribeiro Filho, S.; Brandão, L.: *Investigation of the influence of coating and the tapered entry in the internal forming tapping process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 1, 2019, S. 1051–1063.
- [OSG19] OSG GmbH: *AT-1 Gewindefräser*. URL <https://de.osgeurope.com/at-1>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [OSG22] OSG GmbH: *SYNCHROMASTER SYNCHROFIT*. URL <https://de.osgeurope.com/synchromaster>. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [OSG23] OSG GmbH: *Gewindefräsen ins "Volle": DLC-O-EM-PNC*. URL [https://de.osgeurope.com/media/pdf/GER-MANY/JPG/Flyer/2023\\_01\\_V1\\_Gewindefr%C3%A4sen\\_OP.pdf](https://de.osgeurope.com/media/pdf/GER-MANY/JPG/Flyer/2023_01_V1_Gewindefr%C3%A4sen_OP.pdf). – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.
- [Ost14] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer Vieweg (VDI-Buch), Berlin, Heidelberg, 3. Aufl., 2014.
- [ÖSW21] Öztürk, T.; Sarıkaya, E.; Weigold, M.: *Sensor-integrated tap holder for process uncertainty detection based on tool vibration and axial length compensation sensors*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 5, 2021, S. 1905–1914.
- [Pat22] Patka, T.: *THE EFFECT OF COOLING METHOD ON SURFACE ROUGHNESS IN DEEP HOLE DRILLING OF ALUMINIUM ALLOYS*.

Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering, Nr. 1, 2022, S. 8–12.

- [PBP<sup>+</sup>22] Pramanik, A.; Basak, A. K.; Prakash, C.; Shankar, S.; Chattopadhyaya, S.: *Sustainability in drilling of aluminum alloy*. Cleaner Materials, 2022, S. 100048.
- [PD17] Pereira, I. C.; Da Silva, M. B.: *Study of the internal thread process with cut and form taps according to secondary characteristics of the process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 5, 2017, S. 2357–2368.
- [PGS22] Panday, A.; Goindi, G. S.; Singh, N.: *Evaluation of effect of oil viscosity in MQL turning of aluminium 6061*. Materials Today: Proceedings, 2022, S. 1740–1747.
- [PL08] Paucksch, E.; Linß, M.: *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen*. Vieweg + Teubner (Studium), Wiesbaden, 12., vollst. überarb. und erw. Aufl., 2008.
- [Ruž19] Ružbarský, J.: *Al-Si Alloys Casts by Die Casting: A Case Study*. Springer, Cham (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology), 1. Aufl., 2019.
- [Sch04] Schäfer, M.: *Analyse und Beschreibung des Innengewindefertigungsverfahrens Gewindefurchen auf Basis eines Modellversuchs*, Kassel, Universität, FB 15, Maschinenbau, 2004.
- [SFB<sup>+</sup>23] Sarafray, Y.; Felinks, N.; Biermann, D.; Walther, F.: *Effect of Core Hole Diameter on Tensile and Fatigue Properties of the Helically Formed Internal Thread in AlSi10MnMg Cast Alloys*. Solid State Phenomena, 2023, S. 11–17.
- [SIA<sup>+</sup>04] Saikawa, Y.; Ichikawa, T.; Aoyama, T.; Takada, T.: *High Speed Drilling and Tapping Using the Technique of Spindle through MQL Supply*. Key Engineering Materials - KEY ENG MAT, 2004, S. 559–564.
- [SKL11] Schlosser, R.; Klocke, F.; Lung, D.: *Sustainability in Manufacturing – Energy Consumption of Cutting Processes*. In: Seliger,

Günther; Khraisheh, Marwan M.K.; Jawahir, I. S. (Hrsg.): *Advances in Sustainable Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 85–89.

- [SKM+22] Schmolke, T.; Krüger, C.; Merdivan, D.; Meschut, G.: *Gewichtsoptimierte Batteriegehäuse für Volumenfahrzeuge*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 1, 2022, S. 80–85.
- [Spu61] Spur, G.: *Beitrag zur Schnittkraftmessung beim Bohren mit Spiralbohrern unter Berücksichtigung der Radialkräfte*. Dissertation Braunschweig, TH Braunschweig, 1961.
- [SS10] Sjölander, E.; Seifeddine, S.: *The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys*. Journal of Materials Processing Technology, Nr. 10, 2010, S. 1249–1259.
- [SSA+19] Swissi, A.; Soussi, H.; Abid, M.; Krichen, A.: *Internal and interface shear behaviors of cut and form tapping thread*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 7, 2019, S. 3463–3475.
- [Stö24] Stölzel, T.: *Aus EINEM Guss*. WirtschaftsWoche Heft 3/2024 vom 12.01.2024, Nr. 3, 2024, S. 42.
- [Tha99] Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1998. Vulkan-Verl. (Schriftenreihe des ISF 5), Essen, 1999.
- [The08] Theisen, W.: *Werkstoffe II: Werkstoffe und Werkstoffverarbeitung*. Vorlesungsskript. – Bochum, 2008.
- [Toe14] Toenshoff, H. K.: Machinability. In: Laperrière, Luc; Reinhart, Gunther (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 769–770.
- [TRI20] TRIMET Aluminium SE: *trimal-05: Druckgusslegierung für crashrelevante Anwendungen*. URL <https://www.trimet.eu/de/produkte/gusslegierungen/trimal->

05. – Aktualisierungsdatum: 2024-07-23 – Überprüfungsdatum 23.07.2024.

- [TSF\*17] Tai, B.; Stephenson, D.; Furness, R.; Shih, A.: Minimum Quantity Lubrication for Sustainable Machining. In: Abraham, Martin A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Oxford: Elsevier, 2017, S. 477–485.
- [VDI15a] VDI-Richtlinie: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 01.11.2015. URL <https://www.vdi.de/2230>
- [VDI15b] VDI-Richtlinie: *Machining of internal threads*. 2015. URL <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3334-maschinelle-innengewindefertigung>
- [WA14] Wan, M.; Altintas, Y.: *Mechanics and dynamics of thread milling process*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2014, S. 16–26.
- [War04] Warmuzek, M.: *Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractograp*. ASM International, 2004.
- [WB 14] WB Werkstatt und Betrieb: *Helikal-Gewindeformen ist schnell und spart Energie*. WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 09, 2014, S. 66–68.
- [WB 19] WB Werkstatt und Betrieb: *Fix zum Innengewinde*. WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 11, 2019, S. 49.
- [WB 20] WB Werkstatt und Betrieb: *Ausgereifte Serienlösung*. WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 10, 2020, S. 28–31.
- [WB 23] WB Werkstatt und Betrieb: *Doppelspindlig zu höherer Wettbewerbsfähigkeit*. WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 4, 2023, S. 20–22.
- [Wei99] Weinert, K.: *Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung: Einsatz in der spanenden Fertigung*

stechnik. Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering), Berlin, Heidelberg, s.l., 1999.

- [Wir19] Wirtz, A.: *Simulationsgestützte Analyse und Auslegung energieeffizienter NC-Fräsprozesse im Rahmen der Anpassungsplanung*. Dissertation Dortmund, Shaker Verlag, Virtual Machining, 2019.
- [WIS<sup>+</sup>04] Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J. W.; Wakabayashi, T.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*. CIRP Annals, Nr. 2, 2004, S. 511–537.
- [ZGW13] Züst, S.; Gontarz, A.; Wegener, K.: Energy Equivalent of Compressed Air Consumption in a Machine Tool Environment. In: *Innovative solutions : Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Zürich: ETH Zürich; Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), 2013, S. 394–399.

## 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 114 Rinschede, T.: *Konturieren kleiner Tiefbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN ISBN: 978-3-8027-8930-0
- Band 113 Gerken, J.F.: *Technologische Analyse des Ejektortiefbohrens 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 diamantimpregnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8918-2
- Band 101 Fuß, M.: Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3802789120
- Band 96 Tiffe, M.: Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-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 Verdichterschaukeln. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner 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 Edelstahl X5CrNi18-10. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2
- Band 77 Heymann, T.: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9
- Band 73 Schlenker, J.: Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1

- Band 70 Sacharow, A.: Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4
- Band 69 Baschin, A.: Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von  $\beta$ -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 Verschleißschichten 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 Fräswerkzeugen zur HSC-Bearbeitung. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2

- Band 46 Bergmann, S.: Beitrag zur Zerspanung intermetallischer  $\gamma$ -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