



tu technische universität
dortmund

90

Technische Universität Dortmund
44221 Dortmund

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

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

Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens

Yang Liu

Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens

Schriftenreihe des ISF
Hrsg.: Dirk Biermann

Liu

ISBN 978-3-8027-8795-9



Vulkan Verlag



Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Yang Liu

aus

Shanxi

Tag der mündlichen Prüfung: 28. März 2017

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

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther

Dortmund, 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-8027-8795-9

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und als Doktorand im Rahmen der Forschungsschule für Energieeffiziente Produktion und Logistik Nordrhein-Westfalen (NRW) am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund.

Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, meinem Doktorvater, danke ich für seine persönliche Förderung und Unterstützung sowie dem mir entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, dem Leiter des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik, danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann Wolfgang Tillmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie, für die Übernahme des zweiten Koreferats und Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Andreas Zabel, dem Oberingenieur des Instituts, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dem ehemaligen Leiter des Instituts Herrn Prof. i. R. Dr.-Ing. Dr. h. c. Klaus Weinert danke ich, dass er in mir das Interesse zu wissenschaftlichen Arbeiten geweckt hat.

Für die finanzielle Förderung der Forschungsarbeit bedanke ich mich bei der Forschungsschule-NRW und dem ISF. Ein weiterer Dank gilt Herrn Sven Rautenberg von der Firma Flowdrill Fließformwerkzeuge GmbH für die Beschaffung von Versuchswerkzeugen.

Allen Kollegen am ISF, insbesondere dem ehemaligen Leiter der Abteilung Zerspanung Dr.-Ing Timo Engbert und dem jetzigen Leiter Dr.-Ing. Ivan Iovkov, Dr.-Ing Marko Kirschner, Maximilian Metzger, Marcel Tiffe, Dr.-Ing Hennig Hartmann, Dr.-Ing Hendrik Abrahams, Moritz Fuß, Dr.-Ing Ekrem Özkaya, Dr.-Ing Markus Steiner, Florian Vogel, Dr.-Ing. Tobias Heymann, Sebastian Schumann, Dr.-Ing Christian Rautert, Robert Aßmuth, Timo Bathe, Michael Kansteiner, Monika Kipp, Meik Tilger und Mark Wolf, danke ich für ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft sowie die schöne gemeinsame Zeit am Institut.

Meinem Bürokollegen Stefan Hannich danke ich insbesondere für die angenehme Zusammenarbeit und die Korrektur meiner schriftlichen Arbeit. Für die technische Unterstützung für die Versuchsdurchführung bedanke ich mich bei Michael Kater, Wolfram Krückendorf, Tobias Hoffmann, Martin Gerwert und Jörg Eichmann. Darüber hinaus bedanke ich mich bei mein Studien- und Masterarbeitern, Ruimin Huang und Yihui Cai für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

Meinen Eltern gilt mein herzlicher Dank. Sie haben mir den Bildungsweg bis hin zur Promotion ermöglicht und mich auf diesem immer unterstützt. Meiner Frau Ang Li danke ich vom ganzen Herzen für ihre unermüdliche Unterstützung, ihre Liebe und Motivation.

Kurzfassung

Das Fließbohren ist ein umformendes Verfahren zur Herstellung von Bohrungen in dünnwandigen Werkstücken. In Kombination mit einer anschließenden Gewindefertigung bietet es die Möglichkeit, ein Innengewinde direkt in Bauteilen mit geringer Wandstärke zu fertigen. Das Werkstück kann anschließend durch dieses Gewinde mit anderen Bauteilen verbunden werden. Beim Fließbohren wird ein schnell rotierendes Werkzeug aus Hartmetall in ein flach eingespanntes Blech aus einem metallischen Werkstoff gedrückt. Durch die induzierte Reibungswärme reduziert sich die Festigkeit des Materials und ein offener Durchzug wird in Vorschubrichtung geformt. Mit nachfolgender Gewindebearbeitung kann ein tragfähiges Gewinde in den Durchzug eingebracht werden. Die erzeugte Gewindelänge ist deutlich größer als die lokale Materialstärke des Bauteils.

Neue Forschungsergebnisse am Institut für Spanende Fertigung der Technischen Universität Dortmund (ISF) zeigen, dass mit dem Fließbohrverfahren eine geschlossene Bohrungswand an dünnwandigem Profil ausgeformt werden kann. Das zu bearbeitende Werkstück wird nicht flach zur Vorschubrichtung eingespannt, sondern orthogonal versetzt. Die Stirnseite bzw. Querschnittsfläche werden bearbeitet. Die Fließbohrbearbeitung erfolgt durch das lokale Aufweiten des Materials und ein Innengewinde kann in die geformte Bohrung eingebracht werden. Im Vergleich zum konventionellen Fließbohren befindet sich in Vorschubrichtung immer Material vor dem Werkzeug. Es ergibt sich eine völlig neue Anwendungsmöglichkeit zur Herstellung von Verbindungsstellen mit hoher Qualität im Bereich der Konstruktion und Fertigungstechnik. Bei den Verstärkungsrippen oder Verstärkungsverstrebungen eines dünnwandigen Bauteils lassen sich hochfeste Fügstellen unter Einsatz des neuartigen Fließbohrens erzeugen.

Bisherige Untersuchungen zu der neuartigen Fließbohrbearbeitung am ISF zeigen, dass sehr gute Ergebnisse bei einer duktilen Aluminiumknetlegierung erreicht werden können. Neben dieser Legierung existiert noch eine Reihe weiterer Werkstoffe, die durch das Fließbohren bearbeitet werden und somit Verwendung in Konstruktionen finden könnten. Ihre mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich jedoch stark von der detailliert untersuchten Aluminiumlegierung. Die Antwort auf die Frage, ob das neuartige Fließbohren auch auf andere Werkstoffe übertragen werden kann, könnte das Einsatzgebiet des Fließbohrens stark ausweiten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit technologischen Untersuchungen zum neuartigen Fließbohren. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher Bedingungen für die Erzeugung von Fließbohrungen mit geschlossener Bohrungswand bei verschiedenen Werkstoffen zu ermitteln, um die Einsatzmöglichkeit des stirnseitigen Fließbohrens zu erweitern. Zu dem Zweck werden Profile aus den Werkstoffen: PA66, PVC-U, AZ31, CuZn37 und X5CrNi18-10 eingesetzt. Systematische Untersuchungen wurden durchgeführt. Ein weiteres Ziel der Arbeit besteht darin, die statische Festigkeit der in die Fließbohrungen eingebrachten Gewinde zu untersuchen, da diese von großer Bedeutung für eine sichere Verbindungsstelle ist. Dazu wurden die in die ausgeformten Bohrungen erzeugten Gewinde mithilfe des Axialzugversuchs überprüft. Die Festigkeitsuntersuchung soll die Auswirkung der Randbedingungen auf den Fließbohrprozess widerspiegeln, um eine Empfehlung für die sichere Auswahl der Prozessparameter zu ermöglichen.

Abstract

Flow drilling is a forming process for the production of holes in thin-walled workpieces. In combination with a threading operation, it can make stable joints between the thin-walled lightweight parts. The workpiece can be connected directly to other components through this and fulfill its function. During the flow drilling process, a tungsten carbide tool penetrates the thin-walled workpiece. Frictional heat is produced. For this reason the strength of the material is reduced. A bushing can be formed in the feed direction of the tool. With a subsequent threading operation, stable detachable joints between the workpieces can be realized at the bushing. The utilized thread depth is greater than the local thickness of the profile.

The latest research from the Institute of Machining Technology of the Technical University Dortmund shows that a blind hole can be machined on thin-walled profile. The workpiece is not flat clamped to feed direction, but orthogonal. The narrow side and cross-sectional area is being processed. The flow drilling process is carried out by the local widening of the material and an internal thread can be processed into the shaped hole. Compared to conventional flow drilling, there is always material in front of the tool in feed direction during the process. This entirely new application of flow drilling opens new possibilities to connect thin-walled workpieces in the field of design and production technology, because reinforcing ribs or struts of a thin-walled component can be used for creating high-strength joints.

This application of flow drilling has been studied already for a ductile aluminum alloy in detail. In addition to this alloy, many other materials could be processed with flow drilling and thus be used in construction. But they have different mechanical properties to the already examined aluminum alloy. The answer to the question, how good this new floating drilling in other materials can be used, can extend the field of application of the flow drilling.

This work is focused on technological investigations of the new flow drilling. One goal is to determine conditions for the production of blind holes at different materials to enhance the possibility of using the frontal flow drilling. For this purpose, profiles made from the following materials are used: PA66, PVC-U, AZ31, CuZn37 and X5CrNi18-10. Systematic investigations have been performed. Another goal is to investigate the pullout strength of threads, which is generated in the manufactured blind holes. This is very important for a secure joint. Furthermore, the investigation of pullout-strength allows a recommendation for the safe selection of the flow-drilling process parameters.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Fließbohren und dessen geschichtliche Entwicklung.....	3
2.2	Wissenschaftliche Untersuchungen zum Fließbohren.....	8
2.3	Fließbohrwerkzeug	18
2.4	Alternative Methode zum Verbinden dünnwandiger Strukturen	22
2.5	Innengewindebearbeitung.....	22
2.5.1	Gewindeformen	23
2.5.2	Gewindebohren	26
2.5.3	Einfluss der Einschraubtiefe auf die Schraubenverbindungen.....	28
2.6	Werkstoffe	29
2.6.1	Kunststoffe Polyamid PA66 und Polyvinylchlorid PVC-U.....	29
2.6.2	Magnesium und seine Legierungen.....	30
2.6.3	Messing CuZn37	32
2.6.4	Edelstahl X5CrNi18-10.....	32
3	Untersuchungsziele und Methoden	35
4	Experimentelle Randbedingungen	37
4.1	Werkzeuge	37
4.2	Versuchsmaschinen	38
4.3	Messtechnik	39
4.3.1	Erfassung der mechanischen Bauteilbelastungen	39
4.3.2	Bestimmung der Prozesstemperaturen	40
4.3.3	Geometrische Eigenschaften der Fließbohrungen.....	41
4.3.4	Metallographie	41
4.3.5	Erfassung der statischen Tragfähigkeit	41
4.4	Versuchsproben	43
4.5	Versuchsumfang, Versuchsaufbau und –durchführung.....	44
4.5.1	Kunststoffe PA66 und PVC-U	44
4.5.2	Magnesiumknetlegierung AZ31	47
4.5.3	Messing CuZn37	49

4.5.4	Edelstahl X5CrNi18-10	49
5	Fließbohren der Kunststoffe PA66 und PVC-U	53
5.1	Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von PA66	53
5.1.1	Mechanische Werkzeugbelastungen	53
5.1.2	Thermische Werkzeugbelastungen	56
5.1.3	Bohrungsqualität	58
5.1.4	Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde	59
5.1.5	Auszugsfestigkeit der Gewinde.....	61
5.2	Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von PVC-U	62
5.2.1	Mechanische Werkzeugbelastungen	62
5.2.2	Thermische Werkzeugbelastungen	65
5.2.3	Bohrungsqualität	66
5.2.4	Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde	68
5.2.5	Auszugsfestigkeit der Gewinde.....	70
5.3	Prozessoptimierung beim Fließbohren der Kunststoffe	71
5.3.1	Fließbohren des Polyamids PA66 mit modifizierten Werkzeugen	72
5.3.2	Fließbohren des Kunststoffes PVC-U mit modifizierten Werkzeugen.....	76
5.3.3	Veränderung des Prozessablaufs beim Fließbohren.....	80
6	Fließbohren von Leicht- und Buntmetallen	85
6.1	Untersuchungen zur Fließbohrbearbeitung von AZ31	85
6.1.1	Mechanische Werkzeugbelastungen	85
6.1.2	Thermische Werkzeugbelastungen	88
6.1.3	Durchmesser- und Rundheitsabweichungen	90
6.1.4	Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde	94
6.1.5	Auszugsfestigkeit der Gewinde.....	98
6.2	Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von CuZn37	100
6.2.1	Mechanische und thermische Werkzeugbelastungen.....	100
6.2.2	Thermische Werkzeugbelastungen	102
6.2.3	Durchmesser- und Rundheitsabweichungen	103
6.2.4	Längsschnitte der Bohrung und Gewinde	105
6.2.5	Metallografische Untersuchungen der Bohrungsrandzone	106
6.2.6	Auszugsfestigkeit der Gewinde.....	110

6.3	Machbarkeitsuntersuchung von AlSi7Mg.....	111
6.3.1	Fließbohren mit werkstückseitiger Vorerwärmung.....	112
6.3.2	Mechanische Werkzeugbelastungen	113
6.3.3	Durchmesser- und Rundheitsabweichungen	115
6.3.4	Visuelle Beurteilung der Bearbeitungsergebnisse.....	116
7	Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10.....	119
7.1	Problemstellung beim Fließbohren.....	119
7.2	Mechanische Werkzeugbelastungen und Einfluss der Vorbohrung.....	119
7.3	Thermische Bauteilbelastungen.....	127
7.4	Durchmesser- und Rundheitsabweichungen	129
7.5	Längsschnitte der Bohrungen und Gewinde.....	135
7.6	Metallographische Untersuchungen der Bohrungsrandzone	142
7.7	Auszugsfestigkeit der Gewinde	144
7.8	Materialanhaftungen am Werkzeug.....	146
8	Zusammenfassung und Ausblick	149
9	Literaturverzeichnis.....	153

<u>Abkürzungen</u>	<u>Bedeutung</u>
Al	Aluminium
BAZ	Bearbeitungszentrum
CN	Siliziumnitridkeramik auf Siliziumnitridbasis
CNC	Computer Numerical Control
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DoE	Design of Experiments
ED	Einschaltdauer
EN	Europäische Norm
FB	Fließbohren
FEM	Finite-Elemente-Methode
HSK	Hohlschaftkegel
HSS	Schnellarbeitsstahl
HSS-E	kobaltlegierter Schnellarbeitsstahl
HV	Härteprüfung nach Vickers
HW	Hartmetall auf Wolframkarbidbasis
ISF	Institut für Spanende Fertigung
KSS	Kühlschmierstoff
M	Metrisches Gewinde
Mg	Magnesium
Ni	Nickel
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
Si	Silizium
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiN	Titannitrid
TU	Technische Universität
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Zn	Zink

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung
a	mm	Abstand
b	mm	Breite
D	mm	Durchmesser
D _N	mm	Nenndurchmesser
d _{FB}	mm	Durchmesser des eingesetzten Fließbohrwerkzeugs
F _{A,Max}	N	maximale axiale Kraft
F _Z	N	Vorschubkraft
F _{Z,Max}	N	maximale Vorschubkraft
f _B	Hz	Bildrate
f _t	Hz	Abtastrate
H _m	HV0,01	Mittlere Härte nach Vickers
H _{m,G}	HV0,01	Mittlere Härte nach Vickers vom Grundmaterial
l	mm	Länge
L ₁	mm	Länge der Werkzeugspitze
L ₂	mm	Länge des Werkzeugkonus
L ₃	mm	Länge des zylindrischen Werkzeugteils
M _Z	Nm	Drehmoment
M _{Z,Max}	Nm	maximales Drehmoment
p	bar	Druck
P	W	Leistung
t _B	mm	Bohrtiefe
t _{Ge}	mm	Gewindetiefe
t _w	mm	Wandstärke
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
T _G	°C	Glasübergangstemperatur
T _{Max}	°C	maximale Temperatur
T _R	µm	Rundheitsabweichungen
T _{Raum}	°C	Raumtemperatur
T _S	°C	Schmelztemperatur

v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_p	mm/min	Prüfgeschwindigkeit
v_u	m/min	Umfangsgeschwindigkeit
$v_{u.Ge}$	m/min	Umfangsgeschwindigkeit beim Gewindeformen
σ	°	Spitzenwinkel am Fließbohrwerkzeug
ξ	°	Konuswinkel am Fließbohrwerkzeug
ΔD	μm	Durchmesserabweichung
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ_L	μm	Wellenlänge

1 Einleitung

Die technische Innovation ist die treibende Kraft hinter dem Produktivitätsfortschritt. Die vorliegende Arbeit widmet sich der innovativen Entwicklung des noch „jungen“ Fertigungsverfahrens Fließbohren und fasst umfangreiche experimentelle Untersuchungen zusammen. Entstanden ist diese neue Entwicklung des Fließbohrens am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Diese Innovation ermöglicht, in Kombination mit einer anschließenden Gewindebearbeitung, eine lösbare Fügestelle in Form eines Innengewindes am Ende oder in den Verstrebungen eines Flach- bzw. Hohlprofils in zwei Prozessschritten herzustellen. T-Stoß-Verbindungen können mit derartig bearbeiteten Profilen mit Schraubverbindungen realisiert werden, ohne zusätzliche Knotenelemente einzubringen oder andere konstruktive Maßnahmen (z. B. Materialzugaben) zu ergreifen [48].

Das klassische Fließbohren beschreibt ein umformtechnisches Verfahren, bei dem ein dornförmig konisches Werkzeug mit einem definierten Vorschub entlang der Rotationsachse in das Werkstück eingebracht wird. Dabei wird das Werkstück durch die Reibung mit dem Werkzeug erwärmt und thermisch entfestigt. Aufgrund dieser Entfestigung kann der Werkstoff verdrängt werden. Im konventionellen Anwendungsfall werden Durchzüge spanlos in dünnwandigen Bauteilen wie z. B. Rohren oder Blechen erzeugt. Diese einer Bohrung ähnlichen Durchzüge verfügen über eine nutzbare Länge, die deutlich die lokale Materialstärke überschreitet. Ein tragfähiges Innengewinde kann in diese Durchzüge eingebracht werden. Somit entsteht eine hochfeste Verbindungsstelle [91].

Die innovative Entwicklung des Fließbohrens unterscheidet sich von seiner klassischen Anwendung, in dem eine Art geschlossene Bohrung erzeugt wird. Ein konventionelles Fließbohrwerkzeug kommt dabei zum Einsatz. Während des Fließbohrens befindet sich immer Material vor dem Werkzeug. Die Ausformung der Bohrung erfolgt durch lokales Aufweiten des Bauteilmaterials.

Bei der neuen Anwendungsmöglichkeit können die nutzbare Länge und der Durchmesser der Bohrung mehrfach größer als die lokale Materialstärke sein, dies ist auch die wichtige Grundlage und Voraussetzung für die Herstellung eines hochfesten Innengewindes [48]. Durch die Kombination des Fließbohrens mit einem anschließenden spanlosen Gewindeformen werden während des gesamten Prozessablaufes keine Späne produziert, was zu einer effizienten Nutzung des Bauteilmaterials führt.

Es befindet sich eine Vielzahl von Halbzeugen verschiedener Werkstoffe in Form von Profilen oder Hohlprofilen auf dem Markt, deren Enden bzw. Verstärkungsrippen oder Verstärkungsverstrebungen durch das innovative Fließbohren mit Fügstellen versehen und somit flexibel in der Konstruktion eingesetzt werden können. Ein erfolgreicher Einsatz des innovativen Fließbohrens setzt dabei ein grundlegendes Wissen über diese Anwendung voraus. In der vorliegenden Arbeit wird diese technische Innovation des Fließbohrens systematisch untersucht, um grundlegendes Wissen für industrielle Anwendungen zu gelangen.

2 Stand der Technik

2.1 Fließbohren und dessen geschichtliche Entwicklung

Das Fließbohren ist ein spanloses Verfahren zur Bohrungsbearbeitung dünnwandiger Bauteile. Nach VDI 3359 zählt es neben dem Kragenziehen zu den Verfahren zur Herstellung von Durchzügen. Unter einem Blechdurchzug wird eine ringförmige Geometrie mit geschlossenen Rändern am Werkstück verstanden, die durch verschiedene Verfahren hergestellt werden kann [155]. Es handelt sich dabei um eine offene Bohrung am Bauteil.

Abbildung 2-1 stellt das Verfahrensprinzip des Fließbohrens dar. Ein rotierendes, konisches Werkzeug wird in ein dünnwandiges Bauteil gedrückt. Durch die Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück wird Wärme induziert, welche zu einem Herabsetzen der Materialfestigkeit führt. Mit Hilfe der Vorschubbewegung lässt sich ein Durchzug am Bauteil einbringen [148]. Die erzeugte Bohrung kann als Lager-, Löt- oder Schweißbuchse dienen. Bei einer anschließenden Gewindebearbeitung kann eine Verbindungsstelle mit hoher Festigkeit aus einer Fließbohrung erzeugt werden. Die Länge der Bohrung bzw. des Gewindes ist deutlich größer als die lokale Materialstärke. Der Querschnitt eines Fließbohrwerkzeugs ist nicht rund, sondern polygonförmig. Die abgerundeten Ecken im Querschnittsprofil werden als Formstollen bezeichnet.

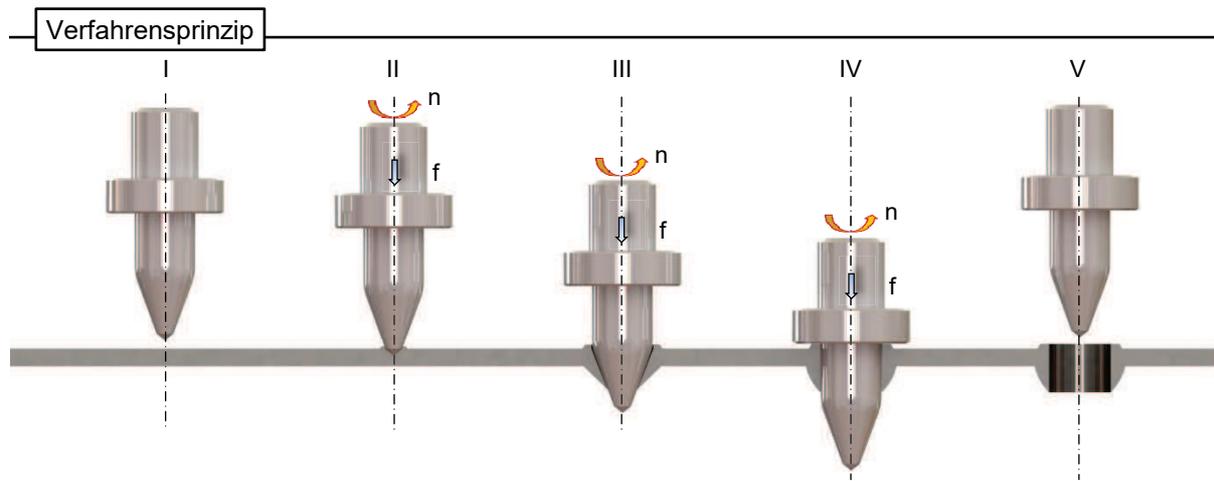


Abbildung 2-1: Bearbeitungsschritte beim Fließbohren [13]

Das Verfahrensprinzip wird in der Literatur unterschiedlich benannt. Anfangs wurde es im englischen Sprachgebrauch als „Method of forming manifolds“ [55], später als „Piercing“ [56] oder „Flowdrilling“ [133] sowie „Friction drilling“ [112] und „Thermdrill“ [118] bezeichnet. Im deutschsprachigen Raum untersuchte Kretschmer zuerst das Verfahren und bezeichnete es als „Fließlochformen“ [91]. Dieser Name wurde von Forschern übernommen und weiter verbreitet [125]. In anderen wissenschaftlichen Abhandlungen [49] sowie in der industriellen Praxis [121] ist ebenfalls der Begriff „Fließbohren“ gebräuchlich.

Aufgrund der ähnlichen Prozessdynamik zum Bohren, bei dem das Werkzeug neben der rotatorischen Hauptbewegung nur eine Vorschubbewegung in Richtung der Werkzeughauptachse aufweist [83], wird der Name „Fließbohren“ in der vorliegenden Arbeit durchgehend verwendet. Das Bearbeitungsergebnis lässt sich als „Durchzug“, „Buchse“ oder

„Bohrung“ bzw. „Fließbohrung“ bezeichnen. Im Vergleich zum Bohren entstehen beim Fließbohren praktisch keine Späne. Die Reibungswärme ist dabei erwünscht, da dies zu einer Temperaturerhöhung im Bauteil und somit zu einer niedrigen Fließgrenze des Werkstoffes führt. Dadurch lassen sich plastische Verformungen bei einer geringen mechanischen Werkzeugbelastung erzeugen [84].

Der Aufbau von Fließbohrwerkzeugen und das Verfahrensprinzip scheinen verhältnismäßig einfach zu sein. Es dauerte allerdings längere Zeit bis zur Etablierung des Verfahrens und Festlegung der Grundgestalt des Werkzeugs. Zur kostengünstigen Anfertigung von Anschlussstellen bei dünnwandigen Bauteilen wurde nach Verfahren und Möglichkeiten gesucht, diese in wenigen Schritten herzustellen. Die Idee, mit Hilfe eines rotierenden Werkzeugs und der Reibungswärme Bohrungen bei Blechen und Rohren spanlos zu erzeugen, kann schon auf die 1920er-Jahre in den USA zurückgeführt werden. Aufgrund der damaligen Technik gab es jedoch kein passendes Material für das Werkzeug, welches der hohen thermischen Belastung standhalten konnte [93]. Daher entstand auch keine wirtschaftliche Anwendung.

1923 entwickelte der Franzose Jean Claude de Valliere auch Werkzeuge, die nach dem beschriebenen Prinzip funktionierten, welche aber ebenfalls aufgrund der geringen Warmfestigkeit frühzeitig versagten [61]. Im Jahr 1929 reichte Winford L. Enghauser in den USA eine Anmeldung eines Patenten zur Herstellung von Gasverteilerrohren ein, welches er vier Jahre später erhielt. Er brachte eine Vorbohrung zuerst mit einem konventionellen Bohrwerkzeug in ein dünnwandiges Rohr ein. Im nächsten Schritt drang ein rotierendes Werkzeug aus gehärtetem Stahl in die Bohrung ein. Durch die Reibungswärme wurde die Vorbohrung weiter plastisch zu einer Buchse ausgeweitet, deren Länge größer als die Wandstärke des Rohres war. Anschließend konnte ein tragfähiges Gewinde in die Buchse eingebracht werden [55]. Enghauser erwähnte in seinem Patent die hohe thermische Belastung. Einen weiteren Beitrag leistete Armand Leroy in Frankreich. Im Jahr 1959 erhielt er ein Patent für ein Werkzeug zum Bohren von Rohren und Blechen [102]. Das von ihm entwickelte Werkzeug verfügte über die Form eines Quadrates mit abgerundeten Ecken im Querschnittsprofil. Diese Gestalt kann als der Prototyp der heutigen Fließbohrwerkzeuge betrachtet werden. **Abbildung 2-2** zeigt Teile der Zeichnungen von den Patenten, die in dieser frühen Phase entstanden.

Ausgehend von dem Patent von Enghauser ließ die Firma The Production Plating in den USA ein Werkzeug zur Erzeugung von Buchsen für Gasverteilerrohre patentieren. Die Werkzeugspitze weist die Gestalt eines konventionellen Spiralbohrers auf. Die Funktionen vom Bohren und Aufweiten der Bohrung wurden in einem Werkzeug integriert. Eine Buchse ließ sich damit in einem Schritt fertigen [62]. Joseph J. Feher entwickelte Werkzeuge, mit denen es möglich war, sowohl Buchsen als auch Innengewinde in einem Schritt in Metallplatten aus Aluminium zu erzeugen. Im Jahr 1969 wurde ihm ein Patent dazu erteilt [58]. Diese Werkzeuge wiesen schon eine ähnliche Gestalt auf wie eine moderne fließlochformende Schraube, bei deren Einsatz das Durchbohren und ein direktes Verbinden von Blechen kombiniert werden kann [45].

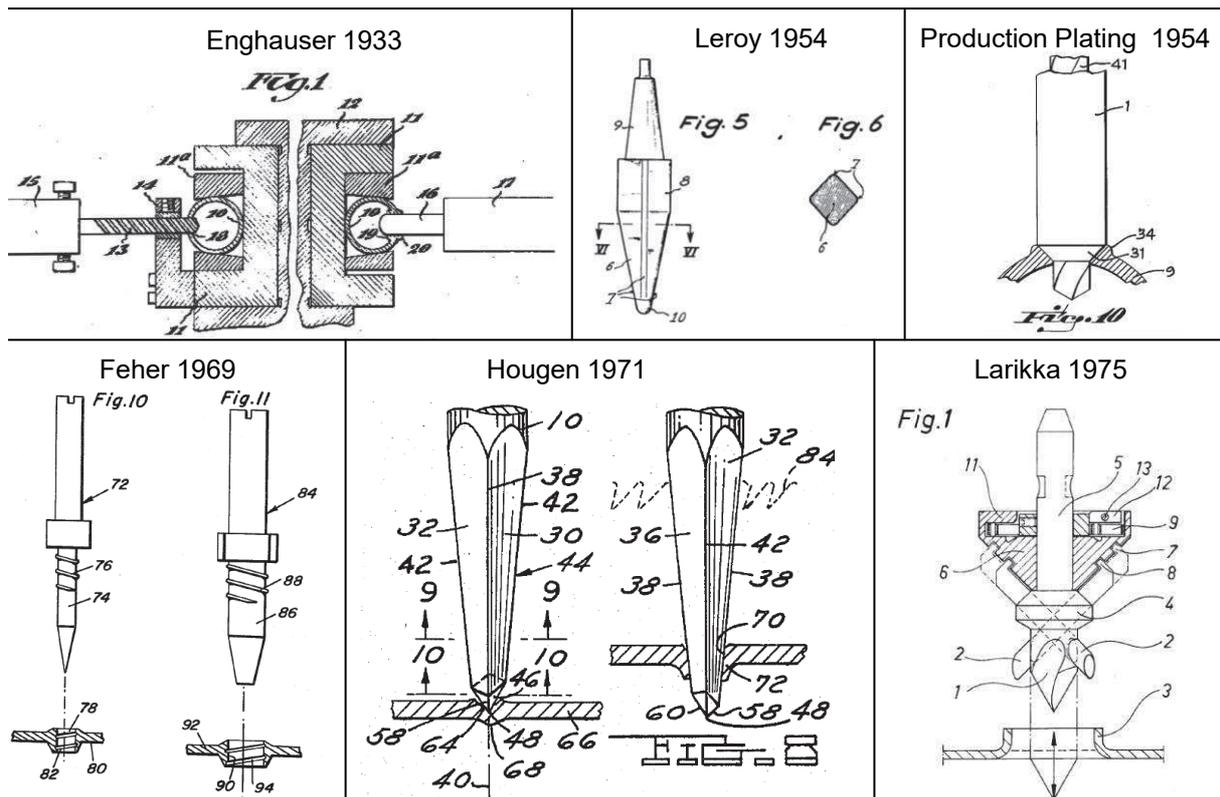


Abbildung 2-2: Übersicht wichtiger Patentzeichnungen I [55, 56, 58, 62, 98, 102]

Des Weiteren bekam die Firma Everett D. Hougen im Jahr 1971 ein Patent für ein Werkzeug aus gehärtetem Schnellarbeitsstahl (HSS), mit dem es möglich war, Bohrungen bis zu einem Durchmesser von $D = 0,25$ Zoll (0,635 cm) in dünnen Blechen aus Kunststoff und Metall umformtechnisch herzustellen. Somit sollte ein geringerer Werkzeugverschleiß gegenüber dem konventionellen Bohren erreicht werden. Das Werkzeug weist eine komplexe, asymmetrische Gestalt im Vergleich zu den bisher entwickelten Werkzeugen auf [56]. Im Jahr 1975 erhielt der Finnländer Leo Larikka ein Patent für einen Apparat zur Herstellung von Rohrabzweigungen. Es wurde so konzipiert, dass das Rohr zuerst vorgebohrt wurde. Die entgegen der Vorschubrichtung gerichtete Buchse wurde dann beim Rückzug des Apparats ausgeformt [98]. Diese Technik ließ sich etablieren und weiter entwickeln. Sie kam zum Einsatz, um Rohrverbindungen kostengünstig herzustellen [134].

Den Durchbruch schaffte der Holländer Johannes Adrianus van Geffen im Jahr 1976. Er erhielt ein Patent für ein Werkzeug aus Hartmetall [149]. Der Querschnitt des konischen und zylindrischen Werkzeugteils verfügten über drei Formstollen. Durch Schleifen konnte die Gestalt gefertigt werden. Beim Einsatz wurde keine Vorbohrung benötigt, um eine Buchse herzustellen. Er arbeitete an weiteren Entwicklungen und erhielt mehrere Patente in den folgenden Jahren. Bei einem Patent im Jahr 1979 gestaltete er Werkzeuge mit Senkschneiden am Kragen, um das gegen die Vorschubrichtung verdrängte Material am Buchseeintritt zerspantechnisch zu entfernen. Somit entstand eine bündige Anschlussfläche am Bauteil, was eine bessere Dichtung garantierte und bei der anschließenden Gewindebearbeitung eine Gratbildung am Werkzeugeintritt verhinderte [151]. Darüber hinaus hatte er im selben Jahr ein Patent für einen elektrohydraulischen Vorschubantrieb für den Prozess auf einer gesteuerten Bohrmaschine bekommen, welches einen wirtschaftlichen Einsatz des Verfahrens

ermöglichte [150]. Van Geffen merkte, dass die Werkzeuge nach mehreren Verwendungen raue Oberflächen aufwiesen und dies sowohl die Oberfläche der erzeugten Bohrungen als auch die Standzeit der Werkzeuge nachteilig beeinflusste. Als Grund nannte er die thermische Belastung im Prozess sowie den daraus resultierenden Spannungsgradienten innerhalb des Werkzeugs. Daher entwickelte er im Jahr 1980 Werkzeuge, welche über einen Hohlraum verfügten [152]. Der Temperaturgradient des Werkzeugs ließ sich damit herabsetzen. **Abbildung 2-3** zeigt einige Skizzen seiner Patente.

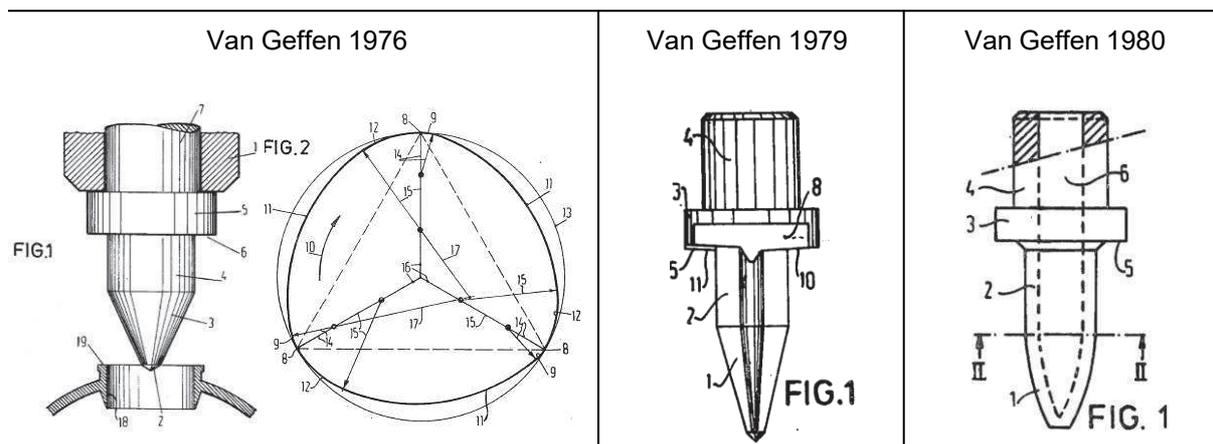


Abbildung 2-3: Übersicht wichtiger Patentzeichnungen II [149, 151, 152]

Ausgehend von dem Patent von Enghauser im Jahr 1933, entwickelte Ward A. Ames neue Werkzeuge zur Bearbeitung von Anschlussstellen in Rohren und erhielt im Jahr 1979 ein Patent dafür [2]. Sein Werkzeug verfügte über einen Bohrer im Bereich der Werkzeugspitze, wodurch eine Vorbohrung spanend erzeugt wurde. Im Anschluss konnte eine Buchse vom konischen Werkzeugteil ausgeformt werden. Außerdem wies das Werkzeug eine polierte Oberfläche im konischen Bereich auf. Dadurch sollten die Materialanhaftungen verringert werden. Er stellte in dem Patent auch eine Konstruktion einer Maschine dar, die für die Durchführung des von ihm entwickelten Verfahrens vorgesehen war.

Im Jahr 1981 stellte Friedrich Karl Hirby in seinem Patent ein Werkzeug dar, welches aus drei Funktionselementen bestand. Die Elemente ließen sich bei Bedarf gegen Ersatz austauschen [74]. So sollte die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessert werden. Im selben Jahr veröffentlichten Head, Jr. et al in einem Patent eine werkstückseitige Erwärmung vor dem Prozess [69]. In einer Vorrichtung wurde die zu bearbeitenden Stellen eines Werkstückes punktuell erwärmt, um den Materialfluss entgegen der Vorschubbewegung des Werkzeugs zu erhöhen. Somit ließ sich die Ausformung der Buchse am Werkzeugeintritt verbessern. Des Weiteren stellten Head, Jr. et al das Abschrecken direkt nach einer Ausformung der Buchse vor, um eine gehärtet Innenoberfläche der Buchse zu erzielen. Der obere Teil der **Abbildung 2-4** stellt diese Entwicklung dar.

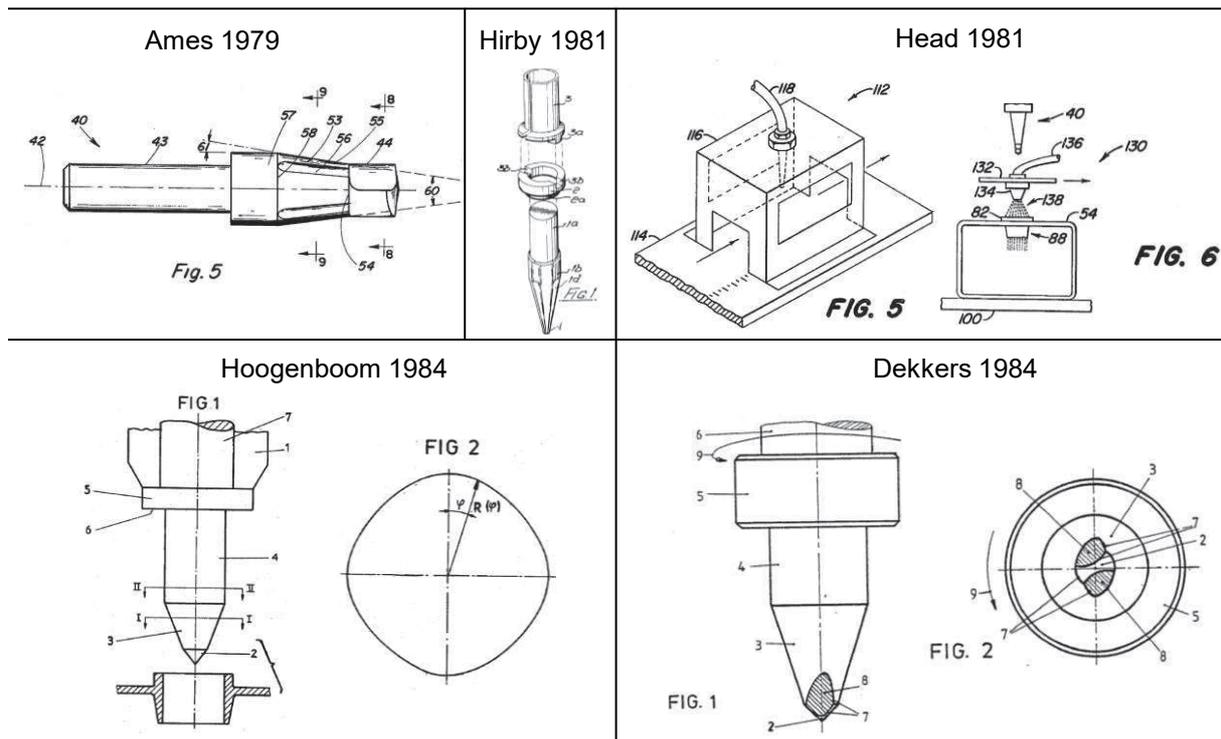


Abbildung 2-4: Übersicht wichtiger Patentzeichnungen III [2, 17, 69, 74, 76]

Auf Basis des Patents von van Geffen stellte Hoogenboom in seinem Patent für die Firma Flowdrill B.V. Werkzeuge vor, mit denen sich Buchsen auch bei Werkstoffen höherer Festigkeit wie Stähle fertigen ließen [76]. Die Kontur des Querschnitts von dem Werkzeug war polygonförmig, welche als eine harmonische Funktion in Polarkoordinaten dargestellt werden konnte. Die Anzahl der Formstollen betrug vier. Diese Gestalt führte einerseits zu einer geringen Materialanhaftung am Werkzeug und andererseits zu einem gleichmäßigen Verschleiß am Werkzeugumfang. Nach seiner Berechnung kann die Anzahl der Formstollen eines Werkzeugs auch drei, fünf oder sechs betragen, allerdings konnten diese Gestalt keine Verbesserungen erzielen. Während sich ein Arbeitsteil mit einer geringen Anzahl von Formstollen als nicht stabil erwies, ähnelte die Gestalt eines Arbeitsteils mit mehr als vier Formstollen sehr einem Kreis, was zu größerer thermischer Belastung führte.

Gerard Johan Dekkers erhielt im Jahr 1984 ein Patent, bei dem das Werkzeug an der Spitze mit Schneiden ausgeführt war [17]. Somit ließ sich die mechanische Belastung bei Bearbeitung von duktilen Werkstoffen wie Aluminium und Kupferlegierungen verringern und ein Einreißen des Buchsenrandes vermeiden. Darüber hinaus konnten Werkzeuge dieser Gestalt bei Werkstücken verwendet werden, bei denen aufgrund einer Beschichtung am Bauteil ein vollständig spanloser Bohrvorgang erschwert oder gänzlich unmöglich war. Verschiedene Beschichtungen, insbesondere galvanische Beschichtungen, konnten einen gezielten punktuellen Wärmeeintrag hemmen, so dass insbesondere das Ansetzen und die Zentrierung des Fließbohrwerkzeugs mit erhöhtem Aufwand einhergingen [157]. Diese Gestalt konnte sich etablieren und wurde industriell eingesetzt. Der untere Teil der Abbildung 2-4 stellt die Patentzeichnungen der erwähnten Entwicklungen dar.

Ab Anfang der 1980er Jahre wurde das Fließbohren auch für industrielle Anwendungen eingesetzt [133]. Das Verfahren wird heute bei der Herstellung von Durchzügen an Bauteilen

eingesetzt, wo lediglich eine einseitige Zugänglichkeit vorliegt. Es wird z. B. bei Werkstücken mit komplexer Gestalt und schwer zugänglichen Bereichen verwendet. Des Weiteren lässt sich das Verfahren als Vorbereitung für eine folgende Innengewindebearbeitung anwenden. Tragfähige Gewindegänge können erzeugt werden, deren nutzbare Tiefe die lokale Materialstärke deutlich überschreitet. Das Einsatzspektrum ist breit. In Automobil- und Zulieferindustrien lässt es sich zur Herstellung von Lötverbindungen in Wärmetauschern [124], Anschlussstellen bei der Kraftstoffleitung sowie Funktionsflächen an Lenksäulen und Gaspedalen einsetzen [60]. Außerdem können Hydraulik-Anschlussstutzen für Schwingungsdämpfer mit dem Verfahren hergestellt werden [72]. Darüber hinaus können mit Gewinde versehene Buchsen an Kühl- und Heizaggregaten, Möbeln sowie Haushalts- und Freizeitgeräten angefertigt werden [65]. Ein mobiler Einsatz des Fließbohrens ist ebenfalls möglich, solange die notwendige Leistung der Maschine sichergestellt werden kann.

2.2 Wissenschaftliche Untersuchungen zum Fließbohren

Neben den zahlreichen Erfindungen tragen wissenschaftliche Untersuchungen dazu bei, den Fließbohrprozess zu verstehen und das Einsatzgebiet des Verfahrens ständig zu erweitern. Grundlegendes Wissen über das Verfahren wurde angesammelt. Im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren ist das Fließbohren noch ein „junges“ Verfahren. Es liegt momentan lediglich eine geringe Anzahl wissenschaftlicher Artikel zu dem Thema vor. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigste Literatur zum Fließbohren chronologisch vorgestellt. Dabei handelt es sich um Erkenntnisse zu verschiedenen Werkstoffen. Die Literatur liefert wichtige Referenzen und Anhaltswerte für die Untersuchungen, die in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden.

Im Jahr 1977 erschien ein Artikel von Kretschmer zum Thema Fließlochformen von Stahlblechen. Er stellte das Verfahren als eine wirtschaftliche Ersatzmöglichkeit zur Herstellung von Durchzügen bei ungünstiger Zugänglichkeit des Bauteils dar, wenn die konventionelle Methode schwer anzuwenden war. Als wichtige Einstellgrößen nannte er die Drehzahl und die Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs. Die eingesetzte Handbohrmaschine zum Fließbohren musste auch das benötigte Drehmoment zur Ausformung des Durchzugs bereitstellen [92].

Kretschmer untersuchte das Fließbohren weiter und veröffentlichte im Jahr 1980 seine Dissertation mit dem Titel „Ein Beitrag zum Fließlochformen von Blechdurchzügen“. Er befasste sich speziell mit der Kinematik des Verfahrens, welche noch unbekannt in der damaligen Zeit war. Er verwendete eine Tischbohrmaschine für seine experimentellen Untersuchungen. Die im Prozess auftretenden Kräfte und Drehmomente wurden werkstückseitig aufgenommen. Seine Werkzeuge verfügten über einen Spitzenwinkel von $\sigma = 90^\circ$ und einen Konuswinkel von $\xi = 45^\circ$. Die Querschnittsform der Werkzeuge war 3-polygonförmig. Als Versuchskörper wurden Vierkantrohre unterschiedlicher Wandstärke von $t_w = 1,5 \dots 2$ mm aus den Stählen S235JR bis S275JR verwendet. Nach Kretschmer setzt sich die nötige Arbeit zum Fließbohren aus der Rotationsarbeit und der Translationsarbeit zusammen. Während die Rotationsarbeit für die Erwärmung des Werkstücks und das Herabsetzen der Fließgrenze des Werkstoffes sorgt, ist die Translationsarbeit für die vollständige Umformung des Werkstücks zum Durchzug verantwortlich. Zur rechnerischen

Ermittlung der Translationsarbeit entwickelte Kretschmer ein Modell, welches auf dem Röhrenmodell der elementaren theoretischen Plastomechanik basierte. Kretschmer erkannte, dass die Rotationsarbeit um den Faktor 300 größer als die Translationsarbeit sein kann [91].

Des Weiteren bestimmte er die maximale Prozesstemperatur am Werkstück experimentell, weil sich diese Größe direkt auf die Fließgrenze des Werkstoffes auswirkt und somit die mechanische Belastung während des Prozesses beeinflusst. Zunächst kamen Thermocolor-Messfarben zum Einsatz, welche auf die Bearbeitungsstelle aufgetragen wurden. Durch eine Farbänderung, die sich nur beim Erreichen einer bestimmten Temperatur ergibt, lässt sich die maximal auftretende Temperatur grob bestimmen. Farbänderungen an der Seite des Materialaufwurfs wurden ausgewertet und anhand der Ergebnisse ließen sich Temperaturen grob in einem Bereich von $T = 560 \dots 715 \text{ °C}$ bestimmen. Diese Methode erwies sich jedoch als ungenau für die Bestimmung der Temperatur, da die erwärmte Fläche am Bauteil sehr gering und damit die Beobachtung der Farbeänderung schwierig war. Neben Messfarben setzte Kretschmer auch Infrarotstrahlungs-pyrometer zur Bestimmung der Temperatur ein. Mit dem Gerät konnten jedoch auch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Als Grund nannte er den Abstrahlwinkel des Bereiches zum Messgerät, welcher sich aufgrund der Umformung ständig ändert und somit zu einem ändernden Emissionsgrad führt, welcher vor der Messung aber als Festwert am Gerät eingestellt wurde. Kretschmer griff schließlich auf eine kombinierte Methode zur Bestimmung der Temperatur zurück. Es wurde die untere Temperaturgrenze an einer definierten Stelle um den Durchzug mit Hilfe von Thermoelementen bestimmt. Die obere Temperaturgrenze wurde mithilfe von mathematischen Berechnungen, bei denen die ermittelte Translations- und Rotationsarbeit herangezogen wurden, bestimmt [91]. Diese Messmethode wurde in weiteren Fachaufsätzen von Kretschmer konkretisiert [95].

Kretschmer stellte auch fest, dass Gewinde mithilfe des Gewindeformens (Gewindefurchens) in die Buchse eingebracht werden konnten. Da damals noch keine Norm für Gewindeformwerkzeuge existierte, hatte er diese nach Normen für Gewindebohrer fertigen lassen. Anhand der damaligen Norm DIN 267 (heute DIN EN 20898-2 Teil 4) wurden die in den Buchsen geformten Gewinde geprüft und diese erfüllten die Anforderungen der Norm [91]. Kretschmer erkannte das Potenzial der Kombination von Fließbohren und Gewindeformen und schrieb einen weiteren Artikel mit dem Titel: „Furchen von Gewinde in fließlochgeformten Durchzügen bei dünnen Werkstücken“. Er untersuchte das Gewindeformen der fließgebohrten konischen und zylindrischen Durchzüge, die mit Hilfe verschiedener Ausführungen von Fließbohrwerkzeugen erzeugt wurden. Dabei entdeckte er, dass besser ausgeformte Gewindeprofile bei konisch ausgeformten Durchzügen erreicht wurden. Aufgrund der umformtechnischen Gewindebearbeitung ließ sich eine Härtesteigerung im Gewinde erzielen. Daher verfügen die Gewinde über eine hohe Festigkeit [94]. Kretschmer erforschte auch die Einsatzmöglichkeit des Fließbohrens bei Aluminiumwerkstoffen und veröffentlichte diese im Jahr 1987 [96]. Er erkannte, dass Aufschweißungen beim Fließbohren von Aluminium durch den Einsatz eines Trennmittels zum Teil verhindert werden können.

Streppel et al. stellten im Jahr 1983 einen Fachaufsatz zum Fließbohren vor. Er bezeichnete die thermomechanischen Belastungen beim Fließbohren für den Werkzeugverschleiß verantwortlich. Mit einer Beschichtung ließ sich der Oxidationsverschleiß des Werkzeugs zum Teil verhindern. Dies hat aber nur einen geringen Einfluss auf die Standzeit des Werkzeugs [133].

Im Jahr 1991 wurde das Fließbohren von Kunststoffen von Crawford vorgestellt [15]. Crawford verwendete modifizierte Werkzeuge aus gehärtetem Stahl. Er stellte fest, dass die Parameterkombination zum Fließbohren der verschiedenen Kunststoffe auch an deren thermische Eigenschaften angepasst werden muss, damit der Werkstoff nicht schmilzt. Crawford bestimmte auch die Prozesstemperatur beim Fließbohren von Kunststoffen. Dabei ließen sich gute Bearbeitungsergebnisse bei ca. $T = 100\text{ °C}$ erzielen [15].

An der Universität Kassel wurden umfangreiche Forschungen zum Thema Fließbohren durchgeführt. Tikal und Heiler schrieben im Jahr 1994 einen Fachaufsatz zum Fließbohren von Stahl-Hohlprofilen aus dem Werkstoff St37 (Heute S235JR). Es wurde untersucht, ob die in die fließgebohrten Buchsen geformten Gewinde herkömmliche Schrauben-Mutter-Verbindungen ersetzen könnten. Mit Hilfe des Fließbohrens ließen sich Vorbohrungen für Gewindegröße M20 bei einer Wandstärke bis zu $t_w = 12,5\text{ mm}$ erzeugen. Die Ergebnisse der Auszugsversuche zeigen, dass die Belastbarkeit der Gewinde in den Buchsen nicht nur die Anforderung der Norm erfüllten, sondern oberhalb einer Wandstärke von $t_w = 6\text{ mm}$ übertroffen werden [139]. Tikal et al. untersuchten auch das Fließbohren von austenitischen Edelstählen. Beim Fließbohren des Edelstahl 1.4301 (X5CrNi18-10) ergab sich eine deutlich größere mechanische Belastung als bei Baustahl. Als Grund wurden die niedrige Wärmeleitfähigkeit und höhere Warmfestigkeit des Edelstahl gegenüber dem Baustahl genannt [141]. Im Jahr 1997 veröffentlichten Tikal et al. einen weiteren Fachaufsatz zum Fließbohren und anschließendem Gewindeformen in Stahl St37 im Bereich der Wandstärke von $t_w = 1,5 \dots 5\text{ mm}$. Das maximale Anzugsdrehmoment der Gewinde wurde mit Hilfe eines Drehmomentschlüssels ermittelt, um ein sicheres Anziehen der Schraube ohne eine Beschädigung des Gewindes zu zusichern [145]. Neben Stählen erforschte Tikal das Fließbohren der Aluminiumknetlegierung EN-AW 6060. Es stellte sich heraus, dass hohe Werkzeugdrehzahlen ein entscheidendes Kriterium sind, um hohe Durchzugsqualitäten zu erreichen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumwerkstoffs ließen sich Durchzüge erst ab einer Grenzdrehzahl erzeugen [140]. Des Weiteren erforschten Tikal et al. die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens bei Bearbeitung von Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen. Dabei kamen Werkzeuge mit einem verlängerten zylindrischen Teil und einer modifizierten Querschnittsform zum Einsatz [147]. In einem weiteren Fachaufsatz beschrieben Tikal et al., dass auf Basis seiner Ergebnisse beim Fließbohren der Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen weitere entwickelte Werkzeuge zum Einsatz kamen, die über einen Drall verfügen. Somit ließen sich die Bearbeitungsergebnisse optimieren, da der Anteil des in und entgegen der Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens gesteuert werden konnte [146].

Heiler beschäftigte sich mit dem Fließbohren an der Universität Kassel und veröffentlichte seine Dissertation im Jahr 1999. Er untersuchte experimentell den Einsatz des Fließbohrens

mit anschließendem Gewindeformen zum Erzeugen auszugsfester Gewindebuchsen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen. Als Werkstoffe kamen die Aluminiumlegierung EN AW-6060, der austenitische Edelstahl X5CrNi18-10 und der Baustahl St37 (S235JR) in Form von Blechstreifen zum Einsatz. Es wurden Werkzeuge aus Hartmetall verschiedener Ausführung eingesetzt, welche über einen Spitzenwinkel von $\sigma = 90^\circ$ und einen Konuswinkel von $\xi = 45^\circ$ verfügten. Größere Wandstärken führten zu einer erhöhten mechanischen Werkzeugbelastung beim Fließbohren des Edelstahls X5CrNi18-10, welche in Form der Vorschubkraft sowie des Drehmoments gemessen wurden. Heiler stellte auch fest, dass das maximale Drehmoment mit erhöhter Drehzahl abfällt und mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit leicht ansteigt. Eine höhere Drehzahl führte zu einer Temperaturerhöhung, welche die Materialfestigkeit weiter herabsetzte. Eine höhere Vorschubgeschwindigkeit verringerte hingegen die erzeugte Wärmemenge, so dass der Werkstoff einen höheren Umformwiderstand dem Werkzeug entgegensetzte. Neben den mechanischen Belastungen beim Fließbohren untersuchte Heiler auch die Prozesstemperaturen und die Mikrostrukturänderung der Bohrungsrandzone. Er beobachtete, dass sich beim Fließbohren des Edelstahls aufgrund der hohen Temperaturen eine dünne Oxidationsschicht an der Randzone der Bohrungswand bildet, welche die Korrosions-beständigkeit des Werkstoffs nachteilig beeinflusst. Er zeigte auch, dass sich die Oxidation durch den Einsatz einer schützenden Atmosphäre beim Fließbohren verhindern lässt. Er untersuchte zudem auch den Einsatz gestufter Vorschubgeschwindigkeiten und Drehzahlen, um einerseits verkürzte Fertigungszeiten zu erreichen, andererseits deren Einfluss auf den Prozess und den erzeugten Durchzug zu ermitteln. Darüber hinaus untersuchte er das Gewindeformen der fließgebohrten Bohrungen verschiedener Werkstoffe. Auch Heiler konnte feststellen, dass ein besseres Gewindeprofil bei konischen Durchzügen erzeugt wurde. Heiler untersuchte auch die Schwingfestigkeit fließgeformter Gewindebuchsen der Größe ISO-Regelgewinde M10 in Baustahl St 37, welche bei einer ausreichenden Materialstärke die Dauerfestigkeit konventioneller Verbindungen erreichte [71].

Lopes erforschte das Fließbohren an der Universität Kassel. Er promovierte im Jahr 1999 und veröffentlichte seine Dissertation mit dem Titel: „Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des Fließlochformens“. Er verfolgte eine Verbesserung der Werkzeuge zum Fließbohren, um Nachteile eines Hartmetallwerkzeugs wie verstärkte Materialanhaftungen an der Werkzeugoberfläche und die geringe Temperaturbeständigkeit zu vermeiden. Er führte Untersuchungen sowohl mit Werkzeugen verschiedener Hartstoffe als auch mit beschichteten Hartmetallwerkzeugen (TiAlN, Titanaluminiumnitrid) durch und verglich deren Einsatz mit denen des Hartmetalls. Als Werkzeugwerkstoff wurden Aluminiumoxid, Cermet und Siliziumnitrid verwendet. Der Stahl St12 (DC01) kam als Versuchswerkstoff mit Wandstärken von $t_w = 2 \dots 3$ mm zum Einsatz. Aluminiumoxid ist gemäß Lopes Ergebnissen nicht als Werkzeugmaterial zum Fließbohren von Stahl geeignet, weil die Biege- und Bruchfestigkeit sowie der E-Modul des Werkzeugmaterials gering sind und diese zum schnellen Versagen des Werkzeugs führen. Er schließt aber einen Einsatz dieses Materials beim Fließbohren in dünne Bleche aus leicht umformbaren Werkstoffen wie Kupfer oder Messing nicht aus. Nach Lopes ergaben sich größere Maximaltemperaturen und kleinere Drehmomente mit Werkzeugen aus Cermet im Vergleich zu Hartmetallwerkzeugen. Die im Prozess auftretenden maximalen Vorschubkräfte variieren dabei mit der Materialstärke. Lopes

stellte heraus, dass Werkzeuge aus Siliziumnitrid eine geringere Adhäsion aufweisen. Zufriedenstellende Ergebnisse mit diesem Werkzeugwerkstoff lassen sich aufgrund von vorzeitigen Ausfällen durch Werkzeugbruch schwer erzielen. Nach seinen Ergebnissen begünstigt die Hartstoffbeschichtung TiAlN eines Fließbohrwerkzeugs aus Hartmetall eine geringe Adhäsion im Vergleich zu einem unbeschichteten Werkzeug, da die Beschichtung eine niedrige Affinität zum Werkstückmaterial aufweist. Jedoch erfolgt der Verschleiß der Beschichtung insbesondere im Bereich der Werkzeugspitze infolge der dort auftretenden hohen Temperatur, welche die Einsatztemperatur der Beschichtung überschritt, sehr schnell. Lopes weist darauf hin, dass die untersuchten alternativen Werkzeugmaterialien trotz eines frühzeitigen Versagens über großes Optimierungspotenzial verfügen. Dazu ist eine Anpassung der Werkzeuggestalt an die thermomechanischen Materialeigenschaften erforderlich [106].

Im Jahr 2005 veröffentlichte Gies an der Universität Kassel seine Dissertation mit dem Titel: „Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE“. Die Schwerpunkte seiner Arbeit liegen in einer systematischen Parameteridentifikation der Prozesseinflussgrößen beim Fließbohren mithilfe statistischer Versuchs- und Methodenplanung, um die Grundlage für eine anwendungsorientierte Werkzeugentwicklung zu schaffen. Als Einflussgrößen wurden die Werkzeuggeometrie, die Oberflächengüte, das Material des Werkzeugs, die Bearbeitungsparameter sowie der Werkstückwerkstoff und dessen Geometrie definiert. Der Werkstoff S355 J2G3 kam in Form von Streifen mit einer Blechdicke von $t_w = 2...3$ mm zum Einsatz. Gies erkannte, dass die Umfangsgeschwindigkeit, welche maßgeblich die Umformeigenschaften des Werkstückes und die mechanischen Eigenschaften der Fließbohrungen bestimmt und auch den größten Einfluss auf die Prozesstemperatur hat. Des Weiteren untersuchte er intensiv den Einfluss verschiedener Werkzeuggestalten auf das Fließbohren und die erzeugten Bohrungen. Werkzeuge mit asymmetrischer Formstollenverteilung sowie mit wendelförmig umlaufenden Formstollen wurden zum Versuchszweck entwickelt und verwendet. Gies stellte heraus, dass die erzeugte Buchsenlänge durch den Einsatz gedrahter Fließbohrer über die Variation der Bearbeitungsparameter hinaus beeinflusst werden kann. Mit einem positiven in Werkzeugdrehrichtung gerichteten Drallwinkel können sowohl die Buchsenlänge als auch der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffanteil vergrößert werden. Hingegen begünstigt ein negativer Drallwinkel den entgegen der Vorschubrichtung fließenden Materialanteil. Somit ließen sich Materialanteile in beiden Richtungen anwendungsgerichtet gezielt steuern. Gies testete auch die Einsatzmöglichkeit alternativer Werkzeugwerkstoffe, indem Werkzeuge aus Siliziumnitrid verschiedener Hersteller angefertigt und zum Fließbohren eingesetzt wurden. Ähnlich zu den Ergebnissen von Lopes weisen seine keramischen Werkzeuge geringere Aufschweißungen an der Werkzeugoberfläche auf. Die geringe Standzeit und die hohen Anschaffungskosten der Werkzeuge lassen allerdings keinen industriellen Einsatz zu [65].

Neben Stählen untersuchte Ramsay an der Universität Kassel experimentell das Fließbohren und Gewindeformen von dünnen Blechen und Rohren aus Kupfer und Kupferlegierungen. Er fasste seine Ergebnisse in seiner im Jahr 2009 veröffentlichten Dissertation zusammen. Das Hauptziel seiner Untersuchung war die Ermittlung günstiger Bearbeitungsparameter für das Fließbohren von dünnwandigen Bauteilen aus Kupfer und dessen Legierungen. Solche

Bauteile können zum Bauen von Wärmetauschern verwendet werden. Nach Ramsay sollen kurze Buchsen mit minimalen Einrissen und Graten durch Fließbohren erzeugt werden, weil diese einen geringen Widerstand gegen den Durchfluss der Flüssigkeit aufweisen. Um eine kurze Buchsenlänge zu erzielen, brachte Ramsay eine Vorbohrung in das Werkstück ein. Somit lässt sich weniger Material in Vorschubrichtung verdrängen und es bilden sich kurze Buchsen. Ramsay stellte auch heraus, dass der Zinkanteil bei Messing einen großen Einfluss auf die Ausformung der Buchsen hat. Während hohe Drehzahlen bei einem hohen Zinkanteil zu besseren Buchsenqualitäten führen, reicht eine niedrige Drehzahl bei einem niedrigen Zinkanteil der Legierung aus. Blei als Legierungselement verhindert die Ausformung guter Fließbohrungen. Ramsay erkannte auch thermomechanisch bedingte Gefügeänderungen in der Bohrungsrandzone nach dem Fließbohren [124].

Miller befasste sich ebenfalls mit dem Thema Fließbohren. Seine Untersuchungen deckten dabei ein breites Werkstoffspektrum ab. Im Jahr 2005 untersuchte er die Fließbohrbearbeitung von spröden Gusswerkstoffen [112]. Dabei untersuchte er die Möglichkeit, Durchzüge bei Raumtemperatur mithilfe des Fließbohrens in die Aluminiumgusslegierung AlSi9Cu3 sowie die Magnesiumgusslegierung AZ91 einzubringen. Aufgrund der geringen Duktilität der Gusswerkstoffe wiesen die Durchzüge starke Einrisse auf. Miller testete ebenfalls eine werkstückseitige Erwärmung zur gezielten Beeinflussung der Materialeigenschaften der Aluminiumgusslegierung. Dadurch traten weniger Einrisse im Durchzug auf [112]. Miller et al. untersuchten Mikrostrukturänderungen, die durch das Fließbohren in Aluminium und Titan entstanden [110]. Diese Ergebnisse erschienen auch in seiner Dissertation mit dem Titel: „Experimental Analysis and Numerical Modeling of the Friction Drilling Process“, welche im Jahr 2006 veröffentlicht wurde [109]. Neben grundlegenden experimentellen Untersuchungen der thermomechanischen Belastungen beim Fließbohren setzte Miller Simulationstechniken ein. Er entwickelte ein FEM-Modell, welches auf der Basis der gemessenen thermomechanischen Belastungen, der Werkstoffeigenschaften und der umgerechneten Spannungen in der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück aufgebaut ist. Nach Miller können Vorschubkraft und Drehmoment mit dem Modell abgeschätzt werden [111].

Lee et al. stellte im Jahr 2007 das Fließbohren von einer Nickelbasislegierung IN-713LC vor [100]. Die Bohrungsrandzone wurde untersucht. Er fand heraus, dass die beim Gießen entstehenden Mikroporen im Gegensatz zum Zerspanprozess keinen Einfluss auf das Fließbohren haben. Die Poren lassen sich von den beim Fließbohren induzierten thermomechanischen Belastungen verschließen. Dieser Effekt ist primär von der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs abhängig. Eine Härtesteigerung lässt sich in der Bohrungsrandzone feststellen, welche durch eine schnelle Abkühlung nach dem Prozess entstand [100]. Chow et al. stellte im darauf folgenden Jahr einen Fachaufsatz zum Fließbohren von dem Edelstahl X5CrNi18-10 vor. Auch er konnte eine Härtesteigerung in der Bohrungsrandzone feststellen, welche durch das Fließbohren hervorgerufen wurde [99]. Im Jahr 2009 stellte Lee et al. das Fließbohren in Edelstahl X5CrNi 18-10 mit beschichteten Werkzeugen (TiAlN und AlCrN) vor [99]. Als Referenz verwendete er auch unbeschichtete Werkzeuge zum Fließbohren. Seine Ergebnisse zeigen, dass sich höhere Temperaturen beim Einsatz von beschichteten Werkzeugen ergeben, weil TiAlN und AlCrN eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als das Substrat Hartmetall besitzen und somit eine wärmeisolierende

Wirkung aufweisen. Mit steigender Anzahl von Bohrungen tritt schnell der Verschleiß der Beschichtung ein. Dadurch unterscheiden sich die maximalen Temperaturen beim Fließbohren mit beschichteten- und unbeschichteten Werkzeugen geringfügig. Lee stellte fest, dass der Verschleiß aller Werkzeuge mit zunehmender Anzahl der Bohrungen steigt. Beschichtete Werkzeuge weisen geringeren Verschleiß auf als unbeschichtete Werkzeuge. AlCrN ist dabei verschleißbeständiger als TiAlN [99].

In den letzten Jahren wurde im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs Transregio 10 „Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen“ das Fließbohren von verbundstranggepressten Aluminiumprofilen am Institut für Spanende Fertigung der Technischen Universität Dortmund systematisch erforscht. Die wesentlichen Ziele des Teilprojekts waren die Gestaltung flexibler und kleinserientauglicher Prozesse für die wirtschaftliche Fertigung von qualitätsgerechten Funktionselementen in verstärkten und unverstärkten Aluminiumprofilen, von Profilenden sowie den entsprechenden Verbindungselementen [125]. Die Forschungen erweitern das Einsatzgebiet des Fließbohrens auf Leichtbauverbundwerkstoffe. In Flachprofile aus der Aluminiumlegierung EN AW-6060 wurden Stahldrähte (aus Edelstahl X5CrNi18-10) zur Erhöhung der Festigkeit beim Strangpressen in Pressrichtung eingebettet. Diese Drähte stellen eine Schwierigkeit aufgrund der inhomogenen Werkstoffeigenschaften bei einem spanenden Prozess dar, wenn diese vom Werkzeug bearbeitet werden. Das Fließbohren kann als ein alternatives Verfahren für die Bearbeitung eines Kernlochs angesehen werden, in welches ein Innengewinde eingebracht werden kann. Unter Anwendung der Verfahren Gewindebohren, Gewindefurchen und Gewindefräsen in Kombination mit dem Fließbohren wurde die Eignung des jeweiligen Verfahrens experimentell untersucht. Im Jahr 2009 stellte Engbert das Fließbohren von stahlverstärkten, stranggepressten Aluminiumprofilen dar [50]. Tragfähige Kernbohrungen für eine Gewindegröße von ISO-M10 lassen sich erzeugen. Er definierte anhand der Lage der Bohrungsachse zu den Verstärkungselementen drei Bohrungsanordnungen: Mittig, zwischen Verstärkungselementen und ohne Verstärkungselement (unverstärktes Aluminium). Bei der Anordnung mittig wurde das Verstärkungselement von der Werkzeugspitze durchgetrennt, während bei der Anordnung zwischen Verstärkungselement die Mantelfläche von zwei Verstärkungsdrähten vom Fließbohrwerkzeug bearbeitet wurde, da der Abstand zwischen zwei Drähten geringfügig kleiner war als der Werkzeugdurchmesser. Mechanische Bauteilbelastungen wurden experimentell ermittelt. Engbert stellte fest, dass mit dem Fließbohren Durchzüge bei solchen Profilen eingebracht werden können und die Länge der Durchzüge die lokale Materialstärke übersteigt. Außerdem erkannte er, dass die Bohrungsanordnung Einfluss auf die erzeugten Durchzüge haben. Insbesondere bei der mittigen Anordnung wurde der Stahldraht vor der Trennung aus seiner ursprünglichen Position verdrängt und beeinflusst dadurch die Güte der Bearbeitung stark [50]. Darüber hinaus führt die Bearbeitung verschiedener Bohrungsanordnungen zu unterschiedlichen maximalen Vorschubkräften. Die größten Vorschubkräfte ergeben sich beim Fließbohren der mittigen Bohrungsanordnung, weil in dem Fall neben dem Aluminium auch der Stahldraht Widerstand gegen das Eindringen des Fließbohrwerkzeugs leistet [50].

Engbert untersuchte weiter die Gewindebearbeitung bei fließgebohrten Buchsen an den stahlverstärkten Aluminiumprofilen. Er stellte den Einsatz drei verschiedener Gewindebearbeitungsverfahren vor, in dem das Gewindebohren, Gewindeformen sowie Gewindefräsen zur Erzeugung höherfester Fügestellen verwendet wurden [53]. Mit den erwähnten Verfahren lassen sich Innengewinde erfolgreich in die unterschiedlichen Bohrungsanordnungen einbringen. Er stellte fest, dass sich Stahldrähte beim Gewindeformen aufgrund ihrer unterschiedlichen Festigkeit zum Matrixwerkstoff negativ auf die Ausformung der Gewindespitze auswirkten, wenn sie von dem Gewindewerkzeug bearbeitet wurden. Mit spanenden Gewindeherstellungsverfahren wie Gewindebohren und Gewindefräsen lassen sich die Verstärkungsdrähte besser bearbeiten. Zur Festigkeitsuntersuchung der Gewinde wurden Gewindeauszugsversuche durchgeführt. Ergänzend stellte Engbert die Festigkeit der Gewinde dar, deren Kernlöcher in diesem Fall durch Zirkularfräsen erzeugt wurden, um den Einfluss der Vorbohrungen zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die geformten Innengewinde auch hier bei allen Bohrungsanordnungen die höchste Festigkeit aufweisen. Die durch Fließbohren gewonnene lokale Wandstärkenerhöhung trägt zu einer zunehmenden Gewindefestigkeit bei [53].

Des Weiteren erforschte Engbert die durch thermische Belastung beim Fließbohren induzierte Mikrostrukturänderung der verstärkten Profile [52, 54]. Er stellte Gefügebilder der Fließbohrungen und Gewinde einer Bohrungsanordnung (Ohne Verstärkungselement) in Hinblick auf die Gewindebearbeitungsverfahren dar. Durch das Fließbohren entsteht eine neue Gefügestruktur, die sich stark von dem Grundgefüge des Werkstoffs unterscheidet. Diese Struktur wurde durch die anschließende Gewindebearbeitung weiter verändert. Das Gewindeformen wirkt sich infolge der Umformung am stärksten auf das neu gebildete Gefüge aus [52]. Er bestimmte darüber hinaus die Prozesstemperaturen mit Hilfe einer Wärmebildkamera [54].

Modernes Strangpressen ermöglicht eine komplexe Gestaltung innerhalb eines Hohlprofils, welche die mechanischen Eigenschaften gezielt ändern kann. Durch Schraubverbindungen lassen sich derartiger Profile zu einer Rahmenstruktur zusammenbauen oder Anbauteile montieren. Neben Flachprofilen untersuchte Engbert die Einsatzmöglichkeit des Fließbohrens bei stranggepressten Mehrkammerhohlprofilen zur Vorbereitung einer Fügestelle [51]. **Abbildung 2-5** zeigt die entstandenen Fließbohrungen und Gewinde. Neben der einfachen Flachwand des Mehrkammerprofils versuchte er, durch das Fließbohren Kernlöcher für Gewinde in Verstrebungen zu integrieren. Diese Art des Fließbohrens unterscheidet sich von allen bisher vorgestellten Forschungen, da sich stetig Material vor der Werkzeugspitze befindet. Es bilden sich keine Durchzüge mehr, sondern geschlossene Bohrungen. Allerdings kann es aufgrund der begrenzten Drehzahl der eingesetzten Versuchsmaschine zu Fehlstellen in der Bohrungswand führen [51]. Mit deutlich erhöhter Drehzahl lassen sich geschlossene Bohrungswände ausformen [48].

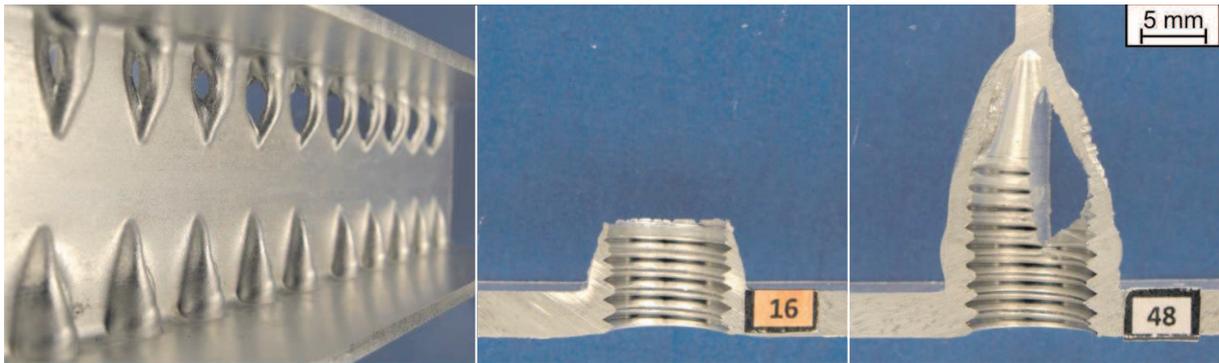


Abbildung 2-5: Fließbohren von Mehrkammerprofilen [51]

Derartiges Fließbohren bietet die Möglichkeit, Fügestellen am Profilende oder in Verstärkungsrippen eines Werkstücks zu integrieren. Es ergibt sich eine völlig neue Anwendungsmöglichkeit für Konstruktion und Fertigungstechnik. Engbert erkannte das Potenzial der neuen Anwendung und erforschte es weiter. Im Jahr 2011 veröffentlichte Engbert seine Dissertation mit dem Titel: „Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen“. Er stellte, neben dem Fließbohren von verstärkten Profilen und Mehrkammerhohlprofilen, auch seine systematische Forschung der innovativen Anwendung des Fließbohrens vor [48]. Engbert setzte Flachprofile verschiedener Wandstärken von $t_w = 4 \dots 8$ mm zum Fließbohren ein. Er untersuchte die Zusammenhänge zwischen Parameterkombinationen, Wandstärken sowie deren Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse. **Abbildung 2-6** zeigt das Verfahrensprinzip beim innovativen Fließbohren sowie die durch diese Weise am Profilende erzeugten Fügestellen. Im Vergleich zum konventionellen Fließbohren wird das Material des dünnwandigen Werkstücks im Prozess von dem Fließbohrwerkzeug radial so aufgeweitet, dass eine geschlossene Bohrungswand ausgeformt werden kann. Während des Fließbohrens befindet sich immer Material vor dem Werkzeug. Nach dem Fließbohren lässt sich ein Innengewinde in die erzeugte Bohrung einbringen [48].

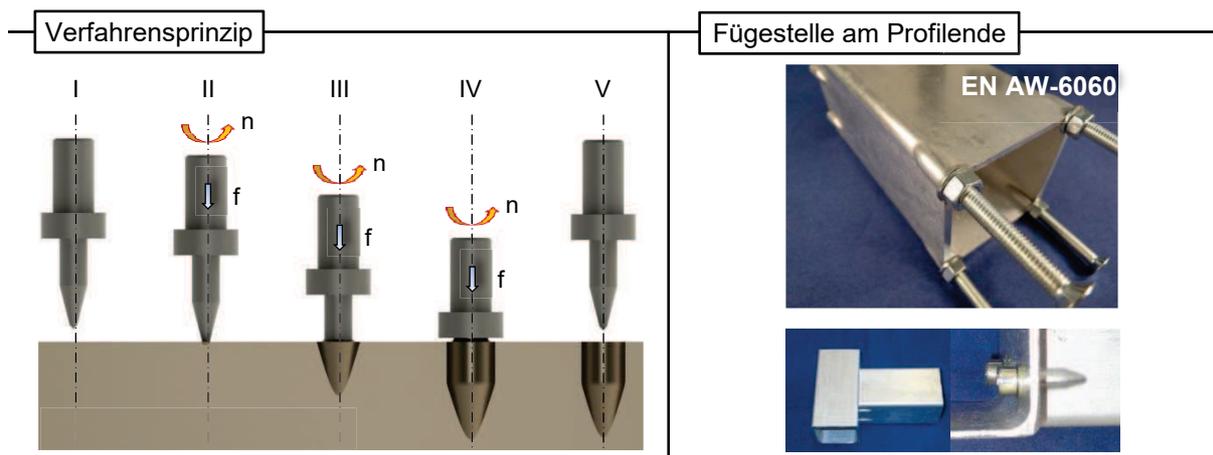


Abbildung 2-6: Bohrungsbearbeitung durch lokales Aufweiten der Profilwand [48]

Engbert stellte fest, dass nachdem der zylindrische Werkzeugteil in das Material eingedrungen ist, sich ein quasi-stabiler Umformungszustand des Materials um das Werkzeug ergibt. Dieser bewegt sich mit dem Werkzeug in Vorschubrichtung. Die Vorschubkraft und das Drehmoment weisen einen flachen Verlauf auf. Hohe Umfangsgeschwindigkeiten des Fließbohrwerkzeugs begünstigen die Ausformung der Bohrungswand [48]. Engbert stellte

auch eine Machbarkeitsstudie für die Übertragbarkeit des stirnseitigen Fließbohrens in Edelstahlblech (X5CrNi18-10) vor. Fließbohrungen für die Gewindegröße M6 können stirnseitig in Bleche eingebracht werden. Die enorme thermische Belastung führte jedoch zu einem frühzeitigen Werkzeugversagen [48].

Am ISF wurden weitere Untersuchungen zu dem innovativen Anwendungsfall des Fließbohrens durchgeführt. So wurde die Dauerschwingfestigkeit eines derartig erzeugten Fügestelle in einer Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund untersucht. Die mechanischen Eigenschaften von Innengewinden in Profilen und Vollmaterial aus der Aluminiumlegierung EN AW-6060 wurden in Zugversuchen und Schwingversuchen im Zug-Schwellbereich mikrostrukturbasiert charakterisiert [161]. Verglichen wurden dabei die Fertigungsverfahren Gewindebohren, Gewindeformen und Gewindefräsen. Die maximal erreichbaren Belastungen der Profilproben sind im Gegensatz zum Vollmaterial im quasistatischen Bereich um ca. 50 % und im zyklischen Bereich um ca. 25 % geringer. Dabei weisen geformte Gewinde die besten und gebohrte Gewinde die schlechtesten mechanischen Eigenschaften auf, die mit den fertigungsbedingten Grundgefüge des Ausgangsmaterials und dessen Gefügestrukturänderungen korreliert wurden [161]. Außerdem wurde der Einsatz des stirnseitigen Fließbohrens in dünne Bleche aus der Kupferlegierung CW024A vorgestellt [104]. Fließbohrungen mit geschlossener Bohrungswand lassen sich auch hier erzeugen. Die Umfangsgeschwindigkeit beeinflusst das Fließbohren maßgeblich. Durch die induzierte thermische Belastung lässt sich eine Rekristallisation in der Bohrungsrandzone feststellen [104]. Die Einsatzmöglichkeit des neuartigen Fließbohrverfahrens der Magnesiumknetlegierung AZ31 wurde auch am ISF untersucht [150, 11]. Auch hier lassen sich Bohrungen mit vollständig ausgeformter Bohrungswand erzeugen. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera können die Temperaturen sowohl beim Fließbohren als auch bei der anschließenden Gewindebearbeitung bestimmt werden. Aufgrund des geringen Umformvermögens der Magnesiumlegierung weisen die in die Fließbohrungen geformten Gewindeprofile Rissbildungen im Bereich der Gewindespitzen auf [11]. Ergebnisse der Auszugsversuche zeigen jedoch, dass geformte Gewinde trotz dieser Fehlstellen höhere Festigkeiten aufweisen als zerspantechnisch gefertigte Gewinde [105].

Neben dem neuartigen Fließbohren wurden auch zum konventionellen Fließbohren weitere Untersuchungen am ISF durchgeführt. So wurde ein FEM-Modell vorgestellt, mit dem das Gewindefräsen und Gewindebohren in Bohrungen, die sowohl durch Fließbohren als auch durch Zirkularfräsen hergestellt wurden, analysiert werden kann [7]. Außerdem wurde das Fließbohren von stranggepressten Hohlprofilen vorgestellt. Dabei war die Werkzeugdrehachse nicht mehr orthogonal zur Profilloberfläche angeordnet, sondern schräg unter einem definierten Winkel [9]. In diesem Fall kann eine Querkraft auftreten und das Werkzeug ungünstig belasten. Eine entsprechende Prozessführung ermöglicht es, Durchzüge in derartige Bauteile einzubringen, ohne das eingesetzte Werkzeug beim schrägen Eindringen zu zerstören.

Des Weiteren existiert das Verfahren Fließbohrfügen zum Fügen von dünnen und flachen Profilen. Das Verfahren kann als eine Modifikation des konventionellen Fließbohrens betrachtet werden. Durch das gleichzeitige Fließbohren mehrerer sich überlappender Teile

kann eine Art Durchzug mit Hinterschnitt erzeugt werden, welcher gleichzeitig als ein Formschluss der Bauteile dient. Dazu wird ein modifiziertes Fließbohrwerkzeug benötigt, welches zusätzlich über einen Bund am Arbeitsteil verfügt. **Abbildung 2-7** stellt das Verfahrensprinzip auf einer NC-Maschine dar. Im ersten Prozessschritt wird ein doppelter Durchzug geformt. Das Werkzeug rotiert und bleibt weiter tief im Durchzug. Dann wird das Werkzeug geringfügig um seine ursprüngliche Drehachse versetzt und bewegt sich anschließend auf einer Vollkreisbahn konzentrisch zu der Mittelachse des doppelten Durchzugs. Danach wird das Werkzeug zu seiner vorherigen Drehachse gefahren und aus dem Durchzug zurückgezogen. Somit lässt sich ein Durchzug mit Hinterschnittformen erzeugen. Das Verfahren befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Zu den Schwierigkeiten zählen eine zu lange Bearbeitungszeit für eine spaltfreie Verbindung und eine kürzere Standzeit des Werkzeugs gegenüber dem herkömmlichen Fließbohren [116].

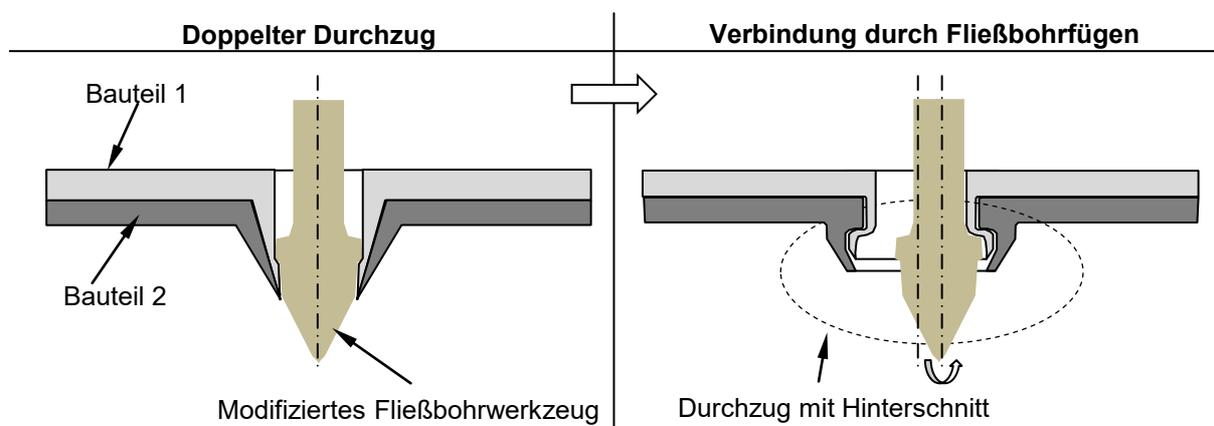


Abbildung 2-7: Das Fließbohrfügen [116]

2.3 Fließbohrwerkzeug

In **Abbildung 2-8** sind die typische Werkzeuggestalt sowie die Formen der herstellbaren Durchzüge dargestellt. Die Funktionsbereiche eines typischen Fließbohrwerkzeugs lassen sich in fünf Teile aufteilen: die Werkzeugspitze, der konische- und zylindrische Arbeitsteil, der Kragen sowie der Zylinderschaft. Die Werkzeugspitze verfügt meist über eine kegelige Form und hat eine glatte Fläche. Sie dient der Zentrierung beim Fließbohren. Um eine hohe Axialkraft zu Beginn des Fließbohrens zu verringern, können auch Werkzeuge eingesetzt werden, bei denen im Bereich der Spitze Schneiden angeschliffen sind. Somit wird das Material zu Beginn des Prozesses spanend entfernt, was die Axialkraft um bis zu 30 % reduzieren kann [71]. Der Winkel der Werkzeugspitze beträgt normalerweise $\sigma = 90^\circ$. Ein geringerer Winkel kann beim Fließbohren unter Belastung zu einem Werkzeugbruch führen, während ein größerer Winkel die Zentrierfähigkeit des Werkzeugs schwächt.

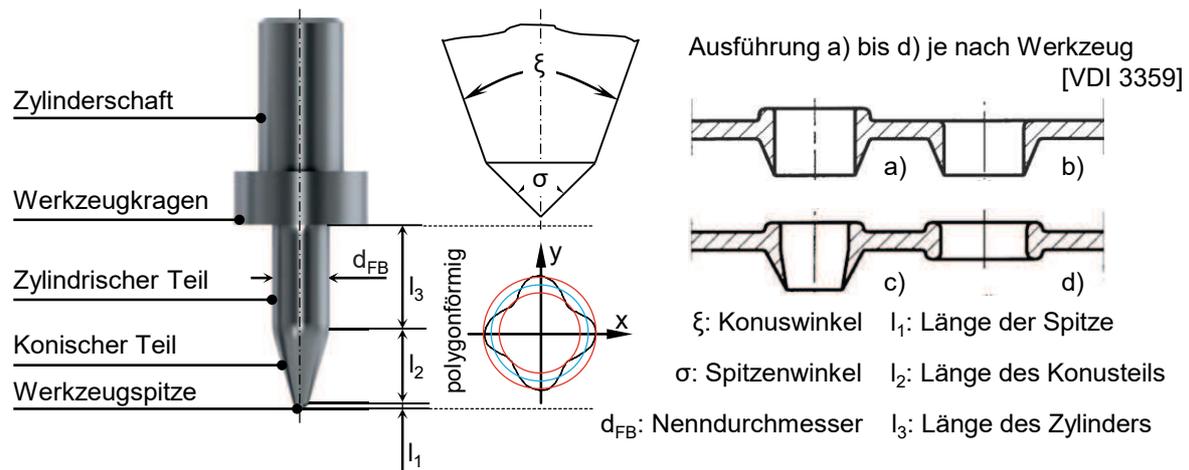


Abbildung 2-8: Typisches Fließbohrwerkzeug sowie Formen der Buchse [155]

Der konische- und zylindrische Werkzeugteil sind meist polygonförmig, mit sogenannten Formstollen, ausgeführt. Diese Formstollen sind bei Standardwerkzeugen symmetrisch um die Drehachse des Werkzeugs verteilt. Der Übergangsbereich der beiden Teile ist eine Verrundung. Während der konische Teil die Buchse aufweitet, unterstützt der zylindrische Teil diese und formt die Bohrungswand endgültig aus. Die Querschnittsformen der beiden Teile bestimmen die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Der Werkzeugkragen schließt sich an den zylindrischen Teil an. Er formt den beim Fließbohren entgegen der Vorschubrichtung erzeugten Materialaufwurf. Je nach der Werkzeugausführung wird ein Werkzeugkragen oder Senkschneiden in dem Bereich ausgeführt. Somit lässt sich eine ebene Anschlussstelle entweder umformtechnisch oder spanend herstellen. Bei Werkzeugen mit Schneiden kann eine ebene oder mit der Profilloberfläche bündige Anschlussfläche anhand der Zustelltiefe erzeugt werden. Die Gestalt der beiden Teile bestimmt die Form der bearbeiteten Buchsen. Der Zylinderschaft dient als Spannbereich zwischen Werkzeug und der Werkzeugaufnahme.

Ein typischer Fließbohrprozess lässt sich anhand der Gestalt und der jeweiligen Funktion der Bestandteile eines Werkzeugs unterteilen: Eindringen der Spitze, Eindringen des konischen und zylindrischen Werkzeugteils sowie Einsatz des Werkzeugkragens. Beim Eindringen der Werkzeugspitze erfolgt zuerst eine Kaltumformung des Materials, aufgrund der noch geringen Reibarbeit sowie der daraus induzierten Prozesswärme. Wenn der konische Bereich des Werkzeugs auch in das Material eingedrungen ist, vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Der von der Spitze erzeugte kraterförmige Eindruck wird ständig erweitert. Mehr Reibungswärme wird eingebracht und dies führt zu einem raschen Temperaturanstieg. Mit erhöhter Temperatur fällt die Festigkeit des Werkstoffes ab und eine Warmumformung findet statt. Das Material wird schließlich von dem Werkzeug durchgebohrt. Beim Eindringen des zylindrischen Werkzeugteils wird die Bohrung endgültig ausgeformt. Der Werkzeugkragen bearbeitet schließlich den entgegen der Vorschubrichtung erzeugten Materialaufwurf. Beim Fließbohren wird der Großteil des Materials in Vorschubrichtung gedrückt und zu einem Blechdurchzug geformt. Je nach Bearbeitungsbedingungen kann das Verhältnis zwischen den beiden Teilen 3:2 [133] bis 2:1 betragen [145].

Ein modernes Werkzeug zum Fließbohren besteht aus Hartmetall. Die Form des Werkzeugs wird durch Schleifen erzeugt. Unter Hartmetall werden Schneidstoffe verstanden, deren Schneidfähigkeit, Warmhärte und Anlassbeständigkeit noch bedeutend besser sind als die von Schnellarbeitsstahl. Ihre Zähigkeit ist jedoch geringer. Sie bestehen aus Karbiden der Metalle Wolfram, Titan, Tantal, Molybdän, Vanadium und aus einem Bindemittel [123]. Außerdem kommen keramische Werkstoffe als Schneidstoff zum Einsatz. Keramische Werkstoffe weisen eine höhere Warmfestigkeit gegenüber Hartmetall auf, konnten sich als Werkzeugwerkstoff aufgrund der geringen Standzeit beim Fließbohren allerdings nicht durchsetzen [106]. Während des Fließbohrens können hohe Temperaturen entstehen. Durch die Wärmeleitung über die Werkzeugaufnahme kann diese an die Maschinenspindel übertragen werden. Um die thermische Belastung möglichst gering zu halten, kann eine Werkzeugaufnahme mit integriertem Kühlkörper in Form eines Flügelrads eingesetzt werden. Dieser ist mit der Aufnahme fest verbunden und rotiert im Prozess. Eine lokale Luftströmung entsteht, welche die Wärme schnell an die Umgebung abgibt.

Im Zerspanprozess dient der Einsatz von Kühlschmierstoff in der Kontaktstelle zwischen Werkzeug und Werkstück zur Reduzierung der resultierenden Reibung und Prozesswärme. Somit lässt sich eine zu starke Aufheizung des Bauteils vermeiden und die thermische Belastung des Schneidstoffs verringern [83]. Die Reibung und die Prozesswärme tragen beim Fließbohren zur Umformung bei. Die durch Reibung induzierte Prozesswärme führt zu einer Temperaturerhöhung, welche die Festigkeit des Materials herabsetzt. Somit lässt sich die mechanische Belastung verringern. Beim Fließbohren mit einem Hartmetallwerkzeug können aufgrund der Adhäsion schnell Materialanhaftungen an der Werkzeugoberfläche entstehen, welche sich negativ auf die Qualität der Bohrungsoberfläche auswirken. Dieser Effekt tritt vor allem beim Fließbohren von Stählen und Aluminiumlegierungen auf. Einer Paste ähnliches Trennmittel kommt normalerweise beim Fließbohren zum Einsatz. Es lässt sich auf die Werkzeugoberfläche auftragen. Die Schmierwirkung der Paste ist aufgrund der hohen Temperaturen im Prozess gering. Sie dient vor allem als ein trockenes Trennmittel zwischen den beiden Reibpartnern Werkzeug und Werkstück [71]. Zwei Einstellgrößen beeinflussen den Fließbohrprozess maßgeblich. Die eine ist die relative Geschwindigkeit zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Werkstoff, welche als Umfangsgeschwindigkeit am zylindrischen Werkzeugteil bezeichnet wird. Die andere Einstellgröße ist die Vorschubgeschwindigkeit.

Der Verschleiß eines Fließbohrwerkzeugs tritt insbesondere bei der Bearbeitung von Stählen auf, da die thermische Belastung hier am stärksten ist. Die Kombination von thermischen und mechanischen Belastungen bestimmt den Verschleiß. Einerseits können Spannungen im Bereich des konischen Werkzeugteils auftreten, welche zu einer Spannungsrisssbildung führen [133]. Andererseits kommen auch Diffusions- und Oxidationsverschleiß der Werkzeuge vor, der von Mikroausbrüchen und Rissen gefolgt wird [71]. Es wurde untersucht, ob sich mit einer Beschichtung der Verschleiß eines Fließbohrwerkzeugs reduzieren ließ. In den frühen Untersuchungen kam TiN als Schichtmaterial zum Einsatz. Diese Schicht kann den Oxidationsverschleiß reduzieren, hat jedoch aufgrund deren niedrigen Einsatztemperatur eine sehr geringe Standzeit [133]. Als Schicht wurde auch das Einsatzverhalten von TiAlN und AlCrN untersucht, welche sich ebenfalls wegen der hohen Temperaturen als nicht geeignet

erwiesen. Die untersuchten Schichten kamen als Einzelschicht zum Einsatz. Es gibt bisher keine Anwendungen von Fließbohrwerkzeugen, die über Mehrlagenschichten oder Nanolayer verfügen. Bei den Mehrlagenschichten lassen sich die erwünschten Eigenschaften der einzelnen Schicht zur Optimierung ihrer verschleißschützenden Wirkung kombinieren. Nanolayer sind eine Weiterentwicklung der Mehrlagenschichten. Hierbei handelt es sich um Schichtsysteme, die aus einer Vielzahl von außerordentlich dünnen Einzelschichten bestehen, deren Schichtdicke nur noch wenige Nanometer beträgt [83]. Diese Hochleistungsschichten stellen ein potentiell Anwendungsgebiet für den Fließbohrprozess dar.

Zur Bewertung eines Bearbeitungsergebnisses beim Fließbohren zählen die Bestimmung des Durchmessers und der Rundheit. Große Abweichungen eines Durchzugs zum Soll-Wert führen zum Ausschussprodukt. Die Oberflächenbeschaffenheit der erzeugten Bohrung ist auch ein wichtiges Qualitätsmerkmal, wenn es als Gleitlager eingesetzt wird. Des Weiteren ist die nutzbare Länge der bearbeiteten Bohrung von großer Bedeutung. Idealweise sollen Durchzüge erzeugt werden, deren gesamte Länge benutzt werden kann. Es können Durchzüge beim Fließbohren mit Einrissen auftreten, wenn der zu bearbeitende Werkstoff nicht ausreichend erwärmt wird oder der Werkstoff selber trotz Erwärmung im Prozess noch eine zu niedrige Duktilität bei der erreichten Temperatur aufweist. **Abbildung 2-9** stellt dies anschaulich dar. In dem ersten Fall kann die Wärmezufuhr erhöht werden, in dem noch höhere Umfangsgeschwindigkeiten beim Fließbohren eingesetzt werden. Ansonsten lässt sich anstatt der gesamten Länge des Durchzugs L_D nur die Länge ohne die maximale Einrisslänge $L_D - L_E$ verwenden.



Abbildung 2-9: Bewertung der Qualität eines Durchzugs

Die Herstellung einer Fügestelle in die Fließbohrung kann umformtechnisch oder spanend erfolgen. Bevorzugt ist eine spanlose Formgebung des Gewindes, da in diesem Fall kein Material von dem Durchzug abgetragen wird und somit die durch Fließbohren gewonnene lokale erhöhte Materialstärke ausgenutzt werden kann. Wird das Innengewinde zerspantentechnisch in die Durchzüge eingebracht, verringert sich die maximale nutzbare Durchzugslänge. Es empfiehlt sich daher der Einsatz des Gewindeformens zur Erzeugung einer Fügestelle. Darüber hinaus trägt die Kaltverfestigung zu erhöhter Festigkeit der Fügestelle bei.

2.4 Alternative Methode zum Verbinden dünnwandiger Strukturen

Zum einfachen Verbinden von dünnwandigen Bauteilen können Bohrschrauben, gewindeformende Schrauben sowie Blechschrauben zum Einsatz kommen. Somit wird eine kostengünstige Verbindung in vielen Fällen einfach und schnell ermöglicht. Die in DIN ISO 10666 genormten Bohrschrauben haben eine Spitze mit 2 Bohrschneiden, mit denen in nicht all zu dicke und harte Profile (meist Bleche) ein Loch erzeugt werden kann, wodurch die Schraube in einem Arbeitsgang ohne Vorbohren und Gewindeschneiden verschraubt wird [32]. Gewindeformende Schrauben formen spanlos ein Gewinde in ein Sackloch oder ein Durchgangsloch aus Metall. Sie sind für weiche Materialien geeignet. In DIN 7500-1 sind diese Schrauben genormt [35]. Des Weiteren lassen sich genormte Blechschrauben verwenden, um Bauteile miteinander zu verbinden [36]. Diese Schrauben ähneln einer Holzschraube mit geringer Steigung. Diese vorgestellten Methoden sind für den Einsatz bei dünnwandigen Bauteilen nur bedingt geeignet, weil die Anzahl der tragenden Gewindegänge somit nicht wesentlich erhöht wird. Die Festigkeit reicht daher nicht aus für eine hochbelastbare Verbindung [71].

Eine weitere Möglichkeit um ausreichende Gewindetiefen erreichen zu können ist der Einsatz des Kragenziehens. Unter Kragenziehen, auch Durchziehen genannt, wird das Anbringen von in sich geschlossenen Rändern (Kragen) an in der Regel ausgeschnittenen Innenkonturen, die sich sowohl in ebenen als auch gewölbten Flächen befinden können, verstanden. Die Kragen oder Blechdurchzüge können der Lagerung, Fixierung oder Distanzierung dienen [84]. Blechdurchzüge mit deutlich größerer Länge als die lokale Materialstärke lassen sich damit fertigen. Das Verfahren ist jedoch im Vergleich zum Fließbohren aufwändiger und setzt eine beiderseitige Zugänglichkeit des Bauteils voraus. Eine Vorbohrung wird benötigt [21]. Für Profile mit komplexem Querschnitt ist das Verfahren kaum anwendbar. Neben den vorgestellten Methoden können auch mithilfe von Mutterneinsätzen belastbare Verbindungen in dünnwandigen Bauteilen realisiert werden. Diese Mutterneinsätze erhöhen die Anzahl tragender Gewindegänge. Die Befestigung der Mutterneinsätze setzt jedoch öfter eine beidseitige Zugänglichkeit der Verbindungsstelle voraus, welche einen flexiblen Einsatz erschwert [71].

2.5 Innengewindebearbeitung

Das Fügen ist nach DIN 8593 in der Fertigungstechnik als das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff definiert, wobei der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt wird [22].

Verbindungselemente werden benötigt, um einzelne Elemente zu technischen Systemen wie Baugruppen, Geräten und Maschinen zusammenzufügen. Die Verbindung von Maschinenteilen kann durch mehrere Möglichkeiten erfolgen. Zum einen ist der Stoffschluß möglich. Hierbei wird eine unlösbare Einheit von Teilen an der Stoßstelle mit oder ohne Zuhilfenahme erzeugt. Eine weitere Möglichkeit bietet der Reibschluß. Hierbei werden vornehmlich durch Verspannen, Reibungskräfte in den sich berührenden Flächen erzeugt, die den zu

übertragenden Verschleißkräften entgegenwirken. Die dritte Möglichkeit bietet der Formschluss, wobei die Kraftübertragung durch Formelemente, die als Mitnehmer dienen, erfolgt. Neben diesen verhältnismäßig starren Verbindungen sind im Maschinenbau oft auch elastische, nachgiebige Verbindungen erwünscht (z. B. zur Dämpfung von Stößen und Schwingungen), wobei federnde Elemente zwischengeschaltet werden [67].

In vielen Bereichen des Maschinenbaus besteht die Forderung, unterschiedliche Bauteile lösbar und dennoch hochfest miteinander zu verbinden. Am häufigsten ist dies bezüglich ein Befestigungsgewinde mit einer klassischen Schrauben-Gewinde-Verbindung zu finden [154].

Wenn eine Fügestelle in Form eines Innengewindes in die Durchzüge eingebracht werden soll, können verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen. Unter Gewinde wird eine profilierte Einkerbung verstanden, die fortlaufend wendelartig um eine zylinderförmige Wandung – innen oder außen – in einer Schraubenlinie verläuft [19]. Demnach ist die Gestalt des Gewindes durch die Profilform, die Steigung, die Gangzahl (ein- oder mehrgängig) und den Windungssinn (links- und rechtsgängig) bestimmt. Die Wahl des Gewindeprofils richtet sich nach dem Verwendungszweck. So eignen sich Spitzgewinde wegen der größeren Reibung für Befestigungsschrauben, wohingegen Trapez- und Sägegewinde als Bewegungsschrauben eingesetzt werden [67]. Das metrische ISO-Gewinde ist ein weltweit standardisiertes Gewinde mit metrischen Abmessungen und 60° -Flankenwinkel. Das Grundprofil ist in DIN ISO 68-1 festgelegt [39]. In DIN 13-1 sind die Nennmaße der Regelgewinde verschiedener Gewinde-Nenn Durchmesser von 1 mm bis zu 68 mm festgelegt [34]. Die Herstellung eines Innengewindes in einem Bauteil steht am Ende einer Prozesskette und ist daher auch ein wichtiger Schritt in der Wertschöpfungskette. Das Bauteil weist bereits einen hohen Wert aufgrund der vorherigen Bearbeitungen auf. Eine Fehlproduktion in diesem Schritt bedeutet einen großen Wertverlust und soll daher vermieden werden. Die Gewindegüte wird in der Regel mithilfe von Lehren für das Innengewinde (Werkstück-Mutter-Gewinde) überprüft [154]. In Bezug auf die vorliegende Arbeit werden das spanlose Gewindeformen und das spanende Gewindebohren beschrieben. Das Fließbohren in Kombination mit dem spanlosen Gewindeformen ermöglicht es, eine Fügestelle hoher Festigkeit in den Durchzügen einzubringen.

2.5.1 Gewindeformen

Das Gewindeformen zählt nach DIN 8583-5 zu den druckumformenden Fertigungsverfahren zur Herstellung von Innengewinden [23]. Es ist auch unter dem Namen „Gewindefurchen“ und „Gewindedrücken“ bekannt. Das Verfahrensprinzip ist durch das Eindringen eines Gewindes in ein Werkstück mit einem Werkzeug mit schraubenförmiger Wirkfläche gekennzeichnet [75]. Die Formgebungskanten des Gewindeformers drücken sich schraubenförmig in das Werkstoffmaterial ein und formen die Gewindeflanken auf Nennmaß aus. Dabei fließt der Großteil des verdrängten Materials an den Flanken radial in die Zahnspitzen des Gewindeformers. Es entstehen die für gefurchte Gewinde typischen Krallen im Bereich der Gewindespitzen [154]. Außerdem trägt der „ununterbrochene Faserverlauf“ auch zu einer erhöhten Festigkeit eines Innengewindes bei. Bei der Ausformung des Gewindeprofils fließt ein kleiner Teil des Materials in tangentialer Richtung dem Gewindeformer voraus und bildet eine Bugwelle aus [127]. Dieser umformtechnische

Prozessschritt verleiht dem Gewinde im Bereich der Gewindespitzen und der Gewindegründe durch die Kaltverfestigung eine höhere Festigkeit als geschnittene Gewinde. Des Weiteren können die geformten Gewinde eine höhere Oberflächengüte in den Gewindeflanken aufweisen. Im Vergleich zum Gewindebohren ist das axiale Verschneiden beim Gewindeformen ausgeschlossen. Die spanlose Formgebung führt jedoch zu größeren Drehmoment im Vergleich zum Gewindebohren, was den Einsatz des Verfahrens auf die Herstellung von Gewinden größerer Durchmesser beschränkt [154].

Meist werden Gewindeformer aus hochwertigen, häufig pulvermetallisch erzeugten Schnellarbeitsstählen hergestellt, vergütet und mit einer Hartstoffschicht versehen, um eine längere Standzeit zu gewährleisten. Selten kommen auch Werkzeuge aus Vollhartmetall zum Einsatz [75]. Ein Gewindeformer verfügt über einen Anformkegel, der aus mehreren stufenweise versetzten und im Durchmesser steigenden Formzähnen besteht. Die Formzähne weisen ein vollständiges Gewindeprofil auf und sie formen das Innengewinde stufenweise aus. Ein Gewindeformer hat einen polygonförmigen Querschnitt und vermeidet daher einen vollständigen Kontakt mit der Bohrung. Somit lässt sich das Material in tangentialer Richtung verdrängen, ohne das Werkzeug zu verklemmen. Je nach Ausführung eines Gewindeformwerkzeugs können Schmiernuten im Werkzeug integriert sein, die aber kleiner als die Spannuten eines Gewindebohrwerkzeugs sind. Aufgrund des größeren Querschnitts ist daher ein Gewindeformer grundsätzlich stabiler als ein Gewindebohrer. Da das Material nach der Umformung aufgrund der elastischen Rückfederung zurückfedert, lässt sich ein Gewindeformer nicht wieder in das geformte Gewinde hineinschrauben. Aus diesem Grund ist das Gewindeformwerkzeug geringfügiger größer als das zu bearbeitende Gewinde und es weist entsprechend eine höhere Toleranzklasse auf [46]. Beim Gewindeformen erfolgt die Kühlschmierstoffzufuhr je nach Werkzeugausführung entweder durch eine Innenkühlung oder eine Außenzufuhr [83].

Zu den wichtigen Einflussgrößen beim Gewindeformen zählen der Vorbohrdurchmesser, die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs sowie das nötige Verformungsvermögen des Werkstoffs und die Schmierung beim Gewindeformen. Ein zu kleiner Vorbohrdurchmesser kann zu einem größeren Drehmoment während der Umformung und im schlimmsten Fall zum Werkzeugbruch führen. Ein zu großer Vorbohrdurchmesser führt zu einem geringen Traganteil des Materials im Bereich des Gewindes, was sich negativ auf die Tragfähigkeit des Gewindes auswirkt. Daher muss eine Vorbohrung mit einem kleineren Toleranzfeld für das Gewindeformen als für spanende Gewindebearbeitungsverfahren hergestellt werden [154]. Da die Umformbarkeit vieler Werkstoffe mit einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit des Gewindeformers zunimmt [156], lässt sich die Umformgeschwindigkeit werkstoffabhängig bis zu 100 % höher als die Schnittgeschwindigkeit beim Gewindebohren wählen [154]. Das Material, bei dem das Gewindeformen eingesetzt wird, muss eine ausreichende Umformbarkeit aufweisen. Als Richtwerte werden eine maximale Zugfestigkeit von R_m 1200 N/mm² und eine minimale Bruchdehnung von $A = 5...8$ % in der VDI-Richtlinie 3334 empfohlen [154].

Aufgrund der spanlosen Gewindeherstellung und höheren Produktivität gewinnt das Gewindeformen zunehmend an Bedeutung. Daher beschäftigen sich viele Forschungsarbeiten

mit dem Gewindeformen. Eine Forschungsrichtung des Gewindeformens ist der Einsatz von Magnesiumlegierungen. Bei dem Leichtbauwerkstoff Magnesium und seinen Legierungen stößt das Gewindeformen an seine Grenzen, da diese Werkstoffe bei Raumtemperatur nur über eine begrenzte Umformbarkeit verfügen. Magnesium und seine Legierungen kristallisieren bei Raumtemperatur in der hexagonal dichtesten Gefügestruktur und sind daher nur sehr schlecht umformbar [3]. Bei Raumtemperatur weisen geformte Gewinde in Magnesiumlegierungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse auf. Es bilden sich Mikrorisse und -brüche in dem Gewindeprofil. Mit dem Einsatz erhöhter Umfangsgeschwindigkeit und einer Variation des Vorbohrdurchmessers lässt sich die Qualität der erzeugten Gewinde nur geringfügig verbessern [144]. Mit einer Temperaturerhöhung in der Kontaktzone wandelt sich die Gefügestruktur der Magnesiumlegierung um. Somit ist eine bessere Ausformung des Gewindeprofils möglich [138]. Vollmer stellte fest, dass die Temperaturerhöhung durch Reibung allein zwischen dem Werkzeug und der Magnesiumlegierung nicht ausreicht, um die nötige Temperatur in der Kontaktzone zu erreichen. Diese hohe Temperatur kann nach Vollmer nur durch eine zusätzliche Erwärmung erreicht werden. Diese Erwärmung kann sowohl werkstückseitig als auch werkzeugseitig erfolgen [156].

Neben der externen Erwärmung kann auf ein neu entwickeltes Verfahren zurückgegriffen werden, um Innengewinde umformtechnisch bei Magnesiumwerkstoffen herzustellen. Dazu stellt das Gewindenachformen eine Möglichkeit dar. Dieses Verfahren ist eine Abwandlung des herkömmlichen Gewindefurchens. Zunächst wird konventionell zerspantechnisch in einer Vorbohrung ein unvollständiges Gewinde erzeugt, welches einen geringeren Durchmesser als das Nennmaß aufweist. Im abschließenden Bearbeitungsschritt wird dieses Gewinde dann spanlos durch einen Druckumformprozess auf den Enddurchmesser bei Raumtemperatur ausgeformt. Die so erzeugten Gewinde weisen bereits eine höhere Belastungsgrenze auf als ein konventionell spanend hergestelltes Gewinde [8]. Des Weiteren lassen sich die Vorteile eines umformtechnisch hergestellten Gewindes mit der Flexibilität eines Gewindefräsverfahrens verbinden, indem der Gewindefräprozess mit einem Gewindeformverfahren in einem einzigen Werkzeug kombiniert wird [12]. Ein Gewindefräsfurchwerkzeug hat im Vergleich zu einem herkömmlichen Gewindefräswerkzeug entlang der Zahnflanken ein weiteres formendes Element. Somit bearbeitet das Werkzeug spanend das grobe Gewindeprofil und formt es direkt im Anschluss nach. Durch dieses beschriebene Verfahren kann ein Gewinde erzeugt werden, das an den Flanken spanend und im Gewindegrund umformend bearbeitet wurde. Das Gewinde weist durch die umformende Bearbeitung eine höhere Festigkeit als konventionelle Gewinde auf [12].

Eine weitere Entwicklung der umformtechnischen Herstellung von Innengewinden kann durch eine Modifikation der herkömmlichen Prozesskinematik erreicht werden. Zu der Entwicklung gehören die neu entwickelten Verfahren Axialgewindeformen und Helikal-Gewindeformen. Das von der Audi AG und der EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG entwickelte Axialgewindeformen stellt ein innovatives Fertigungsverfahren zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung dar. Das patentierte Verfahren verfügt über eine innovative Kinematik [89]. Im Vergleich zum konventionellen Gewindeformen fällt die Drehrichtungs-umkehr bei dem Axialgewindeformen weg. Der sog. Axialgewindeformer hat kein durchgehendes Gewindeprofil am Werkzeugumfang, sondern zwei Zahnreihen, die um 180°

versetzt angeordnet sind. Das Werkzeug wird mit Eilganggeschwindigkeit ohne Spindeldrehzahl in die Bohrung eingefahren. Dabei formt der erste Zahn (auf jeder Seite) wie ein Räumwerkzeug zwei gerade Räumkanäle in der Vorbohrung aus. Danach folgt das eigentliche Gewindeformen, welches durch eine synchrone Bewegung der Spindeldrehachse und der Vorschubachse stattfindet. Nach einer Drehung von 180° ist das Gewinde von dem Werkzeug ausgeformt und die Räumzähne treten wieder in die Räumkanäle ein. Nach Ausführung dieser Formgebung bleibt die Spindel wieder stehen und das Werkzeug wird aus den Räumkanälen herausgefahren [10].

Das Helikal-Gewindeformen ist eine technische Weiterentwicklung des Axialgewindeformens [90]. Es zeichnet sich durch das gedrallte Einfahren in die Vorbohrung aus. Der Helikal-Gewindeformer verfügt im Vergleich zum Axialgewindeformer über zwei gedrallte Zahnreihen, die ebenfalls um 180° versetzt angeordnet sind. Bei der Bearbeitung fährt das Werkzeug auf einer steilen helikalen Bahn in eine Vorbohrung, an deren Umfang durch die beiden Räumzähne an der Werkzeugspitze zwei gedrallte Nuten entstehen. Anschließend wird der Helikal-Gewindeformer auf der helikalen Bahn aus der Bohrung herausgefahren [70].

2.5.2 Gewindebohren

Gewindebohren bezeichnet ein Aufbohren zur Erzeugung eines Innengewindes, das koaxial zur Drehachse der Schnittbewegung liegt [83]. Das Gewindebohren wird in der Norm DIN 8589 als Schraubbohren zur Herstellung von Innengewinden bezeichnet. Es zählt zu den trennenden Fertigungsverfahren [24]. Das Verfahren weist die gleiche Verfahrenskinetik wie das Gewindeformen auf. Gewindebohrer bestehen aus einem Schaft und einem Gewindeteil. Beim Gewindeteil ist zwischen dem Anschnitt, an dem die Zerspanung stattfindet und dem Führungsteil, der für eine stabile Lage des Werkzeugs sorgt, zu unterscheiden. Der Anschnitt eines Gewindebohrers besteht aus schräg abgeschliffenen Gewindezähnen [46]. Gewindebohrer verfügen über Spannuten im Führungsteil. Die Nuten dienen dazu, die Späne aufzunehmen und nach außen zu befördern. Darüber hinaus gewährleisten sie die Zufuhr des Kühlschmierstoffs zur Wirkstelle. Große Nutenquerschnitte im Führungsteil erleichtern diese Aufgabe und sind insbesondere bei der Bearbeitung langspanender Werkstoffe von Bedeutung, führen jedoch zur Schwächung des tragenden Werkzeugquerschnitts [83]. Der Schneidvorgang setzt sich aus einer Rotation und der Vorschubbewegung des Werkzeugs zusammen, wobei die Synchronisation beider Bewegungen zur Herstellung lehrenhaltiger Gewinde zwingend notwendig ist [154]. Als Schneidstoffe kommen beim Gewindebohren Schnellarbeitsstähle und Hartmetalle zum Einsatz. Die Oberflächen von Gewindewerkzeugen lassen sich zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit behandeln [83]. Beim Gewindebohren mit größeren Verhältnissen von Gewindetiefe zu Gewindedurchmesser ist eine innere Zuführung des Kühlschmierstoffes über Spindel und Werkzeug von Vorteil, da unabhängig von der Bohrungstiefe kontinuierlich Medium in der Nähe der Wirkstelle zur Verfügung steht und die Spanabfuhr aus der Bohrung unterstützt wird [83].

Wie beim Gewindeformen, muss die Drehrichtung der Spindel beim Erreichen der vorgegebenen Tiefe umgekehrt und das Werkzeug aus dem fertigen Gewinde herausgedreht werden. Diese Drehrichtungsumkehr nach Erreichen der Gewindetiefe stellt einen

technologischen Nachteil des Gewindebohrers dar. Bei der Herstellung eines Sacklochgewindes entsteht bei der Drehrichtungsumkehr eine Drehmomentspitze, welche durch das Abscheren der angeschnittenen Spanwurzel verursacht wird [107]. Für das Werkzeug besteht dabei die Gefahr, dass die kaltverformten Spanwurzeln beim weiteren Rückdrehen einen hohen Druck auf die Schneidkanten ausüben, der zu Ausbrüchen führen kann [154].

Im Vergleich zum Gewindeformen weist das Gewindebohren folgende Vorteile auf. Gewindebohrer stellen an die Werkzeugmaschine meist keine besonderen Anforderungen. Das Gewindebohren lässt sich bei einfachen Maschinen anwenden. Im einfachsten Fall ist nur eine Achse beim Gewindebohren nötig, um Gewinde herzustellen. Im Gegensatz zu Gewindeformern ist ein Nachschleifen eines Gewindebohrers ab etwa einem Durchmesser von $D = 10$ mm grundsätzlich möglich [154].

Nachteile des Gewindebohrers sind die Spanprobleme bei tiefen Gewinden, insbesondere bei Grundlochgewinden und die Gefahr des axialen Verschneidens der Gewinde. Späne lassen sich beim Gewindebohren von tiefen Gewinden schwer durch die Spannuten aus der Bohrung fördern. Ist die Synchronisation der Vorschubachse und der Spindelachse nicht mehr gewährleistet, kann das Werkzeug durch die Vorschubbewegung zu schnell oder zu langsam nachgeführt werden. In dem Fall führen die auftretenden Zug- bzw. Druckkräfte zum axialen Verschneiden und das Gewindeprofil wird beschädigt [107].

Der Einsatz eines sog. Gewindeschneidapparats stellt eine Möglichkeit zur Vermeidung der Spindelumkehr bzw. des damit verbundenen Zeitverlusts durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge dar. Das Gerät verfügt über ein mechanisches Umkehrgetriebe, welches durch eine axiale Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und der Hauptspindel die Drehrichtung reversiert. Sowohl das Gewindebohren als auch das Gewindeformen lässt sich damit adaptieren. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass die Spindel nicht mehr abwechselnd beschleunigt und abgebremst werden muss. Während der Serienfertigung von Innengewinden bleibt die Drehrichtung unverändert und die Spindel wird geschont. Da die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Spindelachse wegfallen, sinkt die Bearbeitungszeit. Gleichzeitig lässt sich eine höhere Vorschubgeschwindigkeit realisieren. Nachteilig ist die Tatsache, dass das Gerät beim Einsatz spindelseitig eine spezielle Drehmomentstütze und eine permanente Druckluftzufuhr für das Umkehrgetriebe sowie eine regelmäßige Wartung mit dem Austausch von Verschleißteilen benötigt [10]. In **Abbildung 2-10** sind die Unterschiede zwischen einem Gewindeformwerkzeug und einem Gewindebohrwerkzeug sowie die Form der bearbeiteten Gewindespitzen dargestellt.

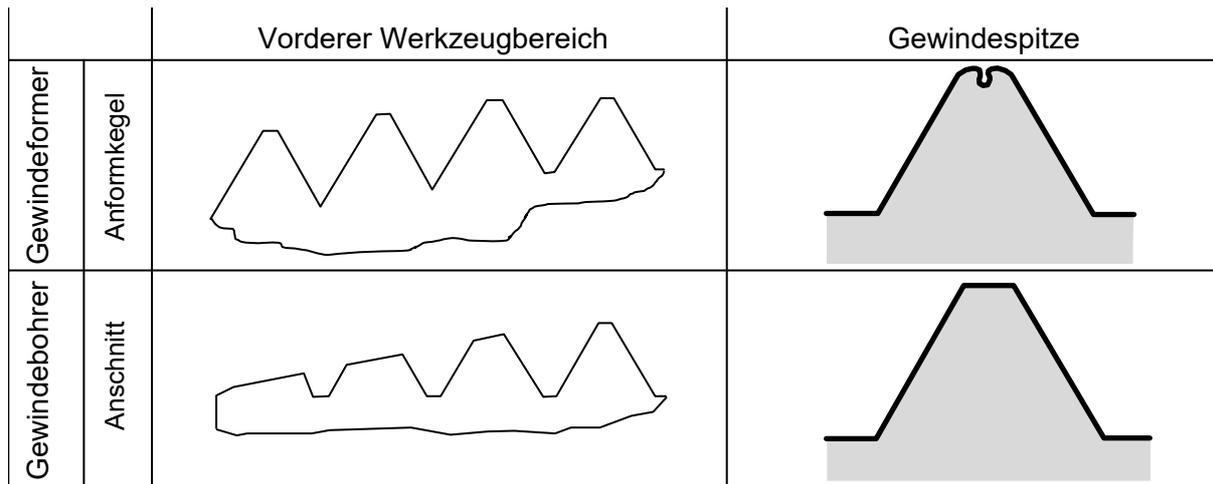


Abbildung 2-10: Typische Gestalt von Gewindeformern / Gewindebohrern und Gewindespitzen

2.5.3 Einfluss der Einschraubtiefe auf die Schraubenverbindungen

Schraube und Mutter bilden eine lösbare Verbindung. Ein Innengewinde in einer Fließbohrung kann als eine Mutter mit groß dimensioniertem Mutterkörper betrachtet werden. Eine optimierte Schraubverbindung soll bei vollständiger Ausnutzung der Festigkeit der Schraube eine maximale Vorspannung liefern. Bei Überbeanspruchungen z. B. infolge von Montageüberbeanspruchungen mit einem zu hohen Anziehdrehmoment, sollen Schraubenverbindungen nicht durch das Abstreifen der gepaarten Schrauben- und Muttergewindgänge versagen. Die Sollbruchstelle der Schraube soll sich im uneingeschraubten Gewindeteil der Schraube befinden. Somit lässt sich keine eventuell geschädigten Schraubenverbindungen unerkant montieren [77].

Eine hinreichende Einschraubtiefe trägt zu einer sicheren Schraubenverbindungen bei [132]. Die „kritische“ Einschraubtiefe liegt vor, wenn die Tragfähigkeit der ineinandergreifenden Gewindgänge gleich der des freien belasteten Schraubengewindes bzw. des Schraubenschaftes ist [160]. Wenn die Einschraubtiefe den kritischen Wert überschreitet, bricht die Schraube und es kommt nicht zum Abreißen des Muttergewindes. Die Festigkeitsklasse der Mutter und der Schraube beeinflusst die kritische Einschraubtiefe maßgeblich. Es wird empfohlen, Muttern und Schrauben derselben Festigkeitsklasse [153] oder Muttern mit höherer Festigkeitsklasse einzusetzen [132]. Ein Innengewinde in einem Bauteil weist in vielen Fällen wesentlich weniger Festigkeit als eine genormte Mutter aus dem gleichen Werkstoff auf. Das hat zu Folge, dass ganz besonders auf die dann notwendigen Mindesteinschraubtiefen geachtet werden muss, um eine ausreichende Haltbarkeit der Schraubenverbindungen sicherzustellen [77]. In VDI 2230 wird die mathematische Ermittlung der Einschraubtiefe beschrieben [153]. Beim stirnseitigen Fließbohren als Vorbereitung für eine anschließende Gewindebearbeitung ist es daher notwendig, eine ausreichende zylindrische Bohrtiefe zu erzeugen, sodass das eingebrachte Innengewinde eine größere nutzbare Länge als die kritische Einschraubtiefe besitzt. Eine Tragfähigkeitssteigerung der Schraubenverbindung bei zügiger Beanspruchung ist jedoch durch das Vergrößern der Einschraubtiefe über diesen kritischen Wert hinaus nicht zu erreichen, weil die Belastbarkeitsgrenze hier durch die von der Einschraubtiefe unabhängige Bruchkraft des freien belasteten Bolzen- gewindes bzw. des Schraubenschafts begrenzt wird [160].

2.6 Werkstoffe

2.6.1 Kunststoffe Polyamid PA66 und Polyvinylchlorid PVC-U

Kunststoffe haben wegen ihrer spezifischen Eigenschaften und ihrer vielseitigen Verarbeitungs-, Bearbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten eine große und immer noch zunehmende Bedeutung erlangt [3]. Kunststoffe, auch Polymere genannt, sind neben den Metallen und den anorganischen, nichtmetallischen Werkstoffen die dritte Werkstoffhauptgruppe [68]. Als Begriff werden Kunststoffe als hochpolymere Festkörper definiert, die ganz oder teilweise synthetisch aus organischen Molekülen hergestellt werden [129]. Bei diesen Werkstoffen gibt es viele nützliche Eigenschaften, wie ein ausgezeichnetes Verhältnis von Festigkeit zu Dichte, sehr gute Verarbeitbarkeit und chemische Beständigkeit. Die Kurzzeichen für Kunststoffe beziehen sich hauptsächlich auf das jeweilige Basis-Polymer. In DIN EN ISO 1043-1 sind die Kennbuchstaben und Kurzzeichen zur Benennung des jeweiligen Kunststoffes genormt [7].

Die Kunststoffe können anhand des molekularen Aufbaus und des daraus resultierenden Verhaltens in Thermoplaste, thermoplastische Elastomere, Elastomere und Duroplaste eingeteilt werden. Thermoplaste sind Kunststoffe mit kettenförmigen Makromolekülen, deren Zusammenhang im Wesentlichen durch Nebenvalenzkräfte bestimmt wird. Die Makromoleküle liegen entweder linear oder verzweigt vor und sind nicht vernetzt. Wenn eine Verminderung oder ein Überwinden der Nebenvalenzkräfte durch äußere Krafteinwirkung auftritt, dann ist eine Auflockerung der molekularen Struktur, eine Streckung bisher verknäuelter Moleküle oder gar ein Abgleiten der Moleküle voneinander möglich. Wärmeeinwirkung begünstigt diese Vorgänge und führt zu einer gesteigerten Beweglichkeit der Makromoleküle. Thermoplaste lassen sich bei Überschreitung einer bestimmten Temperatur erweichen und schmelzen. Diese Eigenschaft ermöglicht verschiedene technologische Verarbeitungsverfahren wie z. B. Gießen, Spritzgießen, Extrudieren oder Schweißen. Die Thermoplaste überstehen eine solche Erwärmung im Allgemeinen ohne chemische Veränderung [3].

Polyamid (PA) ist ein überwiegend teilkristalliner Thermoplast, dessen monomere Grundbausteine durch die Säureamidgruppe miteinander verknüpft sind. Im Jahre 1935 lag das Polyamid schon im Labormaßstab vor. Danach wurde Polyamid unter dem Handelsnamen Nylon in großer Menge hergestellt [126]. Wegen ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften haben Polyamide (PA) große Bedeutung als Konstruktionswerkstoffe für hoch belastbare Maschinenelemente. Hohe Festigkeit, große Zähigkeit und insbesondere starker Widerstand gegen Verschleiß sind die kennzeichnenden Eigenschaften. In der Praxis wird der Werkstoff häufig als Ausgangsmaterial z. B. für Zahnräder, Gleitlager, Buchsen, und Laufrollen eingesetzt [3].

Auf Grund des hervorragenden Eigenschaftsprofils sind Polyamide als Leichtbau- und Konstruktionswerkstoffe in nahezu allen technischen Bereichen zu finden. Bauteile aus Polyamid können im Motorraum eingesetzt werden und zur Minderung des Fahrzeuggewichts beitragen [80]. In der Automobilindustrie findet der Werkstoff PA66 zur Herstellung von Bauteilen mit sehr komplexer Gestalt wie z. B. LKW-Ladeluftrohre durch das Spritzgießen

Verwendung. Im Vergleich zu demselben Produkt aus Aluminium wird eine Reduzierung des Gewichts um 1,8 kg bzw. um 50% erreicht [4]. Der Name PA66 weist darauf hin, dass der Polyamid-Kunststoff aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure hergestellt wurde [29].

Polyvinylchlorid (PVC, nach [29]) ist ein vorwiegend amorpher thermoplastischer Kunststoff mit einem niedrigen kristallinen Anteil (etwa 5%) [129]. Der Werkstoff verfügt über eine hervorragende chemische Beständigkeit gegen Säuren, Laugen, Benzin und Öl [3]. Die ersten Produktionsanlagen von Polyvinylchlorid wurden Ende der 20er Jahre in den USA in Betrieb genommen. Im Jahr 1935 wurde die Massenproduktion von Polyvinylchlorid in den Werken der I.G.-Farben-Industrie in Wolfen und Bitterfeld aufgenommen [80]. Heute ist PVC einer der bedeutendsten Kunststoffe, der durch Additive wie Weichmacher und Elastomere von weich-gummielastisch bis hart-zäh-schlagfest variiert werden kann. Nach der Anwendung kann PVC in Weich-PVC (PVC-P) und Hart-PVC (PVC-U) unterteilt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist, dass Weichmacher zur Erzielung der flexiblen Eigenschaften in PVC-P zugesetzt werden und PVC-U dagegen keinen Weichmacher enthält [5]. Gegenüber anderen Massenkunststoffen lässt sich PVC auf Grund des hohen Chlorgehalts schwer entflammen. Wegen dieser Eigenschaft wird PVC-U vor allem im Baugewerbe für Fensterrahmen, Rollläden und Dachrinnen eingesetzt. Profile aus PVC-U mit komplexer Querschnittsform lassen sich mit Hilfe des Strangpressens herstellen [80].

Die neue Anwendungsmöglichkeit des Fließbohrens ermöglicht es, eine Fügestelle in die dünnwandigen Verstärkungsrippen derartiger Bauteile in Form von Innengewinden einzubringen, sodass das Montieren von weiteren Bauteilen ermöglicht wird. Des Weiteren können Anschlussstellen in den Verstrebungen von Hohlprofilen der Kunststoffe mit dem stirnseitigen Fließbohren erzeugt werden.

2.6.2 Magnesium und seine Legierungen

Magnesium ist ein in der Natur reichlich vorkommendes Metall. Mit einer Dichte von $\rho = 1,74 \text{ g/cm}^3$ ist es der leichteste metallische Konstruktionswerkstoff [3]. Magnesiumlegierungen verfügen über eine Dichte von etwa $\rho = 1,85 \text{ g/cm}^3$. Gegenüber den Stahlstoffen und Aluminiumwerkstoffen weist Magnesium Gewichtsvorteile von 75% bzw. 30% auf [113]. Reines Magnesium besitzt jedoch eine zu geringe Festigkeit, so dass als Strukturwerkstoff nur dessen Legierungen eingesetzt werden [158]. Durch das Zulegieren von Aluminium, Mangan, Silizium oder Zink werden die mechanischen Eigenschaften des reinen Magnesiums verbessert [3]. Magnesiumwerkstoffe lassen sich in Knet- und Gusslegierungen unterteilen. Unabhängig von der Einteilung und der Art der Legierung gibt es die internationale Bezeichnung der Zusammensetzung nach ASTM (American Society for Testing and Materials) [113]. Dabei werden die Legierungen nach ihren Hauptelementen sowie deren Legierungsanteil in Gewichtsprozent unterschieden. So steht beispielsweise die Bezeichnung AZ31 für eine Magnesiumlegierung mit Legierungsanteilen von 3 % Aluminium und 1 % Zink.

Obwohl Magnesium und seine Legierungen über eine hervorragende Zerspanbarkeit verfügen, sind deren Anwendungsmöglichkeiten in der Technik noch nicht voll entfaltet [3]. Im Folgenden sind die Eigenschaften der Magnesiumlegierungen, die neben dem hohen Preis der Magnesiumlegierungen gegenüber Aluminiumlegierungen deren Verwendung beschränken,

beschrieben. Magnesium ist sehr reaktionsfreudig. Es weist daher ein ungünstiges Korrosionsverhalten auf. Zudem ist Magnesium bekannt für eine erhöhte Brand- und Explosionsgefahr, insbesondere bei Spänen und Stäuben [113]. Aufgrund der im Verhältnis gesehen großen Kontaktfläche mit Sauerstoff können sich Magnesiumspäne und Staube entzünden. Infolge der hohen Verbrennungstemperatur von über 3.000 °C des Magnesiums, ist ein Löschversuch mit Wasser, normalem Löschpulver, Kohlendioxid, Stickstoff oder Halogenwasserstoff strengstens verboten. Bei diesen Temperaturen kann es zum Aufspalten des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff kommen, was eine Explosionsgefahr darstellt [156]. Magnesiumwerkstoffe weisen auch eine geringere Warmfestigkeit als die Aluminiumlegierungen auf. Durch das Legieren mit Seltenerdmetallen kann dieser Wert technischer Magnesiumlegierungen verbessert werden [143]. Die umformtechnische Bearbeitung der Legierungen stellt Schwierigkeiten dar. Bei Raumtemperatur verfügen Magnesium und seine Legierungen über eine hexagonale Kristallstruktur auf, welche die Verformbarkeit der Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen beschränkt. Erst oberhalb von $T = 225 \text{ °C}$ tritt sprunghaft eine Phasenumwandlung der Kristallstruktur ein, die ein gutes plastisches Verformen der Werkstoffe ermöglicht [113].

Trotz der oben erwähnten Schwäche sind Magnesiumlegierungen in den letzten Jahren als Leichtbauwerkstoff für die Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie ins Interesse zahlreicher Entwicklungsprojekte gerückt [80]. Zur Gewichtsreduzierung kommen Magnesiumgusswerkstoffe mit Hilfe vom Druckguss zum Bauen von Lenkschlossgehäusen und Sauganlagen zum Einsatz [88]. Aufgrund des Korrosionsverhaltens von Magnesium findet es bislang vor allem dort Anwendung, wo die Anwesenheit von Korrosionsmedien wie Salzsprühnebel eine eher untergeordnete Rolle spielt. Galvanisch beschichtet oder lackiert können Magnesiumlegierungen zum Bauen von Türen oder Klappen, Stoßfängerkomponenten oder anderen Außenhautteilen (z. B. Crash- und Verstärkungsstreben) eingesetzt werden [97].

Im Vergleich zu den Magnesiumgusslegierungen werden Magnesiumknetlegierungen wenig verwendet. Dies liegt einerseits an dem mangelnden Grundwissen von deren weiteren Bearbeitungsverfahren, andererseits an der geringen Vorformbarkeit der Legierungen bei Raumtemperatur. Aufgrund der ungünstigen Verformbarkeit bei Raumtemperatur werden solche Profile vor allem warmumgeformt [82], was den Einsatz der Legierungen zusätzlich beschränkt. Der in der Arbeit eingesetzte Werkstoff AZ31 ist eine der am häufigsten verwendeten Magnesiumknetlegierungen [131]. Durch das Strangpressen lassen sich Profile komplexer Querschnitte herstellen [120]. Hohlprofile und Bleche aus der Magnesiumknetlegierung AZ31 können prototypisch zur Herstellung von Dachrahmen eingesetzt werden [42]. Dünnwandige Bauteile werden auch zum Bauen von astronomischen Teleskopen verwendet [63]. Das stirnseitige Fließbohren mit anschließender Gewindebearbeitung ermöglicht eine umformtechnische Fügestellenerzeugung bei dünnwandigen Bauteilen und zwar bei Raumtemperatur, ohne das gesamte Bauteil zu erwärmen. Somit können Bauteile mit Hilfe von Schraubenverbindungen miteinander verbunden werden. Die Untersuchungen des Fließbohrens können daher einerseits zur Erweiterung des Anwendungsgebiets der Magnesiumknetlegierung andererseits des Fertigungsverfahrens Fließbohren beitragen.

2.6.3 Messing CuZn37

In der vorliegenden Arbeit wurde das neuartige Fließbohren von einem weit verbreiteten Messing CuZn37 untersucht. Kupfer-Zink-Legierungen werden auch Messing genannt. Die Steigerung der Festigkeit gegenüber Kupfer beruht auf Mischkristallbildung. Festigkeit und Härte steigen mit dem Zinkgehalt. Bis ca. 37 % Zn bleiben Kupfer-Zink-Legierungen als einphasige homogene Legierungen bestehen [3].

Aus dem Grund weist der Werkstoff CuZn37 i. A. ein einheitliches Gefüge auf. Je nach Abkühlungsbedingungen beim Herstellungsprozess kann der Werkstoff auch geringe Anteile an β -Mischkristallen enthalten, die in einem kubisch-raumzentrierten Gitter erstarren. Der Werkstoff eignet sich daher gut für die spanlose Umformung durch Tiefziehen, Drücken, Stauchen, Prägen und Biegen. Der Werkstoff kann bis maximal 37 % Zink enthalten. Der hohe Zinkanteil ermöglicht einen wirtschaftlicher Einsatz des Werkstoffs gegenüber anderen kaltumformbaren Messinglegierungen, weil der Preis des Werkstoffs mit fallendem Kupferanteil auch abnimmt [18].

Klassische Anwendungen von Messing CuZn37 sind Heizungen in Fahrzeugen, Münzen, Patronenhülsen, Uhrengehäuse und korrosionsfeste Teile der optischen Industrie [80]. Dank seiner guten Wärmeleitfähigkeit und der gegenüber dem Kupfer höheren Festigkeit kommt der Werkstoff auch zum Bau von Wärmetauschern und Solaranlagen zum Einsatz [124]. Hohlprofile aus dem Werkstoff lassen sich durch Kragenziehen für Sanitärtechnik bearbeiten [115]. Der Werkstoff ist auch zur Herstellung von Musikinstrumenten verwendbar [43]. Mit dem neuartigen Fließbohren kann die Anwendung des Werkstoffs CuZn37 erweitert werden.

2.6.4 Edelstahl X5CrNi18-10

Heutzutage ist Stahl der weltweit meistverwendete metallische Werkstoff. Unter Stahl wird ein Werkstoff verstanden, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2 % ist und der andere Elemente enthält. Gemäß DIN EN 10020 kann eine begrenzte Anzahl von Chromstählen mehr als 2 % Kohlenstoff enthalten, aber 2 % ist die übliche Grenze zwischen Stahl und Gusseisen [25].

Der Werkstoff X5CrNi18-10 ist ein austenitischer, säurebeständiger Stahl. Nach DIN EN 10095 zählt er zu den hitzebeständigen Stählen [38]. Infolge der kubischflächenzentrierten Gitterstruktur des austenitischen Stahls weist der Werkstoff im Vergleich zu anderen kubisch-raumzentrierten Stählen eine hohe Warmfestigkeit und Rekristallisationstemperatur auf [3]. Die chemische Zusammensetzung von X5CrNi18-10 ist in DIN EN 10088-1 genormt [37]. Demnach besitzt der Werkstoff einen Kohlenstoffgehalt von 0,07 % und die Hauptlegierungselemente Chrom (17,5 % bis 19,5 %) und Nickel (8 % bis 10,5 %). Der hohe Anteil vom Chrom verleiht dem Edelstahl seine Korrosionsbeständigkeit [68]. An der Werkstoffoberfläche kann sich eine dichte, zähe, festhaftende und sehr dünne Passivschicht bilden, welche eine weitere Korrosion des Werkstoffs verhindert. Der Werkstoff ist wegen seines niedrigen Kohlenstoffgehaltes bei Blechstärken bis 6 mm auch ohne nachträgliche Wärmebehandlung beständig gegen interkristalline Korrosion [158]. Wird der Werkstoff beim Fließbohren einer hohen thermischen Belastung ausgesetzt, kann die schützende Passivschicht

zerstört werden. Die Zerstörung der Passivschicht führt zu einer Abschwächung der Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffs [3].

Aufgrund seiner ausgezeichneten Eigenschaften wie z. B. Duktilität, Zähigkeit, Verfügbarkeit und Korrosionsbeständigkeit kommt der Werkstoff nahezu in allen Technologie- und Lebensbereichen zur Anwendung. Des Weiteren ist der Stahl einer der wenigen Werkstoffe, der für Tiefsttemperatur-Anwendungen bis nahe zum absoluten Nullpunkt geeignet ist [3]. Das stirnseitige Fließbohren eröffnet auch bei dem Werkstoff eine neue Anwendungsmöglichkeit und wird daher in der vorliegenden Arbeit untersucht.

3 Untersuchungsziele und Methoden

Durch das stirnseitige Fließbohren ergeben sich neue Möglichkeiten zur Herstellung von Verbindungsstellen mit hoher Qualität im Bereich der Konstruktion und Fügetechnik. Bisherige Untersuchungen zum Fließbohren befassten sich mit dem konventionellen Anwendungsfall des Fließbohrens. Es liegen nur wenige Forschungsergebnisse zu dem neuartigen Fließbohren in Kombination mit anschließender Gewindebearbeitung vor. Vor allem können bisher nur gut umformbare Werkstoffe mit dem stirnseitigen Fließbohren bearbeitet werden [48, 105]. Aufgrund der Vielfalt der Profile und Hohlprofile verschiedener Werkstoffe zeigt das neuartige Fließbohren in Kombination mit anschließender Gewindebearbeitung großes Potenzial zur Erweiterung der Fügetechnik von dünnwandigen Bauteilen. Zur Fertigung einer lösbaren Verbindung am Profilende, in Verstärkungsrippen oder Verstreben eines Bauteils werden nur zwei Bearbeitungsschritte gebraucht. Eine einseitige Zugänglichkeit des Bauteils reicht schon aus. Keine weiteren Hilfselemente wie z. B. Muttereinsätze werden für eine derartig gefertigte Schraubenverbindung benötigt. Kombiniert mit dem spanlosen Gewindeformen werden praktisch keine Späne produziert, was eine effiziente Nutzung des Bauteilmaterials ermöglicht.

Ein erfolgreicher Einsatz des neuartigen Fließbohrens setzt ein umfangreiches Grundwissen über das Verfahren voraus. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher Bedingungen für die Erzeugung von Fließbohrungen mit geschlossener Bohrungswand bei verschiedenen Werkstoffen zu ermitteln, um die Einsatzmöglichkeit des stirnseitigen Fließbohrens zu erweitern. Dazu werden Profile aus den vorgestellten Werkstoffen: PA66, PVC-U, AZ31, CuZn37 und X5CrNi18-10 für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt, um grundlegende Erkenntnis über diese neue Anwendungsmöglichkeit des Fließbohrens bei einem breiten Werkstoffspektrum zu gewinnen. Da sich die zu untersuchenden Werkstoffe in ihren Eigenschaften deutlich unterscheiden, gibt es an die Prozessauslegung wechselnde Herausforderungen, auf die im Einzelnen reagiert werden muss. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Untersuchung der statischen Festigkeit der in die Fließbohrungen eingebrachten Gewinde, da diese von großer Bedeutung für eine Verbindungsstelle ist. Die Festigkeitsuntersuchung soll die Auswirkung der Randbedingungen auf den Fließbohrprozess widerspiegeln, um eine Empfehlung für die sichere Auswahl der Prozessparameter zu ermöglichen.

Beim Fließbohren sind die thermomechanischen Belastungen von großer Bedeutung zum besseren Verständnis des Prozesses. Verläufe von Vorschubkräften und Drehmomenten werden aufgenommen und in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter analysiert. Prozesstemperaturen werden messtechnisch bestimmt, um die thermische Werkzeugbelastung zu untersuchen. Die Bearbeitungsergebnisse werden sowohl mithilfe der Längsschnittanalyse als auch taktil bzw. mikroskopisch untersucht, um den Einfluss der Parameter beim Fließbohren auf den Prozess zu identifizieren. Die Oberflächenbeschaffenheiten der Bohrungswand sowie geometrische Merkmale der Bohrungen, nämlich Durchmesser und Rundheit werden in Bezug auf die Parameter beurteilt. Die statischen Festigkeitsuntersuchungen der Innengewinde erfolgen durch axiale Auszugsversuche, um die maximale Belastbarkeit zu untersuchen. Darüber hinaus wird auch nach Möglichkeiten zur Prozessoptimierung beim Fließbohren der Kunststoffe gesucht, um die Qualität der Bohrungen zu erhöhen.

4 Experimentelle Randbedingungen

4.1 Werkzeuge

Abbildung 4-1 stellt die eingesetzten Fließbohrwerkzeuge dar. Neben diesen Werkzeugen kommen auch konventionelle Bohrwerkzeuge zum Einsatz. Beim Fließbohren des Edelstahl wurden Vorbohrungen eingebracht. Deren Verwendung wird in der jeweiligen konkreten Versuchsdurchführung beschrieben. Die eingesetzten Werkzeuge lassen sich nach der Herkunft in zwei Gruppen unterteilen. Bei der einen Gruppe handelt es sich um Werkzeuge, die von kommerziellen Herstellern extern angefertigt wurden. Diese Werkzeuge bestehen aus Hartmetall und besitzen vier Formstollen in dem konischen und zylindrischen Werkzeugteil. Beim Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10 wurden Keramik-Fließbohrer mit sechs Formstollen auf Basis von Siliziumnitrid (Si_3N_4) verwendet. In der vorliegenden Arbeit werden die zwei Schneidstoffe nach der Norm DIN ISO 513 mit HW (Unbeschichtetes Hartmetall) und CN (Siliziumnitridkeramik) bezeichnet [33]. Alle extern angefertigten Werkzeuge weisen keine Beschichtung auf und verfügen über denselben Spitzen- und Konuswinkel von $\sigma = 90^\circ$ bzw. $\xi = 34^\circ$.

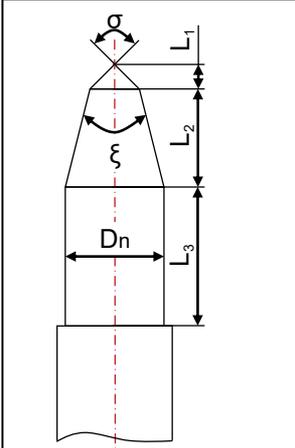
	Externe Anfertigung			Interne Anfertigung		
	Durchmesser D_N in mm:	5,0	5,4	5,4	5,4	5,7
Spitze L_1 in mm:	0,7	0,75	0,75	0,67	0,63	0,84
Konus L_2 in mm:	6	6,75	6,75	6,32	6,98	7,15
Zylinder L_3 in mm:	9	10	10	12,74	12,37	11
Anzahl Formstollen:	4			6		
Werkzeugwerkstoff:	HW			CN		
Spitzenwinkel σ :	90°					
Konuswinkel ξ :	34°					

Abbildung 4-1: Fließbohrwerkzeuge

Darüber hinaus wurden spezielle modifizierte Werkzeuge zum Fließbohren der Kunststoffe eingesetzt, um die Auswirkung der Werkzeugcharakteristika auf die geometrischen Eigenschaften der erzeugten Bohrungen zu identifizieren. Diese Werkzeuge wurden am ISF angefertigt. Zwei Werkzeuge mit dem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm bzw. $D_N = 5,7$ mm wurden aus einem durchgehärteten Zylinderstift (ISO 8734 10×100 A St) geschliffen, der der Norm EN ISO 8734 entspricht [47]. Ein weiteres modifiziertes Werkzeug mit dem Nenndurchmesser von $D_N = 6$ mm wurde aus einer Hartmetallstange geschliffen. Diese Werkzeuge

verfügen über keine Formstollen und keine Beschichtung. Der Übergangsbereich vom konischen zum zylindrischen Teil verläuft scharfkantig. Der Spitzenwinkel σ und der konische Winkel ξ aller eingesetzten Werkzeuge beträgt ebenfalls $\sigma = 90^\circ$ bzw. $\xi = 34^\circ$.

Bei der Fließbohrbearbeitung der dünnwandigen Versuchsproben aus den metallischen Werkstoffen wurden Fließbohrer mit dem Durchmesser von $D_N = 5,0$ mm bei anschließendem Gewindebohren und $D_N = 5,4$ mm beim Gewindeformen eingesetzt. Während in der DIN-Norm 336 eine Empfehlung für den Durchmesser der Kernlochbohrung von geschnittenen Gewinden angegeben ist [20], existiert eine solche beim Gewindeformen nicht. Die Auswahl des Kernlochdurchmessers für die spanlose Gewindebearbeitung basiert daher auf den Untersuchungen von Engbert [48]. Beim Fließbohrprozess wird das Werkzeug mit der programmierten Umfangsgeschwindigkeit bzw. dem Vorschub bis zur Bohrtiefe gefahren. Der Rückzug des Werkzeugs erfolgte mit der Eilganggeschwindigkeit der Werkzeugmaschine.

Die Gewindebearbeitung fokussiert sich auf metrische ISO-Gewinde der Größe M6. Beim Gewindebohren und Gewindeformen kamen Werkzeuge aus kobaltlegiertem Schnellarbeitsstahl (HSS-E) zum Einsatz. Dieser Schneidstoff verfügt neben einer hohen Festigkeit auch über eine gute Zähigkeit. Bei der Gewindebearbeitung werden das Bohrwerkzeug und das Gewindewerkzeug mit verschiedenen Werkzeugaufnahmen gespannt und es kann vorkommen, dass sich die Lage der beiden Achsen der Aufnahmen geringfügig voneinander unterscheidet. Biegebelastungen können dadurch beim Gewinden entstehen und zum Werkzeugbruch führen. Schnellarbeitsstahl ist dagegen unempfindlich gegen solchen Belastungen. Während die Gewindebohrwerkzeuge mit einem Mehrlagensystem aus Titanaluminiumnitrid (TiAlN) und einer amorphen Kohlenstoffdeckschicht versehen sind, verfügen die Gewindeformwerkzeuge über eine Titanitrid-Beschichtung (TiN). Bei der Gewindebearbeitung können axiale Belastungen in Zug- bzw. Druckrichtung aufgrund der begrenzten Synchronisationsgenauigkeit auftreten [79]. Diese axialen Werkzeugbelastungen lassen sich mit einem Längenausgleichsfutter bei der Gewindebearbeitung kompensieren.

4.2 Versuchsmaschinen

Für die Untersuchungen des Fließbohrens kommen zwei Bearbeitungszentren der Firma Grob zum Einsatz. Beide Maschinen sind in Kreuzschlittenbauweise ausgeführt. In **Abbildung 4-2** sind die Versuchsmaschine Grob BZ 40 CS und Grob BZ 600 sowie die wichtigsten Spezifikationen dargestellt. Beide Maschinen verfügen über eine CNC-Bahnsteuerung vom Typ SINUMERIK 840 D der Firma SIEMENS. Während die Grob BZ 40 CS über eine 3-Achs-CNC-Einheit verfügt, besitzt die Grob BZ 600 eine 4-Achs-CNC-Einheit.

Bei der Grob BZ 40 CS kann eine maximale Drehzahl von $n_{\max} = 24.000 \text{ min}^{-1}$ erreicht werden, sodass Versuche mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten möglich sind. Die Spindel verfügt über eine HSK-63-Schnittstelle für die Werkzeugaufnahme. In der Maschine ist eine spezielle Feuerlöschanlage gegen Magnesiumbrand integriert. Das Edelgas Argon funktioniert als Löschmittel, da es keine chemische Reaktion mit Magnesium eingeht und ein Metallbrand verhindert werden kann [87]. Des Weiteren verfügt die Maschine über eine Absauganlage, damit die Gefahr einer Verpuffung verhindert werden kann. Daher wurde die Versuchsmaschine beim Fließbohren der Magnesiumknetlegierung AZ31 eingesetzt. Der

integrierte optische Sensor der Feuerlöschanlage stellt aber beim Fließbohren des Edelstahl ein Hindernis dar, da in dem Prozess sichtbares Feuer entsteht und die Löschanlage aktiveren kann. Daher wurde das Fließbohren des Edelstahl in der Versuchsmaschine Grob BZ 600 durchgeführt. In dieser Versuchsmaschine ist keine Feuerlöschanlage integriert.

Im Vergleich zu der Grob BZ 40 CS kann die Grob BZ 600 eine höhere Leistung liefern. Die maximale Drehzahl der Spindel ist aber auf $n_{\max} = 12.500 \text{ min}^{-1}$ begrenzt. Die Verbindung des Werkzeugs mit der Maschine erfolgt über ein Werkzeugaufnahmesystem vom Typ HSK 80. Darüber hinaus ist ein Palettenwechsler integriert, mit dem zwei Rundtische ausgetauscht werden können.

Grob BZ 40 CS



Antriebsleistung:

bei 100% ED: 34 kW
bei 40% ED: 44 kW

Anordnung der Hauptspindel:

horizontal

Spindeldrehzahl:

$n_{\max} = 24.000 \text{ min}^{-1}$

Steuerung:

SINUMERIK 840 D

KSS-Druck:

$p = 20 \dots 80 \text{ bar}$

Arbeitsweg in X / Y / Z:

500 mm / 500 mm / 500 mm

Maximale Arbeitsleistung:

bei 40% ED $P = 44 \text{ kW}$

bei 60% ED $P = 39 \text{ kW}$

bei 100% ED $P = 34 \text{ kW}$

Grob BZ 600



Antriebsleistung:

bei 100% ED: 50 kW
bei 40% ED: 62 kW

Anordnung der Hauptspindel:

horizontal

Spindeldrehzahl:

$n_{\max} = 12.500 \text{ min}^{-1}$

Steuerung:

SINUMERIK 840 D

KSS-Druck:

$p = 20 \dots 80 \text{ bar}$

Arbeitsweg in X/Y/Z:

800 mm / 700 mm / 630 mm

Maximale Arbeitsleistung:

bei 40% ED $P = 62 \text{ kW}$

bei 60% ED $P = 56 \text{ kW}$

bei 100% ED $P = 50 \text{ kW}$

Abbildung 4-2: Versuchsmaschine, Grob BZ 40 CS und Grob BZ 600

4.3 Messtechnik

4.3.1 Erfassung der mechanischen Bauteilbelastungen

Die Vorschubkraft und das Drehmoment wurden während des Versuchs werkzeugseitig ermittelt. Ein Rotationsdynamometer der Firma Kistler vom Typ 9125A11, was nach dem piezoelektrischen Prinzip arbeitet, kommt dabei zum Einsatz. Das Dynamometer verfügt über eine HSK63-Schnittstelle und kann bei der Grob BZ 40 CS direkt in die Spindel eingespannt werden. Eingesetzte Werkzeuge lassen sich über die integrierte Spannzange des Dynamometers einklemmen. Mit einer Werkzeugverlängerung als Adapter für eine HSK80-Aufnahme kann das Dynamometer auch in der Maschine Grob BZ 600 eingesetzt werden. Die gemessenen Belastungen werden in Form eines elektrischen Signals über Funk an den unmittelbar montierten Stator und schließlich durch Datenkabel an den Ladungsverstärker

vom Typ Kistler 5237A weitergeleitet. An einem Messrechner wurden die gemessenen Größen zuerst durch einen Analog-Digital-Wandler umgewandelt und anschließend gespeichert. Die Abtastrate f_t beträgt während der Messung $f_t = 5000$ Hz. Eine maximale axiale Kraft von $F_z = 3000$ N kann in Zug- oder Druckrichtung gemessen werden. Der Messbereich des Drehmoments beträgt $M_z = -50 \dots 50$ Nm. Die durchgeführten Versuche fokussieren sich auf die Bohrungsbearbeitung für eine anschließende Gewindebearbeitung der Gewindegröße M6. Es ergeben sich Belastungen in dem Messbereich des eingesetzten Dynamometers. Mit dem Messinstrument lässt sich daher eine hohe Auflösung des Prozessablaufes wiedergeben.

4.3.2 Bestimmung der Prozesstemperaturen

Neben der Vorschubkraft und dem Drehmoment ist die Temperatur eine der wichtigsten Bewertungsgrößen im Prozess. Die Ermittlung der Prozesstemperatur erfolgt sowohl taktil als auch berührungslos. Zur taktilen Temperaturmessung wurden Nickel-Chrom-Mantelthermoelemente des Typs K der Fa. Thermocoax mit einem Durchmesser von $D = 0,25$ mm eingesetzt. Bis zu einer Temperatur von $T = 1000$ °C lässt sich diese bestimmen. Der kleine Durchmesser ermöglicht eine schnelle Ansprechzeit und daher kann die Temperaturänderung des zu messenden Objekts bei taktiler Messung schnell erfolgen [135]. Es funktioniert nach dem Seebeck-Effekt und daher muss der Schweißpunkt des Thermoelements an der Messstelle bzw. des Messobjekts angebracht werden und gegen Luftströmung und Kühlflüssigkeit isoliert werden [81]. Eingesetzte Thermoelemente wurden je nach dem verwendeten Messaufbau entweder in einem präparierten Werkzeug positioniert oder fest an die Probenoberflächen angepresst.

Die berührungslose Temperaturmessung erfolgt durch den Einsatz einer Wärmebildkamera vom Typ ImageIR® 8300 der Firma InfraTec. Die Wärmebildkamera arbeitet in einem Spektralbereich von $\lambda_L = 2$ μm bis $\lambda_L = 5$ μm und besitzt ein Bildformat von 640×512 Bildpunkten. Eine detaillierte Analyse der Bearbeitung wird damit ermöglicht. Ein Stirlingkühler als Detektorkühlung ist in dem Messgerät integriert. Bei eingestellter maximaler Auflösung der Wärmebildkamera kann eine Bildrate von $f_B = 100$ Hz erreicht werden. Durch eine Hochgeschwindigkeitsverbindung wird die Wärmebildkamera mit einem Rechner verbunden. Die Messdaten werden in Echtzeit während der Messung an den Rechner weitergeleitet. Mit der mitgelieferten Software IRBIS 3 werden die Messdaten ausgewertet. Die Umschaltung unterschiedlicher Messbereiche wird durch eine so genannte „Optomechanik“ realisiert. In der Wärmebildkamera sind physikalische Filter mit unterschiedlichen Wellenlängendurchlässigkeiten fest eingebaut. Die Umschaltung des Messbereichs ist der Umschaltung des jeweiligen Filters zugeordnet und dies ermöglicht eine hohe Auflösung während der Messung. Bei der Auswahl eines Messbereiches wird der dazu entsprechende Filter mechanisch vor dem Messsensor gewechselt [78].

In den durchgeführten Versuchen wurden Thermoelemente beim Fließbohren der Kunststoffe und des Edelstahl verwendet. Kunststoffe verfügen gegenüber den Metallwerkstoffen über viel geringere Wärmeleitfähigkeit. Eine Temperaturänderung der Bohrungswand lässt sich daher schwer erfassen. Beim Fließbohren des Edelstahl sind die Temperaturen so hoch, dass

der Messbereich der Wärmebildkamera überschritten wurde. Daher kamen Thermoelemente bei der Erfassung der Prozesstemperaturen zum Einsatz.

4.3.3 Geometrische Eigenschaften der Fließbohrungen

Die erzeugten Fließbohrungen werden anhand ihrer geometrischen Eigenschaften beurteilt. Die Untersuchungen erfolgen mithilfe eines Mikroskops und eines taktilen Messgerätes. Der Durchmesser sowie die Rundheit sind zwei wichtige Größen zur Beurteilung der Bohrung. Während ein größerer Durchmesser als das Nennmaß dazu führt, dass bei der anschließenden Gewindebearbeitung kein tragfähiges Gewindeprofil erzeugt werden kann, verursacht ein Untermaß der Bohrung hohe werkzeugseitige Belastungen beim Gewinden [46]. Untersuchungen zu den Bearbeitungsergebnissen lassen auch Rückschlüsse beim Fließbohren auf die verwendeten Parameter zu und bieten somit Optimierungsmöglichkeiten für den Prozess.

In der vorliegenden Arbeit werden fließgebohrte Bohrungen von Kunststoffen und metallischen Werkstoffen untersucht. Bei Kunststoffen weisen die Bohrungen starke Abweichungen zum Sollmaß auf. Aufgrund der Materialanhaftungen an der Bohrungswand entstehen schlechte Oberflächen, die eine taktile Messung der Durchmesser- und Rundheitsabweichungen erschweren. Daher wird der Durchmesser am Bohrungseintritt mikroskopisch ermittelt. Ein Auflichtmikroskop der Firma Keyence vom Typ VHX-500F kommt zum Einsatz. Bei den metallischen Fließbohrungen erfolgt die Vermessung an einem 3D-Koordinatenmessgerät der Firma Zeiss vom Typ Prismo 5HTG-Vast.

4.3.4 Metallographie

Beim Fließbohren können hohe Temperaturen erreicht werden. Der zu bearbeitende Werkstoff ist hohen thermomechanischen Belastungen ausgesetzt. Das Gefüge der Bohrungen kann große Änderungen vom Grundmaterial aufweisen. Dies führt zur Veränderung der mechanischen Eigenschaften, die die Festigkeit des bearbeiteten Gewindes beeinflussen. Die Aufgabe der Metallografie ist die qualitative und quantitative Beschreibung des Gefüges metallischer Werkstoffe. Ziel ist die Ermittlung und Bestimmung der Art, Menge, Größe, Form, örtlichen Verteilung, Orientierungsbezeichnungen und Realstruktur der Gefügeelemente bzw. -bestandteile vorwiegend mit mikroskopischen Verfahren [117]. Um die Gefügeveränderung im Werkstoff zu bestimmen, werden einige Versuchsproben der Metallwerkstoffe metallographisch präpariert. Bei der Präparation wurden die Proben zuerst in einem Kunststoffharz warm eingebettet und anschließend die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit durch Schleifen und Polieren erreicht. Schließlich wird die Gefügestruktur der präparierten Oberfläche durch eine chemische Ätzung sichtbar gemacht und mithilfe eines Mikroskops untersucht.

4.3.5 Erfassung der statischen Tragfähigkeit

Während Mindestbruchkräfte und Prüfverfahren der Schrauben der verschiedenen Festigkeitsklassen in DIN EN ISO 898-1 vorgeschrieben sind [30], liegt keine konkrete Vorschrift für die Auszugsfestigkeit des Innengewindes in Abhängigkeit von der Gewindetiefe vor. In der Literatur sind lediglich nur Empfehlungen über die minimale Einschraubtiefe bei Schraube-

Gewinde-Verbindungen zu finden [59]. In DIN EN ISO 898-2 sind zudem Prüfverfahren und Prüfkraft für Muttern aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl für verschiedene Mutterhöhen vorgeschrieben [31]. Die Muttern werden dabei einer vorgegebenen, konstanten axiale Prüfkraft beaufschlagt. Diese Kraft muss für eine Dauer von $t = 15$ s gehalten werden. Nach der Prüfung ist die Mutter zu entlasten und es wird kontrolliert, ob Versagenserscheinungen an der Mutter auftreten. DIN EN 28839 ergänzt die Prüfkraft für Muttern aus Nichteisenmetallen [28].

Für die Prüfung der statischen Tragfähigkeit von Innengewinden am Bauteil kommt in der Praxis der sogenannte axiale Zugversuch zum Einsatz, welcher sich an dem beschriebenen Prüfverfahren in DIN EN ISO 898-2 orientiert [31]. Die Höhe der Mutter lässt sich mit der nutzbaren Gewindetiefe eines Innengewindes vergleichen. Dabei wird das Gewinde mithilfe eines Prüfdorns, vorwiegend in Form von einer Schraube mit definierter Festigkeitsklasse, unter Zugbelastung gesetzt, bis das Gewinde versagt. Die ermittelte, maximale Auszugskraft stellt in Abhängigkeit der Einschraubtiefe eine analoge Größe zur Zugfestigkeit in der Materialprüfung dar und liefert somit vergleichbare Informationen zu den Bearbeitungsparametern des Gewindes. Daher wurde die Tragfähigkeit des Gewindes in der vorliegenden Arbeit ebenfalls mithilfe des axialen Auszugsversuchs untersucht. Im Folgenden wird diese Vorgehensweise vorgestellt.

Eine Prüfmaschine vom Typ Zwick 1475 wurde zur Erfassung der statischen Festigkeit eingesetzt. Die Maschine verfügt über eine maximale Axialkraft von $F_{A,Max} = 100$ kN. Mithilfe des in der Maschine montierten Dynamometers lässt sich die Kraft während des axialen Zugversuchs in Abhängigkeit des Verfahrwegs aufnehmen. In **Abbildung 4-3** links ist der Versuchsaufbau zur Erfassung der Tragfähigkeit des Gewindes dargestellt.

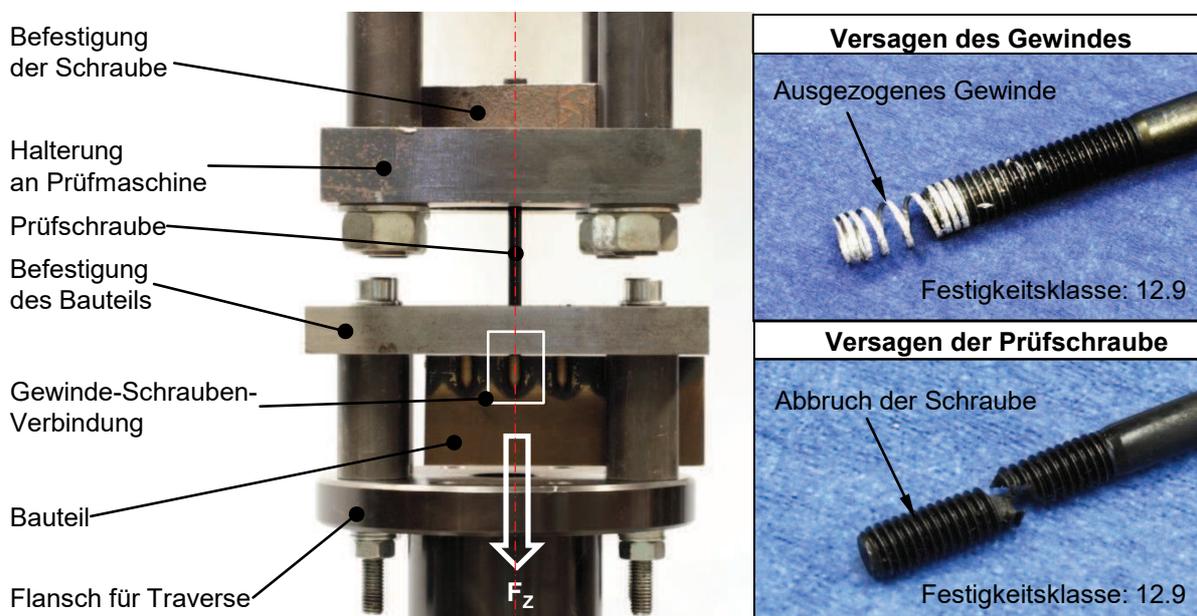


Abbildung 4-3: Versuchsaufbau zur Erfassung der Tragfähigkeit des Gewindes und Versagensarten bei axialen Zugversuchen

M6-Prüfschrauben der Festigkeitsklasse 12.9 wurden als Prüfdorn eingesetzt. Die Befestigung der Schraube erfolgt durch eine Stahlplatte mit einer Wandstärke von $t_w = 25$ mm, die über eine Durchgangsbohrung für eine Schraube verfügt und mithilfe einer Halterung an der

Prüfmaschine verbunden ist. Die Prüfschraube bleibt während des Zugversuchs stationär. Eine Befestigung des Bauteils hält das mit der Schraube verbundene Gewinde fest. Diese Befestigung ist über Schrauben-Mutterverbindungen mit einem Flansch verbunden, der mit der Traverse der Prüfmaschine verbunden ist. Während der Prüfung wurde die Gewinde-Schraubenverbindung mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von $v_p = 10 \text{ mm/min}$ belastet. Die Gewinde-Schrauben-Verbindung stellt in dem Versuchsaufbau eine Schwachstelle dar, welche unter axialer Zugbelastung versagen soll. Die Prüfung wird entweder beendet, wenn das Gewinde versagt oder die Prüfschraube abreißt. Das elastische Verhalten des gesamten Versuchsaufbaus lässt sich aufgrund der soliden Bauweise vernachlässigen.

Der rechte Teil der Abbildung 4-3 stellt die zwei Versagensarten dar, die beim Zugversuch auftreten. Bei den untersuchten Werkstoffen wie Kunststoffen und Magnesiumlegierungen, die über eine niedrige mechanische Festigkeit verfügen, versagen immer die Gewinde. In diesem Fall wurde das gesamte Innengewinde von dem Prüfdorn abgestreift. Die erfassten maximalen Kräfte werden ausgewertet. Bei den Messing- und Edelstahlproben hingegen brachen beim Zugversuch die Prüfschrauben aufgrund der hohen Zugbelastung ab. Die maximalen Kräfte stellen in dem Fall nur die Bruchkraft der Schraube dar. Der Abbruch einer Prüfschraube weist darauf hin, dass eine ausreichende Gewindetiefe in der Verbindung besteht. Es wurde in dem Fall weiter überprüft, ob sich die gebrochene Schraube manuell aus dem Gewinde herausdrehen lässt. Das manuelle Ausdrehen der gebrochenen Schraube ist ein Zeichen dafür, dass sich das Innengewinde beim Zugversuch nicht verformt hat und daher noch intakt ist.

4.4 Versuchsproben

Ein breites Werkstoffspektrum wird bei dem neuen Anwendungsfall des Fließbohrens untersucht. Die Werkstoffe kamen zum Einsatz in Form von Blechzuschnitten. Beim Fließbohren der Kunststoffe wurden die Anwendungsmöglichkeiten beim harten Polyvinylchlorid (PVC-U) und dem Polyamid (PA66) untersucht. Die Wandstärke der Flachprofile beträgt $t_w = 5 \text{ mm}$. Die Untersuchungen der Buntmetalle sind die Fließbohrbearbeitung von Messing CuZn37 und der Magnesiumknetlegierung AZ31.

Die Messingblechzuschnitte verfügen über eine Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$. Beim Fließbohren des Magnesiums kamen Profile aus AZ31 mit den Wandstärken von $t_w = 4...8 \text{ mm}$ zum Einsatz. Des Weiteren wurde das Fließbohren des Edelstahls X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wandstärken von $t_w = 2...4 \text{ mm}$ analysiert. In **Tabelle 4-1** sind die wichtigsten mechanischen und thermischen Kennwerte der untersuchten Werkstoffe zusammengefasst.

Neben den untersuchten Werkstoffen kommt der Aluminiumgusswerkstoff AlSi7 Mg für eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz. Beim Fließbohren des Aluminiumgusses wurde eine Wandstärke der Versuchsproben von $t_w = 6 \text{ mm}$ untersucht. Der Werkstoff ist in der Automobilindustrie weit verbreitet. Mit dem Werkstoff können dünnwandige Bauteile für hohe Beanspruchungen wie z. B. Zylinderköpfen, Kurbelgehäusen sowie Hinterachsträger hergestellt werden [157, 158]. Verbindungsstellen am Gehäuse aus diesem Aluminiumgusswerkstoff könnten mit dem neuen Anwendungsfall vom Fließbohren mit

anschließendem Gewindeformen angefertigt werden und dann zum Befestigen von Bauteilen benutzt werden.

Tabelle 4-1: Werkstoffkennwerte [16, 18, 108, 114, 136, 137, 158]

Werkstoffbezeichnung	PCV-U	PA 66	CuZn37	AZ31	X5CrNi18-10	AlSi7Mg
Dichte in g/cm ³	1,4	1,14	8,44	1,77	7,9	2,6-2,8
Zugfestigkeit in N/mm ²	55	90	300	260	540-750	140-250
Bruchdehnung in %	≥15	>40	38	8-12	45	1-2
Elastizitätsmodul in N/mm ²	3000	3450	110000	45000	200000	69000-75000
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	0,14	0,28	120	100	15	180

4.5 Versuchsumfang, Versuchsaufbau und –durchführung

4.5.1 Kunststoffe PA66 und PVC-U

Beim Fließbohren der Kunststoffe kamen Werkzeuge mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm zum Einsatz. Eine Bohrtiefe von $t_B = 16,3$ mm wurde erzeugt, damit sich eine nutzbare Gewindetiefe von $t_{Ge} = 10$ mm ergab. Das entgegen der Vorschubrichtung fließende Material wurde nach dem Fließbohren frästechnisch entfernt, damit eine Planfläche am Bohrungseintritt entstand. Beim Fließbohren des Kunststoffs PA66 wurden vier Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 10$ m/min bis $v_u = 25$ m/min schrittweise um $\Delta v_u = 5$ m/min variiert. Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit erfolgte von $v_f = 30$ mm/min bis $v_f = 60$ mm/min in Schritten um $\Delta v_f = 15$ m/min. Beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U wurden die Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 2,5$ m/min stufenweise um $\Delta v_u = 2,5$ m/min bis $v_u = 7,5$ m/min variiert. Schließlich wurden Versuche bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15$ m/min ergänzt. Die Vorschubgeschwindigkeiten verdoppeln sich jeweils von $v_f = 15$ mm/min bis $v_f = 60$ mm/min. Die Erfassung der mechanischen Werkzeugbelastungen und die Gewindebearbeitung wurden an der Versuchsmaschine Grob BZ 40 CS durchgeführt. In **Abbildung 4-4** sind der Versuchsaufbau sowie jeweils eines der bearbeiteten Flachprofile dargestellt.

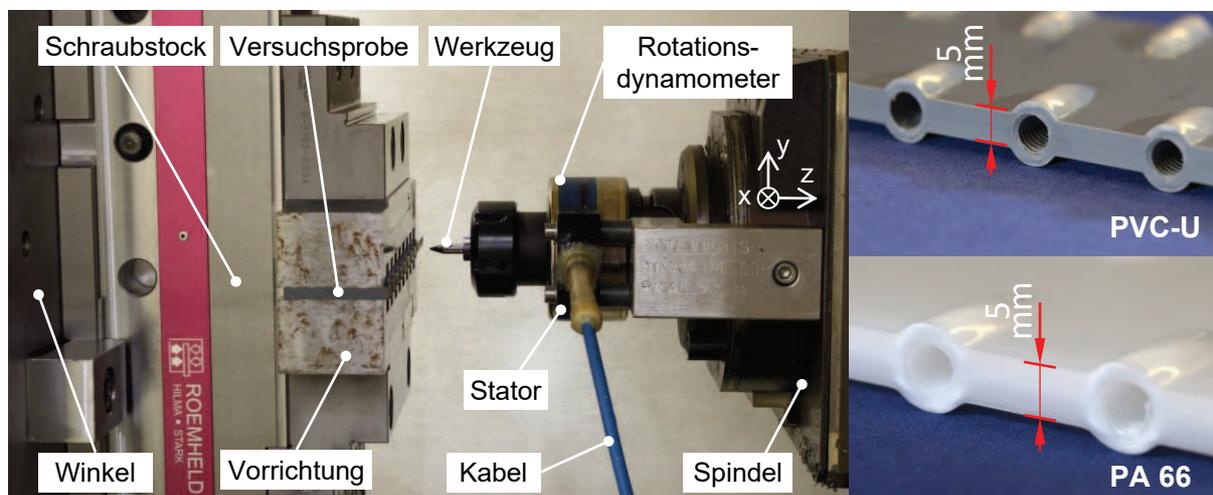


Abbildung 4-4: Versuchsaufbau zur Erfassung der mechanischen Werkzeugbelastungen

Die Vorschubkraft und das Drehmoment wurden werkzeugseitig aufgenommen. Mithilfe einer Vorrichtung lässt sich die Versuchsprobe in dem Schraubstock einspannen, welcher an den auf dem Rundtisch befestigten Winkel angebracht ist. Die eingebaute Vorrichtung ist mit Freiräumen versehen, damit die radiale Aufweitung des Materials beim Fließbohren ermöglicht wird.

Insgesamt acht Bohrungen wurden in eine Versuchsprobe eingebracht. Die Vorschubkraft und das Drehmoment wurden bei drei Bohrungen aufgenommen. Während beim Fließbohren des Kunststoffes PVC-U komplett auf eine Schmierung verzichtet wurde, wurde bei der Bearbeitung des Kunststoffes PA66 ein Schmieröl vom Typ Unicut® VA verwendet, um die starken Aufschweißungen an der Werkzeugoberfläche zu minimieren. Aufgrund der kleinen Durchmesser der erzeugten Bohrungen lässt sich das Gewindeformen nicht anwenden. Fünf metrische Gewinde der Größe M6 wurden durch anschließendes Gewindebohren bearbeitet. Die Schnittgeschwindigkeit betrug dabei $v_c = 25$ m/min. Drei der Bohrungen wurden angesichts der statischen Festigkeit im axialen Zugversuch geprüft. Drei bearbeitete Bohrungen wurden mithilfe eines Mikroskops hinsichtlich der Durchmesser am Bohrungseintritt vermessen. Schließlich wurden jeweils eine Bohrung und ein Gewinde frästechnisch freigelegt, um eine Längsschnittanalyse durchzuführen.

Zur Temperaturmessung wurden zunächst Thermolemente werkstückseitig eingesetzt. In der Literatur wurde ebenfalls versucht, die Prozesstemperaturen auf diese Weise zu vermessen [15]. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes lässt jedoch keine genaue Messung zu. **Abbildung 4-5** zeigt beispielsweise eine solche Temperaturmessung an einem Flachprofil des Kunststoffes PA66 mit einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm.

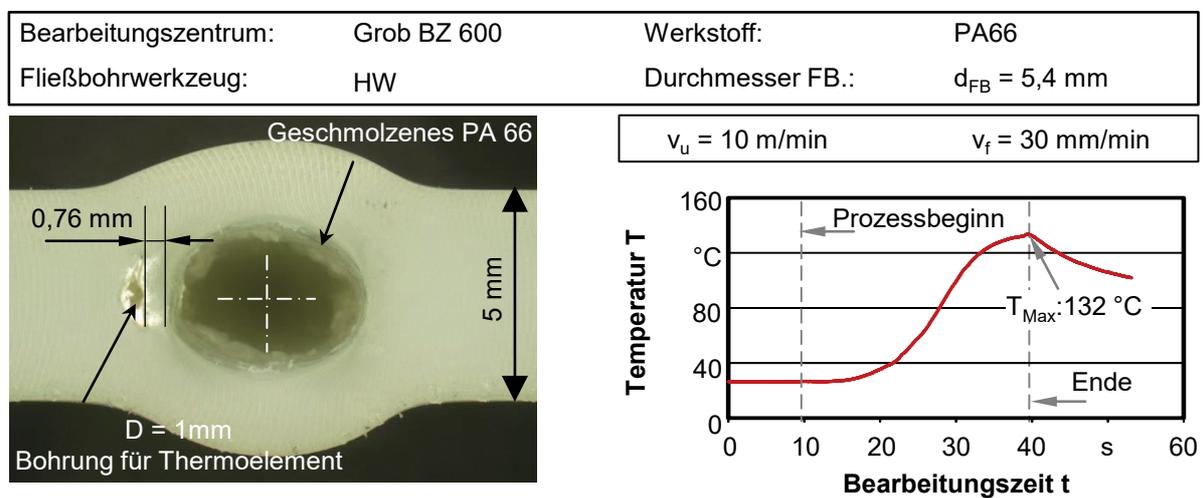


Abbildung 4-5: Werkstückseitige Temperaturmessung an einem Flachprofil aus PA66

Vor dem Fließbohren wurde eine kleine Bohrung mit einem Durchmesser von $D = 1$ mm mittig in das Profil eingebracht. Der Abstand von der Bohrung zu der Bohrungsmittelpunkt beim Fließbohren beträgt $a = 3,5$ mm und die Bohrtiefe beträgt $t_B = 5$ mm. Ein Thermolement mit einem Durchmesser von $D = 0,5$ mm wurde bis zum Bohrungsgrund positioniert. Für eine bessere Wärmeleitfähigkeit wurde eine Wärmeleitpaste auf Silikonbasis in die Bohrung eingespritzt. Nach dem Fließbohren ergibt sich ein Abstand zwischen der Thermolementbohrung und der Fließbohrung von $a = 0,76$ mm. Obwohl sich geschmolzenes

Polyamid an der Bohrungswand erkennen lässt, wurde eine maximale Temperatur von $T_{\text{Max}} = 132 \text{ °C}$ gemessen. Diese Temperatur ist viel niedriger als der Schmelzpunkt ($T_S = 255 \text{ °C}$, Herstellerangabe) des Werkstoffs [114]. Daher wurde auf diese Messmethode verzichtet.

Die Erfassung der thermischen Belastungen wurde anschließend werkzeugseitig durchgeführt. Ein präpariertes Werkzeug kam dabei zum Einsatz. **Abbildung 4-6** zeigt den Versuchsaufbau an der Versuchsmaschine Grob BZ 600 und den Längsschnitt des präparierten Werkzeugs. Während des Versuchs blieb das Werkzeug fest mit einer speziellen Vorrichtung am Winkel fixiert. Die Versuchsprobe wurde in einer Vorrichtung eingeklemmt, unter Rotation gesetzt und mit der Vorschubgeschwindigkeit in das Werkzeug gefahren. Dabei wurde das Werkzeug mittig in die Versuchsprobe eingedrückt. Zwei tiefe Stufenbohrungen wurden durch Erodieren in das Werkzeug eingebracht. Die Tiefe der Bohrungen betrug $t_B = 28,5 \text{ mm}$. Der Abstand von der Mitte der Tiefbohrung zur Werkzeugmantelfläche beträgt $a = 1,4 \text{ mm}$. Zwei Thermolemente mit dem Durchmesser $D = 0,25 \text{ mm}$ wurden im Übergangsbereich zwischen dem Werkzeugkonus und dem zylindrischen Teil positioniert. Aufgrund des Abstandes zwischen den Thermolementen und der Werkzeugoberfläche sind die gemessenen Temperaturen niedriger als die tatsächlichen Temperaturen in der Kontaktfläche zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück.

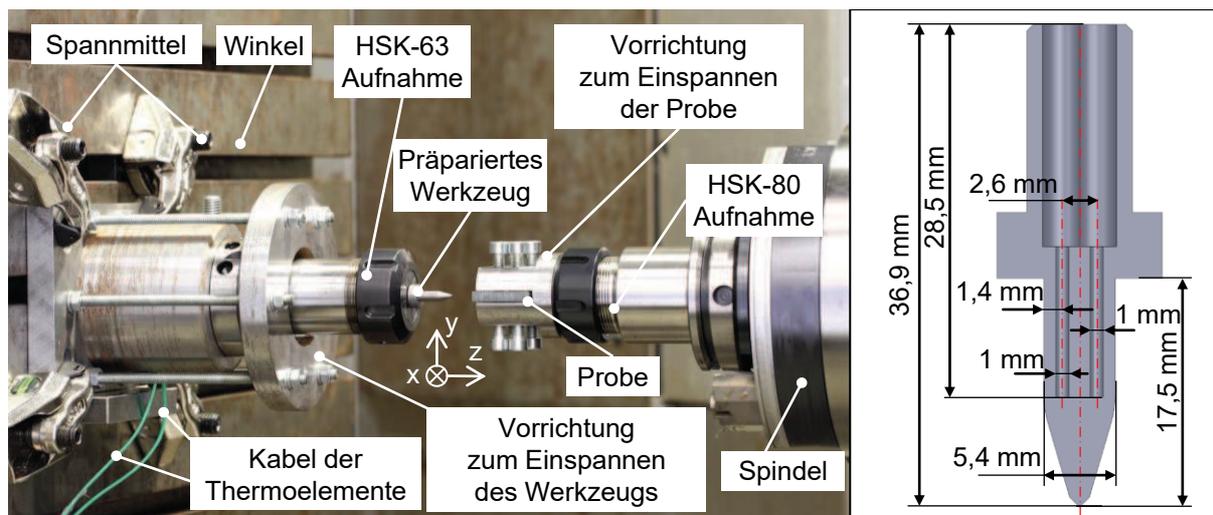


Abbildung 4-6: Versuchsaufbau zur Erfassung der Prozess Temperaturen

Vor dem Einbringen der Thermolemente wurde eine Wärmeleitpaste in die Bohrungen eingespritzt, um die Wärmeübertragung zwischen dem Werkzeug und dem Thermolement zu verbessern. Nachdem die Thermolemente in den Bohrungen positioniert wurden, wurden die Bohrungseintritte sowie die Thermodrähte mit X-60 Kleber abgedichtet, damit die Thermolemente nicht aus den Bohrungen rutschen und keine Luft und Feuchtigkeit in die Tiefbohrungen eindringen. Über eine Spannzange wurde das präparierte Werkzeug in einer HSK-63 Werkzeugaufnahme eingeklemmt und anschließend in einer Vorrichtung integriert. Die Vorrichtung wurde an einem Winkel befestigt, der auf dem Maschinentisch angebracht wurde. Beim jeweiligen Werkstoff bildeten die drei eingesetzten Vorschubgeschwindigkeiten sowie die minimale- und maximale Umfangsgeschwindigkeit die Versuchsmatrix. Bei jeder

Parameterkombination wurde die Messung zweifach durchgeführt. Während des Versuchs wurde eine Bohrtiefe von $t_B = 15$ mm eingestellt.

4.5.2 Magnesiumknetlegierung AZ31

Vor den systematischen Untersuchungen der Magnesiumknetlegierung AZ 31 wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, um die Einsatzmöglichkeit des Fließbohrens bei einer Magnesiumknetlegierung zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass sich geschlossene Bohrungswände während des Fließbohrens bilden und tragfähige metrische ISO-Innengewinde der Größe M6 sowohl durch das Gewindebohren als auch das Gewindeformen einbringen lassen [11]. Da Magnesiumwerkstoffe bei Raumtemperatur kein ausreichendes Verformungsvermögen aufweisen, wird ein besseres Gewindeprofil durch das zerspan-technische Gewindebohren erzeugt. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die geformten Gewinde eine höhere Auszugsfestigkeit gegenüber gebohrten Gewinden aufweisen [105]. Aufgrund der Verfahrensvorteile konzentrieren sich die Untersuchungen daher auf die Kombination des Fließbohrens mit anschließendem Gewindeformen.

Bei der Bearbeitung von Leichtbaustrukturen können sich dünnwandige Profile unter den Belastungen verformen. Dies führt eventuell zu Ausschussprodukten. Zur Ermittlung der beiden mechanischen Bauteilbelastungen Vorschubkraft F_z und Drehmoment M_z wurden Fließbohrversuche an einem Bearbeitungszentrum vom Typ GROB BZ 40 CS durchgeführt. Zum Einsatz kamen Magnesiumprofile aus AZ31 mit den Wandstärken von $t_w = 4 \dots 8$ mm. Neben einer Variation der Wandstärke wurden vier Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 60 \dots 120$ m/min schrittweise um $\Delta v_u = 20$ m/min variiert. Diese Parameter bilden mit zwei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_{f1} = 100$ mm/min und $v_{f2} = 200$ mm/min die Versuchsmatrix. Das Fließbohrwerkzeug mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm wurde verwendet, um anschließend die Gewindegröße M6 anfertigen zu können.

Neben den beiden mechanischen Größen Vorschubkraft und Drehmoment ist die Prozesstemperatur T von großer Bedeutung. Magnesiumspäne mit hohem Mg-Gehalt werden aufgrund ihrer leichten Entzündlichkeit als Gefahrstoff eingestuft [101]. Beim Fließbohren der Magnesiumlegierung entstehen zwar keine Späne, allerdings können die Temperaturen ein sehr hohes Niveau erreichen. Ein kritischer Punkt wird überschritten, wenn der Schmelzpunkt des Werkstoffes erreicht wird. Denn bei Kontakt mit Sauerstoff kann es zu einer chemischen Reaktion kommen und ein Brand ist nicht auszuschließen [128]. Für einen sicheren Prozess wurde die thermische Bauteilbelastung mit Hilfe einer Wärmebildkamera vom Typ ImageIR® 8300 der Fa. InfraTec versuchsbegleitend aufgenommen. Dabei wurden die Temperaturfelder der Bohrungswand erfasst. Temperaturmessungen beschränken sich auf die Wandstärke von $t_w = 6$ mm, da ab dieser Wandstärke die Bohrungswände rissfrei sind. Bei gerissener Bohrungswand führt das Material unter dem Lack wegen des geringen Emissionsgrads zu Messfehlern. Eine Umfangsgeschwindigkeitsvariation von $v_u = 60$ m/min bis $v_u = 120$ m/min wurde in Kombination mit der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 100$ mm/min ausgewählt, um den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf den Prozess zu untersuchen. Des Weiteren wurden Messungen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min bei der minimal und maximal eingesetzten Umfangsgeschwindigkeit durchgeführt.

Abbildung 4-7 stellt den Versuchsaufbau zur Erfassung der thermomechanischen Bauteilbelastungen beim Fließbohren dar. Die Versuchsproben in den verschiedenen Wandstärken wurden mithilfe eines Hydraulikschraubstocks vertikal zur X-Achse der NC-Maschine gespannt. Die Vorschubkräfte und Drehmomente wurden werkzeugseitig mit einem Rotationsdynamometer vom Typ Kistler 9125A aufgenommen. Über das Rotationsdynamometer, welches gleichzeitig als ein Spannzangensystem dient und über einen HSK-63-Anschluss verfügt, wurde das Werkzeug geklemmt. Die erfassten mechanischen Bauteilbelastungen wurden in Form eines Signals über das Kabel an einen Messrechner weitergeleitet und verarbeitet.

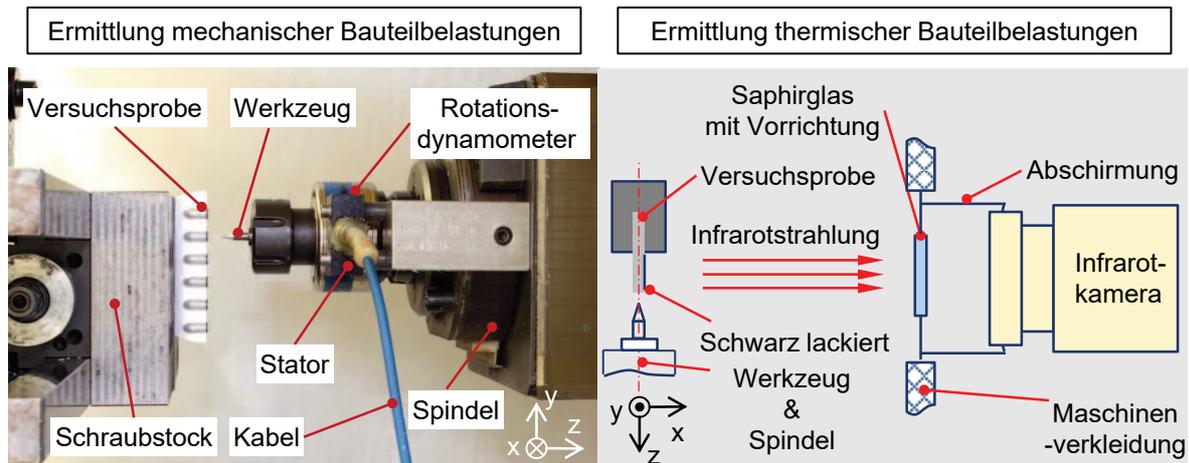


Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur Erfassung der thermomechanischen Werkzeugbelastungen

Die Versuchsmaschine Grob BZ 40 CS verfügt über drei Türen, die mit Plexiglas bestückt sind und gleichzeitig als Sicherheitsfenster dienen. Wird die Infrarotkamera allerdings zur Temperaturmessung außerhalb der Versuchsmaschine platziert, stellt das Plexiglas ein Hindernis dar, da es einen niedrigen Transmissionsgrad im Infrarotbereich aufweist. Daher wurde eine seitliche Tür während der Temperaturmessung offen gehalten. Ein Saphirglas ersetzt unter Verwendung einer Vorrichtung ein seitliches Maschinenfenster und lässt damit die Infrarotstrahlung durch. Die IR-Strahlung der Bohrungswand wurde von der eingesetzten Wärmebildkamera empfangen und ausgewertet. Zwei Bohrungen wurden je Schnittwertkombination angefertigt. Die Versuchsprobe wurde so präpariert, dass die der Saphirglas zugewandten Seite mit grobem Sandpapier angeraut und dann mit einer hochtemperaturbeständigen Farbe geschwärzt wurde. Der Innenraum der Versuchsmaschine und die Übertragungsstrecke zwischen der Versuchsprobe und der Wärmebildkamera wurden abgeschirmt, damit keine IR-Strahlung der Umgebung eindringen und die Messung verfälschen kann.

Bei allen Parameterkombinationen wurden insgesamt acht Bohrungen gefertigt. Die Vorschubkraft und das Drehmoment wurden dreimal aufgenommen. Drei Bohrungen wurden zur Untersuchungen ihrer geometrischen Eigenschaften ausgewählt. Vier Gewinde wurden bei folgendem Gewindeformen mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 20$ m/min in die fließgebohrten Bohrungen eingebracht. Drei davon wurden hinsichtlich ihrer Auszugsfestigkeit bei axialen Zugversuchen eingesetzt. Eine Bohrung und ein Gewinde wurden schließlich zur Längsschnittanalyse frästechnisch aufgetrennt. Beim Fließbohren wurde eine

Bohrtiefe von $t_B = 16$ mm gefertigt, damit bei der anschließenden Gewindebearbeitung eine nutzbare Gewindetiefe von $t_{Ge} = 9$ mm erreicht wurde. Bei dieser eingestellten Bohrtiefe fließt wenig Material entgegen der Vorschubrichtung und es bildet sich ein durch die Gratbildung hervorgerufener Aufwurf am Bohrungseintritt. Da das eingesetzte Fließbohrwerkzeug über keine Senkschneide verfügt, wurde der Materialaufwurf frästechnisch nachträglich entfernt und somit eine ebene Planfläche erzeugt. Während beim Fließbohren komplett auf ein KSS-Konzept verzichtet wurde, kam beim Gewindeformen ein Schmieröl vom Typ Unicut® VA zum Einsatz.

4.5.3 Messing CuZn37

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Bearbeitungszentrum vom Typ GROB BZ 40 CS durchgeführt. Der Versuchsaufbau richtet sich nach dem Versuchsaufbau beim Fließbohren der Magnesiumlegierung AZ 31 (vgl. Abbildung 4-7). Zur Ermittlung der mechanischen Werkzeugbelastungen kamen Profile mit einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm zum Einsatz. Das Fließbohrwerkzeug mit dem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm wurde verwendet, um anschließend Gewinde der Größe M6 anfertigen zu können. Drei Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 100$ m/min bis $v_u = 300$ m/min wurden schrittweise um $\Delta v_u = 100$ m/min variiert. Diese Parameter bilden mit drei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_{f1} = 100$ mm/min, $v_{f2} = 150$ mm/min und $v_{f3} = 200$ mm/min die Versuchsmatrix. Die Vorschubkräfte und Drehmomente wurden werkzeugseitig mit einem Rotationsdynamometer vom Typ Kistler 9125A aufgenommen. Beim Fließbohren der Messinglegierung wurde auf KSS verzichtet. Nach dem Fließbohren wurden Gewinde mithilfe des Gewindeformens bearbeitet. Ein Schmieröl vom Typ Unicut® VA kam dabei zum Einsatz.

Die Ermittlung der thermischen Werkzeugbelastung wurde mit Hilfe einer Wärmebildkamera vom Typ ImageIR® 8300 der Fa. InfraTec versuchsbegleitend durchgeführt. Die Temperaturfelder der Bohrungswand bei unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden erfasst. Vor dem Fließbohren wurde die Außenseite des Profils, welche zum Objektiv der Wärmebildkamera gerichtet war, mit einem temperaturbeständigen Lack beschichtet.

Bei allen Parameterkombinationen wurden insgesamt acht Bohrungen angefertigt. Die mechanischen Werkzeugbelastungen wurden dreimal aufgenommen. Drei Bohrungen wurden zur Untersuchung ihrer geometrischen Eigenschaften ausgewählt. Fünf Gewinde wurden mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_{u,Ge} = 20$ m/min in die fließgebohrten Bohrungen eingebracht. Drei davon wurden hinsichtlich ihrer Auszugsfestigkeit bei axialen Zugversuchen eingesetzt. Eine Bohrung und ein Gewinde wurden schließlich zur Längsschnittanalyse frästechnisch aufgetrennt. Beim Fließbohren wurde eine Bohrtiefe von $t_B = 16$ mm gefertigt, damit bei der anschließenden Gewindebearbeitung eine nutzbare Gewindetiefe von $t_{Ge} = 9$ mm erreicht wurde. Die geringe Bildung des Materialaufwurfs beim Fließbohren wurde nachträglich frästechnisch entfernt und somit eine plane Bauteiloberfläche erzeugt.

4.5.4 Edelstahl X5CrNi18-10

Zum Fließbohren des Edelstahls X5CrNi18-10 kommen Flachprofile mit unterschiedlicher Wandstärke zum Einsatz. Die Länge der Flachprofile beträgt $l = 180$ mm und die Bereit-

$b = 50$ mm. Die Wandstärke der Profile betragen $t_w = 2 \dots 4$ mm in einer Variation von $\Delta t_w = 1$ mm. Neben einer Variation der Wandstärken wurden vier Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 40$ m/min bis $v_u = 100$ m/min schrittweise um $\Delta v_u = 20$ m/min variiert. Diese Parameter bilden mit zwei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_{f1} = 100$ mm/min und $v_{f2} = 200$ mm/min die Versuchsmatrix. Die Tiefe des Fließbohrens beträgt $t_B = 16,3$ mm. Sowohl Werkzeuge aus Hartmetall als auch Keramik-Fließbohrer mit dem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm wurden verwendet, um im Anschluss M6-Gewinde bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 20$ m/min einzubringen.

Die Fließbohrversuche wurden an einem Bearbeitungszentrum vom Typ GROB BZ 600 durchgeführt. In **Abbildung 4-8** ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die mechanischen Werkzeugbelastungen wurden werkzeugseitig mit einem Rotationsdynamometer vom Typ Kistler 9125A11 erfasst. Eine Werkzeugverlängerung mit HSK-63 auf HSK-80-Anschluss diente als Adapter für das Rotationsdynamometer. Die Versuchsprofile wurden mithilfe einer Vorrichtung horizontal in einen Schraubstock eingespannt. Während das Fließbohren der Edelstahlprofile der Wandstärke von $t_w = 2$ mm direkt erfolgte, wurden in die Profile mit der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4$ mm Vorbohrungen mit einem Durchmesser von $D = 2$ mm und einer Bohrtiefe von $t_B = 18$ mm eingebracht. Dabei wurde eine Schnittwertkombination von $v_c = 5,5$ m/min und $v_f = 21$ mm/min eingesetzt. Die Werkzeugspitze der eingesetzten Werkzeuge verfügt über einen Spitzendurchmesser von $D = 1,5$ mm, welcher kleiner als der Durchmesser der Vorbohrung ist. Beim Fließbohren bearbeitet die Werkzeugspitze praktisch kein Material mehr und ist daher entlastet.

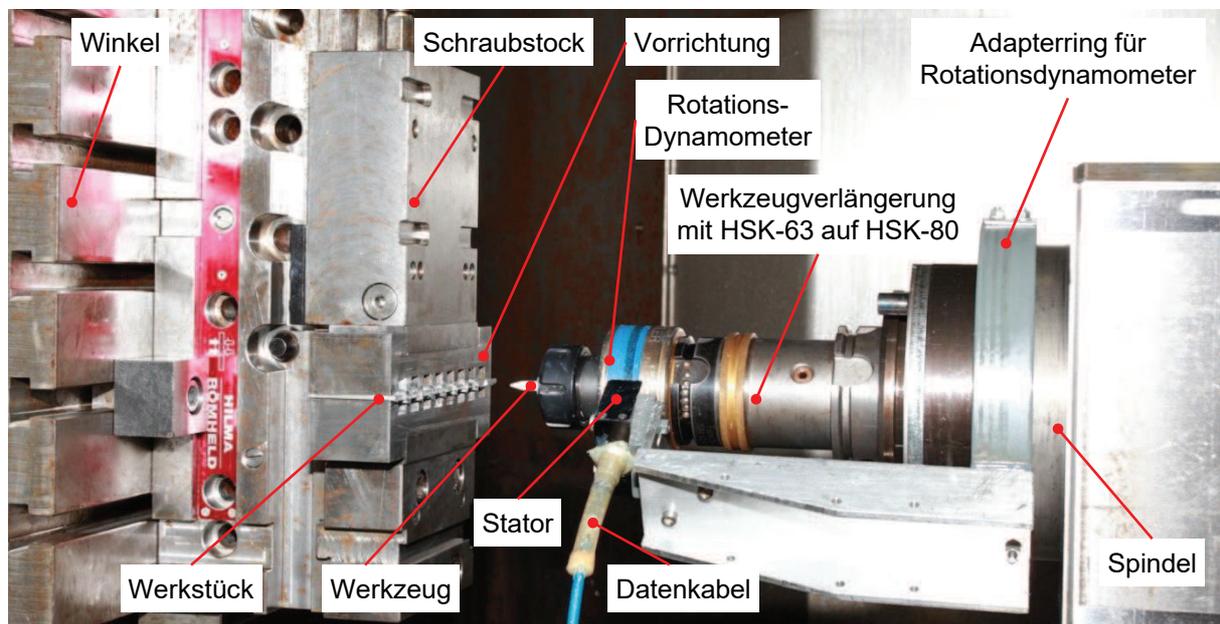


Abbildung 4-8: Versuchsaufbau zur Erfassung der mechanischen Werkzeugbelastungen

Beim Bohren der Tiefbohrung erfolgte die KSS-Zuführung von außen. Beim Fließbohren der Profile mit der Wandstärke von $t_w = 2$ mm wurde ein zinksulfidbasiertes Trennmittel auf die Werkzeugoberfläche aufgetragen, während dieses bei der Bearbeitung von $t_w = 3 \dots 4$ mm Wandstärke noch zusätzlich in die Tiefbohrung gefüllt wurde. Beim Gewindeformen kam das Schmieröl vom Typ Unicut® VA zum Einsatz. Bei jeder Parameterkombination wurden sechs Bohrungen bearbeitet. Die Vermessung der mechanischen Belastung wurde dreimal wieder-

holt. In die fließgebohrten Bohrungen wurden insgesamt drei Gewinde eingebracht. Nach jeder Fließbohrung wurde der Versuchsaufbau mit Druckluft bis zur Raumtemperatur abgekühlt, um einen Wärmeeinfluss auszuschließen. Jeweils eine Bohrung und ein Gewinde wurden frästechnisch getrennt, um die Bohrungswand bzw. die Bildung der Gewinde visuell zu untersuchen. Zur Bestimmung der Ausformung beim Fließbohren wurden zwei Bohrungen ausgewählt und taktil gemessen.

Die Bestimmung der thermischen Belastung erfolgte mit demselben Versuchsaufbau. Thermoelemente mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 0,25 \text{ mm}$ wurden verwendet. Diese wurde an die noch zu formende Bohrungswand angepresst. **Abbildung 4-9** stellt die Befestigung detailliert dar. Der Abstand des Messpunkts zum Rand der Versuchsprobe beträgt $a = 5 \text{ mm}$. Das Thermoelement wurde mit Aluminiumklebeband befestigt, damit es nicht von der Stelle verrutschen konnte. Darauf wurde ein Stück Stahlwolle gelegt und schließlich mit einem Abdeckblech aus Federstahl fixiert. Das Abdeckblech ist mithilfe einer Schrauben-Mutter-Verbindung mit der Versuchsprobe verbunden, und somit verhindert das Verrutschen des Thermoelements von der Messstelle während des seitlichen Aufweitens des Profils. Eine Vorbohrung von $D = 2 \text{ mm}$ wurde vor dem Fließbohren eingebracht. Die Versuche wurden beim Fließbohren der Profile mit der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ sowohl mit einem Werkzeug aus Hartmetall als auch Keramik durchgeführt.

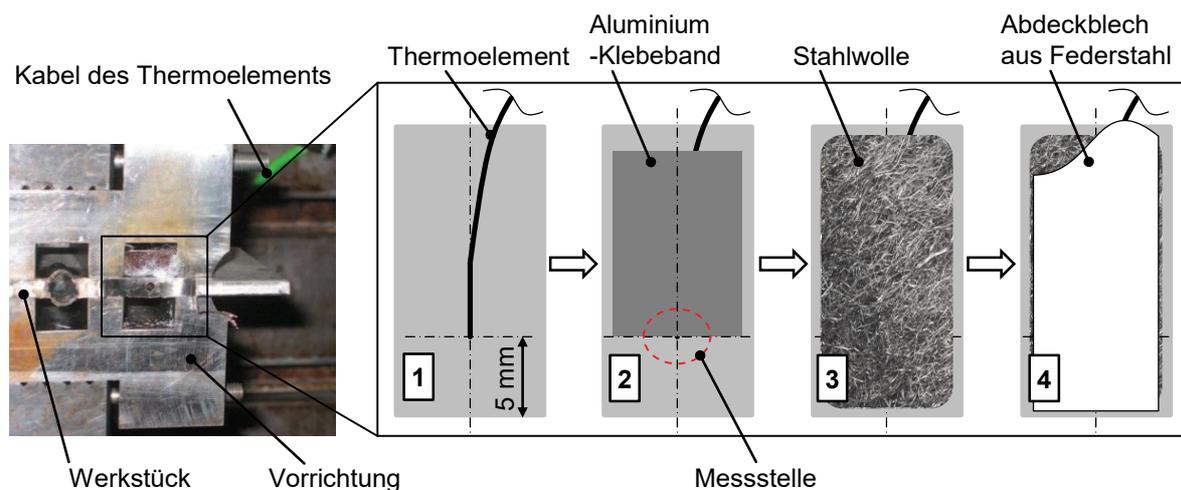


Abbildung 4-9: Bestimmung der thermischen Werkstückbelastung beim Fließbohren

5 Fließbohren der Kunststoffe PA66 und PVC-U

5.1 Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von PA66

5.1.1 Mechanische Werkzeugbelastungen

Das Polyamid PA66 ist ein teilkristalliner, thermoplastischer Kunststoff [86]. Bei thermoplastischen Kunststoffen werden die mechanischen Eigenschaften von der werkstoff-spezifischen Glasübergangstemperatur signifikant beeinflusst. Unterhalb dieser Temperatur ist der Werkstoff hart und spröde. Der Werkstoff verfügt über eine Streckgrenze [44]. Bei einem teilkristallinen, thermoplastischen Kunststoff verlieren die amorphen Bereiche ihre Festigkeit und verhalten sich zäh und duktil, wenn diese Glasübergangstemperatur erreicht ist. Die kristallinen Bereiche im Werkstoff weisen jedoch hohe Festigkeiten auf und halten das Material bei hohen Temperaturen zusammen. Erst wenn die Schmelztemperatur des Werkstoffs erreicht wird, verliert es an Festigkeit und das Fließen des Materials tritt ein.

Abbildung 5-1 und **Abbildung 5-2** stellen die typischen mechanischen Werkzeugbelastungen beim Fließbohren von PA66 in Form von zeitlichen Verläufen dar. Für ein besseres Verständnis ist die Gestalt des eingesetzten Werkzeugs integriert. Alle Prozesse weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Aus dem Aufweiten des sich vor der Werkzeugspitze befindenden Werkstoffs resultieren die Vorschubkraft und das Drehmoment. Diese Größen werden maßgeblich von der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück beeinflusst.

Beim Eindringen der Werkzeugspitze und des Werkzeugkonus steigen sowohl die Vorschubkraft als auch das Drehmoment an. Die Temperaturen zwischen dem Werkzeug und Werkstoff sind am Anfang des Prozesses noch niedriger als die Glasübergangstemperatur des Materials. In dem Fall muss die physikalische Bindekraft der Makromoleküle überwunden werden. Es ergibt sich daher eine hohe Vorschubkraft. Mit zunehmender Bohrtiefe vergrößert sich die Kontaktfläche und das Drehmoment nimmt zu. Dadurch wird mehr Reibungswärme induziert und die Temperatur zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff steigt.

Wenn der Werkzeugkonus in das Material eingedrungen ist, ist der Großteil des sich um das Werkzeug befindenden Werkstoffs so erwärmt, dass die Glasübergangstemperatur ($T_G = 60\text{ °C}$, Herstellerinformation [114]) von PA66 überschritten wird. In dem Fall erweichen die amorphen Bereiche des Werkstoffs, während die kristallinen Bereiche das Material zusammenhalten. Die maximale Vorschubkraft ist in diesem Zustand erreicht und fällt dann wieder ab. Das Drehmoment erreicht in den meisten Fällen auch den maximalen Wert und bleibt auf einem quasi-konstanten Niveau.

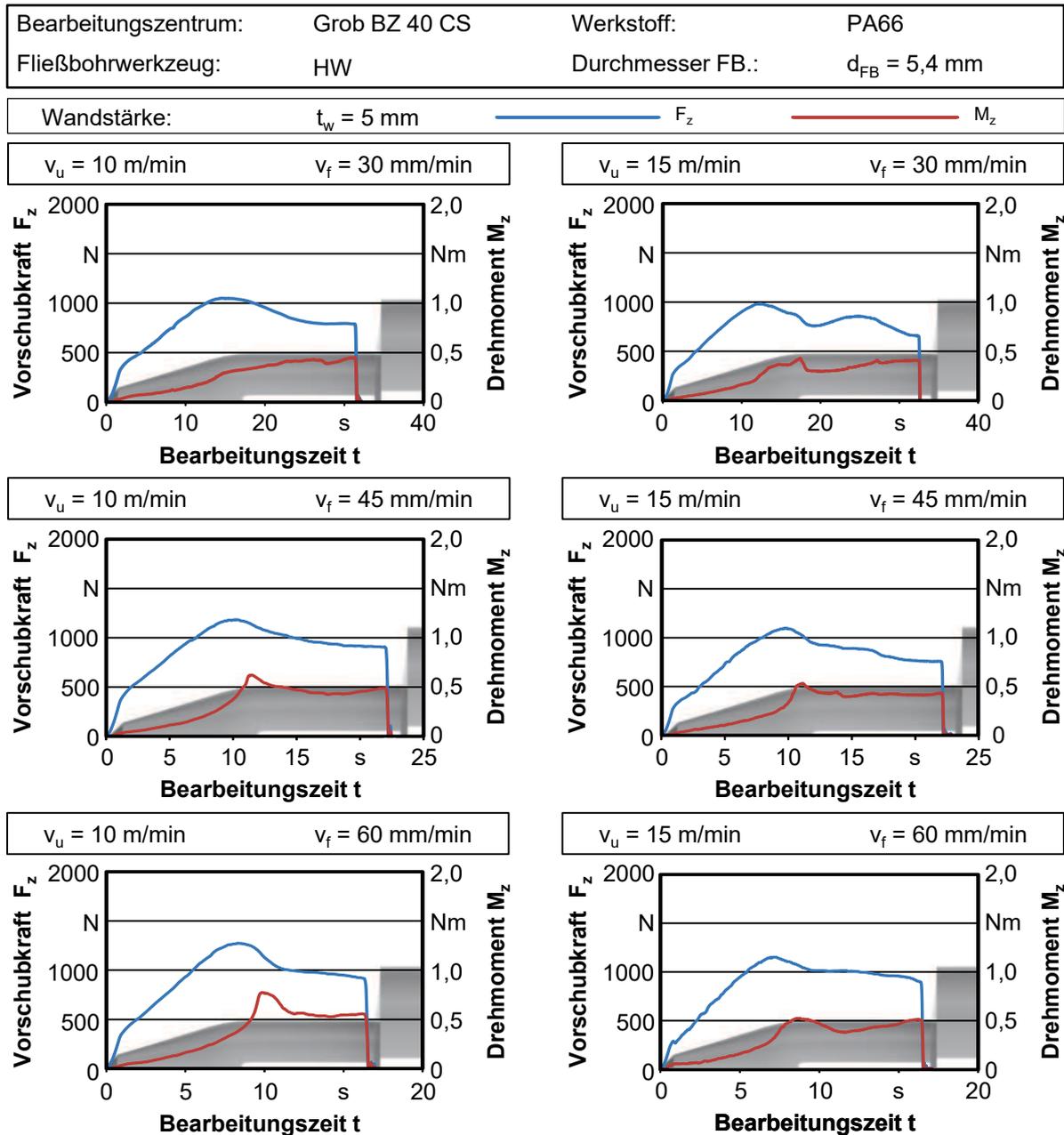


Abbildung 5-1: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren des Kunststoffes PA66 im Umfangsgeschwindigkeitsbereich $v_u = 10 \dots 15 \text{ m/min}$

Ist der zylindrische Teil des Werkzeugs auch in das Material eingedrungen, vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff weiter. Die von der Werkzeugspitze und dem Werkzeugkonus aufgeweitete Bohrungswand wird von dem Werkzeugzylinder unterstützt. Geringe Reibung entsteht in diesem Bereich. Ein quasi-stationärer Verformungszustand ist aufgebaut. Am Ende des Fließbohrens lässt sich ein geringer Anstieg der mechanischen Belastungen bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 25 \text{ m/min}$ erkennen. In dem Fall wird der gegen die Vorschubrichtung fließende und aufgeschmolzene Werkstoff von dem Werkzeugkragen bearbeitet.

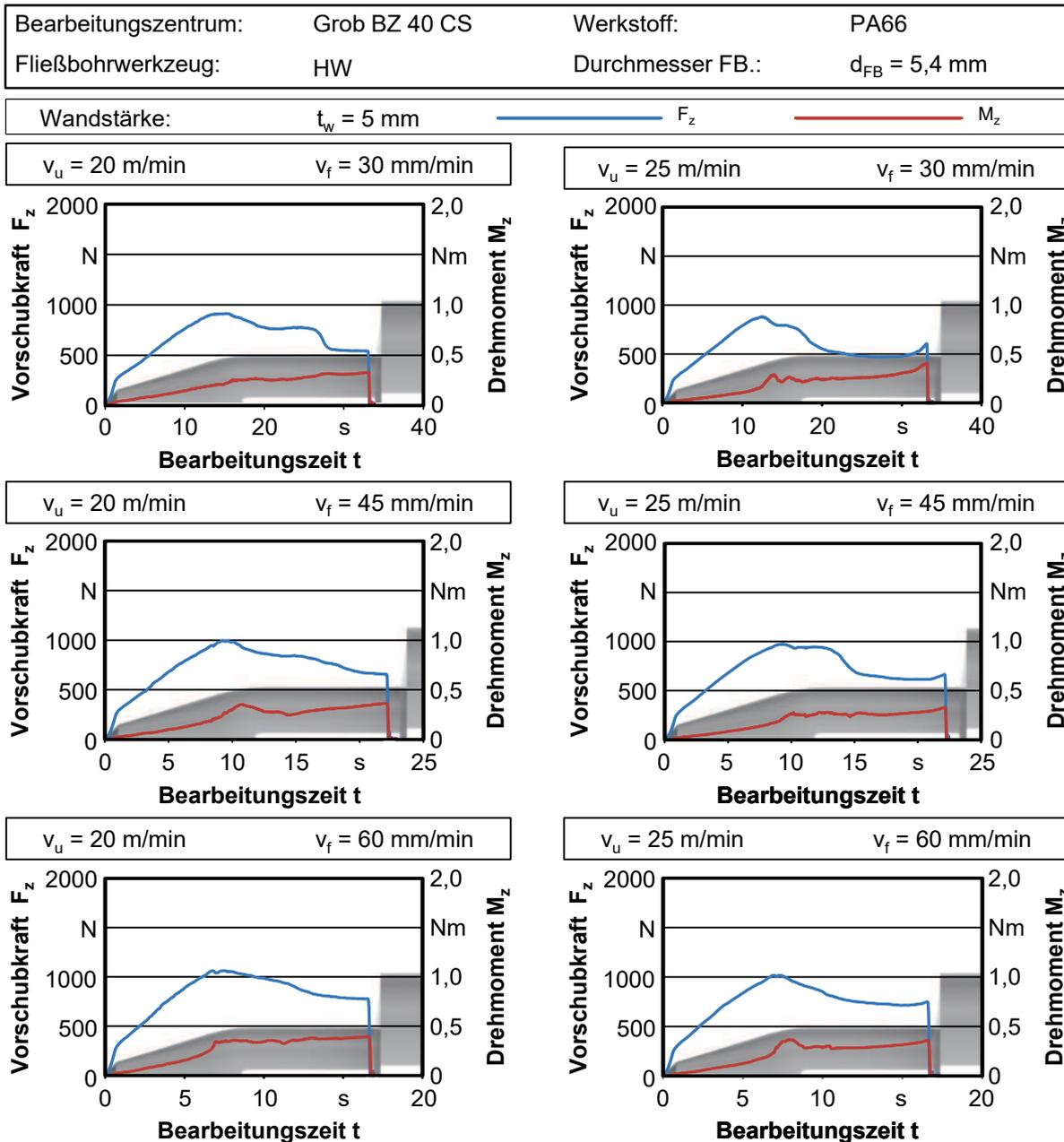


Abbildung 5-2: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren des Kunststoffes PA66 im Umfangsgeschwindigkeitsbereich $v_u = 20 \dots 25 \text{ m/min}$

In **Abbildung 5-3** sind die Maxima der beiden Größen in Abhängigkeit der Parameterkombinationen dargestellt. Die Säulen zeigen die arithmetischen Mittelwerte von drei Messungen. Die Höhe der Fehlerbalken stellt die maximal und minimal ermittelten Werte dar. Sowohl die maximale Vorschubkraft als auch das maximale Drehmoment wurden bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10 \text{ m/min}$ und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 60 \text{ mm/min}$ erfasst. Während eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit zu einer geringeren Vorschubkraft führt, steigert sich diese mit einer Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit. Dieser Sachverhalt lässt sich mit dem thermischen Effekt beim Fließbohren erklären. Bei höherer Umfangsgeschwindigkeit wird mehr Reibungswärme erzeugt. Die Festigkeit des Materials wird herabgesetzt und die Vorschubkraft sinkt. Mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ist eine kürzere Prozessdauer bzw. geringere Reibungswärme

verbunden, was zu einer gegenteiligen Wirkung führt. Das maximale Drehmoment fällt tendenziell mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit ab. Bei der geringsten Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10$ m/min steigt das maximale Drehmoment mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit, bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten ist diese Tendenz nicht mehr deutlich zu erkennen. Insbesondere bei der untersuchten maximalen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 25$ m/min sind die erfassten Werte aufgrund starker Streuung nicht mehr exakt zu unterscheiden. Dies liegt darin begründet, dass bei höherer Umfangsgeschwindigkeit die Temperatur des Materials an der Werkzeugoberfläche heißer wird als die Schmelztemperatur. In dem Fall ergibt sich eine ähnliche Reibbedingung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff. Das Drehmoment verändert sich daher nicht großartig.

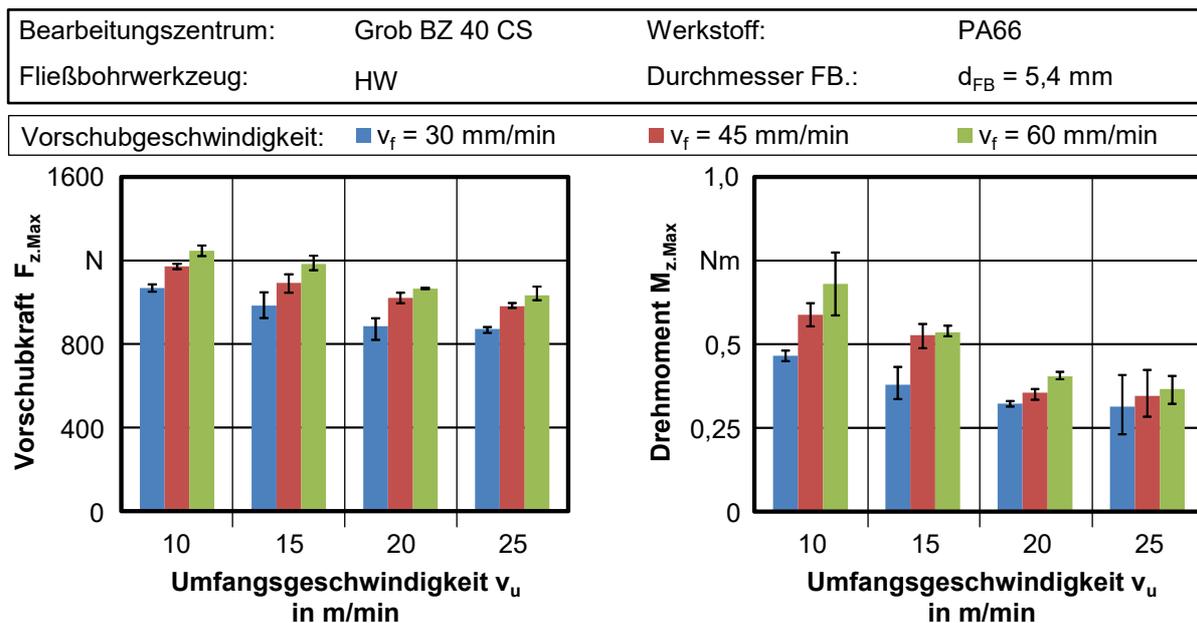


Abbildung 5-3: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$ bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm

5.1.2 Thermische Werkzeugbelastungen

Abbildung 5-4 stellt die zeitlichen Verläufe der erfassten Temperaturen bei den Umfangsgeschwindigkeiten $v_u = 10$ m/min und $v_u = 25$ m/min mit den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 30 \dots 60$ mm/min dar. Die Wandstärke der Versuchsproben beträgt $t_w = 5$ mm. Die Messungen zeigen, dass sich die Temperatur mit zunehmender Bohrtiefe erhöht. Vor dem Prozess liegt das Werkzeug bei Raumtemperatur vor. Am Ende des Prozesses trat die maximale Temperatur ein. Die Variation der Umfangsgeschwindigkeit und der Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst die thermische Werkzeugbelastung nicht signifikant. Am Ende des Prozesses ergeben sich unabhängig von den eingestellten Bearbeitungsparametern ähnliche maximale Temperaturen, die nahe dem Schmelzpunkt des Werkstoffs liegen. Mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit wird die Bearbeitungszeit verkürzt, was zu einer geringeren eingebrachten Wärmemenge führt. Beim Fließbohren wird das Material von dem Werkzeug aufgeweitet. Dabei setzt der Abbau der physikalischen Bindekräfte der Makromoleküle im Werkstoff voraus, dass erhöhte Energie in Form von Wärme zugefügt wird [10]. Bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit ist diese Wärmezufuhr jedoch

abgeschwächt und daher ergeben sich höhere mechanische Werkzeugbelastungen beim Fließbohren (vgl. Abbildung 5-3).

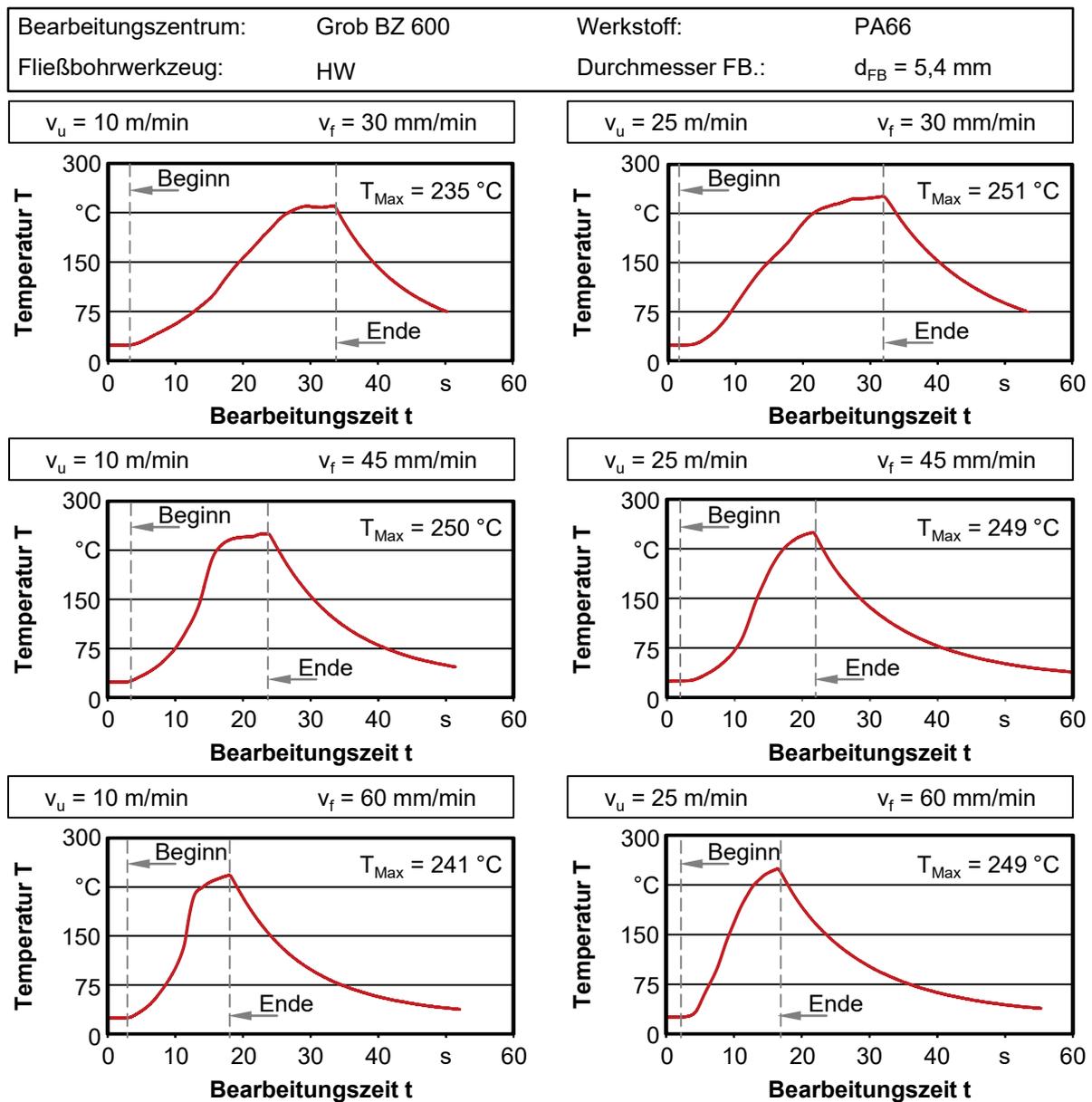


Abbildung 5-4: Thermische Werkzeugbelastung beim Fließbohren des Kunststoffs PA66

Die stetig ansteigende Temperatur ist ein Zeichen dafür, dass sich ein Wärmestau im Übergangsbereich des Werkzeugs bildet. Dessen Entstehung lässt sich mit folgender Begründung erklären. Kunststoffe sind geprägt durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Metallen. Während technische Hartmetalle durchschnittlich über eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 100 \text{ W/mK}$ verfügen [85], besitzt das Polyamid PA66 eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,28 \text{ W/mK}$ [114]. Die induzierte, sich immer steigende Reibungswärme führt einerseits zu einer Temperaturerhöhung in der Kontaktzone zwischen dem Werkzeug und dem Material. Andererseits, da diese Wärme aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs vorwiegend nur durch das Werkzeug abgeleitet werden kann, führt diese Reibungswärme zur Bildung eines Wärmestaus im Werkzeug. Daher nimmt die Temperatur im Werkzeug stetig zu.

5.1.3 Bohrungsqualität

Aufgrund der Adhäsion zwischen dem Werkstoff und dem Werkzeug bilden sich starke Materialanhaftungen an der Werkzeugoberfläche. Hohe Temperaturen begünstigen diese Bildung. Wird das Werkzeug am Ende des Prozesses aus der Bohrung gezogen, hinterlässt es an der Bohrungswand Materialanhaftungen. Der Durchmesser sowie deren Rundheitsabweichung lassen sich daher nicht korrekt mit einer taktilen Messung bestimmen. Um trotz dieser Komplikation die geometrische Gestalt der Bohrung zu untersuchen, wurden die Durchmesser am Bohrungseintritt mikroskopisch vermessen. **Abbildung 5-5** stellt die mikroskopischen Aufnahmen des Bohrungseintritts bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm in Anhängigkeit der Versuchsparameter dar.

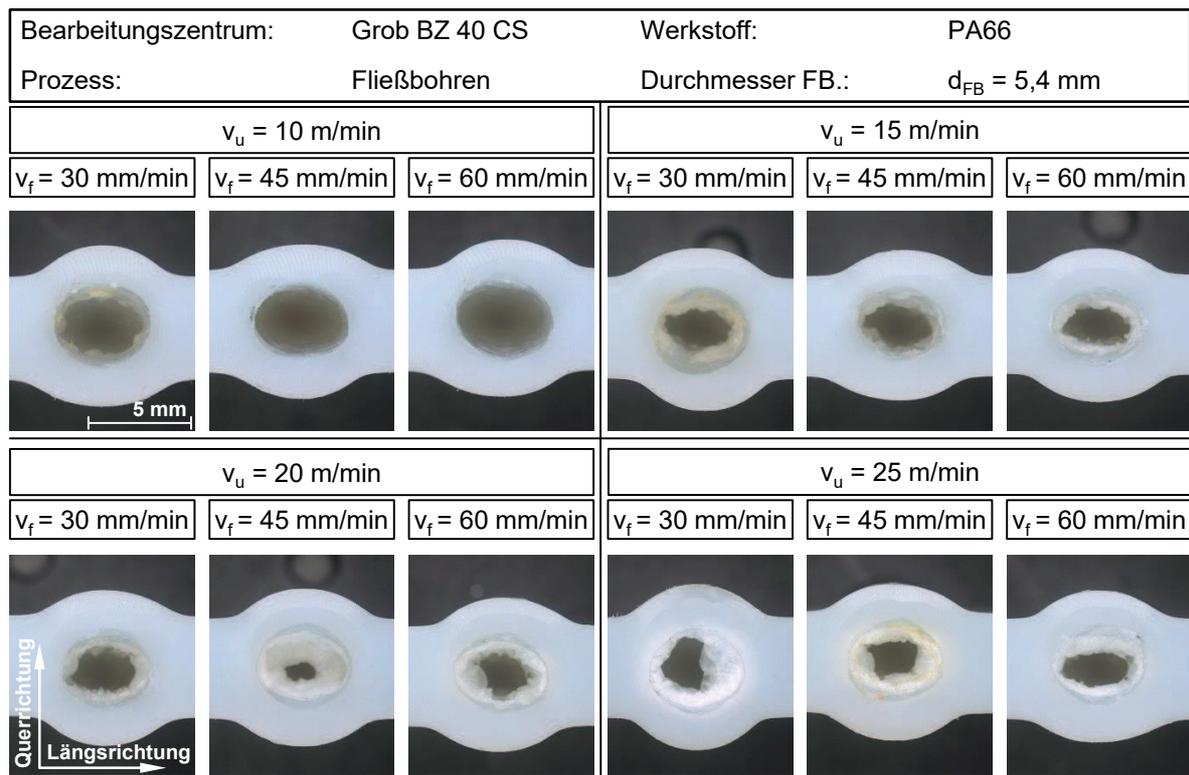


Abbildung 5-5: Querschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PA66

Beim Fließbohren des Polyamids PA66 wurde eine geschlossene Bohrungswand bei allen eingesetzten Parametern erzeugt. Die Bohrungswand weist auch ähnliche Wandstärken in Querrichtung auf. Die geformten Bohrungen unterscheiden sich signifikant von einer zerspanntechnisch hergestellten Bohrung. Sie zeichnet sich durch die ovale Form aus. Die Durchmesser in Längsrichtung sind größer als die in Querrichtung. Die Entstehung derartiger Bohrungen lässt sich mit dem Schrumpfen des Kunststoffes unter Wärmezufuhr erklären. Nachdem das Werkzeug am Ende des Prozesses aus der Bohrung gezogen wird, bleibt die Temperatur in der Bohrungswand noch auf einem hohen Niveau. Bei der Abkühlung absorbieren die gestreckten Molekülketten diese Restwärme und streben nach ihrer ursprünglichen Form [44]. Der Werkstoff fängt an zu schrumpfen. Da die ausgeformte Bohrungswand in Querrichtung nach dem Prozessende keine Abstützung mehr hat, ergibt sich in diese Richtung der kleinste Durchmesser. Dieser Vorgang lässt sich mit dem Abkühlprozess beim Thermoformen von thermoplastischen Kunststoffen vergleichen. In diesem

Prozess kühlt das Bauteil nach der Warmumformung im Umformwerkzeug unterhalb der Erweichungstemperatur ab und es nimmt die von dem Werkzeug vorgegebene Gestalt an [57]. Sonst besteht die Gefahr, dass sich das Bauteil verzerrt und die erwünschte Form nicht erreicht werden kann [130].

Neben der ovalen Form sind die Durchmesser der Fließbohrungen deutlich kleiner als der Durchmesser des Werkzeugs. **Abbildung 5-6** stellt die mikroskopisch erfassten Durchmesser der Fließbohrungen in Längsrichtung und Querrichtung dar. Die Messungen beziehen sich auf den maximalen Durchmesser in beiden Richtungen. Drei Bohrungen wurden dabei vermessen. Während die Bohrungen in Längsrichtung ca. den gleichen Durchmesser von $D_x = 5$ mm aufweisen, sind große Abweichungen des Durchmessers D_y in Querrichtung zu erkennen. Die geringsten Durchmesser ergeben sich immer in Querrichtung, weil hier die Bohrungswand nach dem Rückzug des Werkzeugs keine Abstützung mehr hat und daher am stärksten schrumpft.

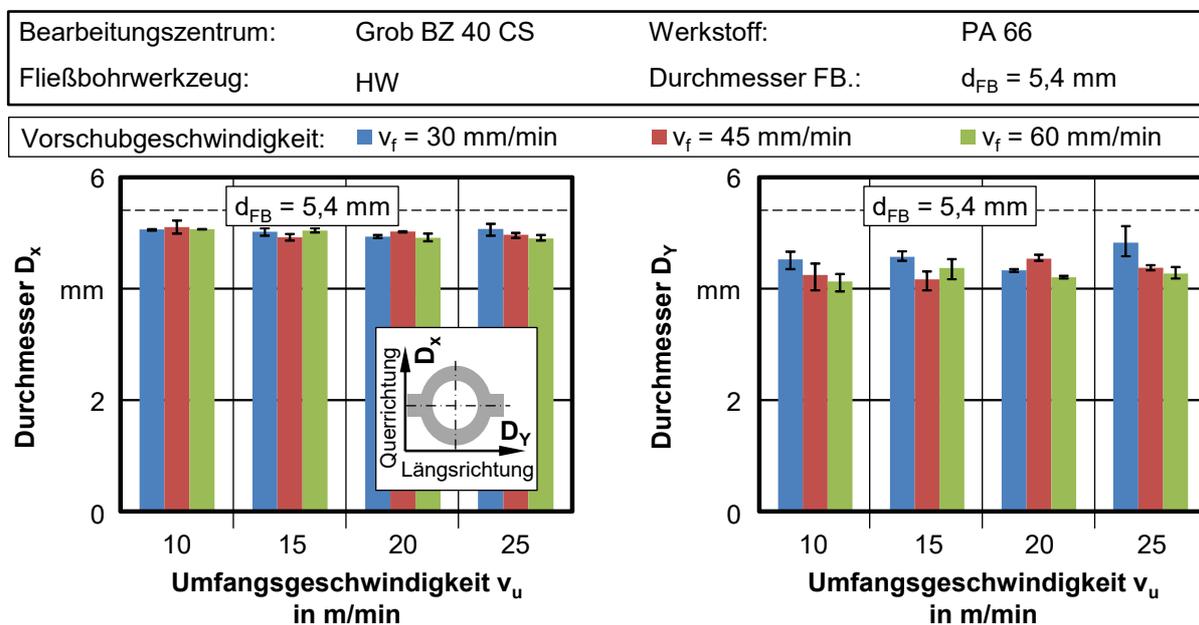


Abbildung 5-6: Durchmesser der Fließbohrungen bei PA66 in Längs- und Querrichtung, $t_w = 5$ mm

5.1.4 Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde

Die Längsschnitte der Fließbohrungen lassen Rückschlüsse auf den Prozess sowie die thermomechanischen Belastungen zu. Die sich dem Schmelzpunkt nähernden Temperaturen hinterlassen sichtbare Spuren an der Innenbohrungswand. **Abbildung 5-7** zeigt die frästechnisch erzeugten Längsschnitte anhand der Parameterkombinationen. Im Vergleich zu den durch ähnliche Weise erzeugten Bohrungen aus Metallen weisen die Bohrungen aus PA66 schlechte Oberflächen auf. Die Bohrungswand ist vorwiegend rau. Tendenziell nimmt die Oberflächengüte der Bohrung mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit ab. Im Bereich der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15 \dots 25$ m/min lassen sich starke Materialanhaftungen an der Bohrungswand erkennen. Die Vorschubgeschwindigkeit hat eher geringen Einfluss auf die Qualität der Bohrungswand. Das aufgetragene Schmieröl erweist sich als wirkungslos gegen die Adhäsion aufgrund der hohen Temperaturen beim Fließbohren.

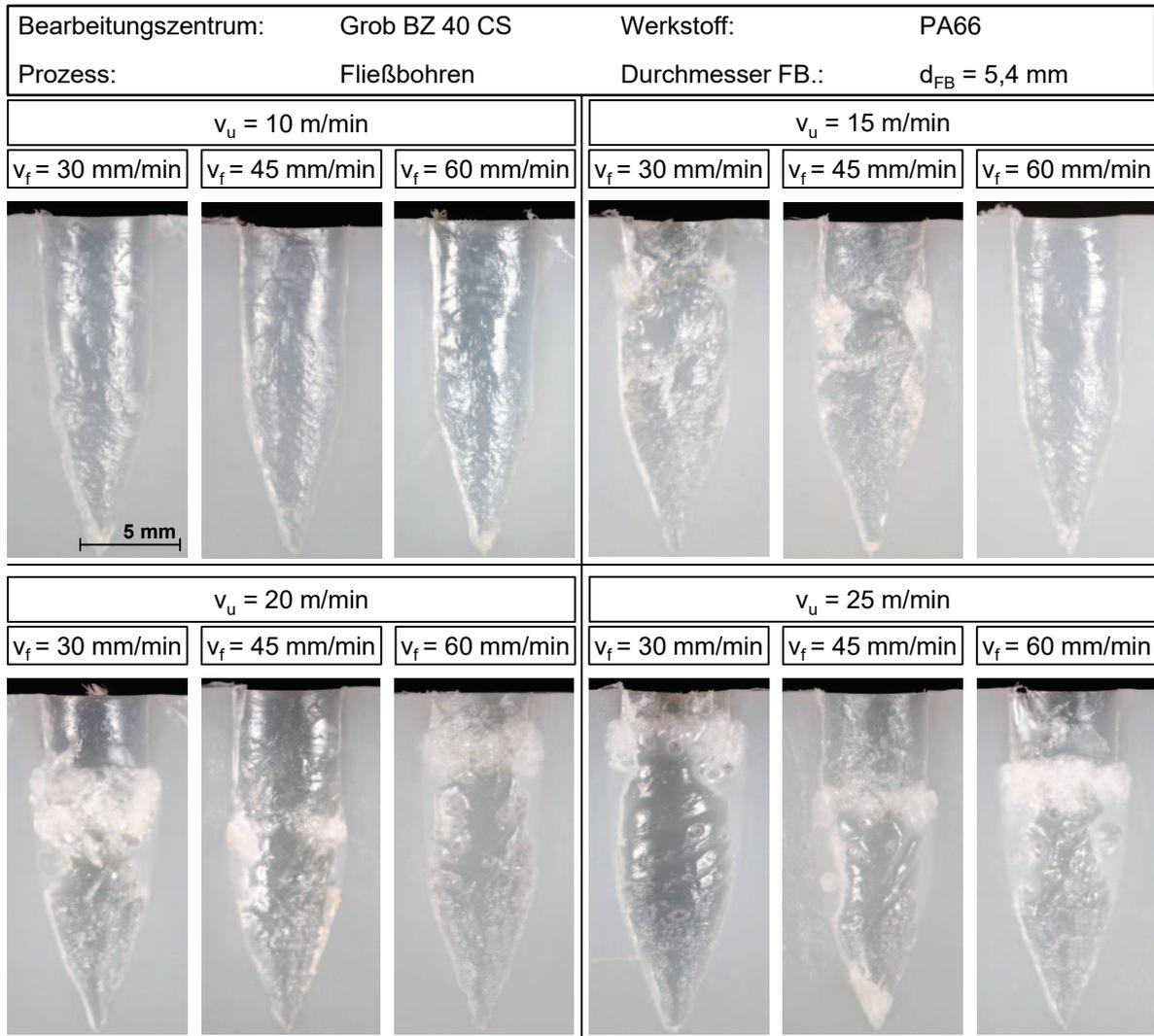


Abbildung 5-7: Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$, PA66

Obwohl das Fließbohrwerkzeug über einen Durchmesser von $d_{FB} = 5,4 \text{ mm}$ verfügt, kann das Gewindeformen aufgrund des Untermaßes der erzeugten Bohrungen nicht angewendet werden. Gewinde lassen sich mit Hilfe des spanabhebenden Gewindebohrers erzeugen. **Abbildung 5-8** zeigt die Längsschnitte der eingebrachten Gewindebohrungen. Die Gewinde weisen ein von den eingesetzten Parametern unabhängig ähnliches Gewindeprofil auf. Dies lässt sich ebenfalls auf das Untermaß der Fließbohrungen zurückführen. Beim Gewindebohren wurde so viel Material abgetragen, dass die ursprüngliche Bohrungswand nicht mehr vorhanden ist. Darüber hinaus kann die statische Festigkeit der Gewinde geschwächt werden.

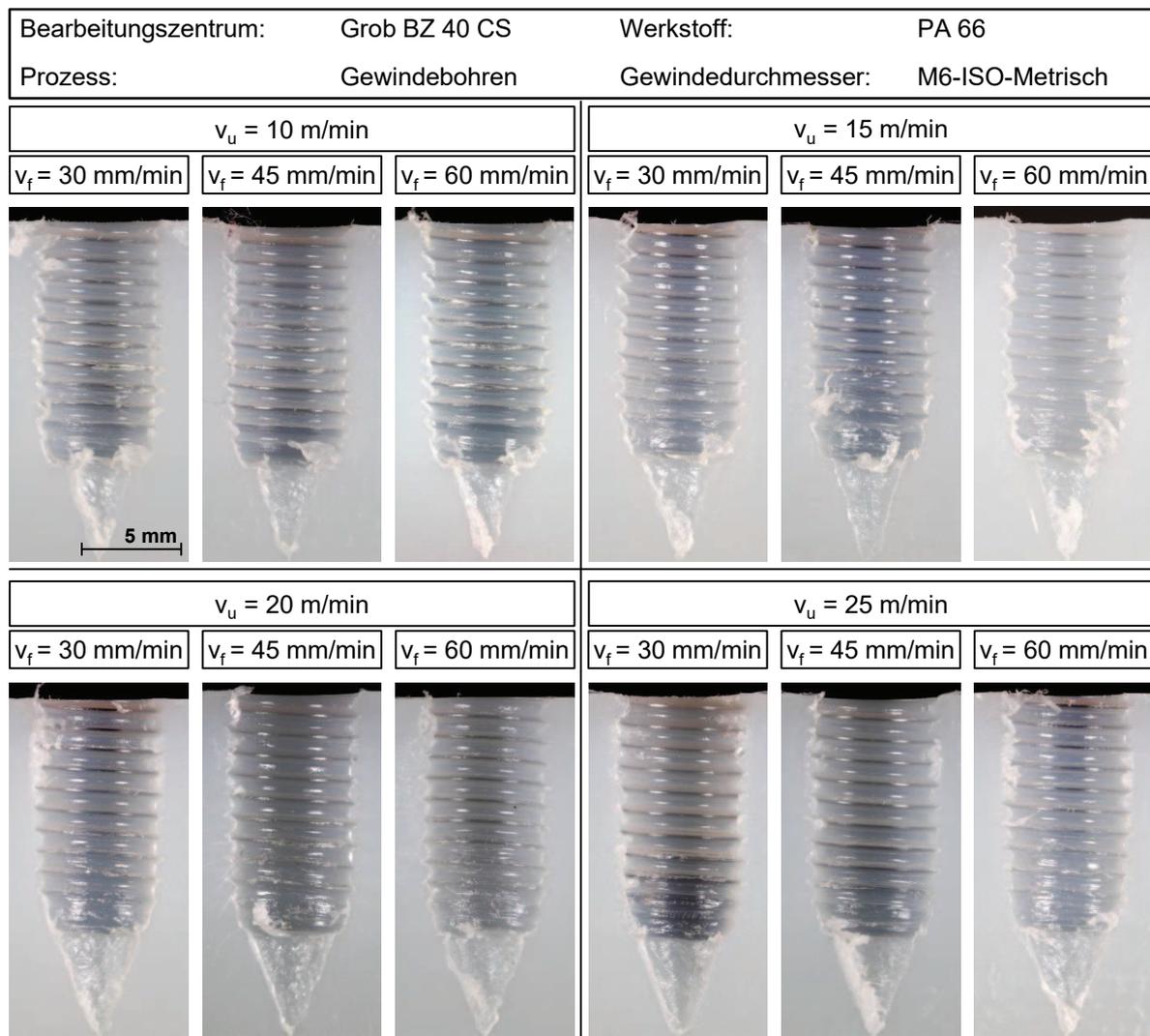


Abbildung 5-8: Längsschnitte der Gewinde bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PA66

5.1.5 Auszugsfestigkeit der Gewinde

Die erzeugten Gewinde wurden im Hinblick auf ihre statische Festigkeit mit Hilfe des Auszugsversuchs geprüft. **Abbildung 5-9** stellt die maximale Auszugskraft bei einer nutzbaren Gewindetiefe dar. Die Gewinde weisen ähnlich maximale Auszugskräfte auf. Dies liegt darin begründet, dass eine ähnliche Bohrungsgestalt nach dem Fließbohren erzeugt wurde (vgl. **Abbildung 5-5** und **Abbildung 5-6**). Die fließgebohrten Bohrungen verfügen über ähnliche Wandstärken in Querrichtung. Beim anschließenden Gewindebohren wurde zwar Material von der Bohrungswand abgetragen, dadurch verändert sich die Gestalt jedoch nicht signifikant. Daher wurden Gewinde mit ähnlicher Festigkeit hergestellt. Die verschiedenen Parameterkombinationen führen beim Fließbohren zwar zu unterschiedlichen thermo-mechanischen Belastungen, haben hier aber keinen eindeutigen Einfluss auf die Auszugsfestigkeit der Gewinde.

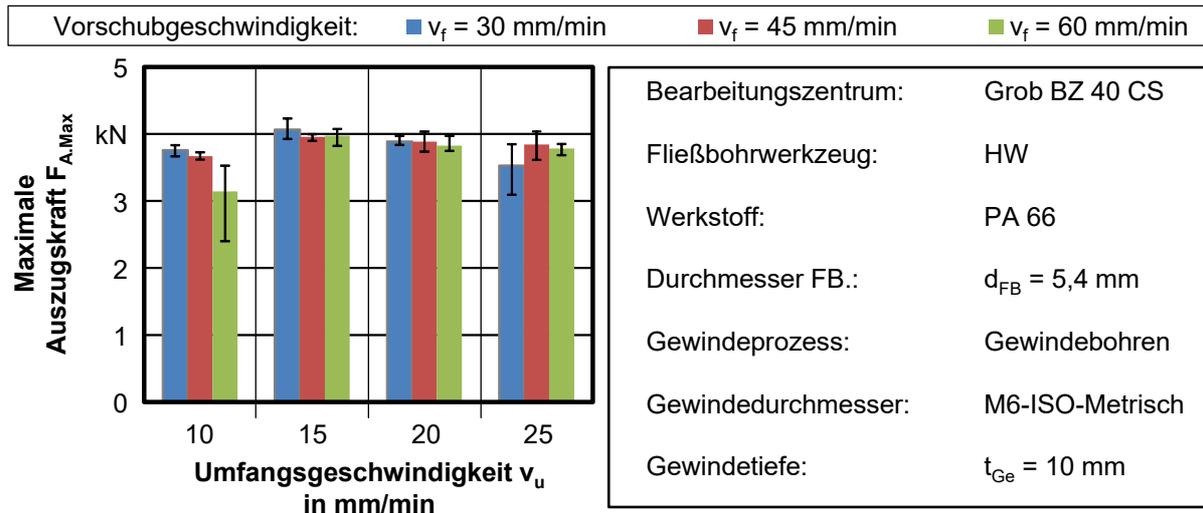


Abbildung 5-9: Auszugsfestigkeit der Gewinde in Abhängigkeit der Versuchsparameter

5.2 Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von PVC-U

5.2.1 Mechanische Werkzeugbelastungen

Der untersuchte Werkstoff PVC-U ist ein amorpher Kunststoff [86], welcher über eine Glasübergangstemperatur von $T_G = 75^\circ\text{C}$ verfügt [137]. In dem Material sind keine kristallinen Bereiche vorhanden, welche beim Erweichen das Material zusammenhalten. Unterhalb der Temperatur ist der Werkstoff hart und spröde. Wird die Glasübergangstemperatur erreicht, verliert das Material an Festigkeit und verhält sich gummiartig und zäh. Wird die Schmelztemperatur überschritten, zersetzt sich der Werkstoff [86]. Daher werden niedrige Umfangsgeschwindigkeiten beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U eingesetzt.

In **Abbildung 5-10** sind die typischen Prozessverläufe in Abhängigkeit der Bearbeitungsdauer bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Flachproben verfügen über eine Wandstärke von $t_w = 5$ mm. Ein Fließbohrwerkzeug mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm kam zum Einsatz. Die Vorschubkraft steigt zu Beginn des Fließbohrens steil an. Nachdem der Werkzeugkonus in das Material eingedrungen ist, nimmt die Kraft zwar weiter zu, diese Tendenz verlangsamt sich jedoch. Zu dem Zeitpunkt, in dem der Übergangsbereich des Werkzeugs in das Material eingedrückt wurde, wurde die maximale Vorschubkraft erreicht und fällt bis zum Ende des Prozesses leicht ab. Das Drehmoment weist einen ähnlichen Verlauf wie die Vorschubkraft auf. Eine steile Zunahme ist bis zum Eindringen des Übergangsbereiches erkennbar. Danach steigt das Drehmoment mit der erhöhten Bohrtiefe nur noch geringfügig an, obwohl sich die Kontaktfläche zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff weiter vergrößert. Im Vergleich zu der Vorschubkraft erreicht das Drehmoment am Prozessende den maximalen Wert.

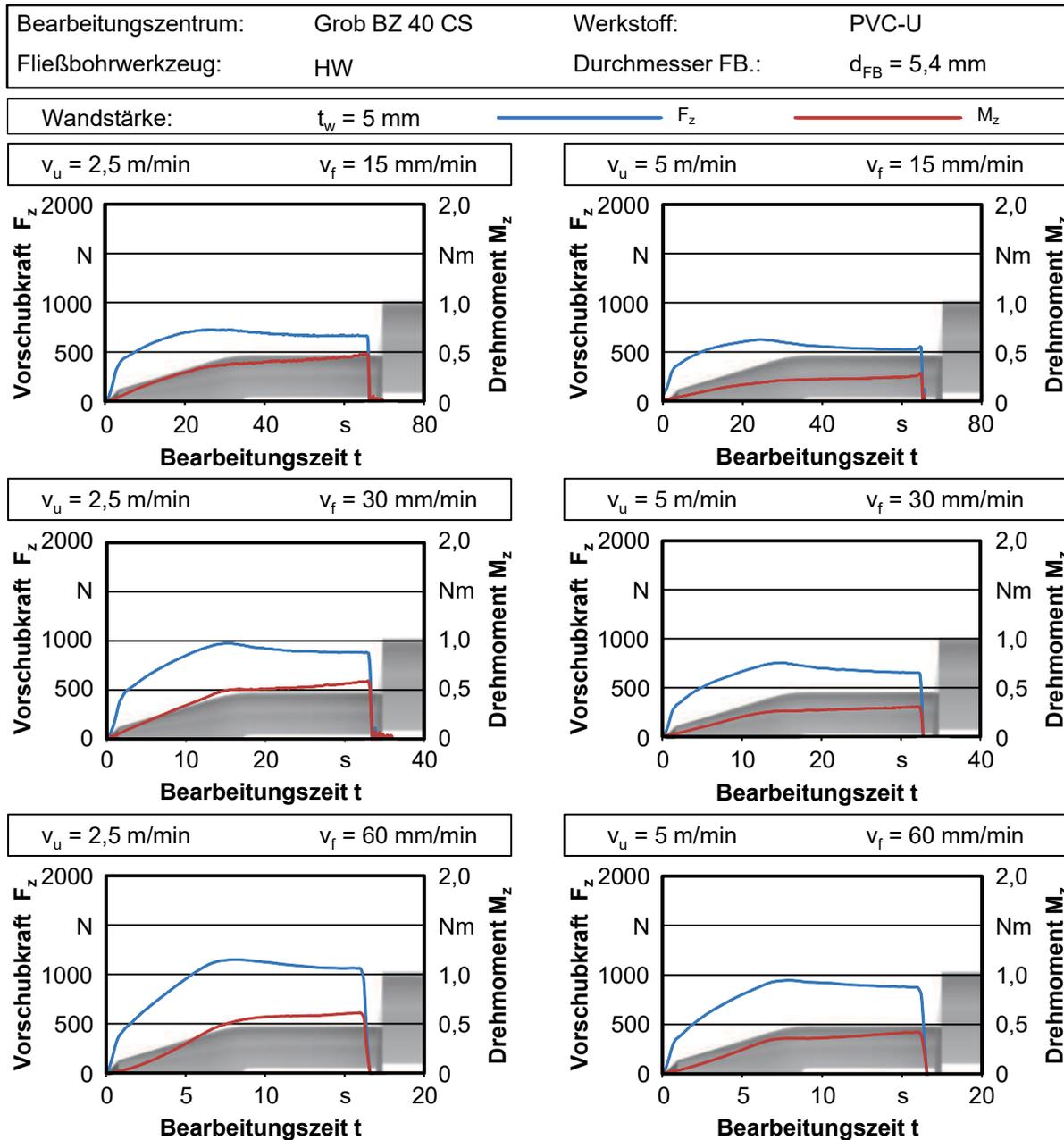


Abbildung 5-10: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U, $v_u = 2,5...5 \text{ m/min}$

Die Entstehung derartiger Verläufe lässt sich mit der thermischen Auswirkung erklären. Am Anfang des Prozesses wurde eine geringe Reibungswärme aufgrund der kleinen Reibfläche zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff produziert. Mit zunehmender Bohrtiefe vergrößert sich diese Fläche und mehr Reibungswärme pro Zeit wurde erzeugt. Dies führt zu einem schnellen Anstieg der Temperatur in der Kontaktzone. Die Glasübergangstemperatur des Kunststoffs wurde zügig erreicht und der Werkstoff lässt sich vom Werkzeug umformen. Nachdem der konische Werkzeugbereich in das Material eingedrungen ist, liegt eine quasi-stationäre Umformung des Materials durch die Werkzeugspitze vor. Dies führt zu den flachen Verläufen der Vorschubkraft und des Drehmoments bis zum Prozessende. **Abbildung 5-11** ergänzt die Prozessverläufe bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten.

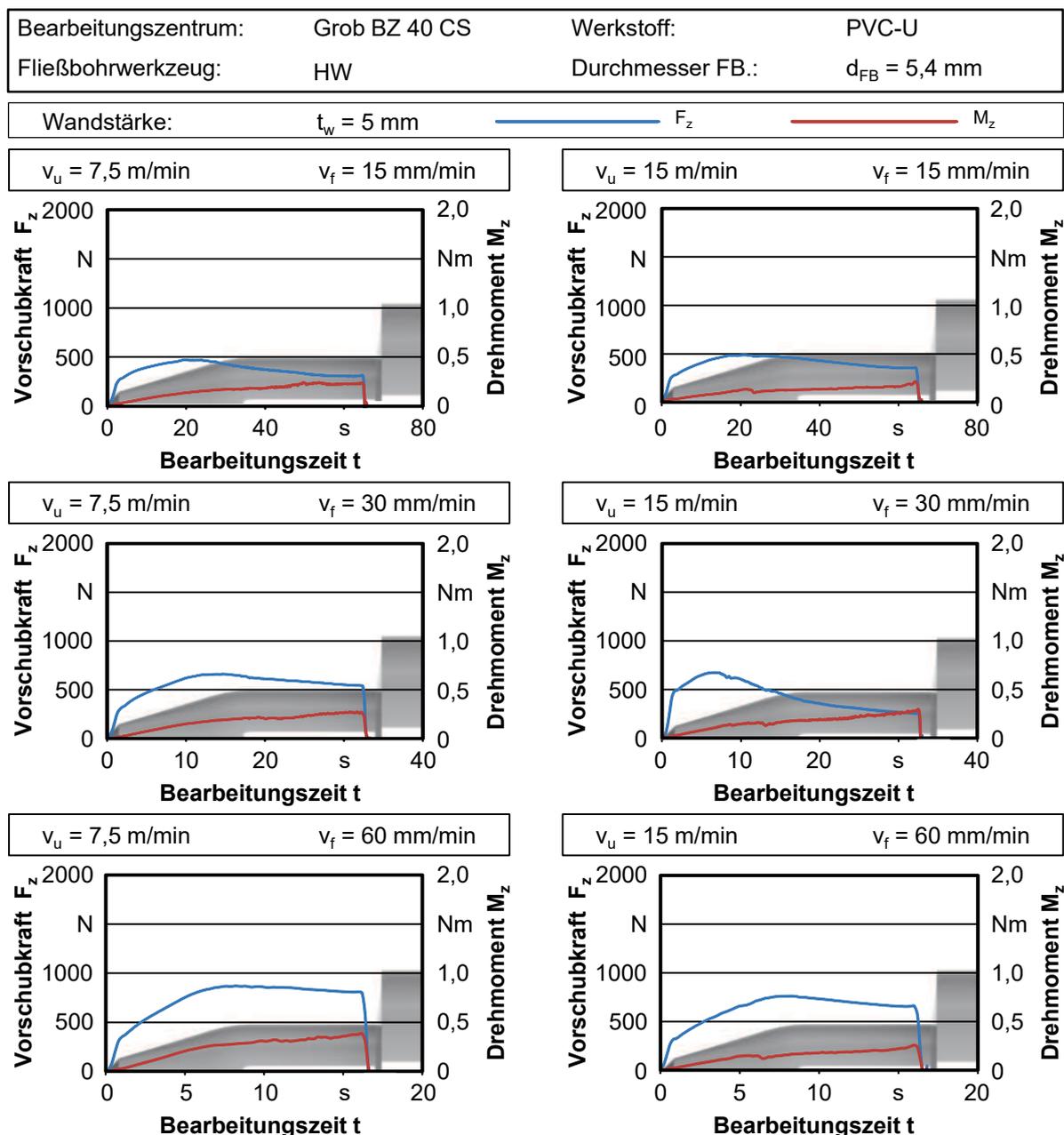


Abbildung 5-11: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U, $v_u = 7,5 \dots 15 \text{ m/min}$

In **Abbildung 5-12** lässt sich der Einfluss der Parameter beim Fließbohren auf die mechanischen Werkzeugbelastungen erkennen. In dem Diagramm sind die erfassten maximalen Vorschubkräfte und Drehmomente in Abhängigkeit von den eingestellten Umfangsgeschwindigkeiten sowie der Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Während eine zunehmende Umfangsgeschwindigkeit zu einer abfallenden Vorschubkraft führt, nimmt diese Größe mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu. Die größte Vorschubkraft tritt bei der geringsten Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 2,5 \text{ m/min}$ und der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 60 \text{ mm/min}$ auf. Das Drehmoment weist tendenziell ein ähnliches Verhalten wie die Vorschubkraft auf. Erhöhte Umfangsgeschwindigkeiten führen auch hier zu einem abfallenden Drehmoment, während eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit eine gegenteilige Wirkung hervorruft. Dieser Sachverhalt lässt sich mit der

thermischen Auswirkung erklären. Erhöhte Umfangsgeschwindigkeiten erzeugen mehr Reibungswärme, welche den Werkstoff entfestigt. Zunehmende Vorschubgeschwindigkeiten hingegen verkürzen die Bearbeitungsdauer und somit die resultierende Wärmeeindringzeit.

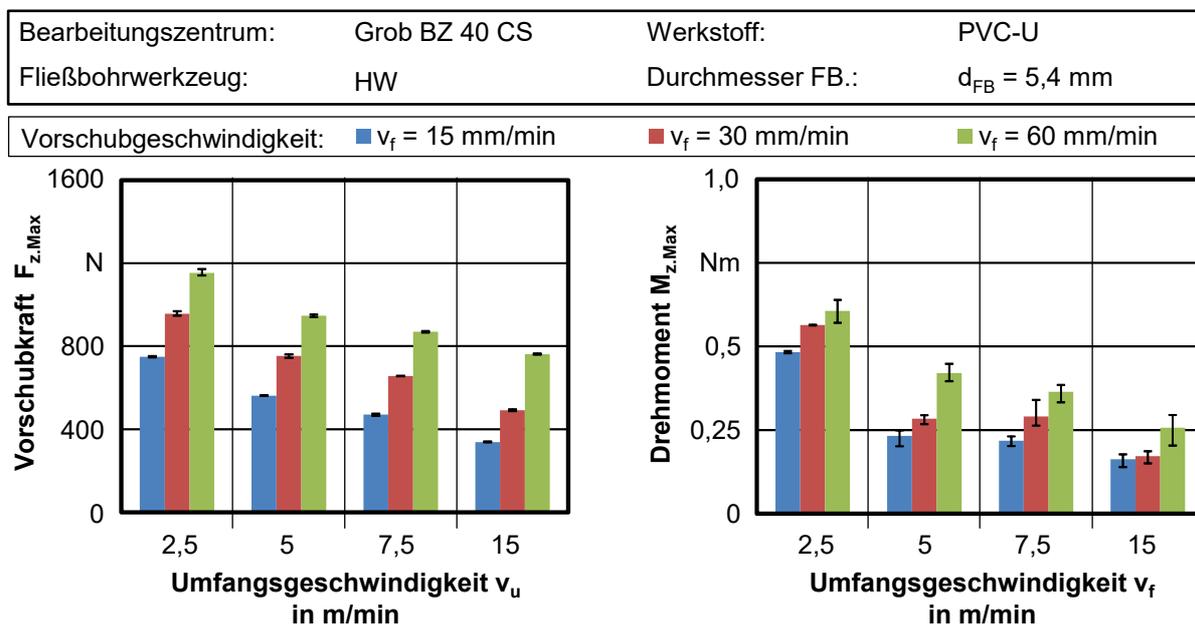


Abbildung 5-12: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$ bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$

5.2.2 Thermische Werkzeugbelastungen

Aufgrund der niedrigen Zersetzungstemperatur des Werkstoffs ist eine Analyse der thermischen Belastungen beim Fließbohren von PVC-U von großem Interesse. In **Abbildung 5-13** sind die erfassten thermischen Werkzeugbelastungen bei den Umfangsgeschwindigkeiten $v_u = 2,5 \text{ m/min}$ und $v_u = 15 \text{ m/min}$ mit den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 15 \dots 60 \text{ mm/min}$ dargestellt. Die Wandstärke der Versuchsproben beträgt $t_w = 5 \text{ mm}$. Auch hier steigen die Temperaturen mit zunehmender Bohrtiefe. Die Glasübergangstemperatur des Werkstoffes wurde nach etwa der Hälfte des Prozesses überschritten. Maximale Temperaturen wurden immer am Ende des Prozesses erreicht, was ebenfalls auf die Bildung eines Wärmestaus beim Fließbohren zurückgeführt werden kann. Beim Fließbohren des Werkstoffs hat die Variation der Umfangsgeschwindigkeit im Vergleich zur Variation der Vorschubgeschwindigkeit einen signifikanteren Einfluss auf die Prozesstemperatur. Mit einer zunehmenden Umfangsgeschwindigkeit steigt die maximale Temperatur deutlich. Während bei der niedrigsten Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 2,5 \text{ m/min}$ die maximale Temperatur $T_{Max} = 97 \dots 105^\circ\text{C}$ beträgt, erhöht sich dieser Wert bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15 \text{ m/min}$ auf $T_{Max} = 146 \dots 150^\circ\text{C}$. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich anhand der Messungen nicht beurteilen.

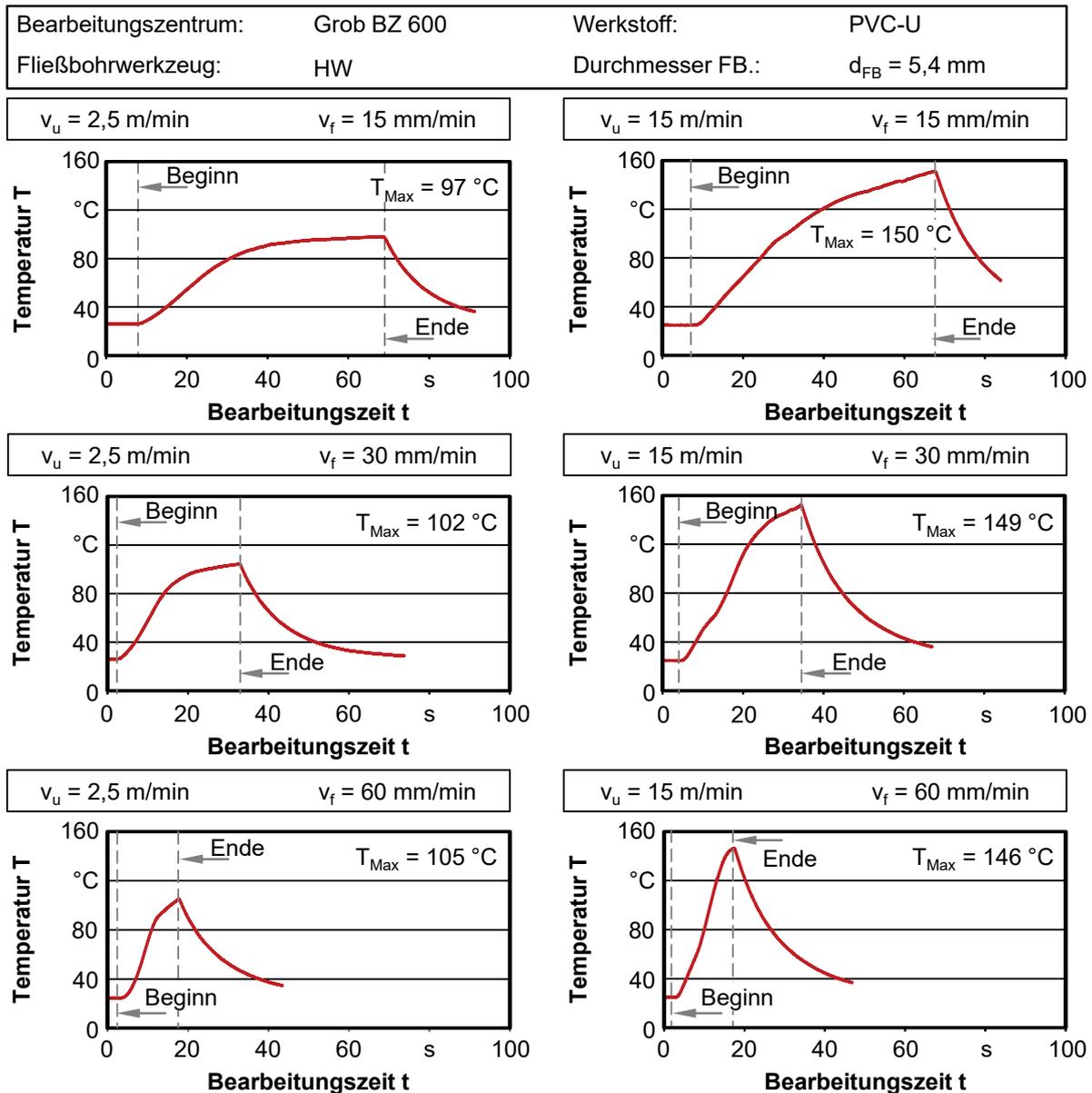


Abbildung 5-13: Thermische Werkzeugbelastung beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U

5.2.3 Bohrungsqualität

Auch beim Fließbohren von PVC-U weisen die erzeugten Bohrungen große Abweichungen zu einer idealen Bohrung auf. **Abbildung 5-14** zeigt die mikroskopischen Aufnahmen des Bohrungseintritts. Die Gestalt der Bohrungen wird signifikant von den Parametern beim Fließbohren beeinflusst. Dabei spielt die Umfangsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Mit einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit lässt sich eine bessere Bohrung ausformen. Während bei sehr niedriger Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 2,5 \text{ m/min}$ runde Bohrungen erzeugt werden können, weicht die Gestalt der Bohrung bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 7,5 \dots 15 \text{ m/min}$ von einer idealen Bohrung derartig ab, dass eine „viereckige“ Bohrung entsteht. Die Auswirkung der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich nur bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten deutlich erkennen. Mit einer Zunahme der Größe verringert sich die Qualität der Bohrung.

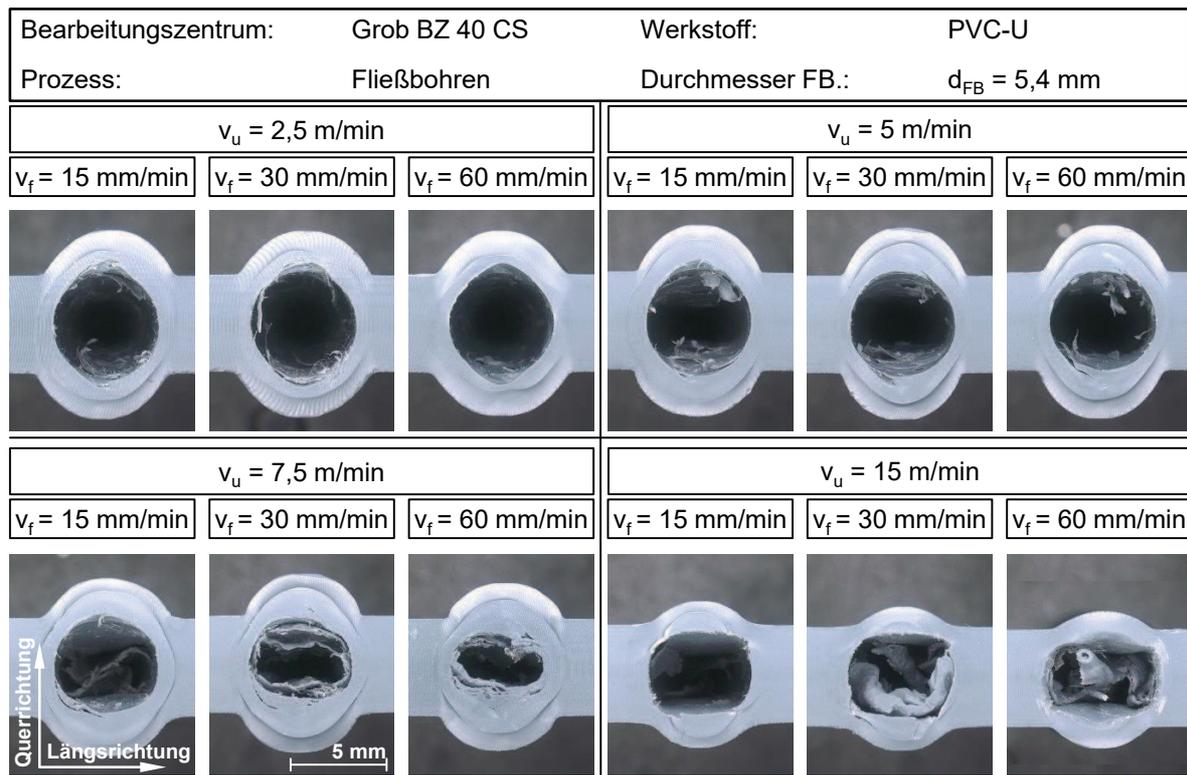


Abbildung 5-14: Querschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$, PVC-U

Die Wandstärke der ausgeformten Bohrungswand wird ebenfalls signifikant von der Umfangsgeschwindigkeit beeinflusst. Die ausgeformten Bohrungswände, welche bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15 \text{ m/min}$ bearbeitet werden, enthalten deutlich weniger Material. Der Grund dafür ist die mit einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit steigende Temperatur beim Fließbohren (vgl. Abbildung 5-13). Das Material um das Werkzeug wurde im Prozess so erwärmt und erweicht, dass die Menge des entgegen der Vorschubrichtung fließenden Materials zunimmt. Es bleibt daher weniger Material in der ausgeformten Bohrungswand.

Die Aufnahmen der Querschnitte zeigen auch, dass sich aufgeschmolzenes Material in den Bohrungen bildet. Diese Bildung ist vorwiegend von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig. Bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten sind weniger Materialanhaftungen in der Bohrungswand zu erkennen. Der Kunststoff PVC-U wandelt sich oberhalb der Erweichungstemperatur zu einer gummiartigen Masse und diese Umwandlung wird bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten beschleunigt. Die Adhäsionsneigung des Werkstoffes erhöht sich ebenfalls. In der Literatur wurden ähnliche Effekte beobachtet, dass PVC-U beim Fließbohren stark aufschmilzt [15].

Der Einfluss der Parameterkombinationen auf die Bohrungsgestalt lässt sich auch anhand des Durchmessers am Bohrungseintritt erkennen. **Abbildung 5-15** zeigt die Mittelwerte der mikroskopisch vermessenen Durchmesser in Längs- und Querrichtung des Profils. Während der Durchmesser in Längsrichtung vorwiegend den Nenndurchmesser des Werkzeugs von $D = 5,4 \text{ mm}$ annimmt, weist diese Größe in Querrichtung große Abweichungen vom Werkzeugdurchmesser auf. Bei den Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 2,5 \dots 5 \text{ m/min}$ ist die Bohrungswand von dem Werkzeug so aufgeweitet, dass größere Durchmesser als das

Nennmaß auftreten. Mit erhöhter Umfangsgeschwindigkeit sinkt der Durchmesser tendenziell, da in dem Fall höhere Temperaturen beim Fließbohren auftreten und die Bohrungswand nach der Bearbeitung stärker schrumpft als bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten.

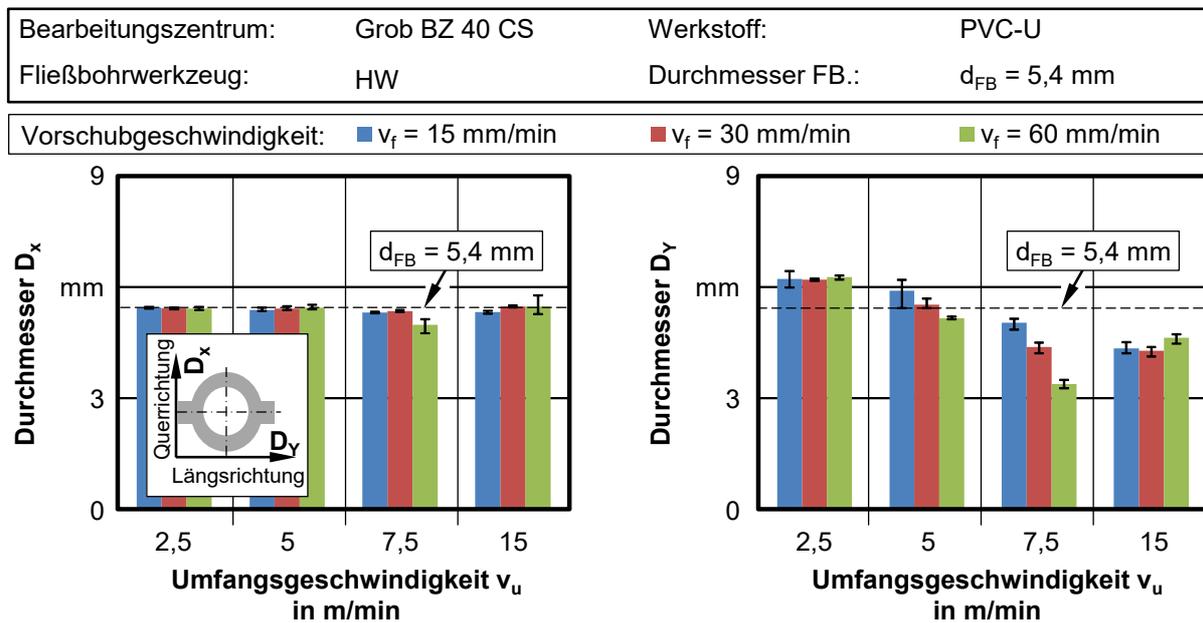


Abbildung 5-15: Durchmesser der Fließbohrungen von PVC-U in Längs- und Querrichtung, $t_w = 5 \text{ mm}$

5.2.4 Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde

Beim Fließbohren von PVC-U wurde die Glasübergangstemperatur des Werkstoffes schon bei der niedrigsten Umfangsgeschwindigkeit überschritten. Neben den Querschnitten zeigen die Längsschnitte der Bohrungen in **Abbildung 5-16** den thermischen Einfluss auf die ausgeformte Bohrungswand. Materialanhaftungen lassen sich bei jeder eingesetzten Parameterkombination feststellen. Die Bohrungswände weisen daher eine niedrige Oberflächengüte auf. Die Entstehung einer solchen Bohrungswand liegt darin begründet, dass sich die mechanischen Eigenschaften des Materials oberhalb der Erweichungstemperatur stark ändern. Die thermische Belastung führt dazu, dass das Material um das Werkzeug gummiartig wird. Das erweichte Material wird im Prozess zum Teil aus der Bohrung verdrängt und bildet so den Materialaufwurf am Bohrungseintritt. Ein geringer Teil des erweichten Materials haftet aufgrund der Adhäsion zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff an der Werkzeugoberfläche. Als der Prozess beendet und das Werkzeug aus der Bohrung gezogen wurde, trennt sich der Teil des weichen Materials ab und wurde schnell abgekühlt. Daher wurde eine raue Struktur an der Innenbohrungswand gebildet. Diese Bildung wird von einer zunehmenden Werkzeuggeschwindigkeit begünstigt. Während bei den Bohrungswänden, die mit den Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 2,5 \dots 5 \text{ m/min}$ bearbeitet wurden, eine schwache Bildung einer solchen Struktur erkennbar ist, ist dies bei den mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten bearbeiteten Bohrungswänden deutlich stärker ausgeprägt.

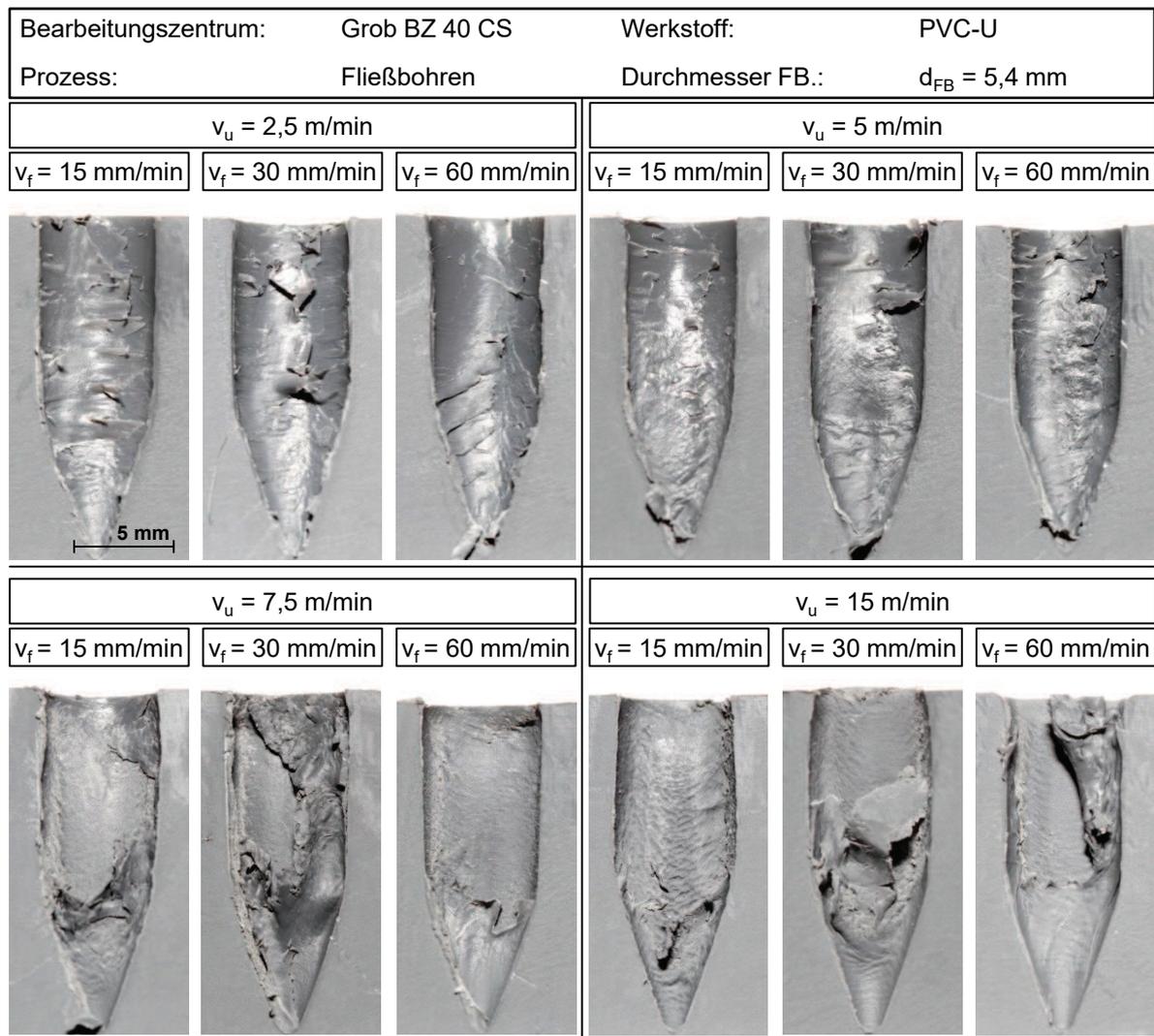


Abbildung 5-16: Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$, PVC-U

Das spanlose Einbringen eines Innengewindes mithilfe des Gewindeformens erweist sich auch hier als schwierig. Obwohl die mit geringen Umfangsgeschwindigkeiten fließgebohrten Bohrungen einen größeren Durchmesser als das Nennmaß am Bohrungseintritt aufweisen (vgl. Abbildung 5-15), ist es nicht möglich, das Gewindeformen einzusetzen, weil der Durchmesser innerhalb der Bohrungen kleiner als der erforderliche Durchmesser von $D = 5,4 \text{ mm}$ ist [61]. Im Vergleich zum Gewindebohren ist eine engere Durchmesser-toleranz notwendig [154]. Ein kleiner Kernlochdurchmesser führt zu einer großen mechanischen Belastung. Es wurde deshalb experimentell versucht, mit dem Gewindeformen ein Innengewinde in die Fließbohrungen einzubringen. Es lassen sich jedoch keine nutzbaren Gewinde erzeugen. Das Gewindeformen lässt sich zwar in die Bohrung einschrauben, beim Rückzug des Werkzeugs wurden die Gewindegänge aber aus der Bohrung herausgezogen. Daher erfolgte die Gewindebearbeitung durch das Gewindebohren.

In **Abbildung 5-17** sind die Längsschnitte der Gewinde in Bezug auf die Parameter beim Fließbohren dargestellt. In Querrichtung der Bohrung ist das Gewindeprofil in den meisten Fällen so abgebildet, dass eine dreieckige Gewindespitze anstatt einer trapezförmigen Spitze entsteht. Dadurch ist die ursprüngliche Bohrungswand nicht mehr zu erkennen. Dies ist ein Zeichen dafür, dass mehr Material als normal von der Bohrungswand abgetrennt wurde. Bei

den mit den niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 2,5 \dots 5$ m/min erzeugten Bohrungen weisen die am Bohrungseintritt liegenden Gewindegänge eine flache Gewindespitze in Querrichtung auf.

Dies lässt sich auf den großen Durchmesser am Bohrungseintritt zurückführen (vgl. Abbildung 5-15), weil diese Stelle bei niedriger Umfangsgeschwindigkeit stärker aufgeweitet wurde als bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten. In Längsrichtung ist das Gewindeprofil insbesondere den Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 7,5 \dots 15$ m/min unzureichend ausgebildet.

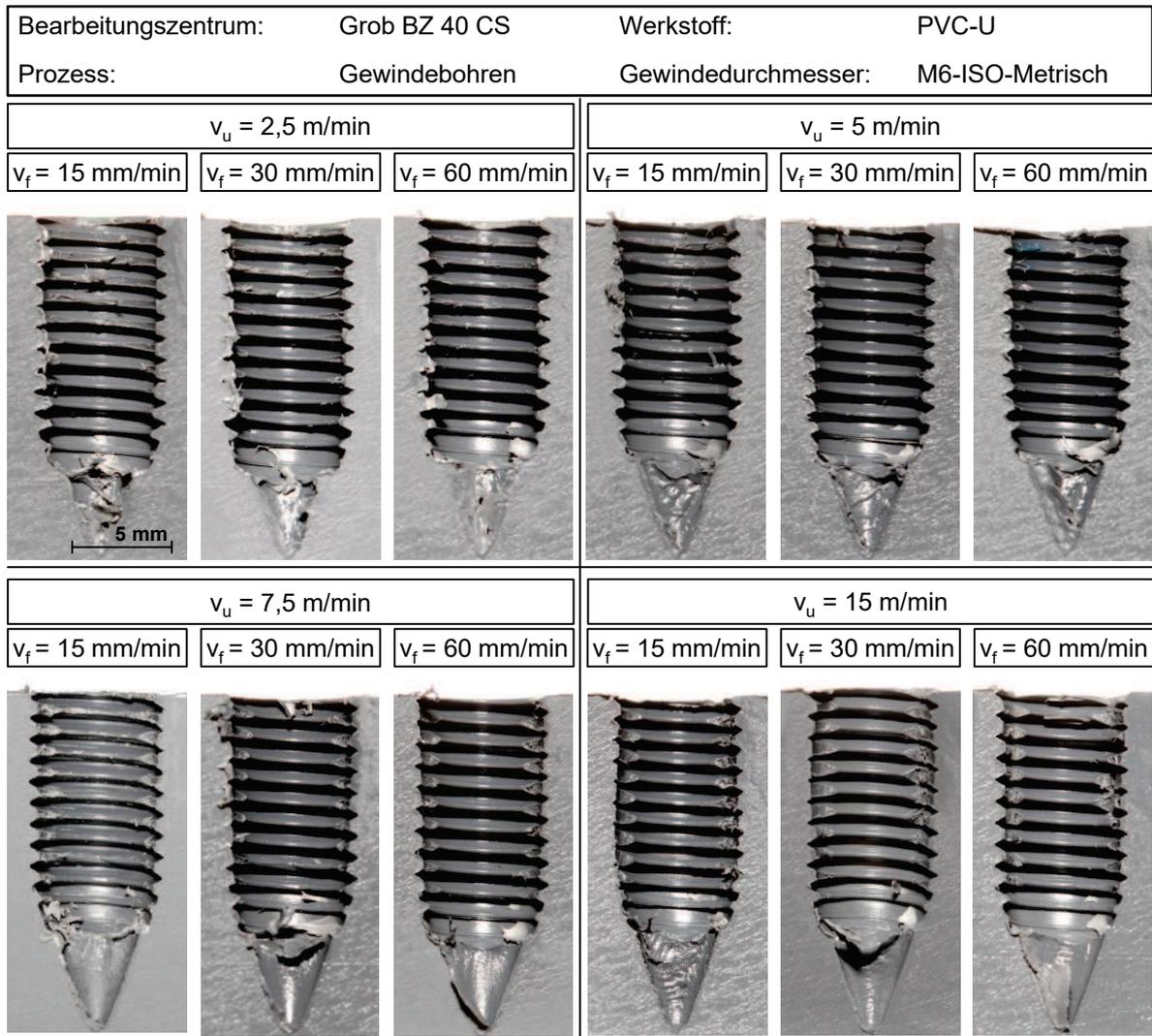


Abbildung 5-17: : Längsschnitte der Gewinde bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PVC-U

5.2.5 Auszugsfestigkeit der Gewinde

Die Parameterkombinationen wirken sich direkt auf die erzeugten Bohrungen sowie die daraus resultierenden Gewinde aus. Zur Erfassung der statischen Festigkeit wurden die angefertigten Gewinde mithilfe des axialen Auszugsversuchs geprüft. In **Abbildung 5-18** sind die maximalen Auszugskräfte in Bezug auf die Parameter beim Fließbohren dargestellt. Der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Festigkeit der Gewinde lässt sich dadurch erkennen. Die Gewinde, deren Vorbohrungen mit niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten hergestellt wurden, weisen höhere Festigkeiten gegenüber den Gewinden auf, deren

Vorbohrungen mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten erzeugt wurden. Die Vorschubgeschwindigkeit spielt hier eine untergeordnete Rolle. Eine höhere Umfangsgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung des Durchmessers (vgl. Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15). Die Wandstärke der ausgeformten Bohrungswand nimmt damit ab. In dem Fall bleibt weniger Material in der Bohrungswand. Beim anschließenden Gewindebohren wird weiteres Material von der Bohrungswand entfernt, was zusätzlich die Festigkeit des Gewindes schwächt.

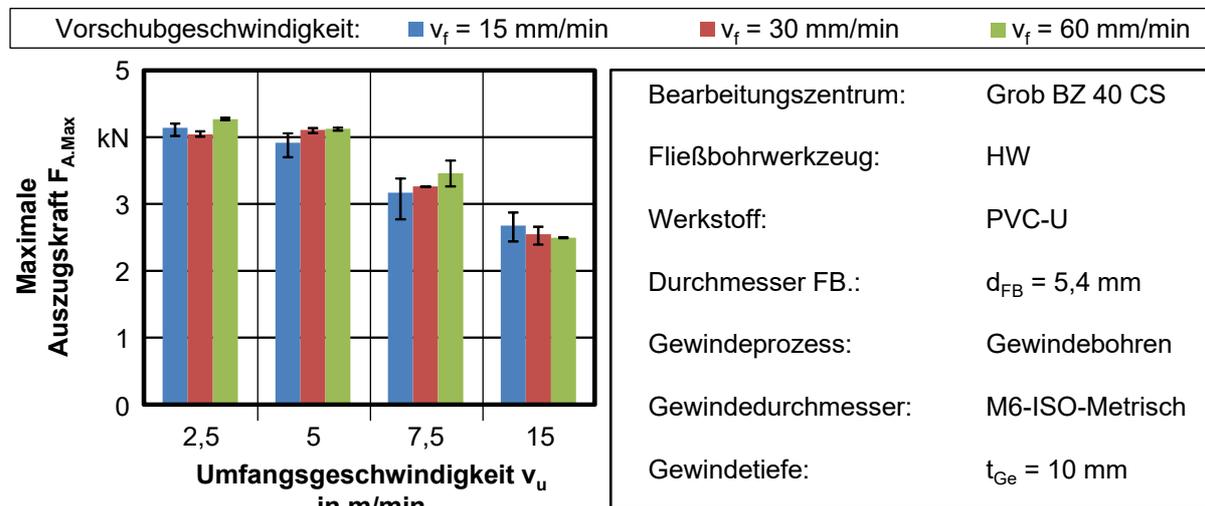


Abbildung 5-18: Auszugsfestigkeit der Gewinde in Abhängigkeit der Parameter

5.3 Prozessoptimierung beim Fließbohren der Kunststoffe

Das Fließbohren der Kunststoffe PA66 und PVC-U zeigt, dass eine geschlossene Bohrungswand in flache Profile eingebracht werden kann. Aufgrund des thermomechanischen Verhaltens des Kunststoffs wird jedoch eine „ovale“ Bohrung hergestellt. Obwohl das eingesetzte Werkzeug über einen Durchmesser verfügt, mit dem ein Kernloch bei metallischen Werkstoffen für das Gewindeformen angefertigt werden kann, weisen die Fließbohrungen bei Kunststoffen kleinere Durchmesser als das Nennmaß auf. Das Einbringen des Gewindes kann nur zerspantechnisch erfolgen. Im Vergleich zum spanlosen Gewindeformen müssen die Späne bei dem Gewindebohren aus der Bohrung entfernt werden. Die Entsorgung der Späne beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Darüber hinaus schwächt das Materialabtragen beim Gewindebohren die Wandstärke des Bauteils und somit die Festigkeit der Fügestelle.

Um das Nutzungspotenzial bei dem innovativen Anwendungsfall des Fließbohrens zu erhöhen, wurde im Rahmen der Arbeit nach Optimierungsmöglichkeiten gesucht. Die Möglichkeiten lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Eine Option ist der Einsatz von modifizierten Werkzeugen. Das Ziel hierbei ist es, den Einfluss des Werkzeugdurchmessers auf die Gestalt der Fließbohrung zu identifizieren. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von modifizierten Bearbeitungsstrategien beim Fließbohren. Das Ziel ist es, anhand der thermomechanischen Eigenschaften gezielt den Prozess zu verändern, damit die Bohrungsgestalt verbessert werden kann. Im Folgenden wird die Umsetzung dieser Möglichkeiten bei den untersuchten Kunststoffen PA66 und PVC-U zusammengefasst und die Ergebnisse diskutiert.

5.3.1 Fließbohren des Polyamids PA66 mit modifizierten Werkzeugen

Im Vergleich zu den extern angefertigten Werkzeugen wurden modifizierte Werkzeuge am ISF hergestellt (vgl. Abbildung 4-1). Diese verfügen über keine Formstollen und haben einen scharfkantigen Übergangsbereich zwischen dem Werkzeugkonus und dem Werkzeugzylinder. Die Parameterkombinationen der Versuche bestehen aus den maximalen und minimalen Umfangs- und Vorschubgeschwindigkeiten, die schon beim Fließbohren mit den konventionellen Werkzeugen untersucht wurden. Es ergeben sich ähnliche Prozessverläufe während des Fließbohrens (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2), welche exemplarisch in **Abbildung 5-19** dargestellt sind. Die Randbedingungen bleiben dabei identisch. Die Wandstärke des Flachprofils beträgt $t_w = 5$ mm.

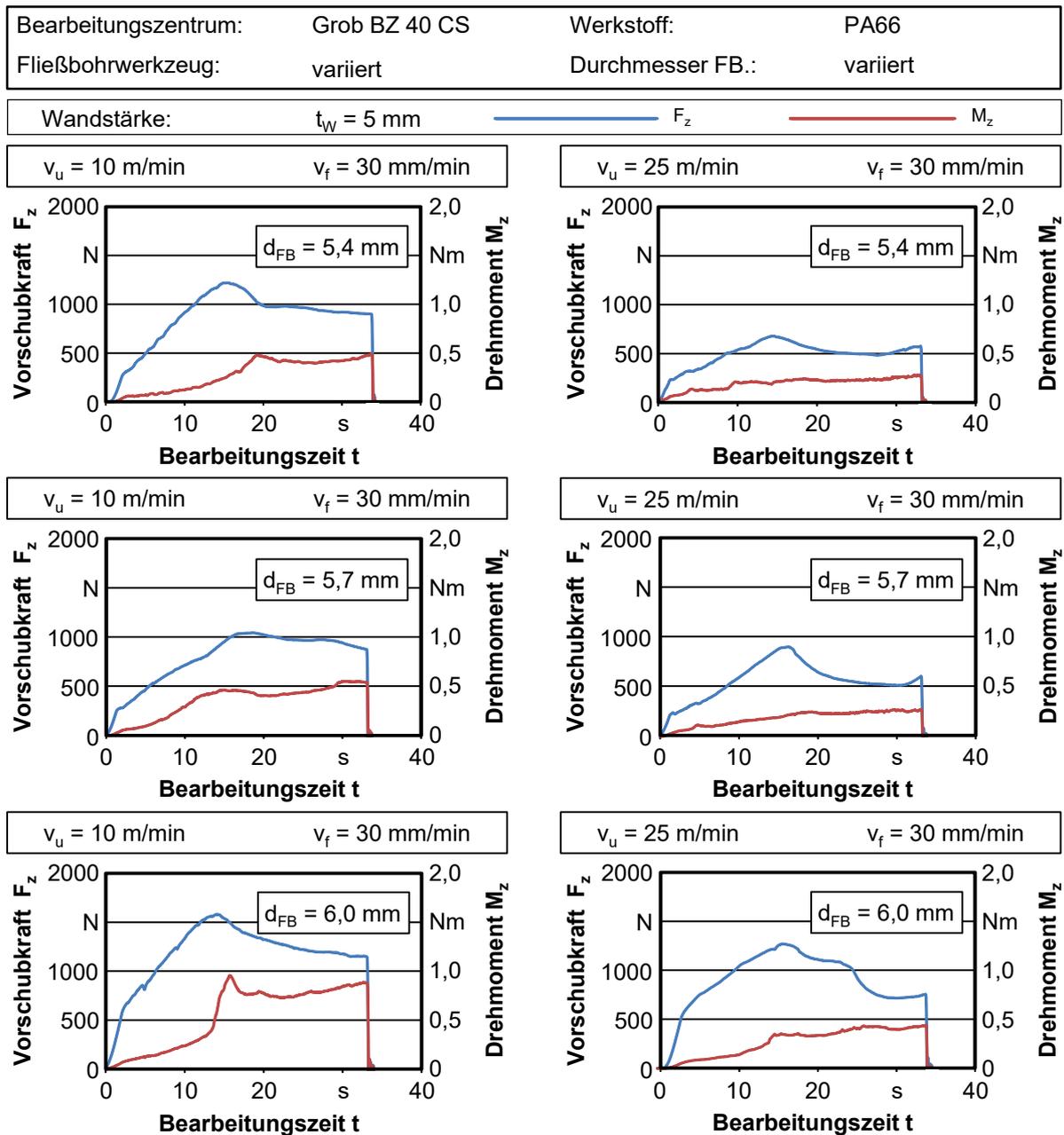


Abbildung 5-19: Prozessverläufe beim Fließbohren des Kunststoffes PA66 mit modifizierten Werkzeugen

Die Gestaltunterschiede zwischen den modifizierten Werkzeugen und den herkömmlichen Werkzeugen haben keinen deutlichen Einfluss auf den Prozessverlauf. Die Vorschubkraft steigt am Anfang des Prozesses steil an. Nachdem der maximale Wert erreicht wurde, fällt diese Größe wieder ab. Das Drehmoment nimmt mit einem erhöhten Vorschubweg zu. Es erreicht den maximalen Wert in den meisten Fällen schon beim Eindringen des zylindrischen Teils in das Material. Danach weist es einen quasi konstanten Verlauf auf. Die Variation des Werkzeugdurchmessers ändert die maximalen Werte der beiden Größen, die Form des Verlaufs jedoch nicht signifikant.

Abbildung 5-20 stellt die Mittelwerte und die Streubereiche von den Maximal- und Minimalwerten der Vorschubkraft und des Drehmoments, ermittelt durch vier Messungen, dar. Auch hier nehmen die mechanischen Werkzeugbelastungen mit einer steigenden Umfangsgeschwindigkeit ab. Dies kann ebenfalls auf die erhöhten thermischen Belastungen zurückgeführt werden. Eine höhere Vorschubgeschwindigkeit führt hingegen zu einer Zunahme der beiden Größen. Während sich ähnliche Vorschubkräfte und Drehmomente beim Fließbohren mit den modifizierten Werkzeugen aus Stahl ergeben, steigen diese Werte deutlich beim Einsatz des Werkzeugs mit dem Durchmesser von $d_{FB} = 6 \text{ mm}$ an.

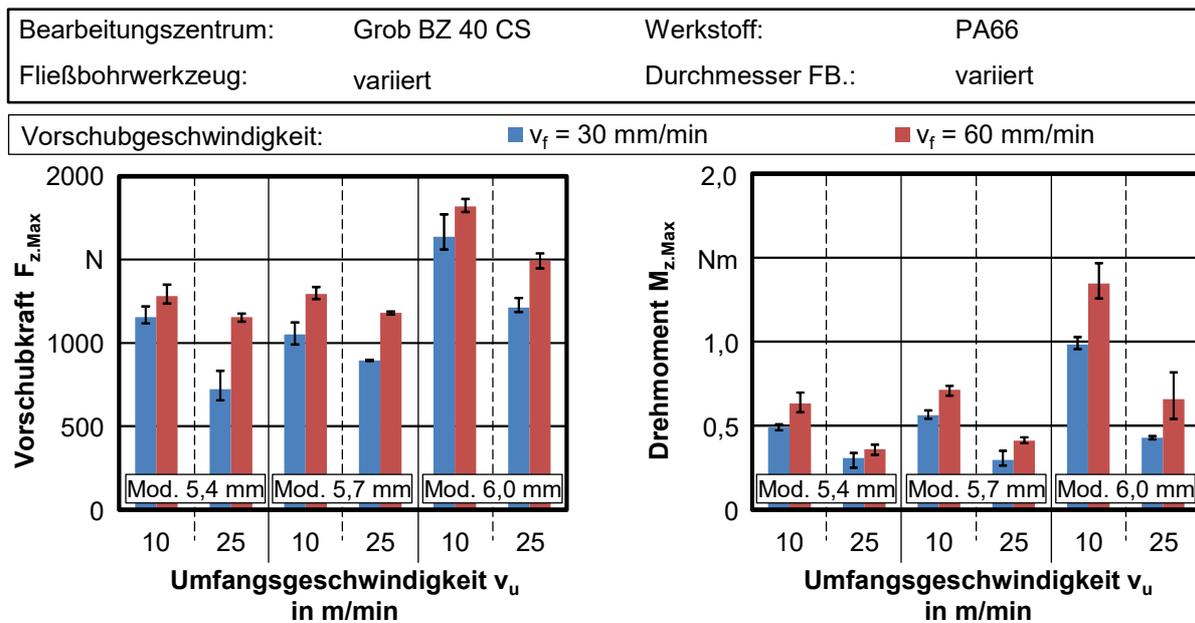


Abbildung 5-20: Maximale mechanische Werkzeugbelastungen beim Fließbohren des PA66 mit modifizierten Werkzeugen

Beim Einsatz von modifizierten Werkzeugen wurden ebenfalls ovale Bohrungen erzeugt. **Abbildung 5-21** zeigt die Gestalt der Bohrungseintritte anhand des Werkzeugdurchmessers und der Prozessparameter. In Querrichtung weisen die Bohrungen einen größeren Durchmesser als in Längsrichtung auf. Die Bildung der Materialanhaftungen ist vor allem von der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs abhängig. Bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10 \text{ m/min}$ sind geringe Materialanhaftungen an der Innenbohrungswand zu erkennen, was sich auf die geringe thermische Belastung zurückführen lässt. Mit erhöhter Umfangsgeschwindigkeit wird die Bildung der Materialanhaftungen beschleunigt. Besonders ausgeprägt ist dies bei dem kleinsten Werkzeugdurchmesser von $d_{FB} = 5,4 \text{ mm}$ der Fall. Bei

der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 25$ m/min und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 30$ mm/min ist die thermische Belastung so stark, dass die Bohrungswand zum Teil durchgeschmolzen ist. An der Bohrungswand befindet sich angeschmolzenes Material. Dies lässt sich mit der geringen Wärmeleitfähigkeit des modifizierten Stahlwerkzeugs sowie der vergrößerten Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstoff erklären. Stahlwerkstoffe haben eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $\lambda = 50$ W/mK [38]. Die Wärmeleitfähigkeit von Hartmetallen ist demgegenüber ungefähr doppelt so hoch [20]. Diese geringe Wärmeleitfähigkeit des Stahlwerkzeugs führt dazu, dass sich die Reibungswärme nicht so schnell aus der Kontaktzone ableiten lässt und eine noch höhere Temperatur beim Fließbohren erreicht wird. Die runde Gestalt des modifizierten Werkzeugs kann zusätzlich mehr Reibungswärme aufgrund der vergrößerten Kontaktfläche hervorrufen. Mit einem zunehmenden Werkzeugdurchmesser kann die thermische Belastung abfallen, da die Reibungswärme durch den vergrößerten Werkzeugquerschnitt schneller abgeleitet wird. Eine erhöhte Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer verkürzten Prozessdauer und somit wird eine geringere Wärmemenge produziert.

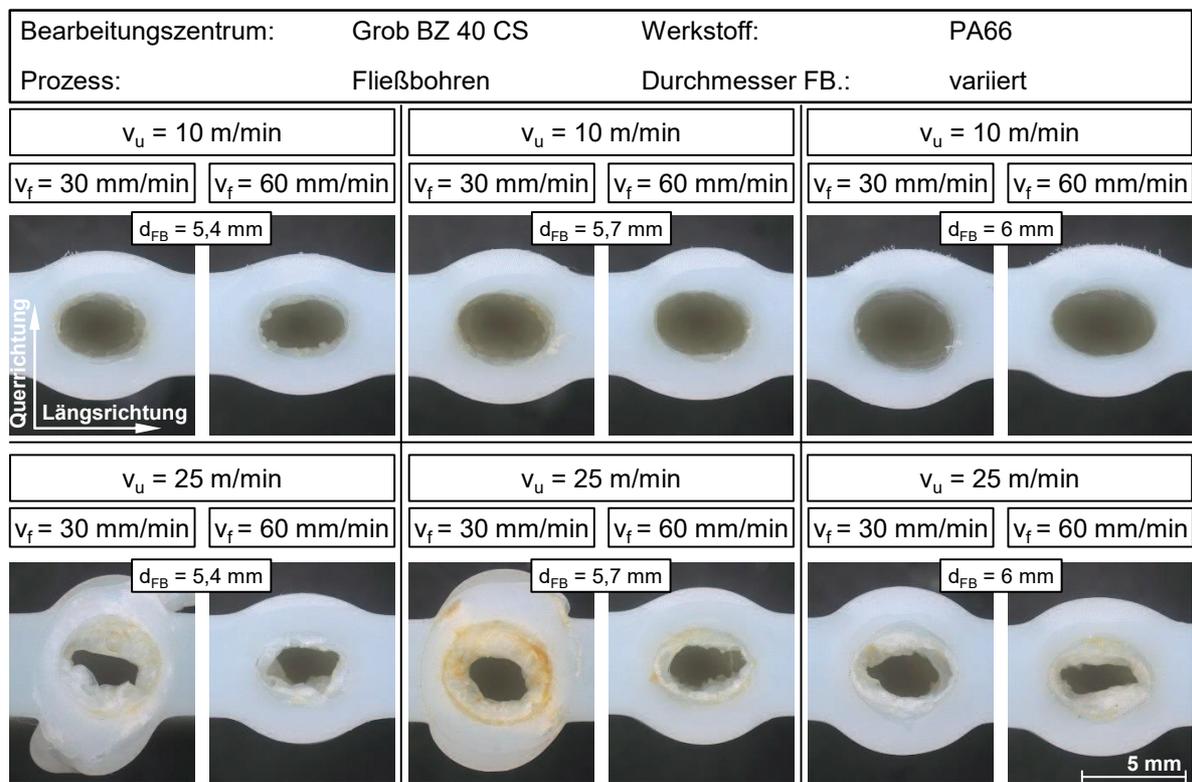


Abbildung 5-21: Querschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PA66

Der Einfluss der Parameterkombinationen auf die Bohrungsdurchmesser ist in **Abbildung 5-22** dargestellt. Der Durchmesser in Längsrichtung beträgt bei niedriger Umfangsgeschwindigkeit quasi den jeweiligen Nenndurchmesser des Werkzeugs. Während sich die Durchmesser mit einer zunehmenden Umfangsgeschwindigkeit tendenziell in beiden Richtungen vergrößern, führt eine erhöhte Vorschubgeschwindigkeit zu einer Abnahme der Durchmesser insbesondere bei den Bohrungen, die mit den modifizierten Stahlwerkzeugen bearbeitet wurden.

Bearbeitungszentrum:	Grob BZ 40 CS	Werkstoff:	PA 66
Prozess:	Fließbohren	Durchmesser FB.:	variiert
Wandstärke: $t_w = 5 \text{ mm}$		Vorschubgeschwindigkeit: ■ $v_f = 30 \text{ mm/min}$ ■ $v_f = 60 \text{ mm/min}$	

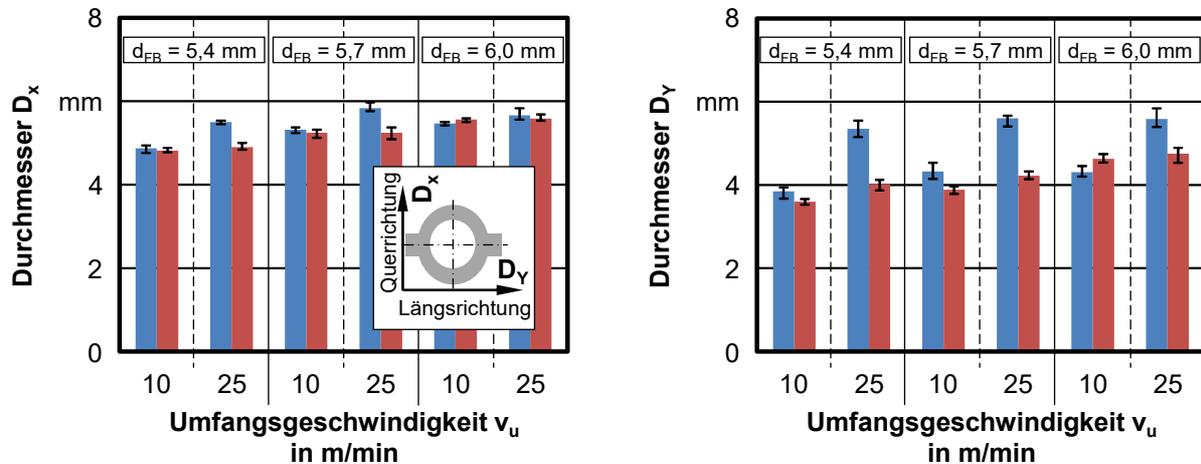


Abbildung 5-22: Durchmesser der Fließbohrungen von PA66 in Längs- und Querrichtung, $t_w = 5 \text{ mm}$

Der Einfluss der Parameter beim Fließbohren lässt sich ebenfalls bei den Längsschnitten erkennen, welche in **Abbildung 5-23** dargestellt sind. Wie beim Fließbohren mit dem Hartmetallwerkzeug weicht die Oberfläche von zerspantechnisch erzeugten Bohrungen stark ab. Eine raue Oberflächen lassen sich erkennen.

Die Umfangsgeschwindigkeit erweist sich auch hier als der dominante Faktor beim Fließbohren mit den modifizierten Werkzeugen. Während die Bohrungswand bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10 \text{ m/min}$ noch frei von Materialanhaftungen ist, weist diese bei der erhöhten Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 25 \text{ m/min}$ eine deutlich verschlechterte Oberfläche auf. Insbesondere betroffen sind die Bohrungen, die mit den Stahlwerkzeugen bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 30 \text{ mm/min}$ bearbeitet wurden.

Der Großteil der Bohrungen weist starke Materialanhaftungen im zylindrischen Bereich der ausgeformten Bohrungswand auf. Eine geringe Vorschubgeschwindigkeit trägt dazu bei, dass bei derselben Umfangsgeschwindigkeit noch mehr Reibungswärme erzeugt wird. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit ist bei erhöhter Umfangsgeschwindigkeit deutlich zu erkennen. Eine Zunahme der Größe führt zu einer geringeren Materialanhaftung an der Bohrungswand.

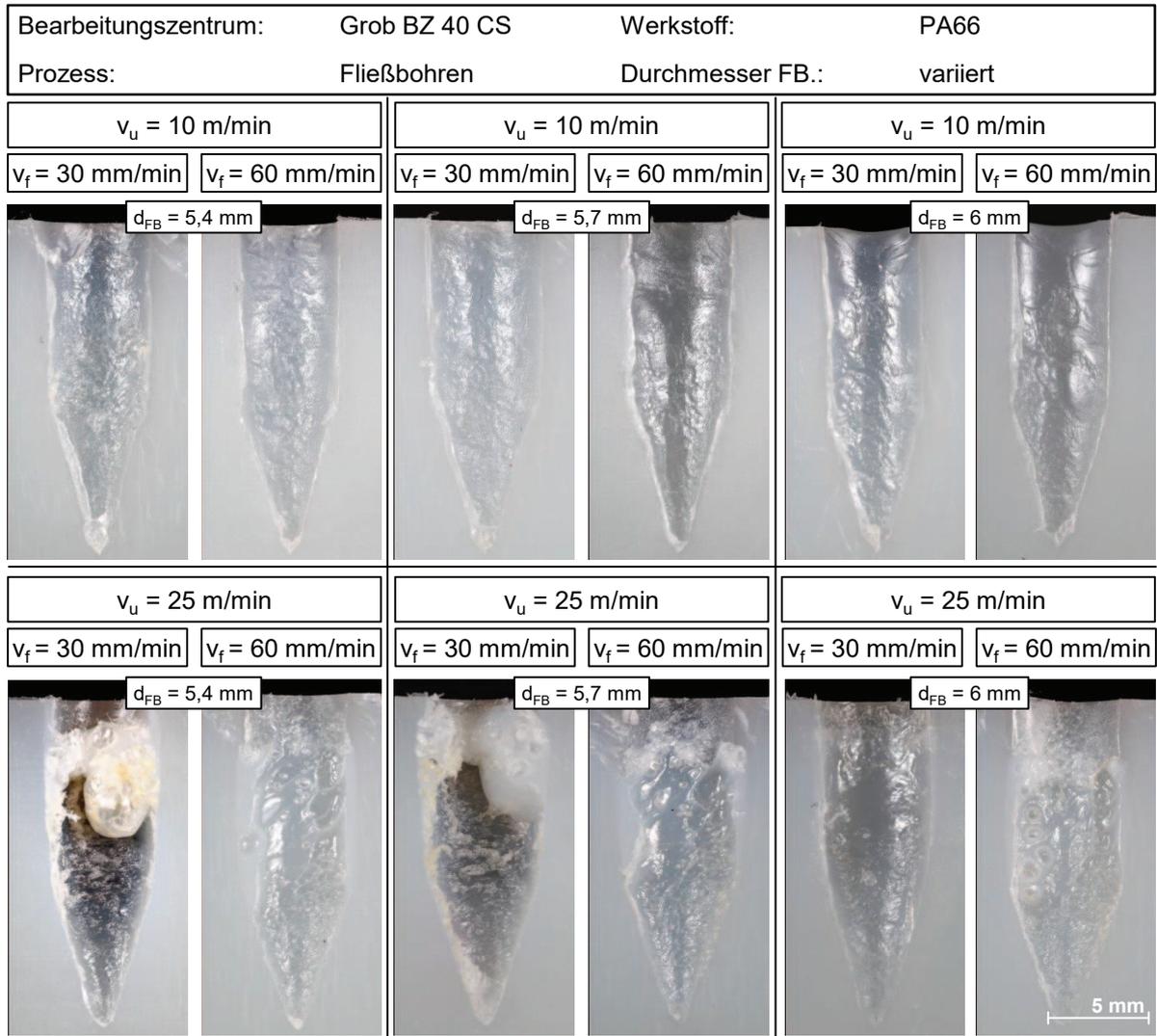


Abbildung 5-23: Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$, PA66

5.3.2 Fließbohren des Kunststoffs PVC-U mit modifizierten Werkzeugen

Beim Fließbohren des Kunststoffs PVC-U weist die Werkzeuggestalt ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf den Prozessverlauf auf, was in **Abbildung 5-24** dargestellt ist. Es handelt sich um die Bearbeitung von Flachprofilen mit der Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$. Die Randbedingungen bleiben dabei unverändert. Die Parameterkombinationen der Versuche bestehen aus den maximalen und minimalen Umfangs- und Vorschubgeschwindigkeiten, die beim Fließbohren mit konventionellen Werkzeugen untersucht wurden. Es wurde komplett auf KSS verzichtet. Nach dem Prozess wurde das gegen die Vorschubrichtung verdrängte Material frästechnisch entfernt, damit eine mikroskopische Vermessung des Durchmessers durchführbar war.

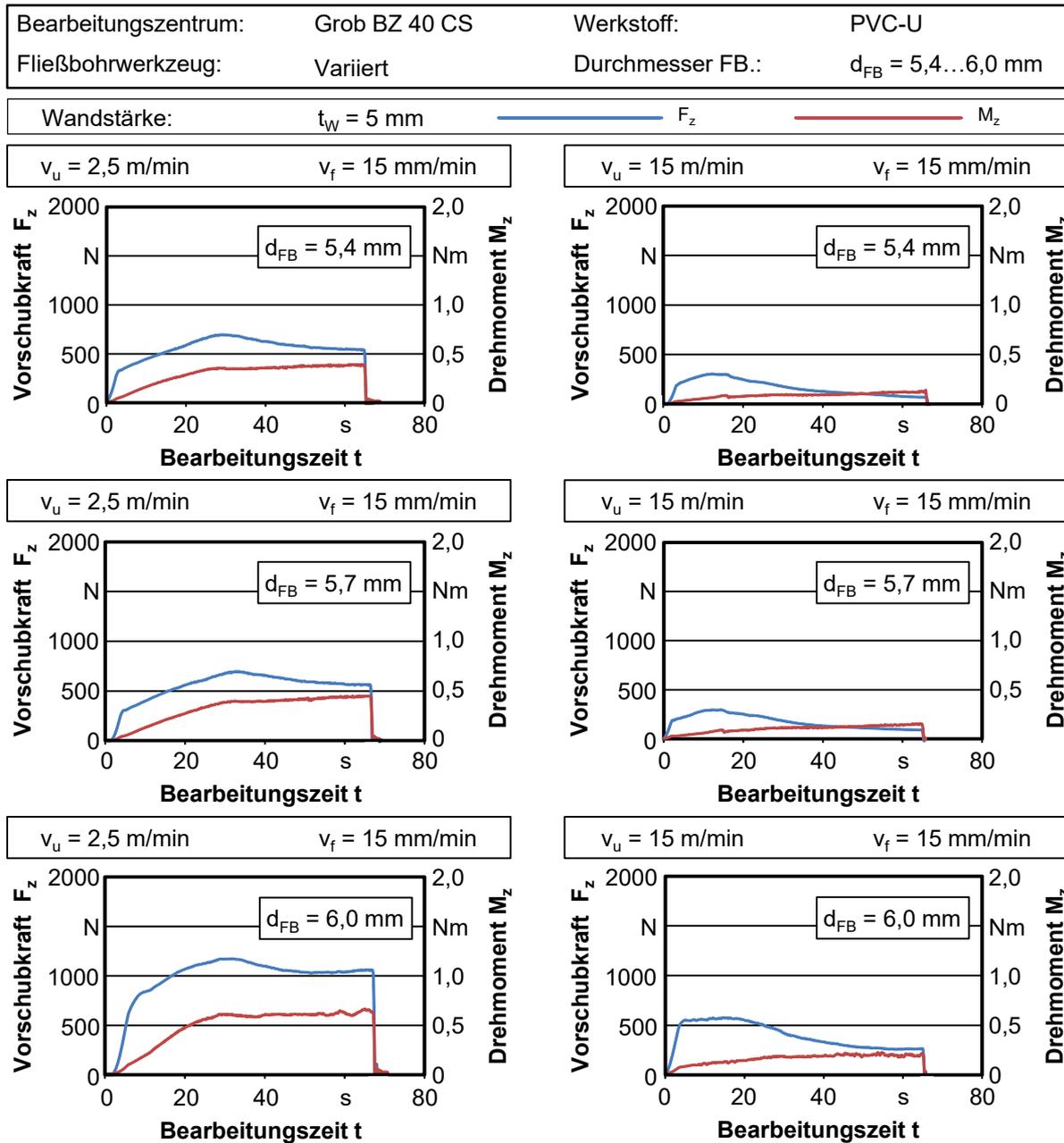


Abbildung 5-24: Prozessverläufe beim Fließbohren des Kunststoffes PVC-U mit modifizierten Werkzeugen

Die Verläufe weisen die typische Form beim Fließbohren des Werkstoffs mithilfe eines kommerziellen Werkzeugs (vgl. Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11) auf. Die Variation des Werkzeugdurchmessers führt lediglich zu einer geringen Änderung der maximalen Werkzeugbelastungen in Prozess. Mit einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit erreicht die Vorschubkraft früher den maximalen Wert als bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit. Das Drehmoment nimmt mit einer wachsenden Umfangsgeschwindigkeit deutlich ab. Mit einer hohen Vorschubgeschwindigkeit sind größere mechanische Werkzeugbelastungen zu erkennen.

In **Abbildung 5-25** sind die maximalen Werkzeugbelastungen beim Fließbohren in Bezug auf die Parameterkombinationen sowie die Werkzeugdurchmesser dargestellt. Die größten

Werkzeugbelastungen treten bei dem maximalen Werkzeugdurchmesser auf, weil in dem Fall die Menge des umzuformenden Materials am größten ist.

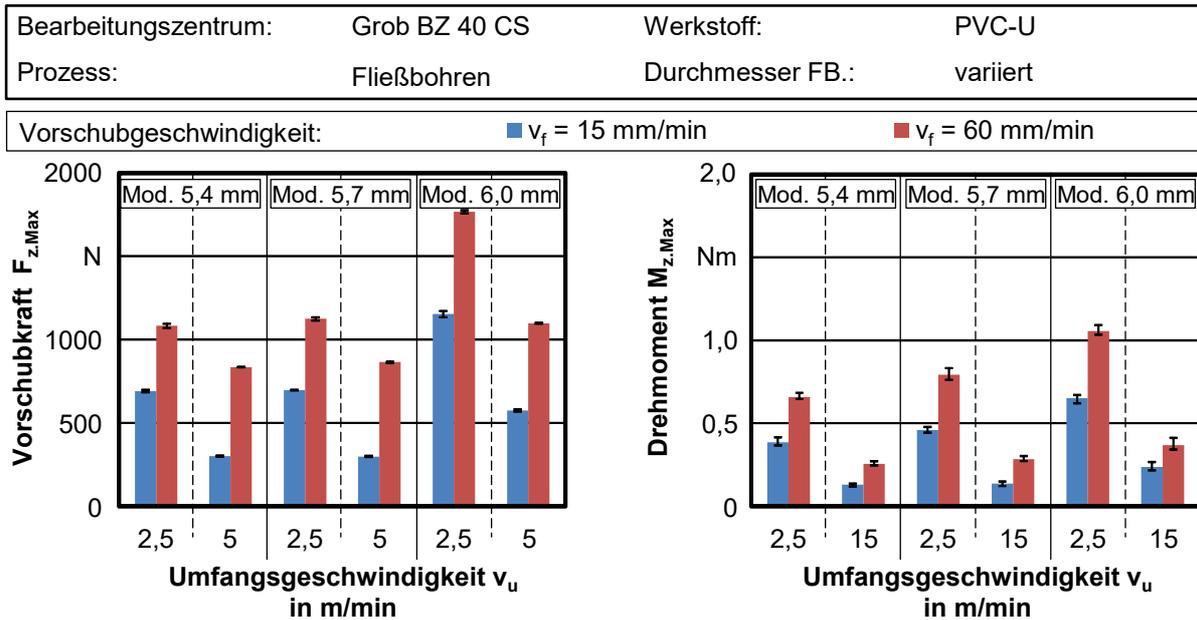


Abbildung 5-25: Maximale mechanische Werkzeugbelastungen beim Fließbohren des PVC-U mit modifizierten Werkzeugen

Abbildung 5-26 zeigt die Gestalt der Bohrungen am Werkzeugeintritt. Im Vergleich zu der Vorschubgeschwindigkeit ist die Umfangsgeschwindigkeit auch hier der dominante Faktor in Bezug auf die Bearbeitungsergebnisse.

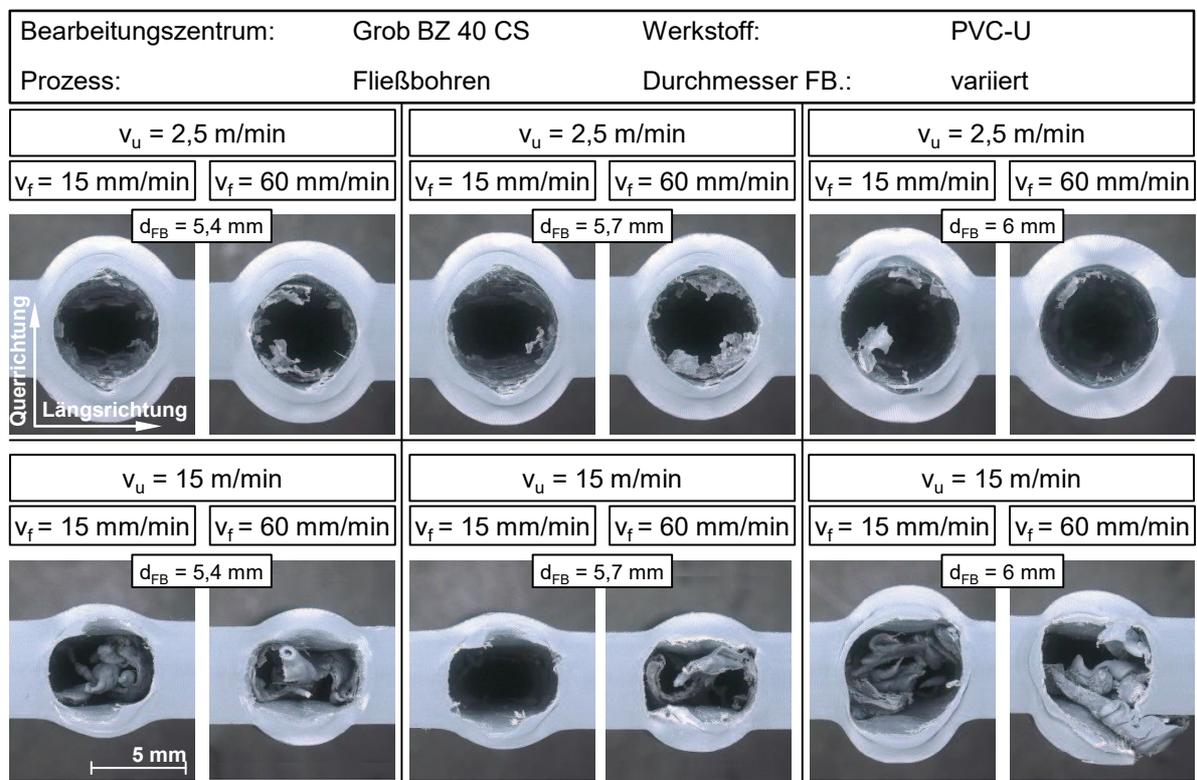


Abbildung 5-26: Querschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PVC-U

Während bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit der Bohrungseintritt visuell als rund bewertet werden kann, ändert sich dieser bei höherer Umfangsgeschwindigkeit quasi zu einer „viereckigen“ Bohrung. Wie beim Fließbohren mit kommerziellen Werkzeugen zeigt sich hier dieselbe Tendenz, dass die Rundheit der Bohrung mit einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit sinkt. Dies gilt für alle untersuchten Werkzeugdurchmesser. Bei einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit wird mehr Reibungswärme erzeugt und infolgedessen lässt sich auch mehr Material bei der Bearbeitung erweichen und verdrängen. Nach dem Fließbohren schrumpft daher die ausgeformte Außenbohrungswand stärker als bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit.

Die Abbildung zeigt auch, dass die Wandstärke der ausgeformten Bohrungswand bei hoher Umfangsgeschwindigkeit deutlich sinkt. Im ungünstigsten Fall lässt sich keine geschlossene Bohrungswand bilden, wie die Bohrung, die mit dem größten Werkzeug bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15$ m/min und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 60$ mm/min bearbeitet wurde, zeigt.

Abbildung 5-27 ergänzt die Gestaltuntersuchung der Bohrung, in dem der Durchmesser in Längs- bzw. Querrichtung mikroskopisch erfasst und in Form von Säulendiagrammen dargestellt wird. Drei Bohrungen je Parameterwertkombination wurden dabei vermessen und die Mittelwerte sowie die Streubreite des Durchmessers abgebildet.

Analog zum Fließbohren mit kommerziellen Werkzeugen lassen sich die Bohrungen bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit in Querrichtung mehr aufweiten als bei einer hohen Umfangsgeschwindigkeit und die Durchmesser sind in diesem Fall größer als die in Längsrichtung. Eine gegenteilige Wirkung hat eine höhere Umfangsgeschwindigkeit. Die ausgeformte Bohrungswand schwindet nach dem Rückzug des Werkzeugs und der Durchmesser in Querrichtung wird kleiner. Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst vor allem die Durchmesser in Querrichtung. Mit einer Erhöhung nimmt der Durchmesser der Bohrung geringfügig ab.

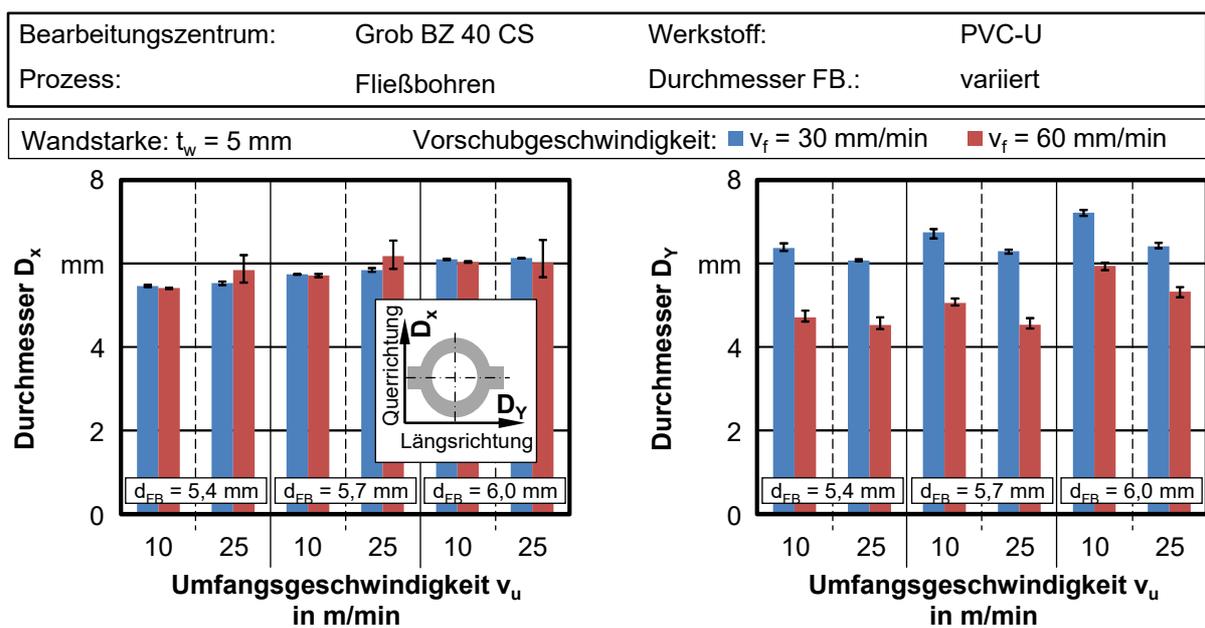


Abbildung 5-27: Durchmesser der Fließbohrungen von PVC-U in Längs- und Querrichtung, $t_w = 5$ mm

Beim Einsatz der modifizierten Werkzeuge wurden Bohrungen mit einer niedrigen Oberflächengüte erzeugt. **Abbildung 5-28** stellt die Längsschnitte der Bohrungen in Abhängigkeit der Parameterkombinationen dar. Auch hier lässt sich erkennen, dass die Umfangsgeschwindigkeit der entscheidende Faktor ist. Die Oberflächenqualität bzw. die Materialanhaftungen an der Bohrungswand werden maßgeblich von ihr beeinflusst. Während eine niedrige Umfangsgeschwindigkeit zu einer akzeptablen Oberfläche der Bohrung aufgrund der geringeren thermischen Belastung führt, verschlechtert sich die Oberfläche bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 15$ m/min deutlich. Die Bohrung weist eine raue Oberfläche auf. Im Vergleich zu der Umfangsgeschwindigkeit ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Bearbeitungsergebnisse nicht signifikant.

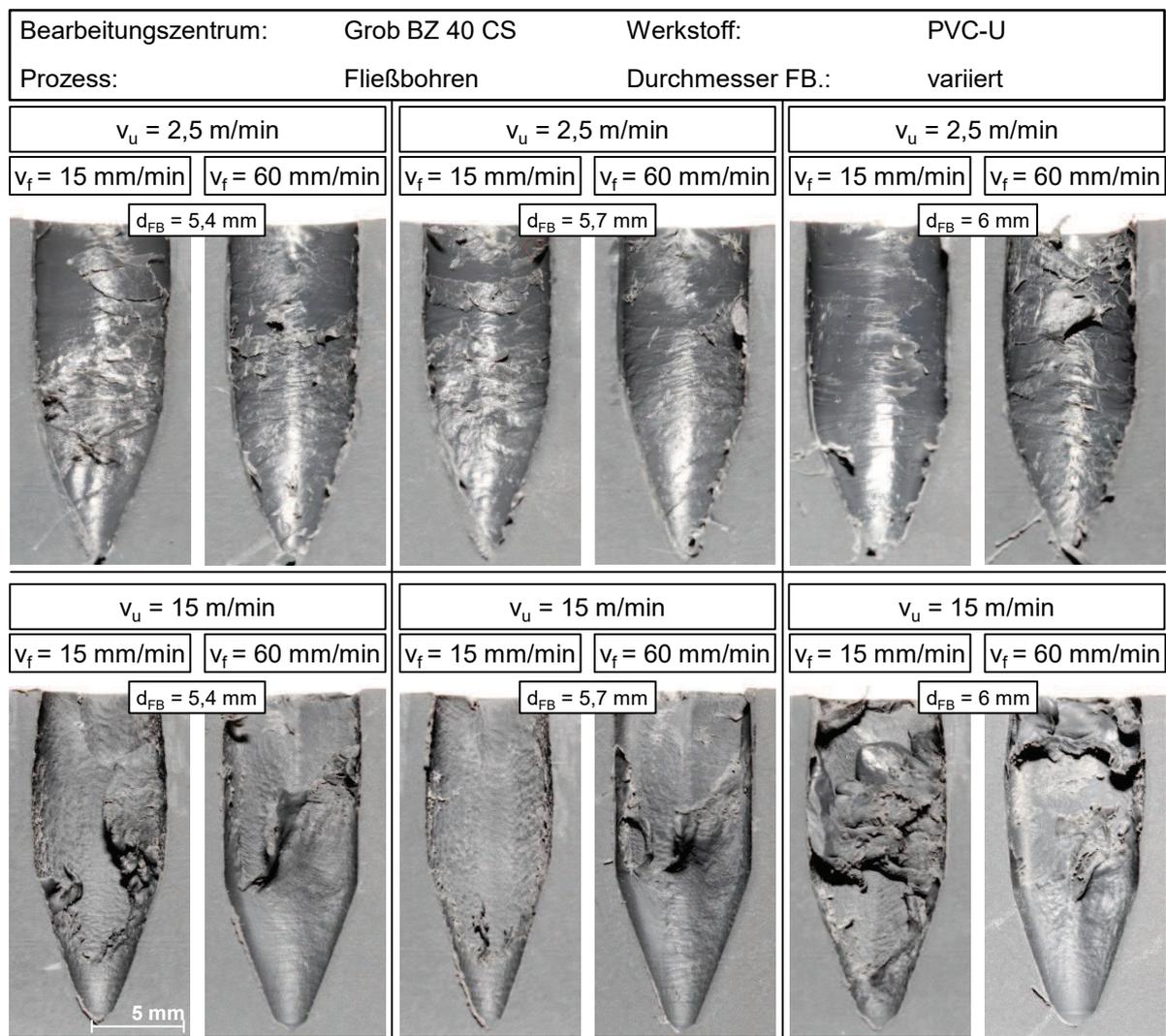


Abbildung 5-28: Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm, PVC-U

5.3.3 Veränderung des Prozessablaufs beim Fließbohren

Die bisher vorgestellten Ergebnisse zum Fließbohren der Kunststoffe zeigen, dass sich Bohrungen mit geschlossenen Bohrungswänden erzeugen lassen. Die Bohrungswand und die Gestalt der Bohrung weichen jedoch stark von einer zerspantechnisch bearbeiteten Bohrung ab. Aufgrund der thermischen Belastung beim Fließbohren sowie der Adhäsion zwischen Werkzeug und Werkstoff entstehen starke Materialanhaftungen an der Bohrungswand, welche

die Qualität der Bohrung weiter herabsetzen. Beim Einsatz von modifizierten Werkzeugen ergeben sich ähnliche Prozessverläufe. Ein größerer Durchmesser lässt sich durch den Einsatz eines großen Werkzeugs realisieren. Die ovale Gestalt der Bohrung und die geringe Oberflächengüte bleiben dabei unverändert. Die thermische Belastung ist entscheidend für die Qualität der Bohrung und nimmt mit steigender Umfangsgeschwindigkeit deutlich zu.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit besteht daher darin, die thermische Beanspruchung beim Fließbohren zu verringern. Die Umfangsgeschwindigkeit beim Fließbohren herabzusetzen wäre eine Möglichkeit, weil sich dieser Wert als die wichtigste Stellgröße beim Fließbohren darstellt und die thermische Belastung maßgebend bestimmt. Bei einer sehr niedrigen Umfangsgeschwindigkeit muss aber mit einer hohen mechanischen Belastung beim Prozess gerechnet werden, was nicht günstig für die Bearbeitung von dünnwandigen Strukturen ist, da sich das Bauteil unter der großen Last verformen kann. Des Weiteren kann der Prozess so umgestaltet werden, dass der Rückzug des Werkzeugs nicht wie bis dahin mit der Eilganggeschwindigkeit der Achse, sondern langsam nach dem Prozessende aus der Bohrung durchgeführt wird. Beim Rückzug stützt der zylindrische Teil des Werkzeugs die ausgeformte Bohrungswand und leitet die Wärme aus der Bohrungswand sowie der Kontaktzone an die Umgebung weiter. Somit wird eine langsame Abkühlung ermöglicht. Diese Umgestaltung des Prozesses wurde für die Kunststoffe PVC-U und PA66 bei niedrigen Parametern implementiert.

Abbildung 5-29 zeigt die Bearbeitungsergebnisse bei PVC-U, die nach diesem Prinzip bearbeitet wurden. Ein Fließbohrwerkzeug mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm wurde dabei eingesetzt und die Wandstärke des Flachprofils betrug $t_w = 5$ mm. Das Werkzeug wurde mit der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 2,5$ m/min und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 4$ mm/min bis zur programmierten Bohrtiefe verfahren. Beim Rückzug wurde das Werkzeug mit derselben Vorschubgeschwindigkeit aus der Bohrung gezogen.

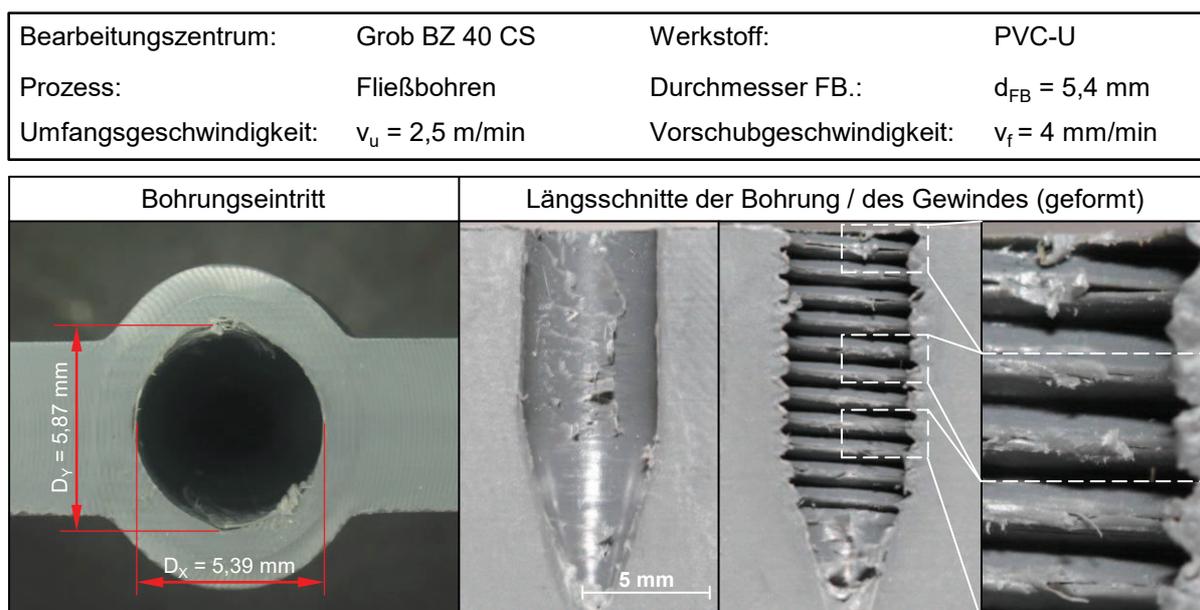


Abbildung 5-29: Fließbohren des PVC-U bei langsamen Rückzug des Werkzeugs

Am Werkzeugeintritt lässt sich eine bessere Gestalt der Bohrung erkennen. Die Bohrung weist hier nur ein geringes Untermaß zum Nenndurchmesser in Längsrichtung der Versuchsprobe auf. Die Innenbohrungswand verfügt über eine glatte Oberfläche. Sehr geringe Materialanhaftungen lassen sich an der Bohrungswand erkennen. Ein M6-Innengewinde lässt sich mit dem Gewindeformen in die Bohrung einbringen. Die Umfangsgeschwindigkeit dabei beitrug $v_{u,Ge} = 20$ m/min. Das erzeugte Gewindeprofil zeigt die typische Krallenbildung in den Gewindespitzen. Entlang der Bohrtiefe ist das Gewindeprofil gleich ausgebildet.

Dieses Prinzip lässt sich auch bei dem Kunststoff PA66 anwenden. **Abbildung 5-30** zeigt die Bearbeitungsergebnisse bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm. Der Rückzug des Werkzeugs erfolgt mit derselben Vorschubgeschwindigkeit wie beim Fließbohren. Auch hier wurde ein Standardfließbohrwerkzeug mit dem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm eingesetzt. Eine Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10$ m/min und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 30$ mm/min wurden eingesetzt. Ein Untermaß ist zwar immer noch vorhanden, eine Verbesserung der Bohrungsgestalt ist deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 5-5). Die Bohrungswand weist eine glatte Oberfläche auf und ist frei von Materialanhaftungen. Aufgrund des Untermaßes lässt sich kein Gewindeformen anwenden. Mithilfe des Gewindebohrens kann ein M6-Innengewinde eingebracht werden. Das Gewindeprofil weist in Längsrichtung der Bohrung eine abgerundete Gewindespitze auf. Es ist auch entlang der Bohrtiefe gleichmäßig abgebildet.

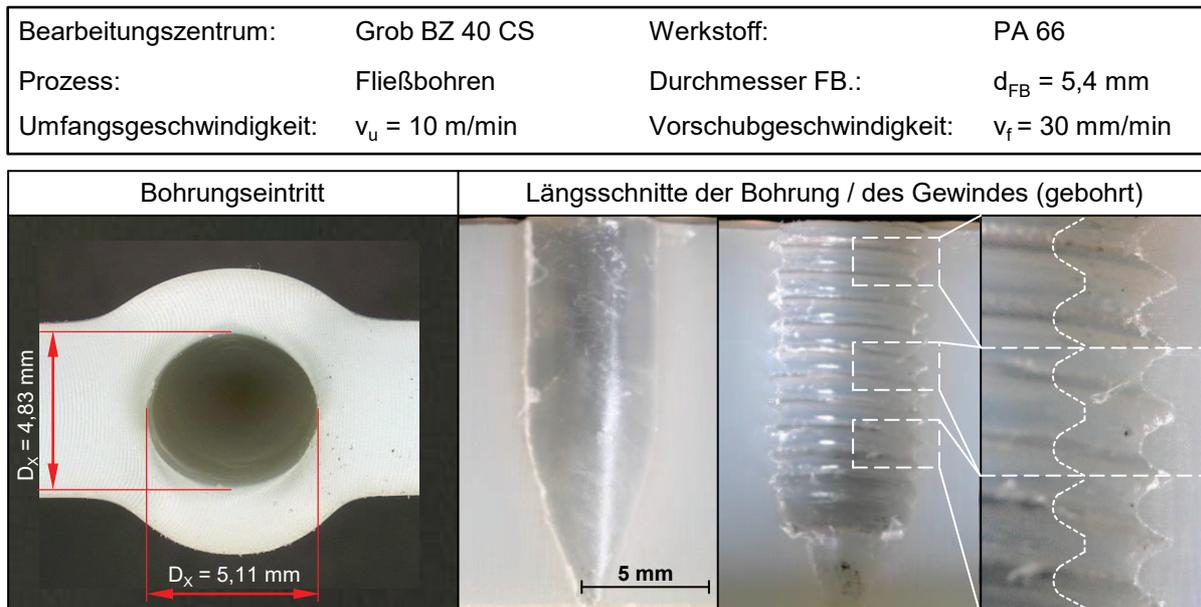


Abbildung 5-30: Fließbohren des PA66 bei langsamen Rückzug des Werkzeugs

Des Weiteren kann eine aktive Kühlung dazu beitragen, die Qualität der Bohrung weiter zu erhöhen. **Abbildung 5-31** zeigt die Längsschnitte der Bearbeitungsergebnisse, bei denen zusätzlich KSS verwendet wurde. Das Fließbohren wurde mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 10$ m/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 30$ mm/min durchgeführt. Die Wandstärke beträgt $t_w = 5$ mm und ein Fließbohrer mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ kam zum Einsatz. Die KSS-Zufuhr wurde eingeschaltet, als die Bohrtiefe erreicht wurde. Das Werkzeug drehte sich mit einer Verweilzeit von $t = 4$ s weiter, dann wurde das Werkzeug mit dem gleichen Vorschub aus der geformten Bohrung zurückgezogen.

Die Messung des Durchmessers am Bohrungseintritt zeigt, dass die Abweichung vom Nennmaß weiter abnimmt und sich die Rundheit verbessert. Beim Einsatz des KSS und der Verweilzeit wird die Wärmeabfuhr der Bohrung über das Werkzeug beschleunigt. Da sich der Fließbohrer in der Bohrung dreht, drückt sich die Bohrungswand zwangsläufig an die Mantelfläche des Werkzeugs. Die Durchmesser der Bohrung liegen daher näher am Nenndurchmesser des Werkzeugs. Eine glatte Bohrungswand lässt sich erzeugen. Es sind keine Materialanhaftungen erkennbar. Ein M6-Gewinde kann mit Hilfe des Gewindebohrens eingebracht werden und das Gewindeprofil weist eine flache Gewindespitze auf. Die Bildung des Gewindeprofils ist auch entlang der Bohrtiefe gleichmäßig.

Bearbeitungszentrum:	Grob BZ 40 CS	Werkstoff:	PA 66
Prozess:	Fließbohren	Durchmesser FB.:	$d_{FB} = 5,4 \text{ mm}$
Umfangsgeschwindigkeit:	$v_u = 10 \text{ m/min}$	Vorschubgeschwindigkeit:	$v_f = 30 \text{ mm/min}$

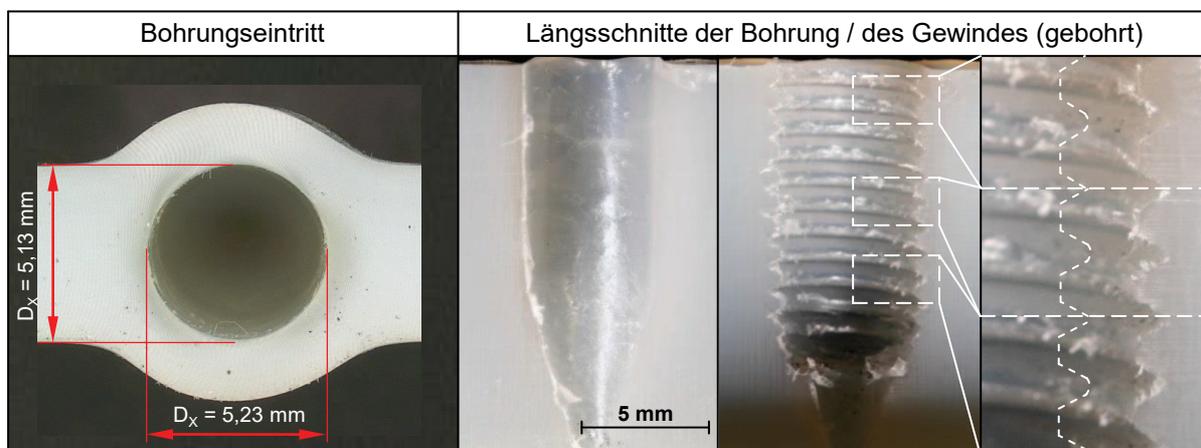


Abbildung 5-31: Fließbohren des PA66 bei langsamen Rückzug des Werkzeugs und KSS-Einsatz

Mit geändertem Prozessverlauf lässt sich die Qualität der Bohrungen beim Fließbohren der Kunststoffe verbessern. Die Fließbohrungen verfügen über eine bessere Bohrungsgestalt am Werkzeugeintritt und die Bohrungswand weist eine höhere Oberflächengüte als die mit dem Fließbohren ohne Einsatz von KSS bearbeiteten Bohrungen auf. Nachteilig ist es, dass die Bearbeitungszeit für eine Bohrung aufgrund eines langsamen Rückzugs deutlich erhöht wird. Der Einsatz des KSS führt zu einer weiteren Abschwächung der Wirtschaftlichkeit, da zusätzliche Kosten für die Betriebsstoffe und die notwendige Peripherie anfallen. Die Energiekosten für die Kühlschmierstoffversorgung (KSS) können allein mit über 50 % des gesamten Energieverbrauchs einer NC-Maschine betragen [1].

6 Fließbohren von Leicht- und Buntmetallen

6.1 Untersuchungen zur Fließbohrbearbeitung von AZ31

6.1.1 Mechanische Werkzeugbelastungen

In **Abbildung 6-1** und **Abbildung 6-2** werden die Verläufe der Vorschubkräfte und der Drehmomente in Abhängigkeit der Bearbeitungszeit und der Werkzeuggestalt dargestellt. In diesem Fall handelt es sich um eine Wandstärke von $t_w = 5$ mm. Der Durchmesser des Werkzeugs beträgt $d_{FB} = 5,4$ mm.

Aufgrund der beschriebenen charakteristischen Merkmale ergeben sich typische Verläufe der Vorschubkraft und des Drehmoments. Die mechanischen und thermischen Größen wirken sich gegenseitig aus. Beim Eindringen der Werkzeugspitze steigen sowohl die Vorschubkraft F_z als auch das Drehmoment M_z steil an. Diese Verläufe ergeben sich infolge der noch geringen Kontaktfläche und der daraus resultierenden geringen Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff. Große mechanische Belastungen treten auf, um das Material zu verformen.

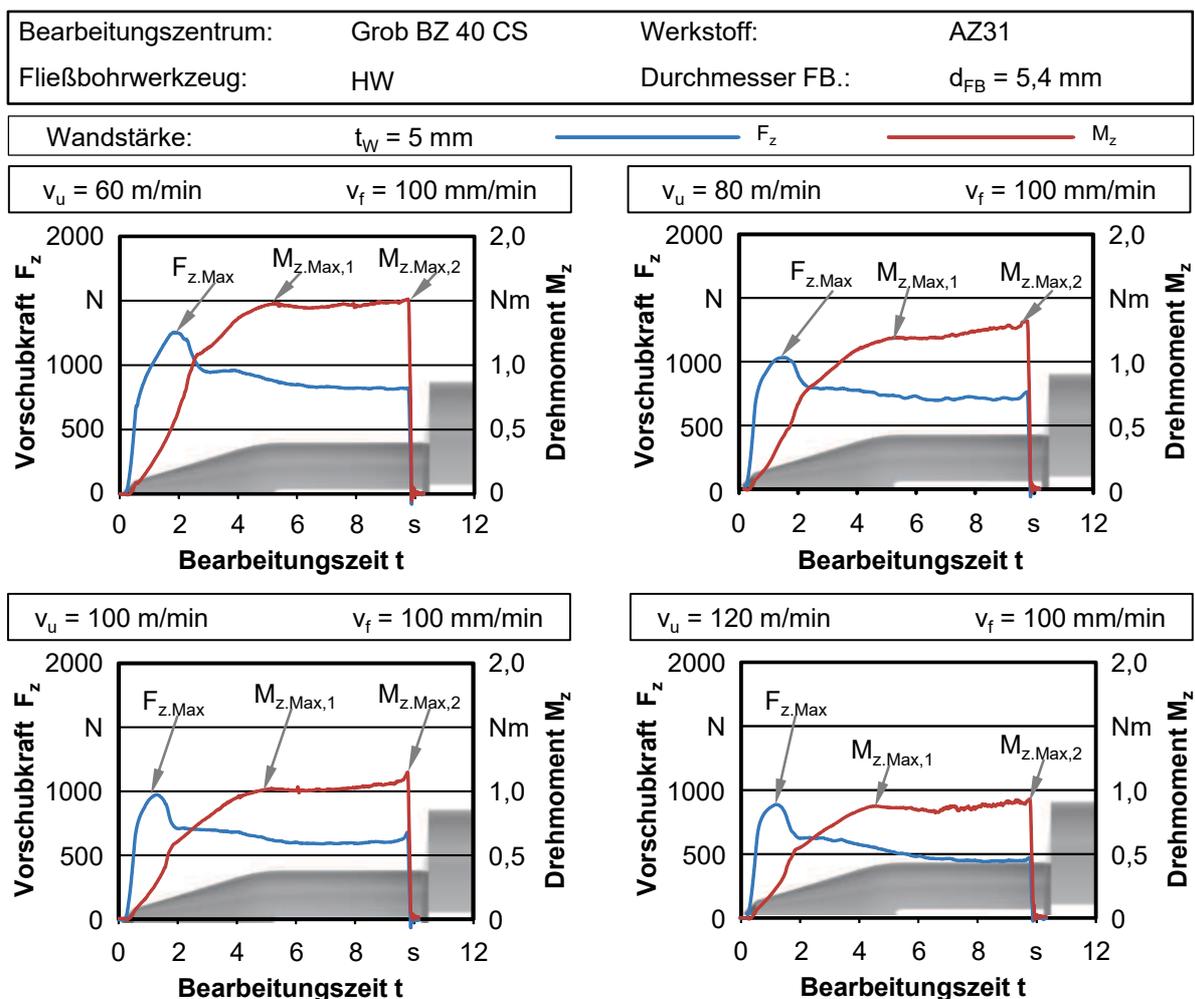


Abbildung 6-1: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung AZ31, $v_f = 100$ mm/min

Mit zunehmender Bohrtiefe drückt der konische Werkzeugteil in das Material ein. Die Vorschubkraft F_z erreicht ihren maximalen Wert $F_{z,Max}$ und fällt steil ab, während das Drehmoment M_z weiter ansteigt. Die Kontaktfläche bzw. die Reibung ist so groß, dass sich die Temperaturen weiter erhöhen. Die Fließgrenze des Werkstoffes wird weiter herabgesetzt [40]. Infolgedessen sinkt die Vorschubkraft. Das Drehmoment nimmt mit zunehmender Kontaktfläche weiter zu und es erreicht den ersten maximalen Wert $M_{z,Max,1}$, wenn der Übergangsbereich des konischen und des zylindrischen Werkzeugteils in das Material eindringt.

Nachdem der zylindrische Werkzeugteil auch im Eingriff mit dem Werkstoff ist, sinkt die Vorschubkraft während das Drehmoment geringfügig zunimmt. Diese Verläufe deuten darauf hin, dass sich eine „quasi-stabile“ Umformzone um das Werkzeug bildet und diese sich aufgrund der Vorschubbewegung der Spindel entsprechend in Vorschubrichtung bewegt. In dieser Zone ergeben sich hohe Temperaturen, die ebenfalls auf einem konstanten Niveau bleiben. Die mechanischen Belastungen wirken vorwiegend im Bereich der Werkzeugspitze und des vorderen Werkzeugkonus. Der zylindrische Teil unterstützt dabei die schon ausgebildete Bohrungswand und die Reibung bleibt in dem Bereich gering.

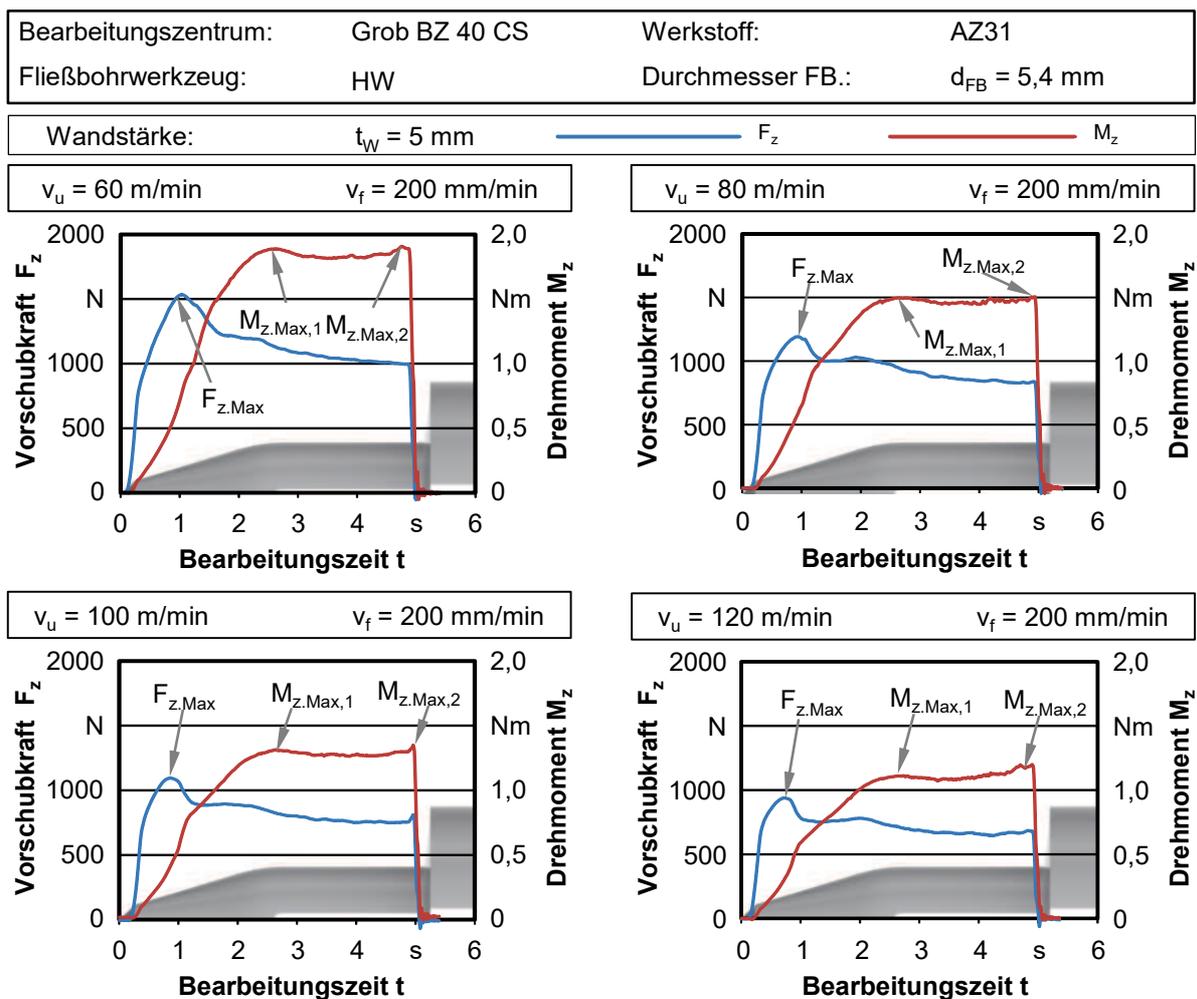


Abbildung 6-2: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung AZ31, $v_f = 200 \text{ mm/min}$

Am Ende des Fließbohrprozesses erreicht das Drehmoment den zweiten maximalen Wert $M_{z,Max,2}$. Bei der Vorschubkraft tritt dies nicht auf. Der Grund dafür ist im Folgenden beschrieben. Bei der eingestellten Bohrtiefe von $t_B = 16$ mm ist wenig Material entgegen der Vorschubbewegung aus der Bohrung gedrungen und es bildet sich eine mit einer Gratbildung vergleichbare Materialanhäufung. Der Umfang dieses Aufwurfs führt praktisch zu keiner Kraftzunahme, da der in den vorderen Teilen des Fließbohrwerkzeugs stattfindende Umformvorgang weiterhin die entscheidende Rolle im Prozess spielt. Wenn der Werkzeugbund diese Materialansammlung bearbeitet, entsteht Reibung und infolgedessen nimmt das Drehmoment geringfügig zu. Es kann passieren, dass das Drehmomentmaximum $M_{z,Max,2}$ am Prozessende geringfügig größer als das Drehmomentmaximum $M_{z,Max,1}$ ist.

Aus den genannten Gründen lässt sich zusammenfassen, dass die maximale Vorschubkraft $F_{z,max}$ und das erste Maximum des Drehmoments $M_{z,Max,1}$ den Fließbohrprozess charakterisieren. Die weitere Analyse der im Fließbohren auftretenden mechanischen Werkzeugbelastungen basiert daher auf diesen beiden Größen. **Abbildung 6-3** zeigt die maximalen Vorschubkräfte und Drehmomente in Abhängigkeit von den Umfangsgeschwindigkeiten, den Vorschubgeschwindigkeiten sowie den Wandstärken. Die Mittelwerte wurden aus drei Messungen ermittelt und die Höhe der Streubreite in diesem Diagramm stellt den minimalen bzw. den maximalen Wert bei der jeweiligen Parameter-Kombination dar.

Die Variation der Umfangsgeschwindigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Bauteilbelastungen. Bei allen untersuchten Wandstärken fallen die Vorschubkraft und das Drehmoment tendenziell mit steigender Umfangsgeschwindigkeit ab. Dies lässt sich mit der immer größer werdenden Reibungswärme erklären. Eine höhere Umfangsgeschwindigkeit führt zu höheren Temperaturen. Da die Fließgrenze des Werkstoffs mit zunehmender Temperatur abnimmt, werden geringere Vorschubkräfte und Drehmomente gemessen.

Neben der Umfangsgeschwindigkeit führt die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu einer Zunahme von Vorschubkraft und Drehmoment. Dies lässt sich mit der abgekürzten Prozessdauer erklären. Bei einem schnellen Prozess wird wenig Reibungswärme eingebracht und das Material bleibt bei einer niedrigen Temperatur. Um den Werkstoff umzuformen sind daher größere Kräfte und Momente nötig. Die Vorschubkraft und das Drehmoment nehmen auch mit zunehmender Wandstärke t_w zu. Dies liegt darin begründet, dass je größer die Wandstärke ist, desto mehr Material beim Fließbohren umzuformen ist.

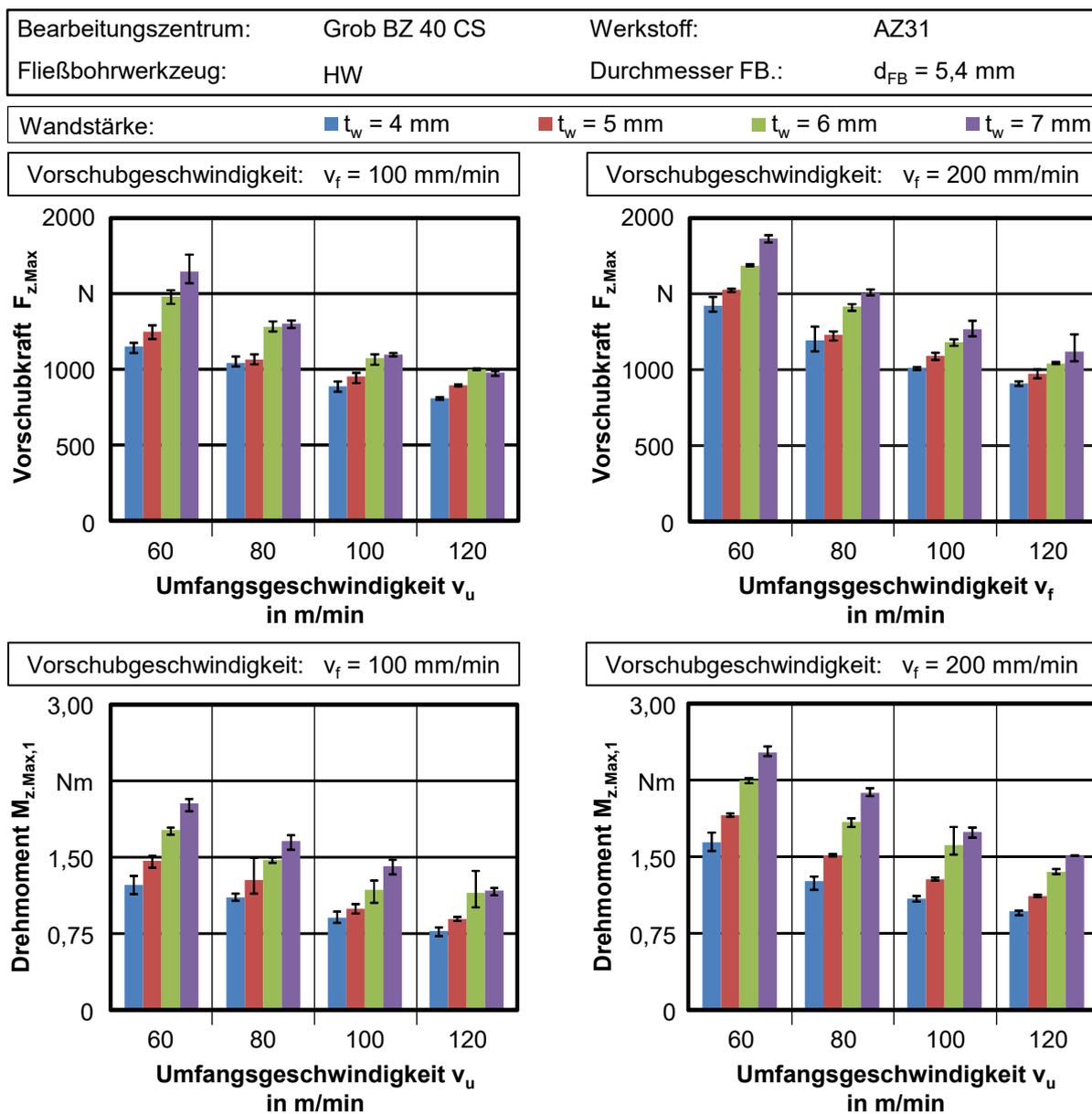


Abbildung 6-3: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max,1}$

6.1.2 Thermische Werkzeugbelastungen

Neben den mechanischen Werkzeugbelastungen stellt die Prozesstemperatur eine der wichtigsten Bewertungsgrößen des Fließbohrprozesses dar. Die Temperaturen wurden während des Prozesses in Form von Wärmebildern aufgenommen und analysiert. In **Abbildung 6-4** sind die Wärmebilder bei einer Versuchsprobe mit der Wandstärke von $t_w = 6 \text{ mm}$ in Abhängigkeit der Bohrtiefe entlang der Bearbeitung dargestellt.

Der Abstand zwischen zwei Wärmebildern beträgt $\Delta a = 2 \text{ mm}$ in axialer Richtung. In der Abbildung ist für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ die gesamte Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \text{ m/min}$ bis $v_u = 120 \text{ m/min}$ dargestellt. Bei der höheren Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200 \text{ mm/min}$ wurden die Wärmebildaufnahmen mit den minimalen und maximalen Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 60 \text{ m/min}$ und $v_u = 120 \text{ m/min}$ betrachtet. Zwischen den beiden Umfangsgeschwindigkeiten weist die

thermische Werkzeugbelastung ein ähnliches Verhalten auf wie bei der niedrigen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$.

Die Wärmebilder repräsentieren das Temperaturfeld der Bohrungswand. Der Einfluss des Abstands von der Bohrungsoberfläche zu der Kontaktstelle zwischen dem Werkzeug und Material ist aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs vernachlässigbar. Bei einer Bohrtiefe von $t_B = 8 \text{ mm}$ tritt der konisch-zylindrische Übergangsbereich des Werkzeugs in das Material ein. Das Fließbohren endet bei der Bohrtiefe von $t_B = 16 \text{ mm}$.

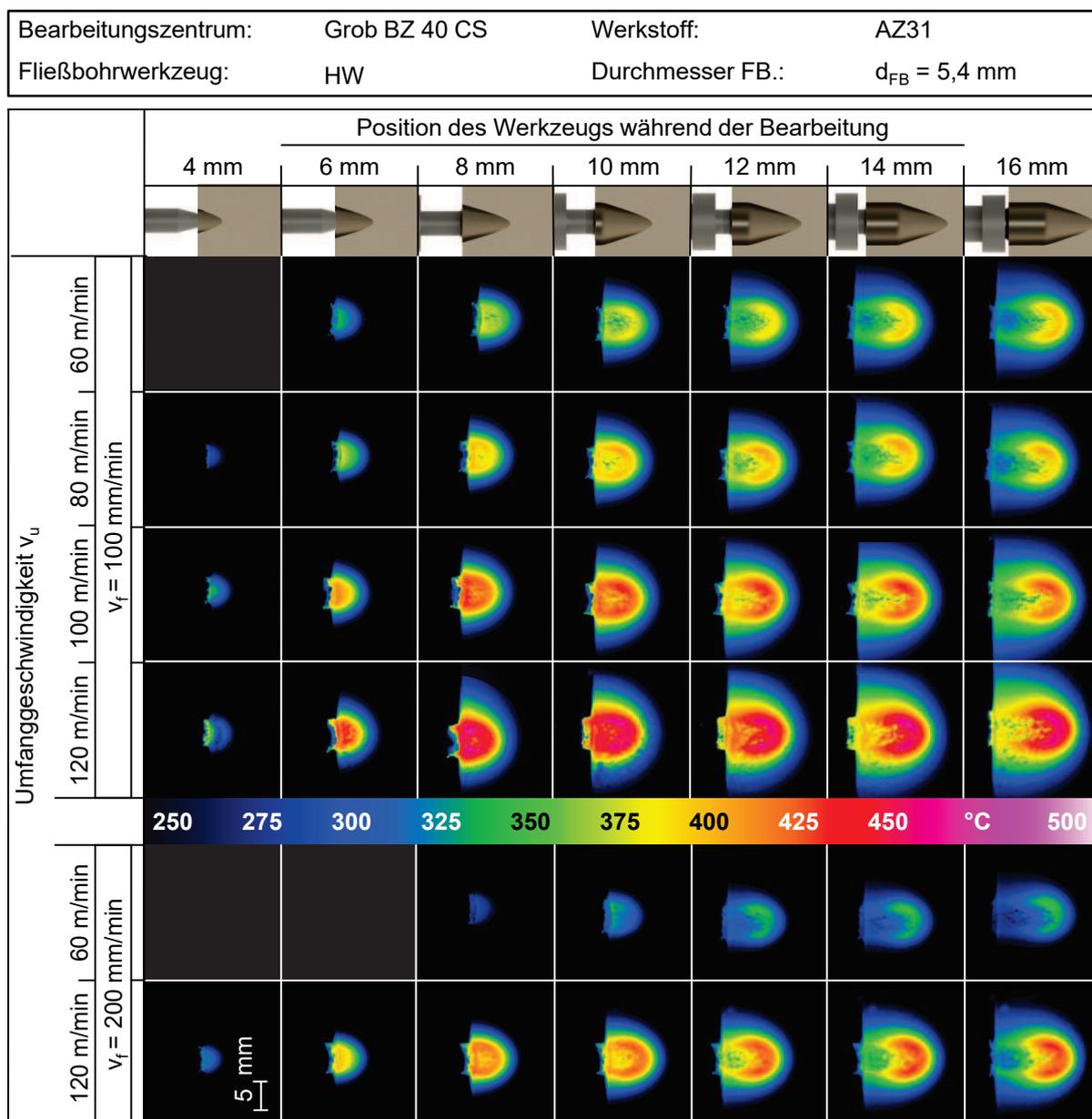


Abbildung 6-4: Wärmebilderaufnahmen in Abhängigkeit der Bohrtiefe bei einer Wandstärke von $t_w = 6 \text{ mm}$

Die Wärmebilder zeigen, dass die Umfangsgeschwindigkeit und die Vorschubgeschwindigkeit signifikanten Einfluss auf die Prozesstemperatur haben. Eine Erhöhung führt jeweils zu einer Veränderung der Temperaturen. Bei höherer Umfangsgeschwindigkeit erreichen die Temperaturen der Bohrungswand schon bei geringer Bohrtiefe ein hohes Niveau. Während die maximale Temperatur der Bohrungswand bei der Umfangsgeschwindigkeit von

$v_u = 60$ m/min und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min ca. $T_{\text{Max}} = 400$ °C am Ende des Prozesses beträgt, erhöht sich dieser Wert bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 120$ m/min auf $T_{\text{Max}} = 458$ °C. Dies liegt darin begründet, dass eine größere Reibungswärme durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit hervorgerufen wird. Dies führt wiederum zu höheren Temperaturen innerhalb der Bohrungswand. Höhere Temperaturen schwächen die Festigkeit des Werkstoffs und führen zu einer Senkung der mechanischen Bauteilbelastungen beim Fließbohren. Eine hohe Vorschubgeschwindigkeit beim Fließbohren führt zu einem gegenteiligen Effekt. Die Temperaturen fallen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min ab.

Diese Ergebnisse der Temperaturmessungen bestätigen damit die in Abbildung 6-3 dargestellte Tendenz. Eine höhere Umfangsgeschwindigkeit beim Fließbohren führt zu höheren Temperaturen und somit verringert sich die mechanische Werkzeugbelastung. Eine zunehmende Vorschubgeschwindigkeit hingegen ruft steigende mechanische Bauteilbelastungen hervor, da die Temperaturen in dem Fall niedrig sind.

Die Wärmebilder zeigen auch, dass die höchsten Temperaturen im Bereich des konischen Werkzeugteils auftreten. Im Bereich der Werkzeugspitze und des zylindrischen Werkzeugteils herrschen vergleichsweise niedrige Temperaturen. Dies ist ein Zeichen dafür, dass der Werkzeugkonus den Großteil der Umformarbeit leistet. Nachdem der Übergangsbereich des Werkzeugs im Material ist, lässt sich die Bildung einer „quasi-stabilen“ Umformzone ebenfalls in den Wärmebildern erkennen. Diese Umformzone liegt im Übergangsbereich zwischen dem konischen und dem zylindrischen Werkzeugteil. Hohe Temperaturen treten immer in diesem Bereich auf. Nachdem der Werkzeugkonus im Werkstoff ist, bewegt sich diese „quasi-stabile“ Umformzone auch mit der Spindel in Vorschubrichtung. Mit erhöhter Umfangsgeschwindigkeit vergrößern sich sowohl das Temperaturfeld als auch die Temperaturen in der Umformzone. Im Gegensatz dazu sinken sie mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Kurz bevor die Bohrtiefe erreicht wird, ist zu erkennen, dass die Temperaturen im Bereich der geformten Bohrungswand niedriger als die der „quasi-stabilen“ Umformzone sind. Dies ist ein Zeichen dafür, dass eine Abkühlung der Bohrungswand sogar während des Fließbohrens stattgefunden hat. Im Folgenden wird deren Entstehung erläutert. Der zylindrische Werkzeugteil stützt die Bohrungswand beim Fließbohren. Es resultiert daher geringe Reibung zwischen den beiden Reibpartnern, nachdem der konisch-zylindrische Bereich des Werkzeugs die Bohrungswand ausgeformt hat. Reibungswärme wird weiterhin vorwiegend von dem Übergangsbereich des Werkzeugs eingebracht. Infolgedessen sind die Temperaturen in der geformten Bohrungswand zwar höher als die des unbearbeiteten Materials, aber niedriger als die des um den Werkzeugübergangsbereich liegenden Materials. Dies lässt sich in Abbildung 6-4 ab einer Bohrtiefe von $t_B = 12$ mm erkennen. Dieser von dem Prozess geprägte Verlauf wirkt sich schließlich auf die geometrischen Eigenschaften der erzeugten Bohrungen aus.

6.1.3 Durchmesser- und Rundheitsabweichungen

Entsprechend der Werkzeuggestalt weist die Bohrung folgende Merkmale auf: Einen von der Werkzeugspitze und dem konischen Teil des Werkzeugs geprägten Bohrungsgrund und eine zylindrische Bohrungswand. Nur die zylindrische Bohrungswand kann bei anschließender

Gewindebearbeitung genutzt werden und deren geometrischen Eigenschaften wirken sich direkt auf die gefertigten Gewinde aus. Daher wurde mit mithilfe der taktilen Messung die Gestalt der zylindrischen Bohrungswand vermessen, um die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen zu ermitteln. Drei Bohrungen der jeweiligen Parameterkombinationen wurden zur Messung herangezogen. **Abbildung 6-5** zeigt den Aufbau der taktilen Messungen der fließgebohrten Bohrungen. Zwei verschiedene Messtiefen wurden ausgewählt, deren Abstand zur Bohrungsoberfläche $z_1 = -2,5$ mm und $z_2 = -5,0$ mm betragen. Bei der Messung wurde ein Taster mit einer Rubinkugel ausgewählt, der über einen Durchmesser von $D = 2$ mm verfügt. Damit wurde ein punktförmiger Kontakt zwischen dem Taster und der Bohrungswand sichergestellt.

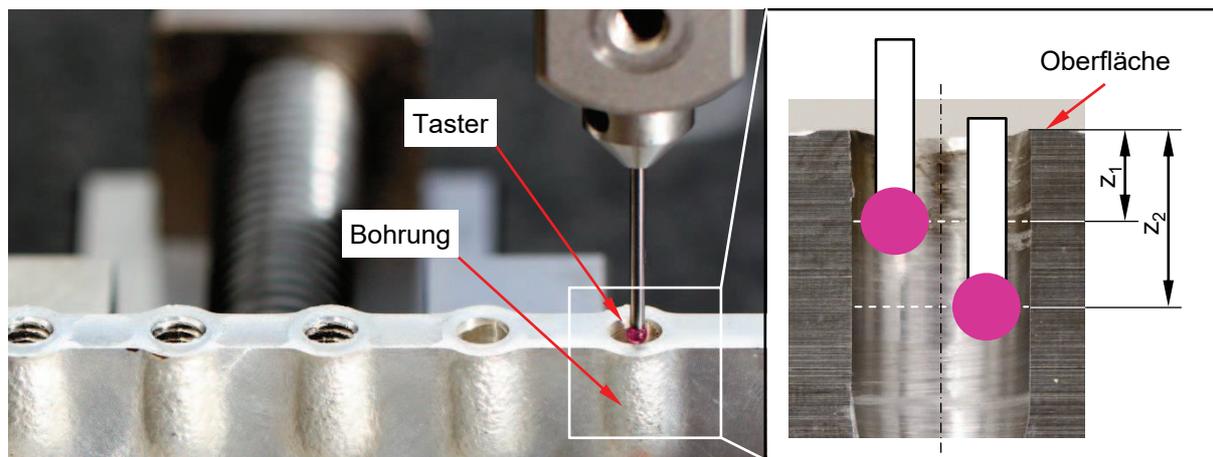


Abbildung 6-5: Aufbau der taktilen Messungen der Bohrungen

Abbildung 6-6 stellt die gemessenen Durchmesserabweichungen vom Nenndurchmesser des Werkzeugs $d_{FB} = 5,4$ mm an den zwei Messebenen in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit, der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Wandstärke dar. Die Säulen repräsentieren die arithmetischen Mittelwerte aus drei Messungen und die Fehlerbalken die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte.

Die Durchmesserabweichungen vom Nennmaß zeigen, dass der Durchmesser der Bohrung mit zunehmender Bohrtiefe abnimmt. Bei der tieferen Messebene $z_2 = -5$ mm weisen die Bohrungen überwiegend Untermaß auf. Bei der Messebene von $z_1 = -2,5$ mm sind die Bohrungen jedoch größer. Bei den Wandstärken von $t_w = 4$ mm und $t_w = 5$ mm ist ein Übermaß bei dieser Messposition entstanden. Aus diesen Ergebnissen lässt sich feststellen, dass konische Bohrungen beim Fließbohren entstehen. Die Entstehung solcher Bohrungen lässt sich mit dem Prozessablauf erklären. Beim Fließbohren wird das zu bearbeitende Material im Prozess von dem Werkzeug erwärmt. Die höchsten Temperaturen weist der Teil der Bohrungswand auf, in der sich die „quasi-stabile“ Umformzone befindet. Diese Umformzone bewegt sich mit der Vorschubbewegung der Spindel weiter. Durch die thermomechanischen Werkzeugbelastungen drückt das Material fest an das Werkzeug und die Bohrung nimmt den Durchmesser bzw. die Kontur des Werkzeugs an. Als die eingestellte Bohrtiefe erreicht wird, sind die Temperaturen in der sich bewegenden „quasi-stabile“ Umformzone bzw. des Bohrungsgrundes immer noch höher als die Temperaturen in der umliegenden Bohrung (vgl. Abbildung 6-4). Aufgrund von diesem ungleichmäßigen

Wärmezustand der Bohrung ergeben sich unterschiedliche Dehnungen innerhalb der Bohrungswand. Nach dem das Werkzeug aus der Bohrung gezogen ist, kühlt die in größerer Bohrtiefe liegende Bohrungswand zuletzt ab. Aufgrund dessen dehnt der Werkstoff dort mehr als der in der schon geformten Bohrungswand. Dies führt zu einem kleinen Bohrungsdurchmesser im Bereich des Bohrungsgrunds.

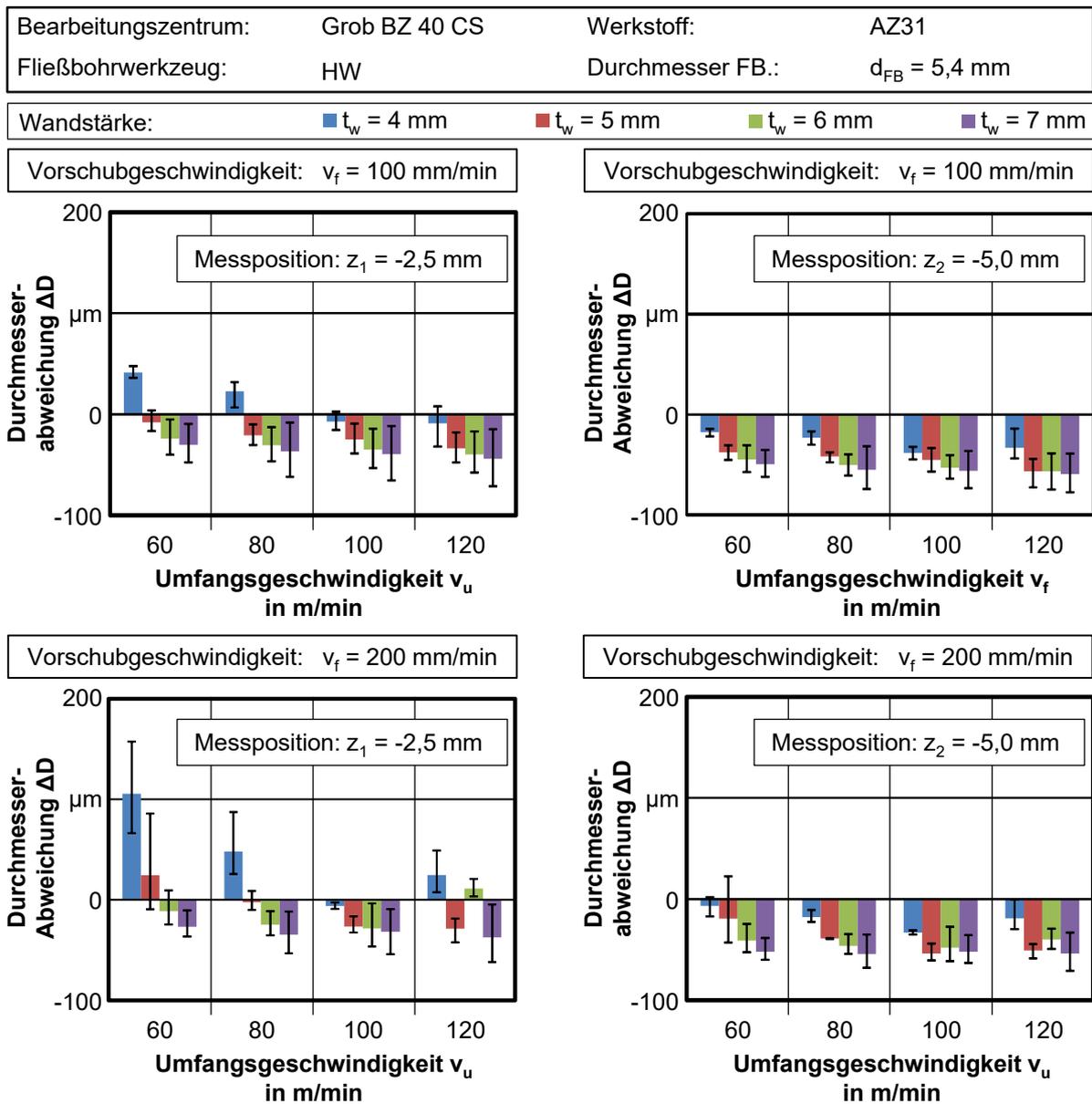


Abbildung 6-6: Durchmesserabweichungen der Fließbohrungen in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Die Messungen der Temperatur der Bohrungswand zeigen, dass sich die Temperatur mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit erhöht, daher führt eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit tendenziell zu einem abnehmenden Durchmesser. Bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit ist der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit jedoch nicht so eindeutig zu interpretieren. Die Durchmesser der Bohrungen vergrößern sich in dem Fall. Bei den Proben mit der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ ist diese Tendenz deutlich zu erkennen. Größere Durchmesser über Nennmaß wurden bei den Proben unter niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 60 \dots 80 \text{ m/min}$ sowie $v_u = 120 \text{ m/min}$ gefertigt. Die kleinsten

Durchmesser wurden in vielen Fällen bei großen Wandstärken von $t_w = 7$ mm erreicht. Dies liegt daran, dass Profile geringer Wandstärke unter erhöhter Vorschubgeschwindigkeit stärker aufgeweitet werden als dickere Proben.

Die fließgebohrten Bohrungen sind auch von großen Rundheitsabweichungen geprägt, wie **Abbildung 6-7** zeigt. Hohe Rundheitsfehler von $T_R = 150$ μm sind insbesondere bei einer niedrigen Wandstärke von $t_w = 4$ mm unter geringer Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs und der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 200$ mm/min zu erkennen. Mit zunehmender Bohrtiefe sinkt der Rundheitsfehler der Bohrungen. Dies lässt sich tendenziell bei der tieferen Messebene $z = -5$ mm erkennen. Bei dieser Messposition übt die Variation der Vorschubgeschwindigkeit keinen Einfluss mehr auf die Rundheit aus. Im Vergleich zu dünnen Versuchsproben weisen Bauteile mit höherer Wandstärke geringere Rundheitsabweichungen auf.

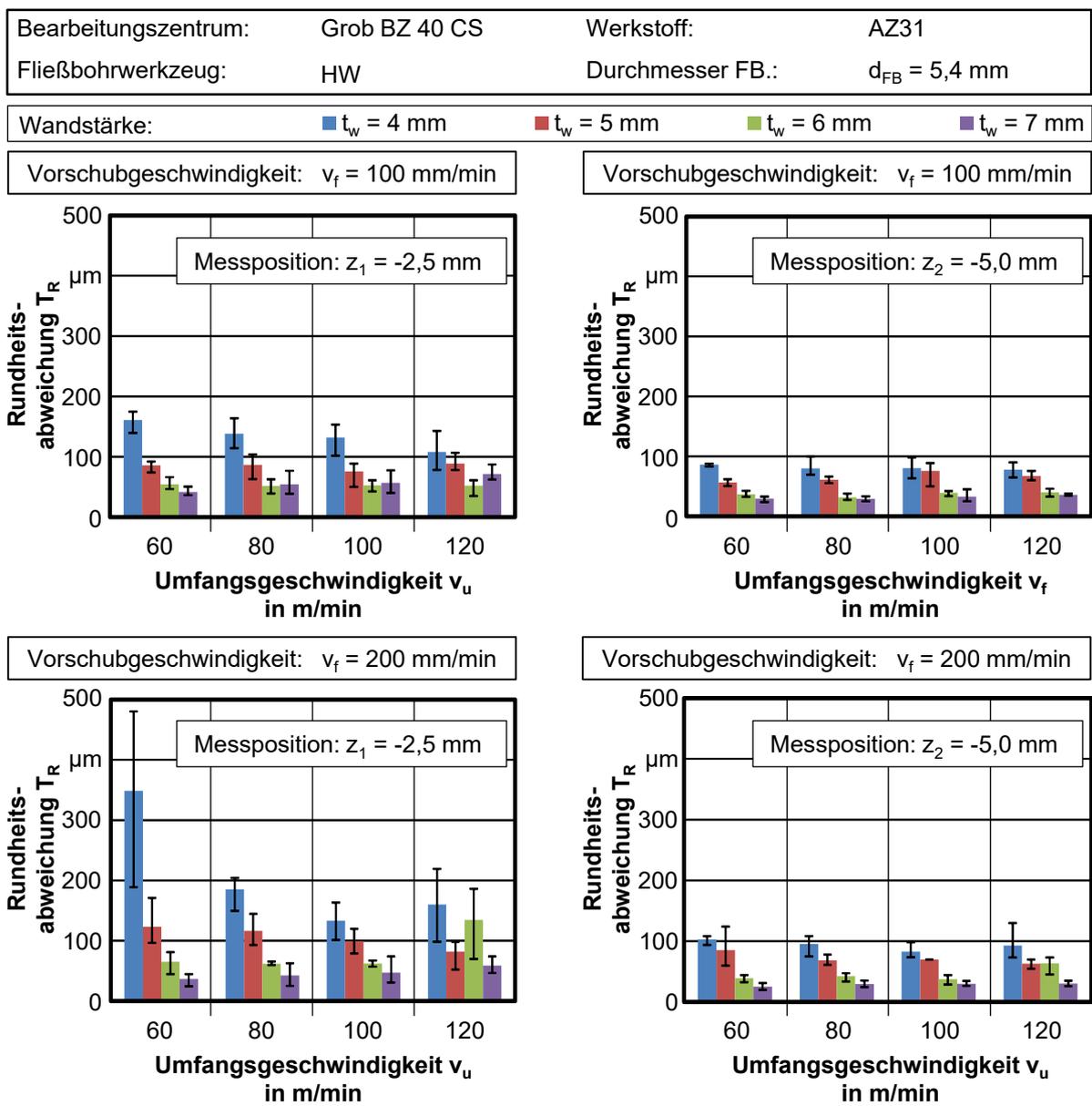


Abbildung 6-7: Rundheitsabweichungen der Fließbohrungen in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Dies wird auch beispielsweise in **Abbildung 6-8** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass „ovale“ Bohrungen beim Fließbohren erzeugt wurden. Ein großer Rundheitsfehler dünnwandiger Proben am Bohrungseintritt führt auch dazu, dass kein vollständiges Gewindeprofil in dem Bereich bei anschließender Gewindebearbeitung erzeugt werden kann. Diese unzureichende Bildung des Gewindeprofils schwächt die Festigkeit der Fügestelle und muss daher vermieden werden.

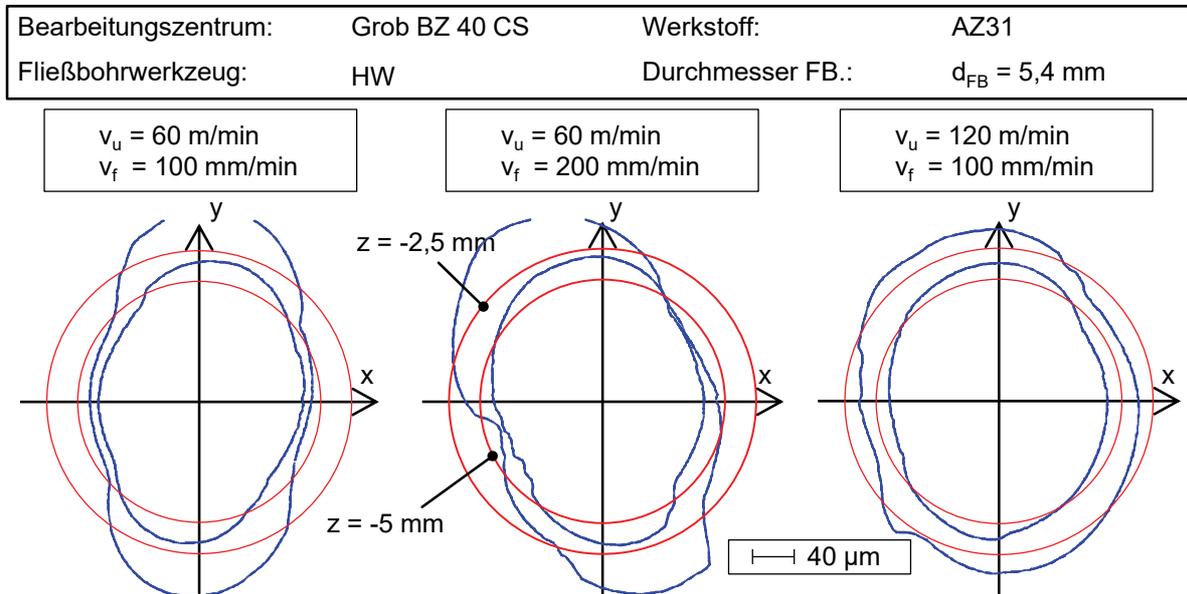


Abbildung 6-8: Rundheitsmessschiebe der Fließbohrungen bei $t_w = 4 \text{ mm}$

6.1.4 Längsschnittanalyse der Bohrungen und Gewinde

Die Analyse der Längsschnitte der Bohrungen und Gewinde ermöglicht es, visuell die Oberflächengüte der Bohrungen bzw. die Ausbildung des Gewindeprofils zu beurteilen. Fehler oder Beschädigungen der Bohrungswand, die während des Fließbohrens entstehen, können zu Fehlstellen im Gewindeprofil führen und sich damit auf die Festigkeit der angefertigten Fügestelle negativ auswirken.

Abbildung 6-9 und **Abbildung 6-10** stellen die Längsschnitte der Bohrungen dar. Bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 200 \text{ mm/min}$ sind die Bohrungen, die mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \text{ m/min}$ und $v_u = 120 \text{ m/min}$ angefertigt wurden, abgebildet. Eine geschlossene Vorbohrung bildet sich bei allen Wandstärken. Es ist keine Rissbindung oder Anhaftung des Materials an der Bohrungswand zu erkennen. Obwohl die Magnesiumlegierung AZ31 bei niedriger Temperatur schwer formbar ist [3], sind die Ergebnisse zufriedenstellend.

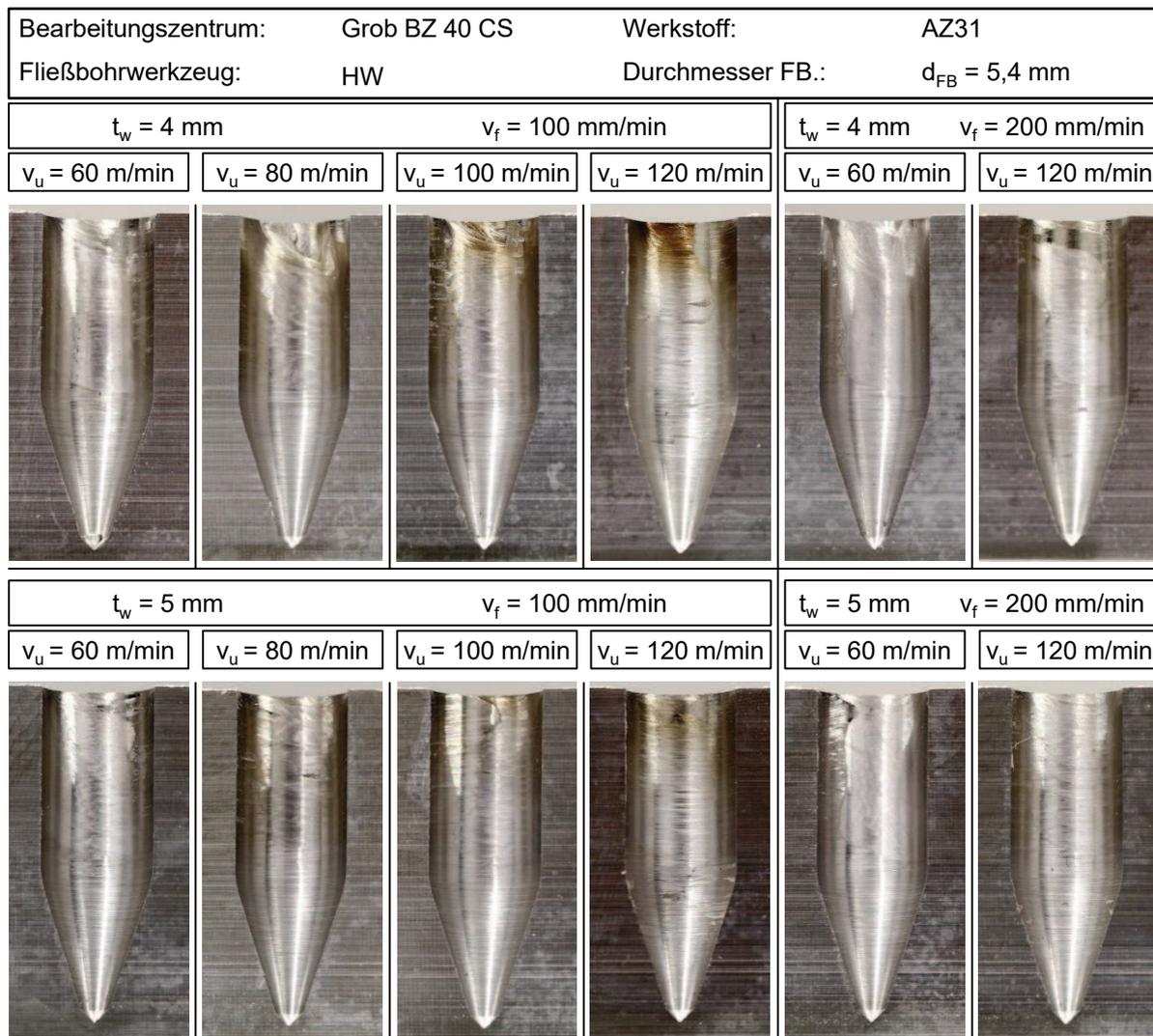


Abbildung 6-9: Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 4 \dots 5 \text{ mm}$

Während die Umfangsgeschwindigkeit eine entscheidende Einflussgröße auf die mechanischen Werkzeugbelastungen darstellt, wirkt sie sich nicht signifikant auf die Oberfläche aus. Auch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt zu keiner deutlichen Veränderung der Bearbeitungsergebnisse. Ein möglicher Grund für die ähnliche Oberflächenqualität der Bohrung liegen in der schwachen Bildung von Aufschweißungen.

Beim Fließbohren der Magnesiumknetlegierung bilden sich geringe Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche. Diese Bildung tritt vor allem im Bereich der Werkzeugspitze und des Werkzeugkonus auf. Auf dem zylindrischen Werkzeugteil ist praktisch keine Aufschweißung zu finden. Beim Rückzug des Werkzeugs wird daher die Oberfläche der Bohrung nicht beeinflusst. Die Wandstärke der Versuchsprobe beeinflusst die Oberflächenbeschaffenheit geringfügig. Die Längsschnitte weisen ähnliche Oberflächen auf und diese fehlerarmen Bohrungen sind vorteilhaft für die anschließende Gewindebearbeitung. Ein Einfluss der Wandstärke auf die erzeugten Bohrungswände lässt sich nicht feststellen.

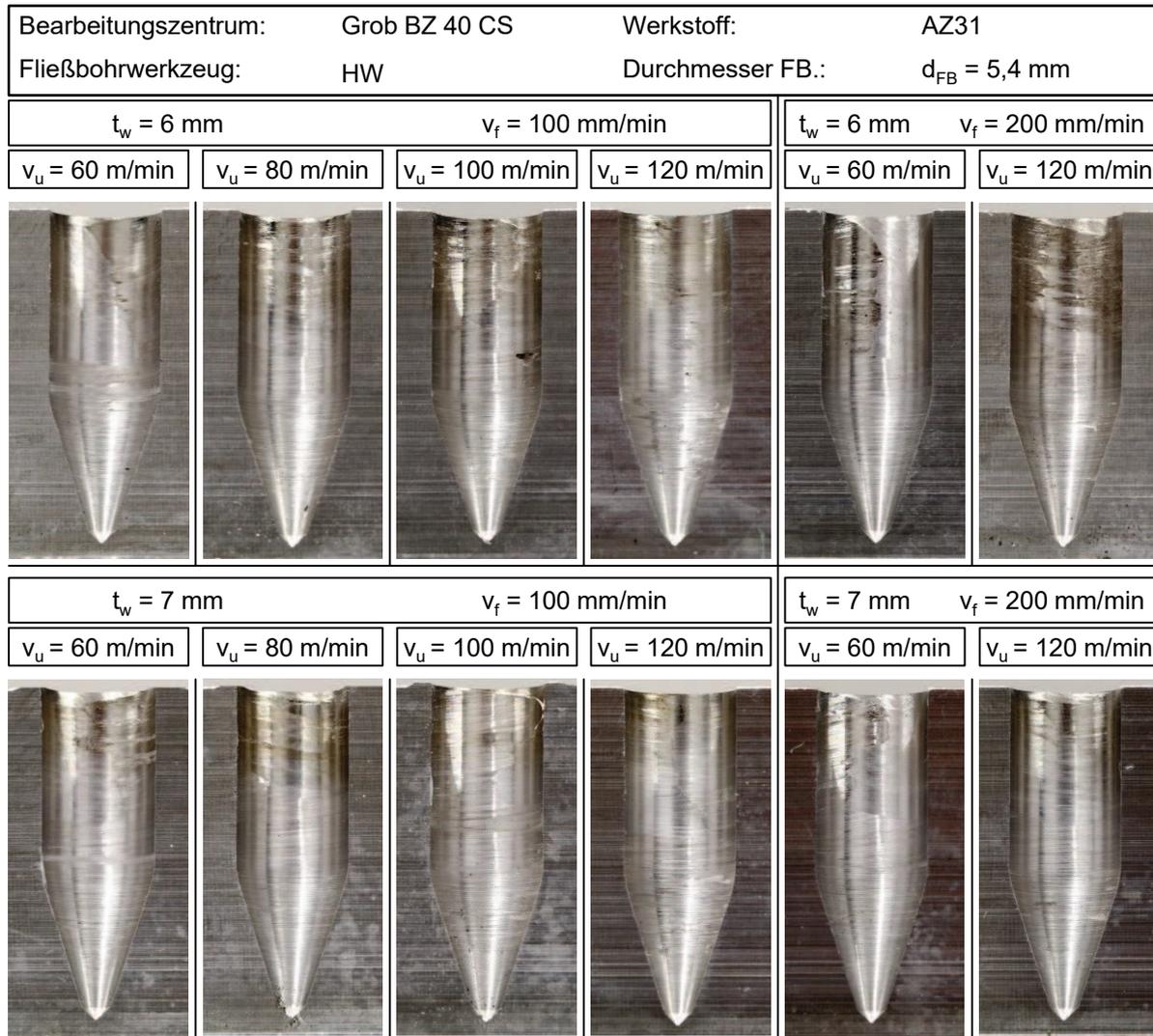


Abbildung 6-10: Längsschnitte der Fließbohrungen, bei einer Wandstärke von $t_w = 5...7 \text{ mm}$

Nach dem Fließbohren wird das Gewinde mithilfe des Gewindeformens in die Bohrung eingebracht. In **Abbildung 6-11** und **Abbildung 6-12** sind die Längsschnitte der erzeugten Gewinde dargestellt. Um den Einfluss der Parameterkombinationen beim Fließbohren auf die Innengewindebearbeitung zu untersuchen, wurden alle Gewinde mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_{u,Ge} = 20 \text{ m/min}$ hergestellt. Da die Fließbohrungen ähnliche Oberflächen aufweisen, wird das Gewindeprofil einerseits von den Durchmesserabweichungen, andererseits von den Werkstoffeigenschaften beeinflusst.

Bei einer Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ weisen die Gewinde, deren Vorbohrungen mit der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \text{ m/min}$ und den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 100...200 \text{ mm/min}$ bearbeitet worden sind, ein unvollständiges Gewindeprofil am Bohrungseintritt auf. Dieser Effekt tritt auch bei der Fließbohrung auf, welche bei der Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$ mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \text{ m/min}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ erzeugt wurde. Die Entstehung des unvollständigen Gewindeprofils am Bohrungseintritt kann auf die starken Durchmesserabweichungen an dieser Stelle zurückgeführt werden (vgl. **Abbildung 6-6**). Aufgrund des lokalen Übermaßes lässt sich kein vollständiges Gewindeprofil erzeugen. Bei zu großem

Durchmesser kann das Gewindeprofil nicht mehr erzeugt werden, weil kein ausreichendes Material zur Verfügung steht. Bei den Wandstärken von $t_w = 6 \dots 7$ mm weisen die Bohrungen am Bohrungseintritt vorwiegend ein Untermaß auf. Aufgrunddessen tritt ein unvollständiges Gewindeprofil bei diesen Wandstärken auf.

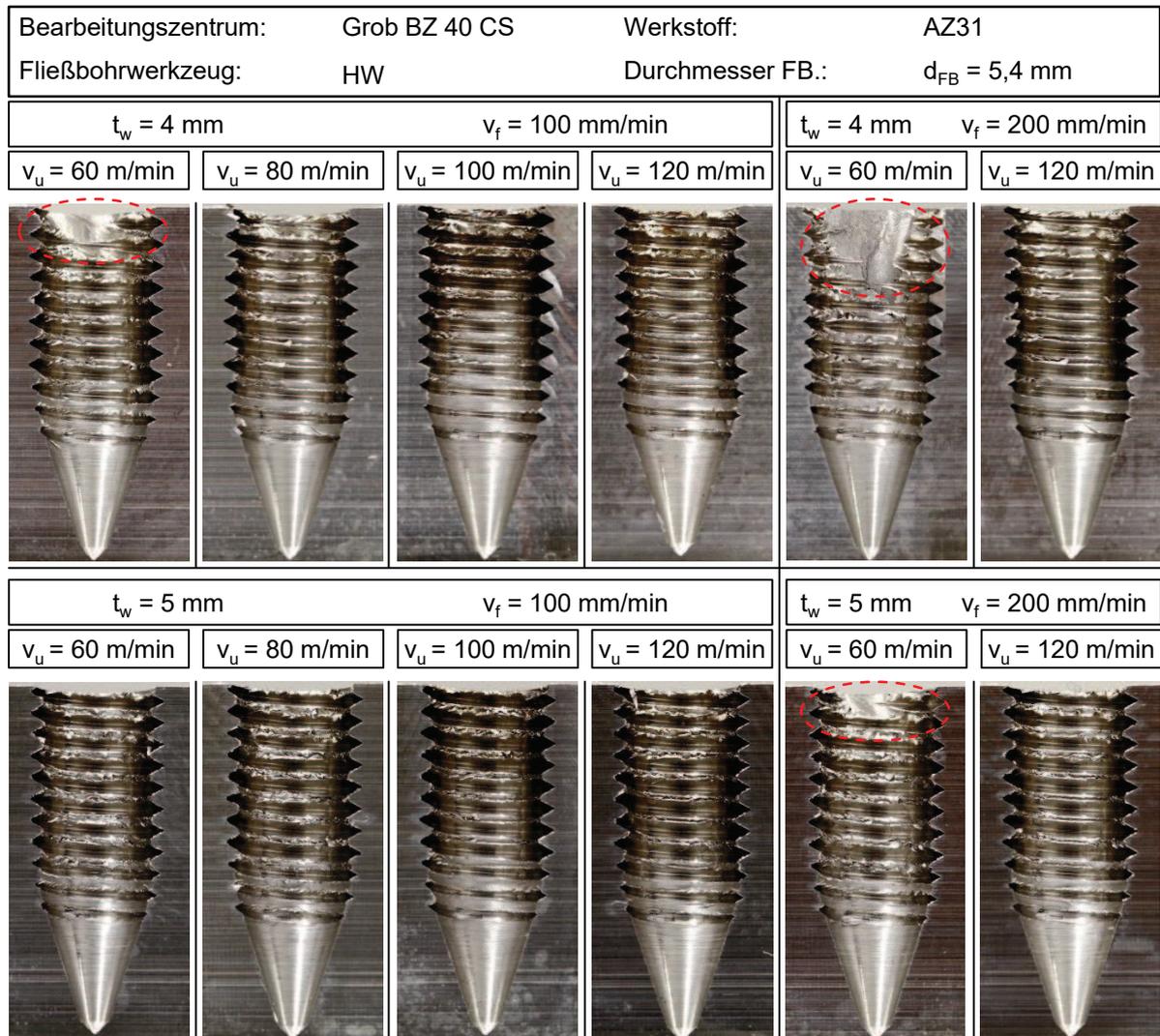


Abbildung 6-11: Längsschnitte der Gewinde bei einer Wandstärke von $t_w = 4 \dots 5$ mm

Mit zunehmender Bohrtiefe weisen die eingebrachten Gewinde ein ähnliches Gewindeprofil auf. An den Gewindespitzen sind Mikrobrüche zu erkennen. Deren Entstehung lässt sich mit der nicht ausreichenden Bruchdehnung des Werkstoffes erklären. Beim Gewindeformen fließt das Material der Bohrungswand zum großen Teil in Radialrichtung der Werkzeughachse und es bilden sich dabei die verfahrensspezifischen Krallen aus [163]. Die Anwendung des Verfahrens setzt bei Raumtemperatur voraus, dass das zu bearbeitende Material über eine ausreichende Bruchdehnung verfügt. Aufgrund der hexagonalen Struktur des Magnesiums lässt sich der Werkstoff unterhalb der Phasenumwandlungstemperatur von $T = 225$ °C schwierig umformen [41]. Beim Gewindeformen der Magnesiumknetlegierung AZ31 ist keine hohe Temperatur zu erwarten [11]. Allein durch den Gewindeformprozess lässt sich daher keine Gewindespitze ohne Mikrorisse fertigen.

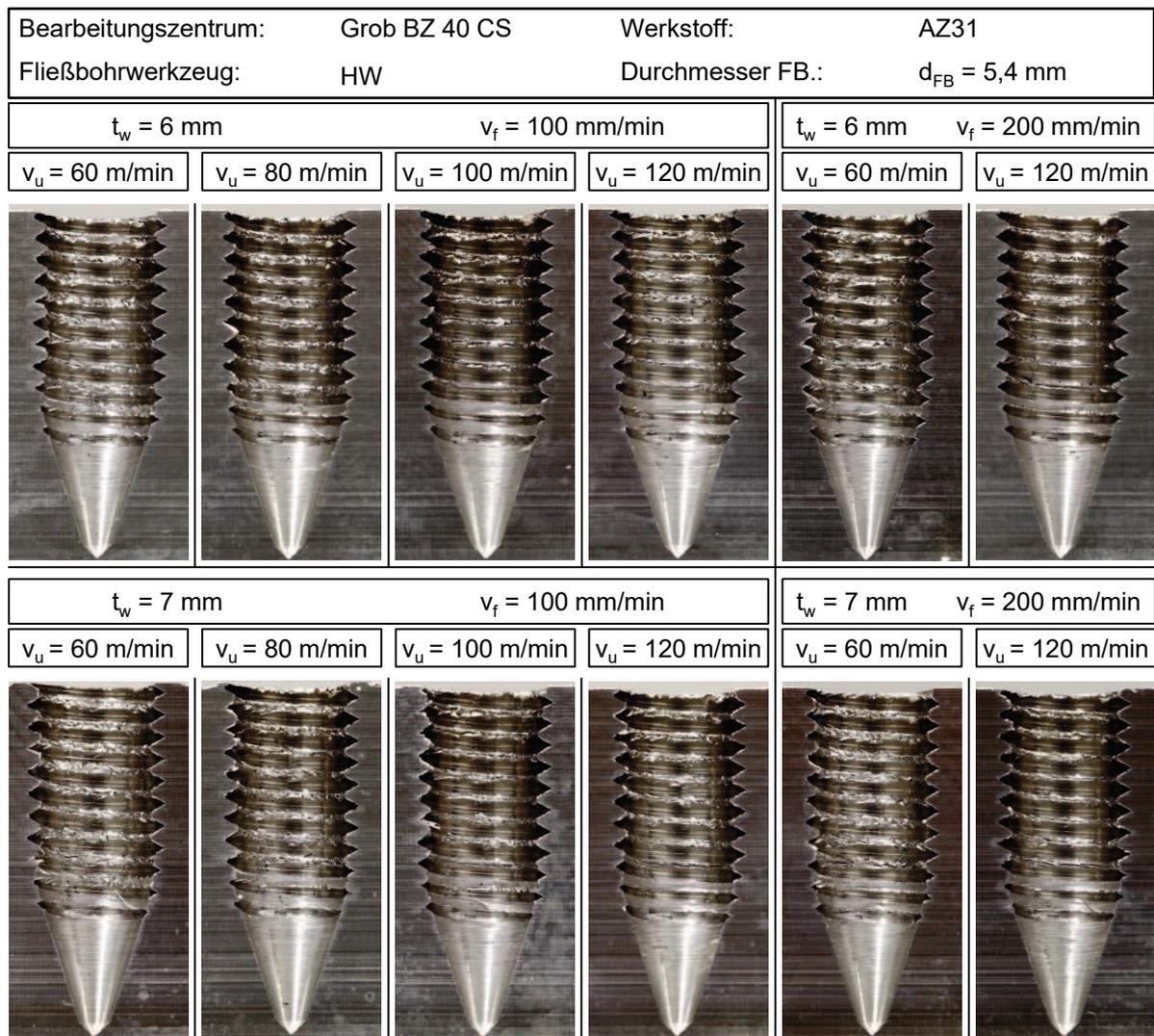


Abbildung 6-12: Längsschnitte der Gewinde bei einer Wandstärke von $t_w = 6...7 \text{ mm}$

6.1.5 Auszugsfestigkeit der Gewinde

Die bearbeiteten Gewinde wurden hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit mithilfe axialer Zugversuche untersucht. Dabei wurde das Gewinde in eine Vorrichtung einer axialen Prüfmaschine gespannt und mit Hilfe eines Prüfdorns in Form einer M6-Schraube mit der Festigkeitsklasse 12.9 bis zum Zerstören geprüft. Die untersuchten Gewinde verfügen über eine nutzbare Gewindetiefe von $t_{Ge} = 9 \text{ mm}$. Die Schraube wurde vor dem Versuch manuell bis zum Gewindegrund geschraubt. Bei jeder Parameterkombination wurden drei Gewinde getestet. Aus den Messungen wurden arithmetische Mittelwerte der maximalen Auszugskraft gebildet. **Abbildung 6-13** stellt diese Werte in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit, der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Wandstärke dar. Die Höhe der Fehlerbalken gibt die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte an. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wandstärke die dominante Rolle bei der Tragfähigkeit der Gewinde spielt. Die höchste Auszugskraft wurde immer bei der maximalen Wandstärke von $t_w = 7 \text{ mm}$ ermittelt, unabhängig von der untersuchten Umfangsgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit. Bei jeder Parameterkombination weisen die Gewinde der Probe mit der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ die geringste Auszugskraft auf. Die Umfangsgeschwindigkeit und die Vorschubgeschwindigkeit haben hier

einen geringen Einfluss auf die Festigkeit der Gewinde. Grund dafür sind die geringeren Durchmesser- und Rundheitsabweichungen der Bohrungen. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Messungen der Durchmesser- und Rundheitsabweichungen in Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7, bei denen die kleinsten Durchmesser und die geringsten Rundheitsfehler immer bei der größten Wandstärke gemessen wurden.

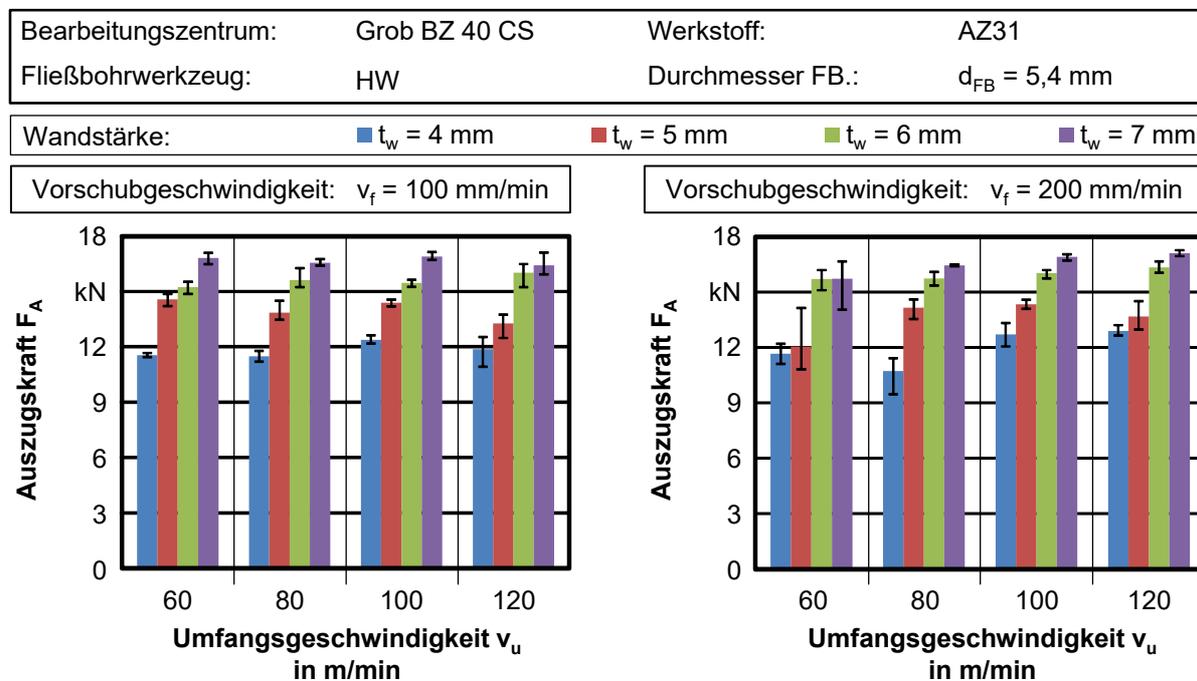


Abbildung 6-13: Auszugsfestigkeit der Gewinde in Abhängigkeit der Parameter

Um die Festigkeit derartiger Gewinde mit einem Gewinde im Vollmaterial vergleichen zu können, wurden M6-Gewinde desselben Werkstoffs mit dem Gewindebohren gefertigt und Auszugsversuche durchgeführt. Der Kernlochdurchmesser der Vorbohrung beträgt dabei etwa $D = 5,0$ mm und die Gewindetiefe $t_{Ge} = 9$ mm. Der Mittelwert der maximalen Auszugskraft aus drei Versuchen beträgt $F_A = 15533$ N. Dieser Wert entspricht der Festigkeit des Gewindes der Bauteile mit der Wandstärke von $t_w = 6$ mm. Die geformten Gewinde, deren Vorbohrungen durch das Fließbohren eingebracht wurden, weisen ab dieser Wandstärke trotz der Rissbildung im Bereich der Krallen an der Gewindespitze, eine höhere Festigkeit auf als die gebohrten Gewinde im Vollmaterial.

Gegenüber gebohrten Gewinden weisen geformte Gewinde bessere statische Festigkeiten auf. Es bestehen weitere Möglichkeiten, die Festigkeit derartiger Fügestellen zu erhöhen. Eine Option ist die nutzbare Gewindetiefe zu vergrößern. Dies kann durch den Einsatz eines noch längeren Fließbohrwerkzeugs umgesetzt werden. Somit steht mehr Bohrtiefe für das Gewindebohren zur Verfügung.

Eine weitere Option ist die Ausformung des Gewindeprofils zu verbessern. Durch eine Erwärmung des umzuformenden Bereichs vor dem eigentlichen Gewindeformprozess kann ein besseres Gewindeformen im Magnesium realisiert werden [138]. Dabei kann sowohl werkstückseitig als auch werkzeugseitig ein Vorheizen durchgeführt werden, damit die nötige Temperatur beim Gewindeformen erreicht werden kann. Beim werkstückseitigen Vorheizen wird dem gesamten Bauteil Wärme zugeführt, während beim werkzeugseitigen Vorheizen

lediglich das Werkzeug auf eine hohe Temperatur erwärmt wird [6]. Das Vorwärmen eines ganzen Bauteils ist angesichts des Energieaufwands nicht effizient, daher ist eine werkzeugseitige Erwärmung technisch von Vorteil. In der Literatur wurden solche Versuche bei spanlosem Gewinden an Magnesiumwerkstoffen durchgeführt und fehlerfreie Gewinde erfolgreich erzeugt [156]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein neues Bearbeitungskonzept beim Gewinden anzuwenden. Das Gewindenachformen kann dazu beitragen, Innengewinde mit hoher Oberflächengüte im Bereich der Gewindeflanken bei Raumtemperatur zu fertigen [12]. Dabei wird zuerst ein unvollständiges Gewindeprofil zerspantechnisch erzeugt, dann wird umformtechnisch das endgültige Gewindeprofil hergestellt. Der verringerte Umformgrad führt dazu, dass sich eine geringe oder keine Rissbildung im Gewinde bei niedriger Temperatur einstellt.

6.2 Untersuchung zur Fließbohrbearbeitung von CuZn37

6.2.1 Mechanische und thermische Werkzeugbelastungen

Abbildung 6-14 stellt beispielhaft einige der Verläufe der Vorschubkräfte und der Drehmomente dar. Am Anfang des Fließbohrens dringt die Werkzeugspitze in das Probenmaterial ein. Es entsteht nur geringe Reibungswärme und das Material weist noch ausreichende Festigkeit gegen das Eindringen des Werkzeugs auf. Die Vorschubkraft und das Drehmoment steigen schnell an. Mit zunehmender Bohrtiefe nimmt die Reibungswärme zu und die Temperatur erhöht sich. Die Materialfestigkeit nimmt mit der erhöhten Temperatur schnell ab und infolgedessen fällt die Vorschubkraft wieder ab, bevor der Werkzeugkonus vollständig in das Material eingedrungen ist. Das Material lässt sich von der Werkzeugspitze und dem Werkzeugkonus aufweiten. Das Drehmoment steigt hingegen weiter und erreicht schon den maximalen Wert, als der Übergangsbereich in das Material eindringt.

Nachdem der zylindrische Werkzeugteil auch im Eingriff ist, verläuft das Drehmoment quasi konstant, während die Vorschubkraft geringfügig abnimmt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich eine „quasi-stabile“ Umformzone um das Werkzeug bildet und diese sich aufgrund der Vorschubbewegung der Spindel entsprechend in Vorschubrichtung mit bewegt. In dieser Zone ergeben sich hohe Temperaturen, die ebenfalls auf einem konstanten Niveau bleiben. Die zu der Umformung des Werkstoffes benötigte Energie wird hauptsächlich von dem Drehmoment eingebracht. Die mechanischen Belastungen wirken vorwiegend im Bereich der Werkzeugspitze und des vorderen Werkzeugkonus, während der zylindrische Teil dabei die schon ausgebildete Bohrungswand unterstützt. Die Reibung bleibt in dem Bereich gering und die Reibungswärme lässt sich aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Materials aus der Kontaktzone ableiten.

Beim Erreichen der Bohrtiefe können die mechanischen Werkzeugbelastungen nochmal steigen, weil das entgegen der Vorschubrichtung fließende Material von dem Werkzeugkragen umgeformt wird. Das entgegen der Vorschubrichtung verdrängte Material wurde von dem Werkzeugkragen umgeformt und es ergibt sich daher eine geringe Zunahme der mechanischen Größen. Der Anstieg dieser Größen wird daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da es den eigentlichen Fließbohrprozess nicht repräsentiert. Beim Rückzug des Werkzeugs fallen die beiden Größen wieder schnell ab.

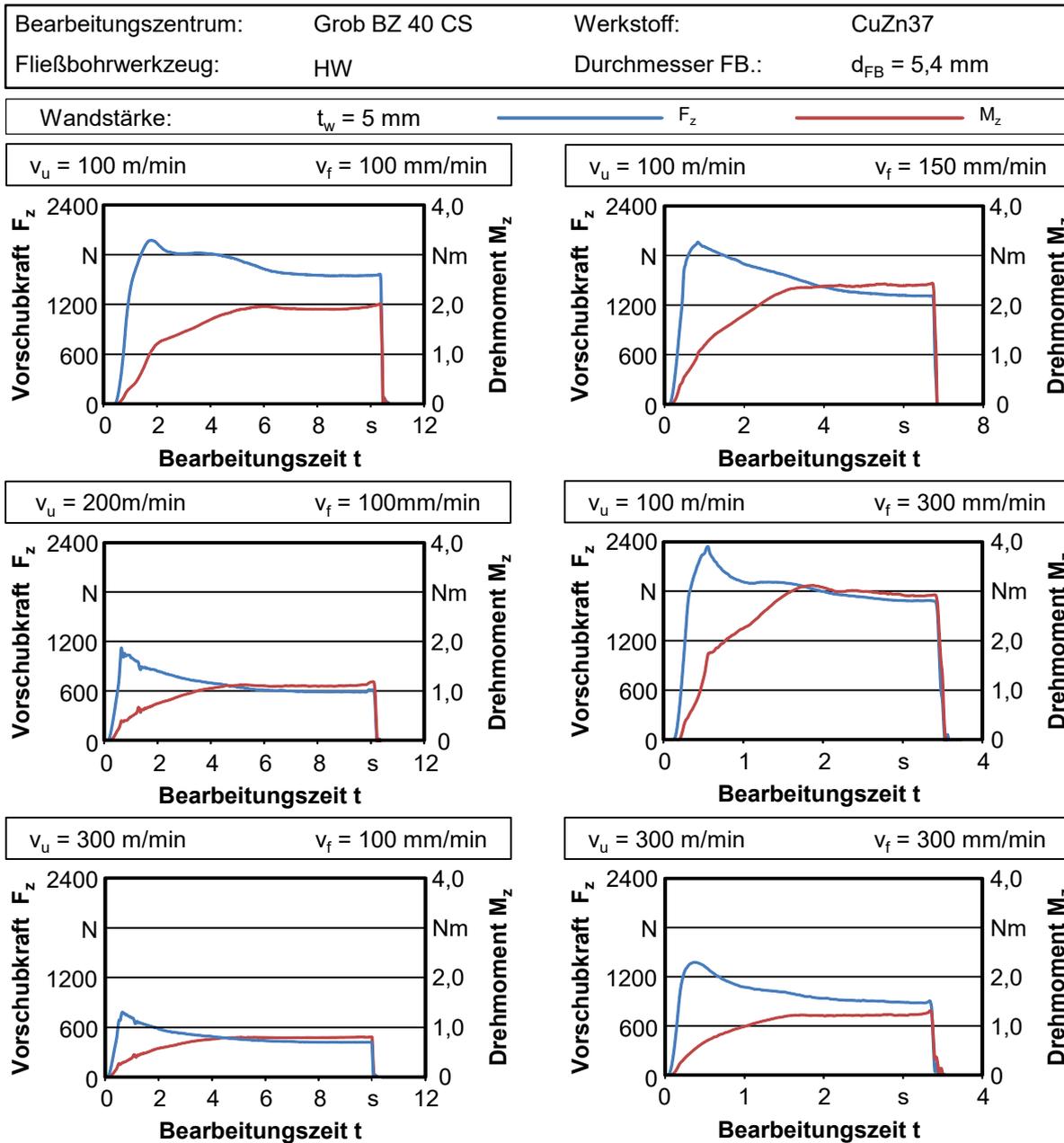


Abbildung 6-14: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung CW508L

Abbildung 6-15 stellt den Einfluss der Parameterkombinationen auf die maximalen Werkzeugbelastungen in Abhängigkeit von den Umfangsgeschwindigkeiten und den Vorschubgeschwindigkeiten bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$ dar. Die Mittelwerte wurden aus drei Messungen ermittelt und die Höhe der Streubreite in diesem Diagramm zeigt den minimalen bzw. den maximalen Wert der jeweiligen Parameterkombination.

Bei der untersuchten Wandstärke nehmen die Vorschubkraft und das Drehmoment tendenziell mit einer steigenden Umfangsgeschwindigkeit ab, während eine höhere Vorschubgeschwindigkeit zu einer Zunahme der beiden Größen führt. Bei einer hohen Umfangsgeschwindigkeit werden auch höhere Temperaturen zwischen dem Werkzeug und dem Material erzeugt, was die Festigkeit des Materials weiter herabsetzt. Daher ist eine geringere mechanische Werkzeugbelastung das Resultat. Eine erhöhte Vorschubgeschwindigkeit hingegen verkürzt die Prozessdauer und führt dazu, dass weniger Reibungs-

energie eingebracht wird. Das Aufweiten der Bohrungswand impliziert daher eine höhere mechanische Werkzeugbelastung.

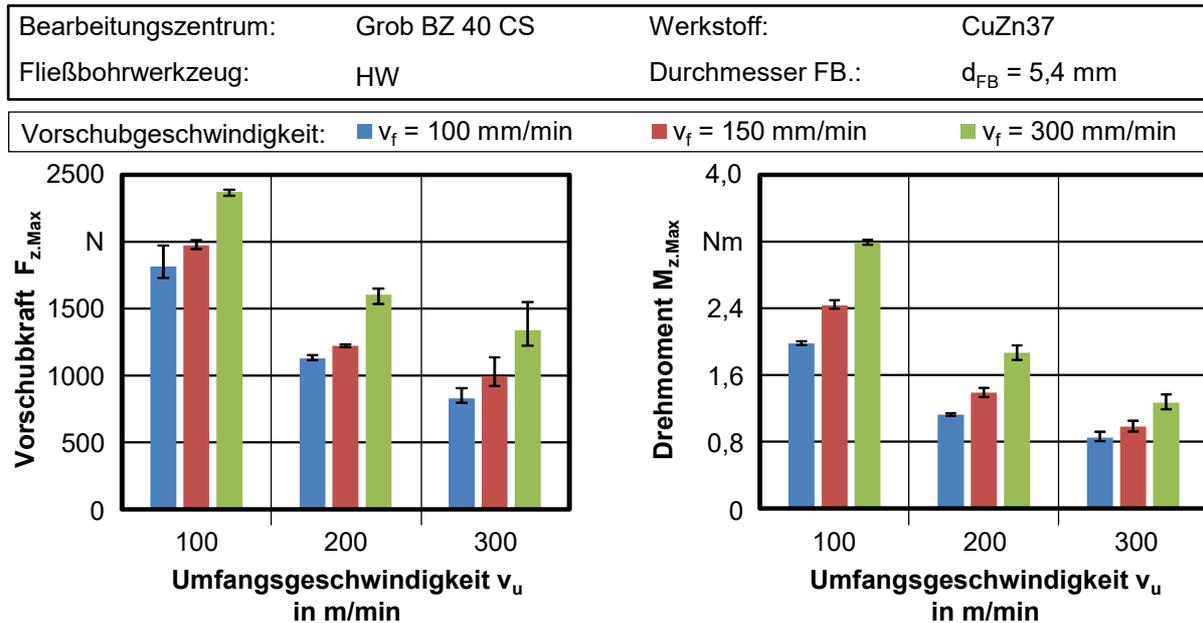


Abbildung 6-15: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$

6.2.2 Thermische Werkzeugbelastungen

Die Bestimmung der Temperatur der Bohrungswand ermöglicht es, das Fließbohren dieses Werkstoffes hinsichtlich der thermischen Werkzeugbelastung zu analysieren. In **Abbildung 6-16** sind die Wärmebilder mit der Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$ in Abhängigkeit der Bohrtiefe dargestellt. Zwischen zwei Wärmebildern beträgt der Abstand $\Delta a = 2 \text{ mm}$. In der Abbildung sind für die Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ und $v_f = 300 \text{ mm/min}$ die gesamten Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 100 \text{ m/min}$ bis $v_u = 300 \text{ m/min}$ dargestellt. Bei einer Bohrtiefe von $t_B = 8 \text{ mm}$ tritt der konisch-zylindrische Übergangsbereich des Werkzeugs in das Material ein. Der Prozess hört bei der Bohrtiefe von $t_B = 16 \text{ mm}$ auf. Da nur die Temperaturfelder der Bohrungswand bestimmbar sind, ist auch hier darauf zu achten, dass die tatsächlichen Temperaturen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff noch höher sein können.

Die Erhöhung der Umfangs- und der Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer höheren thermischen Werkzeugbelastung. Die Temperaturen steigen mit einer Zunahme der beiden Größen. Während die maximale Temperatur der Bohrungswand bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 100 \text{ m/min}$ und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ am Ende des Prozesses $T_{Max} = 577 \text{ °C}$ beträgt, erhöht sich dieser Wert bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 300 \text{ m/min}$ auf $T_{Max} = 713 \text{ °C}$ bei einer unveränderten Vorschubgeschwindigkeit. Bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200 \text{ mm/min}$ lässt sich diese Tendenz anhand der Wärmebilder bestätigen.

Bleibt die Umfangsgeschwindigkeit unverändert, nimmt die maximale Temperatur auch mit einer zunehmenden Vorschubgeschwindigkeit zu. Bei der Parameterkombination von $v_u = 100 \text{ m/min}$ und $v_f = 300 \text{ mm/min}$ wird eine maximale Temperatur von $T_{Max} = 613 \text{ °C}$ erreicht.

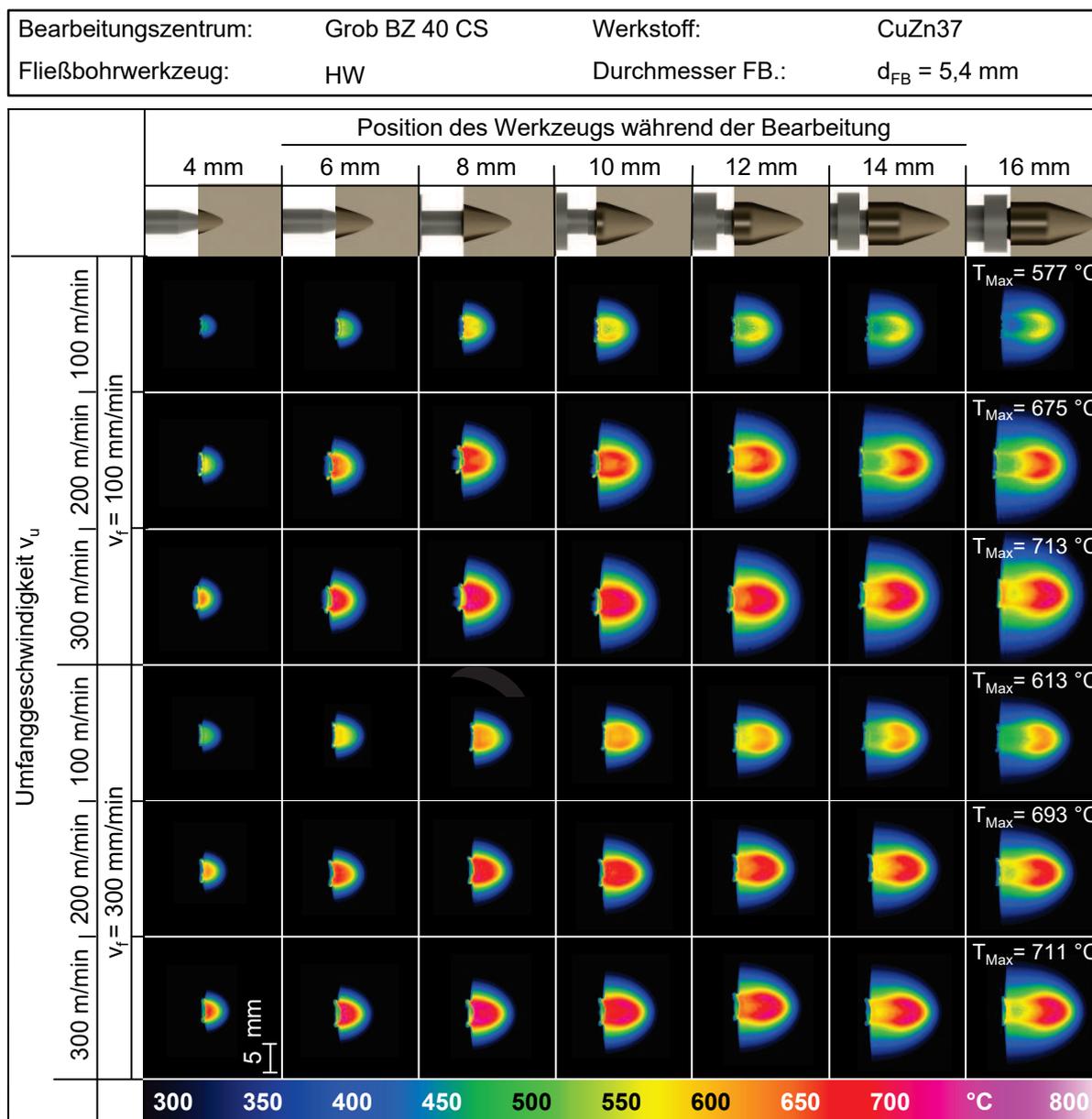


Abbildung 6-16: Temperatur in Abhängigkeit der Bohrtiefe bei einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$

Es lässt sich erkennen, dass die höchsten Temperaturen beim Eindringen des konisch-zylindrischen Übergangsbereichs des Werkzeugs erreicht werden. Mit einer zunehmenden Bohrtiefe bewegt sich auch der Bereich der Bohrungswand, welcher die hohen Temperaturen aufweist, in Vorschubrichtung. Dies ist ein Hinweis dafür, dass sich der Fließbohrprozess ab diesem Punkt quasi statisch weiter entwickelt und sich entsprechend eine Umformzone um den Übergangsbereich des Werkzeugs bildet. Im Bereich des Werkzeugzylinders lassen sich niedrige Temperaturen aufgrund der geringen Reibung zwischen der ausgeformten Bohrungswand und dem Werkzeug feststellen.

6.2.3 Durchmesser- und Rundheitsabweichungen

Die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen der zylindrischen Bohrungen wurden mit Mithilfe der taktilen Messungen bewertet. Dabei wurden drei Bohrungen der jeweiligen Parameterkombinationen zur Messung herangezogen. Drei verschiedene Bohrungstiefen

wurden ausgewählt, deren Abstand zur Bohrungsoberfläche $z_1 = -2,5$ mm und $z_2 = -5,0$ mm sowie $z_3 = -7,5$ mm betragen. **Abbildung 6-17** stellt die Durchmesserabweichungen der Bohrungen in Bezug auf die Bearbeitungsparameter und die Messebene bei dem eingesetzten Werkzeug mit Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm dar. Die Säulen repräsentieren die arithmetischen Mittelwerte aus drei Messungen und die Fehlerbalken die jeweilige Minimal- und Maximalwerte. Die Durchmesserabweichungen zeigen, dass die erzeugte Bohrungswand über einen konischen Verlauf verfügt. Am Werkzeugeintritt weisen die Bohrungen vorwiegend Übermaß und am Bohrungsgrund eine Verjüngung auf. Insbesondere bei der tiefsten Messebene $z_3 = -7,5$ mm ist dieses Untermaß zu erkennen.

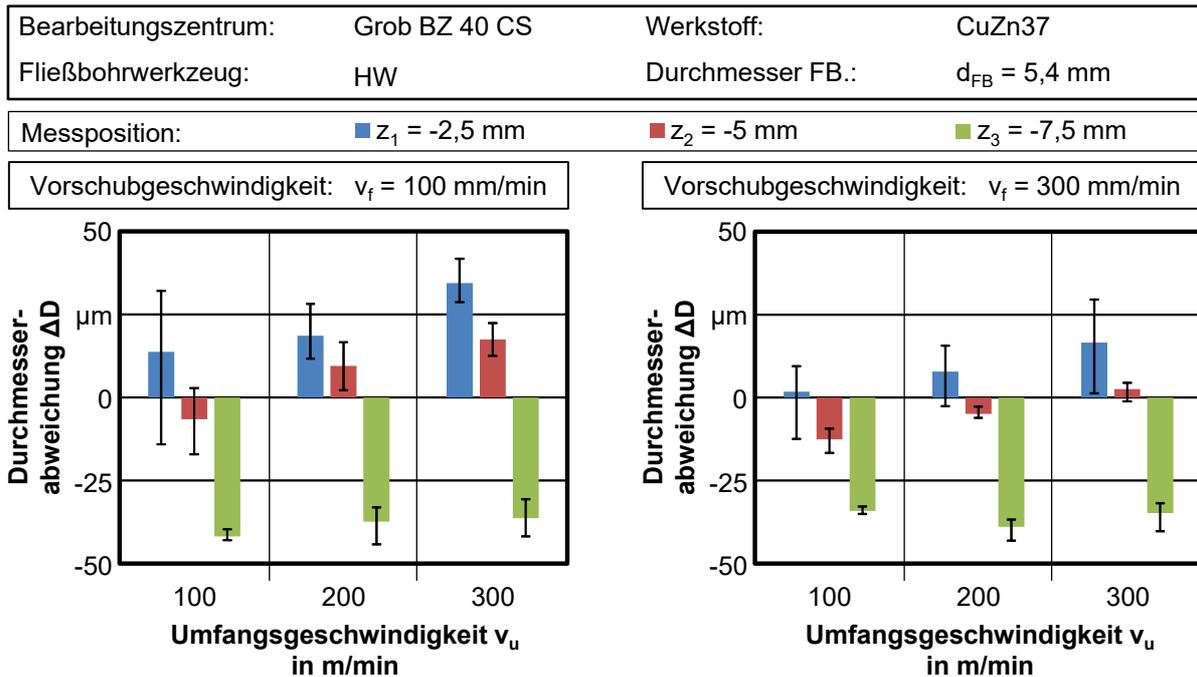


Abbildung 6-17: Durchmesserabweichungen der Fließbohrungen in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Die Verjüngung der Bohrung tritt an der Stelle auf, wo sich der Übergangsbereich des Werkzeugs am Prozessende im Material befindet. Es ist auch die Stelle, die zuletzt am stärksten erwärmt ist. Unmittelbar vor dem Prozessende drückt das Werkzeug fest an das Material und der Durchmesser des Werkzeugs wurde zwangsläufig angenommen. Nach dem Rückzug des Werkzeugs, fängt die in größerer Bohrtiefe liegende Bohrungswand zuletzt an abzukühlen. Aufgrund dessen federt sich der tiefer in der Bohrung liegende Werkstoff mehr als der in der schon geformten Bohrungswand zurück.

Abbildung 6-18 zeigt die Rundheitsabweichungen der bearbeiteten Bohrungen. Die Bohrungen weichen von einer idealen Form ab. Bei der niedrigen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min lässt sich keine Tendenz aufgrund der großen Streuung der Messwerte erkennen. Bei der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 300$ mm/min zeigen die Messungen, dass die Rundheit mit zunehmender Bohrtiefe abfällt.

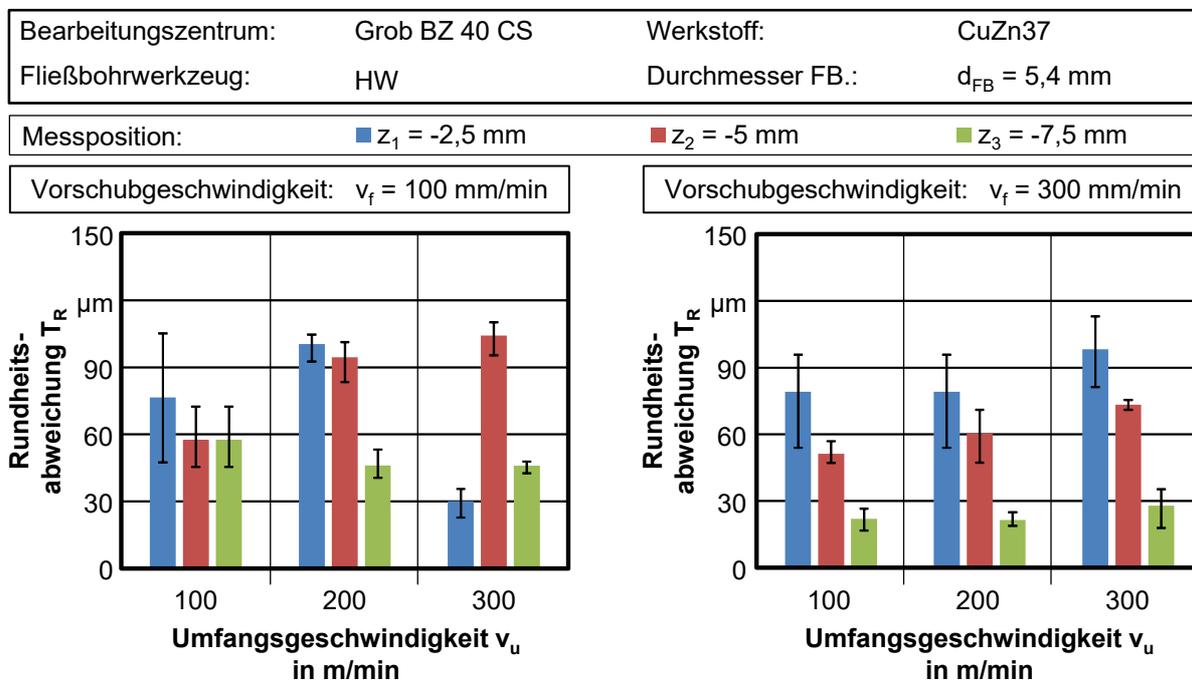


Abbildung 6-18: Rundheitsabweichungen der Fließbohrungen in Abhängigkeit der Versuchsparameter

6.2.4 Längsschnitte der Bohrung und Gewinde

Beim Fließbohren des Messings lässt sich ebenfalls eine ausgeschlossene Bohrungswand erzeugen. Der Einfluss der Parameter auf die Bohrungsqualität, insbesondere die zylindrische Bohrungswand lässt sich nicht eindeutig feststellen. In **Abbildung 6-19** sind die Längsschnitte der Bohrungen sowie der Gewinde in Abhängigkeit von der Parameterkombination dargestellt. Bei den untersuchten Parametern weist die Bohrungswand eine glatte Oberfläche auf. Keine Materialanhaftung ist bei der zylindrischen Bohrungswand zu erkennen. Die Gewinde, obwohl deren Vorbohrung mit verschiedenen Parametern bearbeitet wurde, verfügen über ein ähnliches Gewindeprofil.

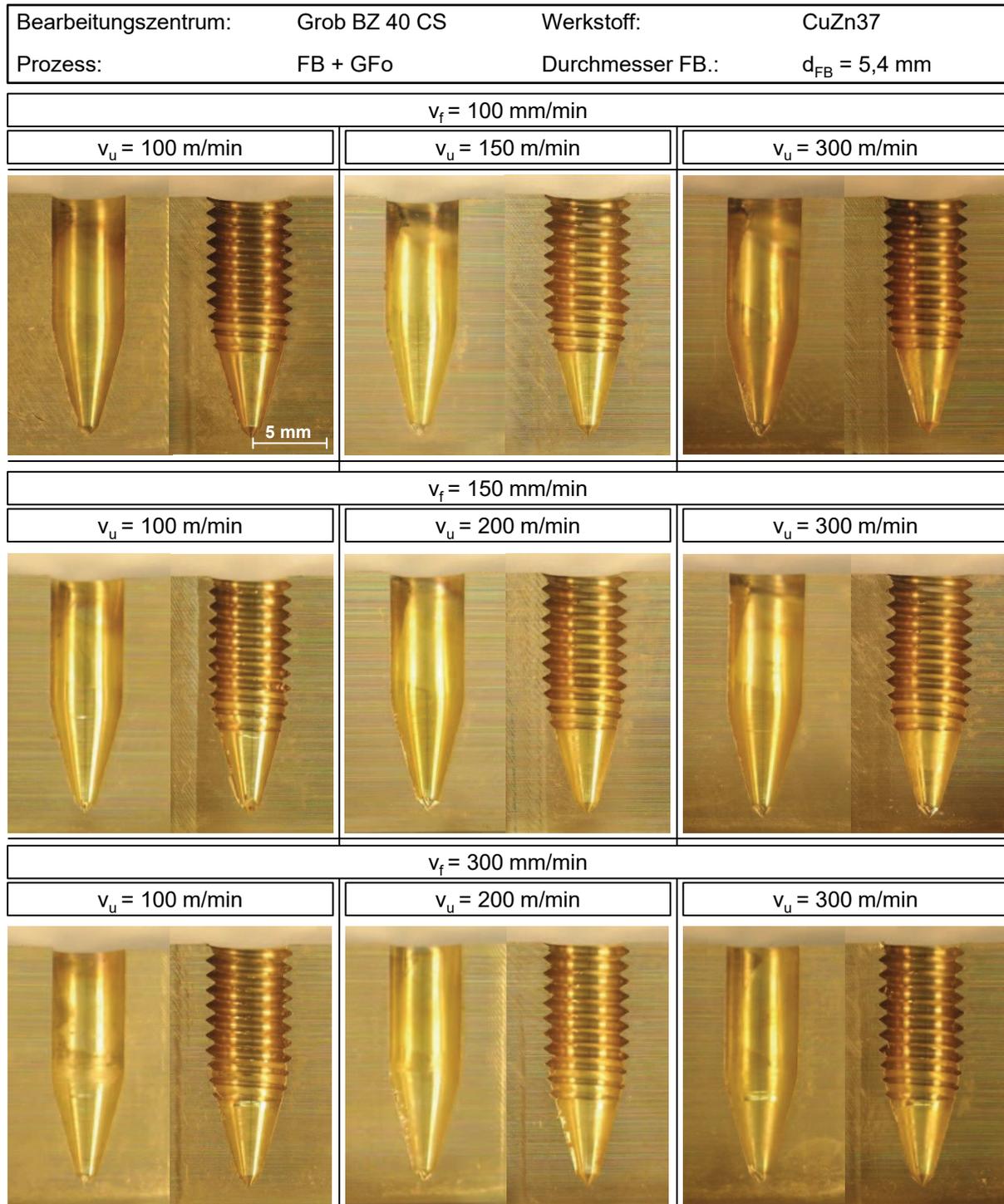


Abbildung 6-19: : Längsschnitte der Fließbohrungen bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm

6.2.5 Metallografische Untersuchungen der Bohrungsrandzone

Beim Fließbohren der Messinglegierung ergibt sich eine große thermomechanische Belastung und diese führt zu Veränderungen der Mikrostruktur der Bohrungsrandzone. Die Umformung der Bohrungswand verändert auch die Materialverteilung innerhalb der Bohrung. Mit Hilfe einer farbigen Ätzung nach Klemm II wird diese sichtbar. **Abbildung 6-20** zeigt die Gefügestruktur eines Querschliffes einer Fließbohrung, die mit der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 100$ m/min und der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150$ mm/min bearbeitet

wurde. Der Abstand von dem Querschliff zur Stirnseite des Profils beträgt $a = 9$ mm. Das Profil verfügt über eine Wandstärke von $t_w = 5$ mm und wurde mit einem Werkzeug mit einem Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm bearbeitet.

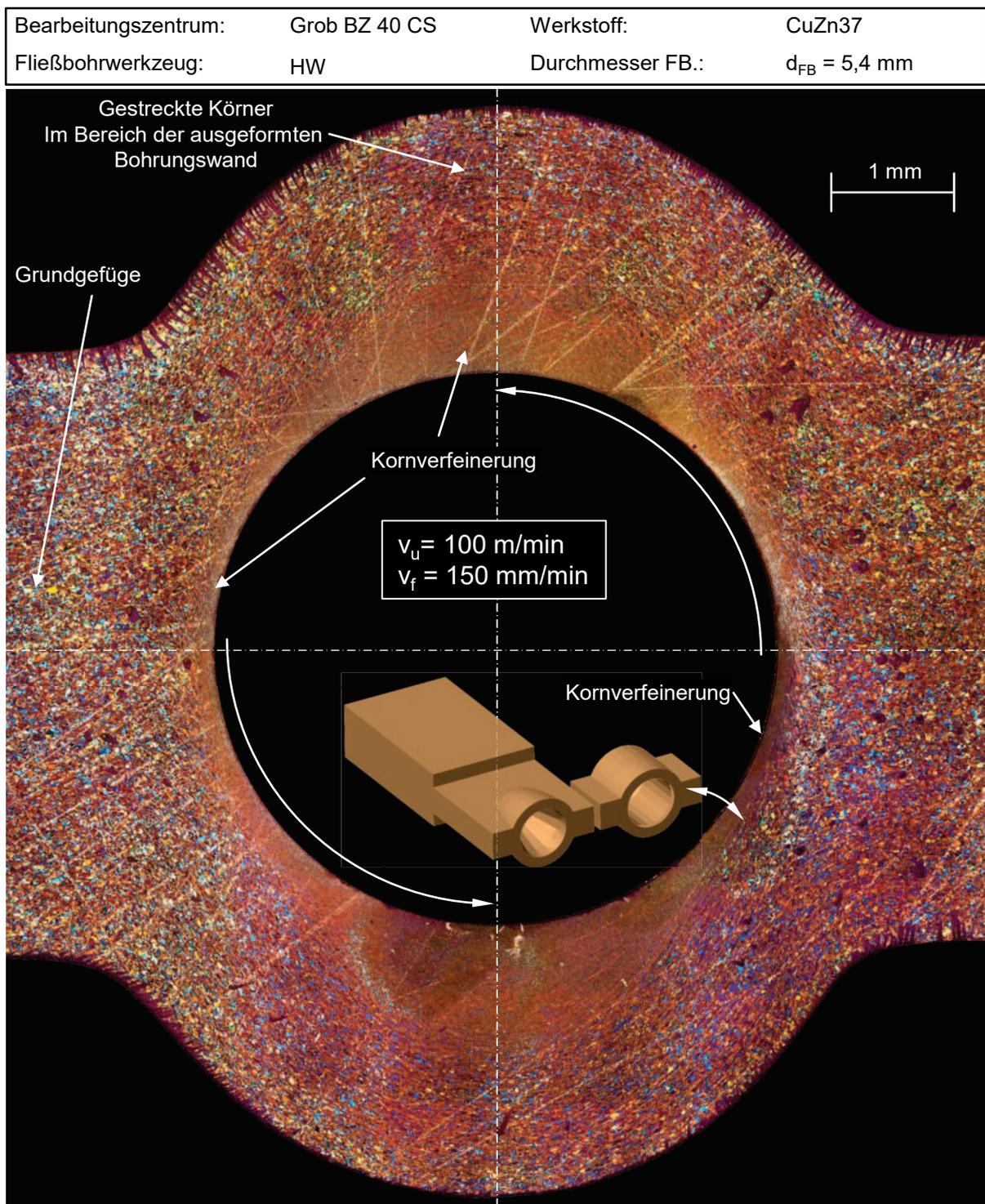


Abbildung 6-20: Gefügestruktur eines Querschliffes einer Fließbohrung

Das Gefüge des Querschliffes zeigt, dass eine Veränderung des Grundgefüges durch die Umformung zu erkennen ist. Um die Mittellinie des Profils bildet sich eine symmetrische Gefügestruktur aus. Die Bereiche der Außenbohrungswand sowie des Profils lassen sich anhand der Umformung der Körner unterscheiden. Im Bereich der Außenbohrungswand ist

die Mikrostruktur am stärksten verändert. Während das Gefüge in der Bohrungswand vor allem durch die Umformung ausgedehnt wird und eine gestreckte Struktur aufweist, ist die neue feine Gefügeausbildung in der Randzone der gesamten Bohrungswand zu erkennen. Die Drehrichtung des Werkzeugs kann anhand der Streckung der Körner bestimmt werden. In dem dargestellten Versuch ist diese gegen den Uhrzeigersinn gerichtet. Im Bereich des Profils ist eine Kornverfeinerung nur in einem sehr geringen Abstand zur Bohrungswand festzustellen. Das Gefüge im Profilbereich unterscheidet sich daher nur in geringem Umfang von dem ursprünglichen Gefüge, da sich das Material des Profils in diesem Bereich kaum vom Werkzeug in radiale Richtung verdrängen lässt.

Die Variation der Parameter beim Fließbohren führt vor allem zu einer Beeinflussung des Gefüges im Außenbereich der Bohrungswand. **Abbildung 6-21** und **Abbildung 6-22** stellen die Ausschnitte der Gefügestruktur der Bohrungsquerschnitte der eingesetzten Parameterkombination dar. Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit scheint keinen deutlichen Einfluss auf die Veränderung des Gefüges zu haben. Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit hingegen führt dazu, dass eine Rekristallisation in der Bohrungsrandzone auftritt.

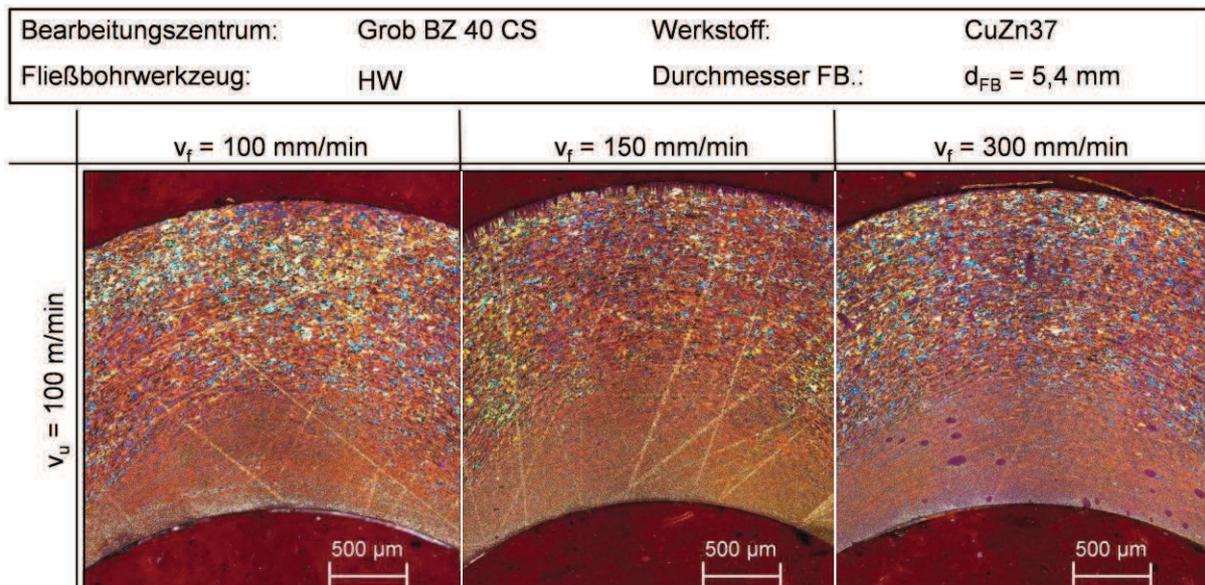


Abbildung 6-21: Mikrostrukturänderung im Bereich der ausgeformten Bohrungswand bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 100 \text{ m/min}$

Wie die lokalen Vergrößerungen in der Abbildung 6-22 zeigen, weisen die rekristallisierten Körner in der Randzone der Bohrungswand, die mit der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 300 \text{ m/min}$ bearbeitet worden sind, keine Richtungsabhängigkeit auf, obwohl diese Stelle am Ende des Prozesses von dem Werkzeug bearbeitet wurde. Es ist ein Zeichen dafür, dass sehr hohe Temperaturen bei der maximalen Umfangsgeschwindigkeit im Bereich der Kontaktzone zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff auftreten. Diese Rekristallisation tritt aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes nur in einem sehr engen Bereich der Bohrungswand auf.

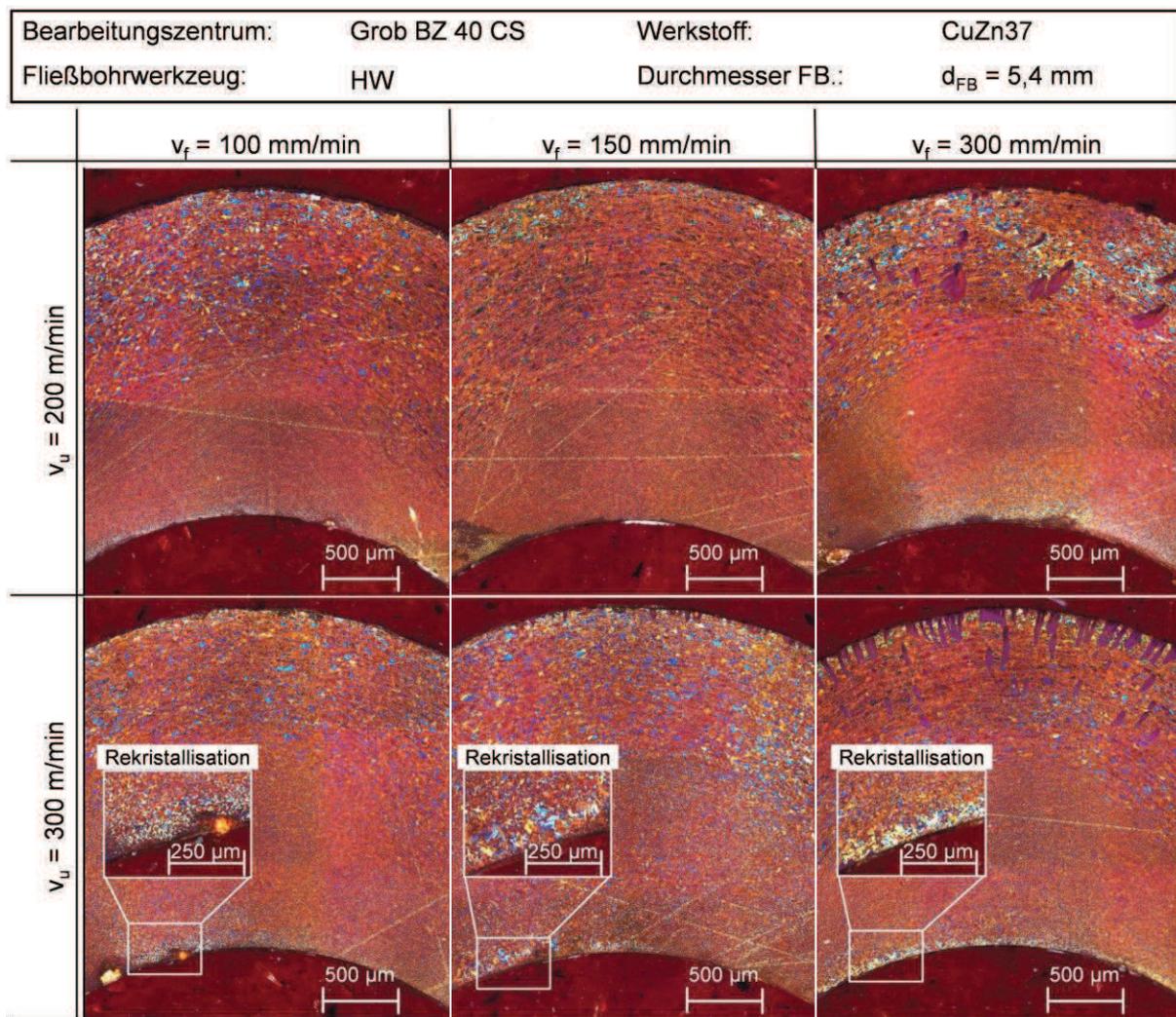


Abbildung 6-22: Mikrostrukturänderung im Bereich der ausgeformten Bohrungswand bei den Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 200 \dots 300 \text{ m/min}$

Mit einer Bestimmung der Mikrohärtigkeit im Bereich der Bohrungswand lässt sich eine Veränderung der Materialeigenschaften feststellen. Wie die Gefüge im Bohrungsquerschnitt zeigen, ändert sich die Gefügestruktur in der ausgeformten Bohrungswand deutlich. Die hohen Temperaturen führen aber dazu, dass die Kristallerholung schon während der Bearbeitung in der Bohrung stattfindet, obwohl die Fließbohrbearbeitung nur einige Sekunden dauerte. Bei der Kristallerholung erreichen sowohl die physikalischen als auch die mechanischen Eigenschaften das Niveau vor Verformung [3].

In **Abbildung 6-23** sind die Mikrohärtigkeitsverläufe im Bereich der Bohrungswand in Bezug auf das Gefüge sowie den Bohrungsquerschnitt am Beispiel einer Bohrung dargestellt. Es handelt sich um die Mikrohärtigkeit nach Vickers HV 0,01. Die Bohrung wurde mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 300 \text{ m/min}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150 \text{ mm/min}$ bearbeitet. Der Abstand zwischen zwei Eindrücken sowie zwei Messreihen beträgt jeweils $a = 50 \mu\text{m}$. Drei Messreihen mit jeweiligen 44 Messungen wurden ab der Randzone der Bohrungswand bis zum Rand der ausgeformten Bohrungswand durchgeführt. Aufgrund der Kristallerholung lässt sich praktisch kein Unterschied zwischen den verschiedenen Gefügestrukturen feststellen. Es ergibt sich eine durchschnittliche Härte in dem

Bereich von $H_m = 128 \text{ HV}_{0,01}$. Im Profilbereich wurde die Grundhärte des Werkstoffes ermittelt. Aus 10 einzelnen Messungen ergibt sich die Grundhärte des Werkstoffes $H_{m,G} = 126 \text{ HV}_{0,01}$. Die grundlegenden Materialeigenschaften bleiben nach dem Fließbohren praktisch unverändert.

Bearbeitungszentrum:	Grob BZ 40 CS	Werkstoff:	CuZn37
Fließbohrwerkzeug:	HW	Durchmesser FB.:	$d_{FB} = 5,4 \text{ mm}$
Umfangsgeschwindigkeit:	$v_u = 300 \text{ m/min}$	Wandstärke:	$t_W = 5 \text{ mm}$
Vorschubgeschwindigkeit:	$v_f = 150 \text{ mm/min}$	KSS-Konzept:	trocken

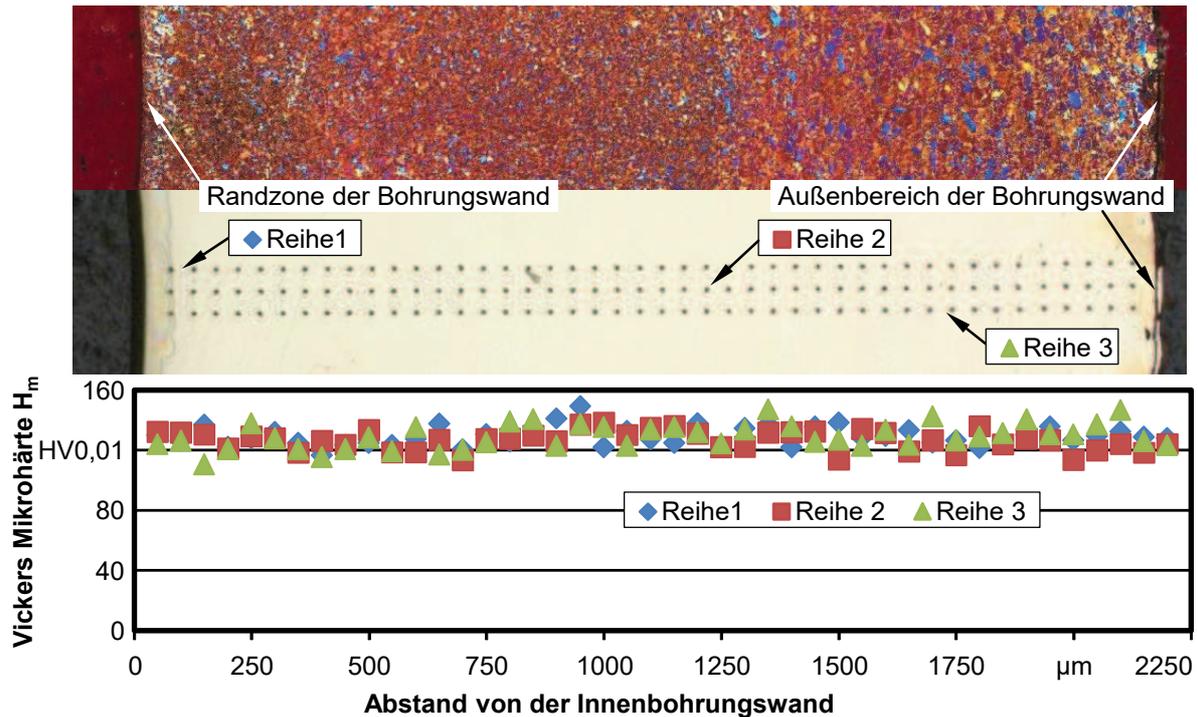


Abbildung 6-23: Mikrohärte nach Vickers einer Fließbohrung in der Bohrungswand

6.2.6 Auszugsfestigkeit der Gewinde

Die Tragfähigkeit der Gewinde wurde mithilfe axialer Zugversuche untersucht. Beim Gewindeformen wurde eine nutzbare Gewindetiefe von $t_{Ge} = 9 \text{ mm}$ erzeugt. M6-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 kamen als Prüfdorn zum Einsatz. Die Schraube wurde vor dem Versuch manuell bis zum Gewindegrund geschraubt. Bei jeder Parameterkombination wurden drei Gewinde geprüft und die maximale Auszugskraft ermittelt. Aus den Messungen lassen sich arithmetische Mittelwerte bilden, welche in **Abbildung 6-24** dargestellt sind. Die Gewinde verfügen über eine hohe und von den Bearbeitungsparametern unabhängige Festigkeit. Während der Prüfung versagte immer die Prüfschrauben. Die maximale Auszugskraft liegt bei $F_{A,Max} = 24,8 \text{ kN}$, was der Mindestbruchkräfte der eingesetzten Schraube entspricht [30]. Die abgebrochenen Schrauben lassen sich manuell ohne zusätzlichen Kraftaufwand aus dem Gewinde herausschrauben. Dies ist ein Zeichen dafür, dass das Gewinde nach dem Auszugsversuch keine Deformation des Gewindeprofils aufweist.

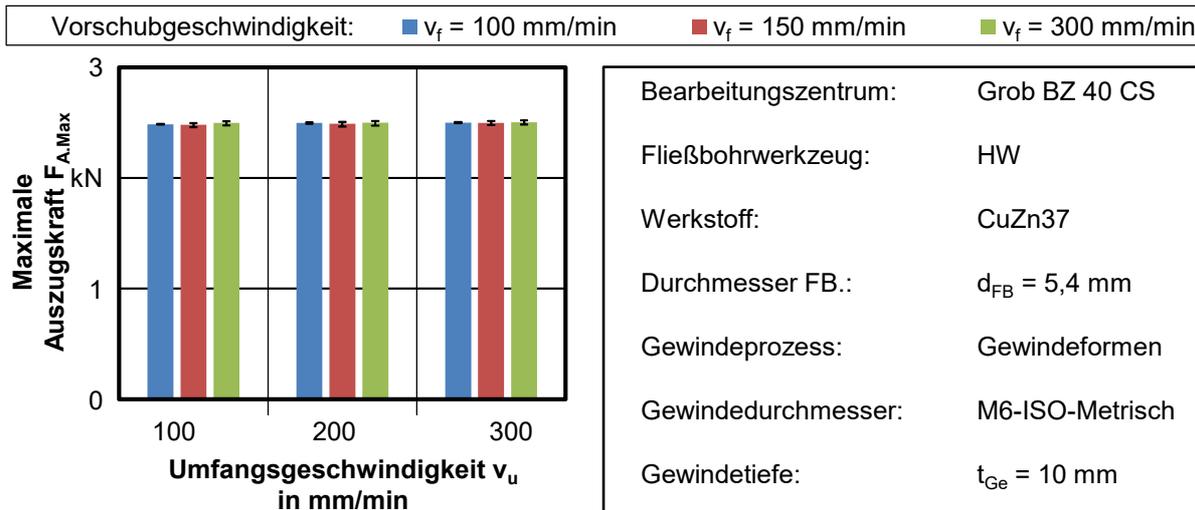


Abbildung 6-24: Auszugsfestigkeit der Gewinde aus CuZn37 bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm

6.3 Machbarkeitsuntersuchung von AlSi7Mg

Die Fließbohrversuche der Aluminiumgusslegierung wurden zuerst bei Raumtemperatur durchgeführt. Frästechnisch vorbereitete Flachprofile aus dem Werkstoff AlSi7Mg mit einer Wandstärke von $t_w = 5,75$ mm kamen dabei zum Einsatz. Der Durchmesser des Werkzeugs betrug $D_N = 5,4$ mm. Eine Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 390$ m/min und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min wurden als Parameter ausgewählt. **Abbildung 6-25** zeigt die erfolgreich bearbeitete Bohrung sowie das durch nachfolgendes Gewindeformen eingebrachte M6-Gewinde.

Bearbeitungszentrum:	Grob BZ 40 CS	Werkstoff:	AlSi7Mg
Fließbohrwerkzeug:	HW	Durchmesser FB.:	$d_{FB} = 5,4$ mm
Umfangsgeschw.:	$v_u = 390$ m/min	Wandstärke:	$t_w = 5,75$ mm
Vorschubgeschw.:	$v_f = 100$ mm/min	KSS-Konzept:	trocken

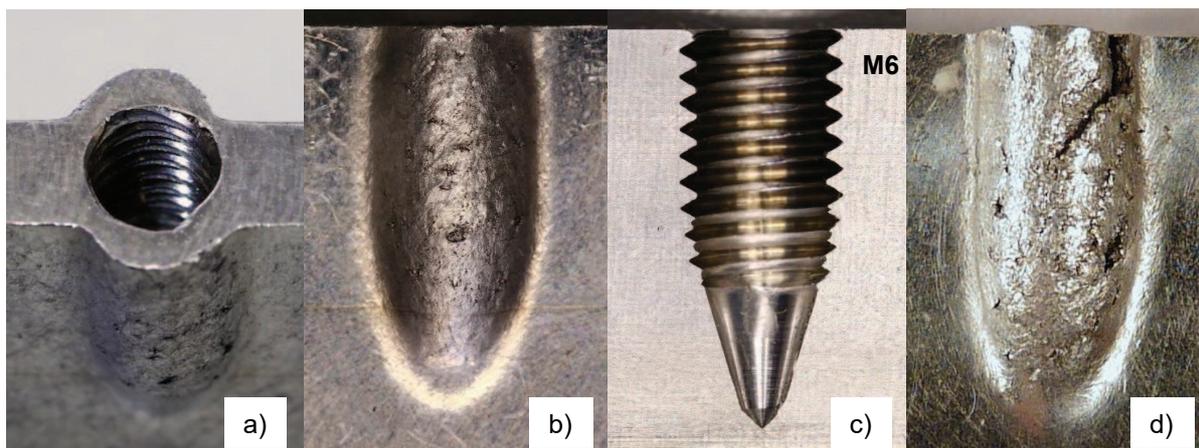


Abbildung 6-25: Fließbohren der Aluminiumgusslegierung AlSi7Mg bei Raumtemperatur

Solange sich eine geschlossene Bohrungswand bildet, lässt sich ein Gewinde problemlos einbringen. Abbildung 6-25 d) zeigt aber auch, dass beim stirnseitigen Fließbohren keine prozesssicheren Ergebnisse erzielt werden können. Die in der Abbildung gezeigte Bohrungswand weist Risse auf. Solche Bohrungen lassen sich nicht für eine anschließende

Gewindebearbeitung nutzen. Beim Fließbohren der Gusslegierung wurde zwar viel Reibungswärme eingebracht, welche aber nicht ausreichend ist, um eine geschlossene Bohrungswand prozesssicher ausformen zu können.

6.3.1 Fließbohren mit werkstückseitiger Vorerwärmung

Um das Verformungsvermögen des Aluminiumgusswerkstoffes zu verbessern, wurde eine werkstückseitige Erwärmung vor dem Fließbohren eingesetzt. Eine erhitzbare Vorrichtung aus Kupfer wurde konstruiert, um Profile aus Aluminiumguss vor dem Prozess zu erwärmen. Eine Heizpatrone mit einer maximalen Leistung von $P = 250 \text{ W}$ kam zum Einsatz. Diese lässt sich durch eine Bohrung in der Vorrichtung montieren und liefert die nötige Wärme. In **Abbildung 6-26** stellt den Heizkörper a), den Versuchsaufbau b), eine Detailansicht der Werkstückspannung c) und das Temperaturfeld d) dar. Die experimentellen Untersuchungen wurden an der Versuchsmaschine Grob BZ 40 CS durchgeführt.

Zwei Teflonplatten mit einer Wandstärke von $t_w = 5 \text{ mm}$ wurden zwischen der Vorrichtung und dem Schraubstock gelegt, um den Wärmeverlust zu verringern. Aufgrund der Wärmebeständigkeit sowie der geringen Leistung der Heizpatrone kann eine maximale Temperatur von $T = 225^\circ\text{C}$ am Regler eingestellt werden. Das Aluminiumprofil lässt sich in der Vorrichtung festspannen. Vier Bohrungen konnten bei einer Einspannung bearbeitet werden. Die Bestimmung der mechanischen Werkzeugbelastung erfolgt werkzeugseitig durch das Rotationsdynamometer vom Typ Kistler 9125A11.

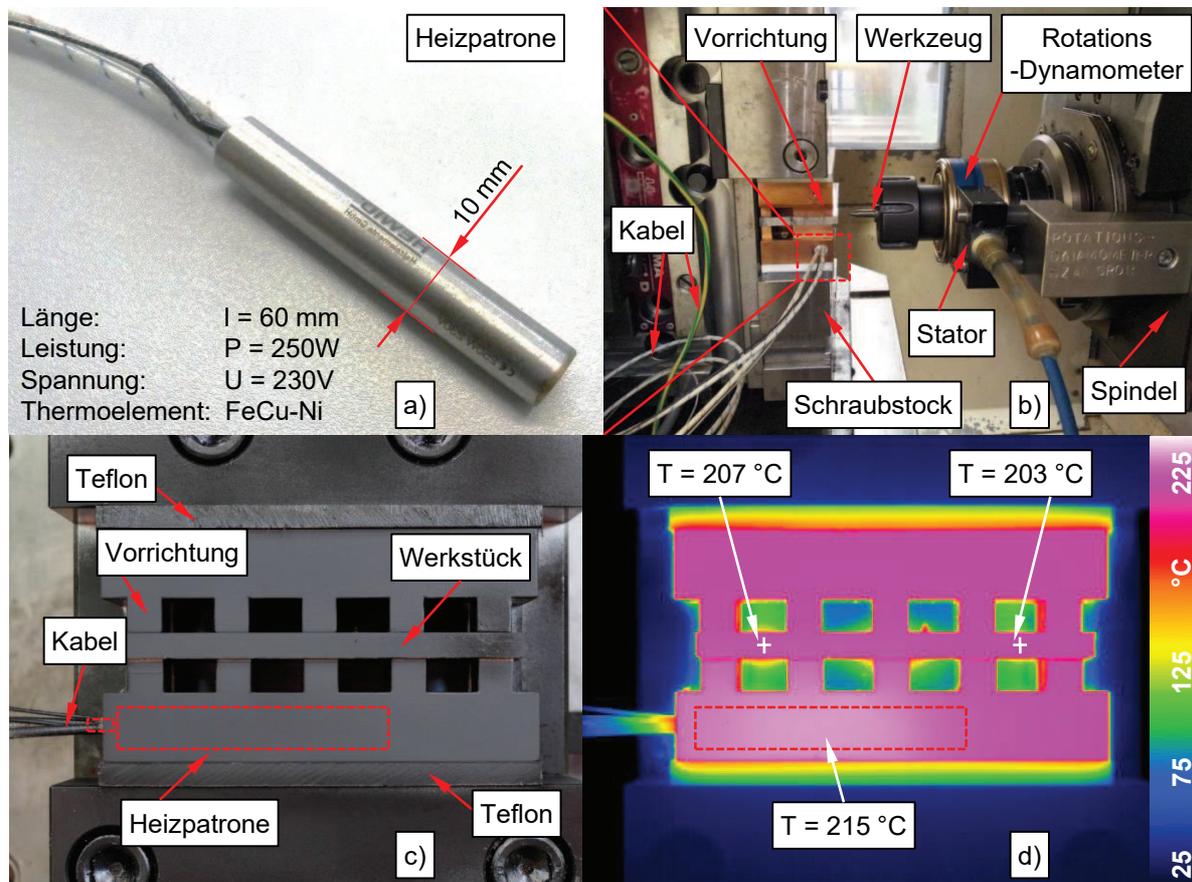


Abbildung 6-26: Werkstückseitige Erwärmung beim Fließbohren der Aluminiumgusslegierung AlSi7Mg

Vor dem Fließbohren wurde das eingespannte Profil bis auf die eingestellte Temperatur erwärmt. Nach ca. 10 Minuten wurde die gewählte Temperatur erreicht. Es lässt sich aus dem Temperaturfeld, welches mit einer Wärmebildkamera aufgenommen wurde, erkennen, dass ein konstantes Temperaturfeld vorhanden ist. Aufgrund des Wärmeverlusts ist die erreichbare Temperatur jedoch geringfügig niedriger als die eingestellte Temperatur. Die Versuche wurde mit einer Kombination aus einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 390$ m/min und drei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 50 \dots 150$ mm/min in Schritten von $\Delta v_f = 50$ mm/min durchgeführt. Insgesamt acht Bohrungen wurden bei jeder Parameterkombination bearbeitet. Die eingesetzten Werkzeuge haben einen Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm. Beim Fließbohren wurde komplett auf einen KSS-Einsatz verzichtet. Die Untersuchung konzentriert sich auf das Fließbohren des Aluminiumgusswerkstoffs. Nach dem Fließbohren wurde daher kein Gewinde erzeugt. Im Folgenden werden die Erkenntnisse dargestellt.

6.3.2 Mechanische Werkzeugbelastungen

Die Versuche zeigen, dass sich reproduzierbare Ergebnisse mithilfe der Vorrichtung erzielen lassen. **Abbildung 6-27** zeigt die erfassten Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren. Die Raumtemperatur während der Versuche betrug $T_{\text{Raum}} = 25$ °C.

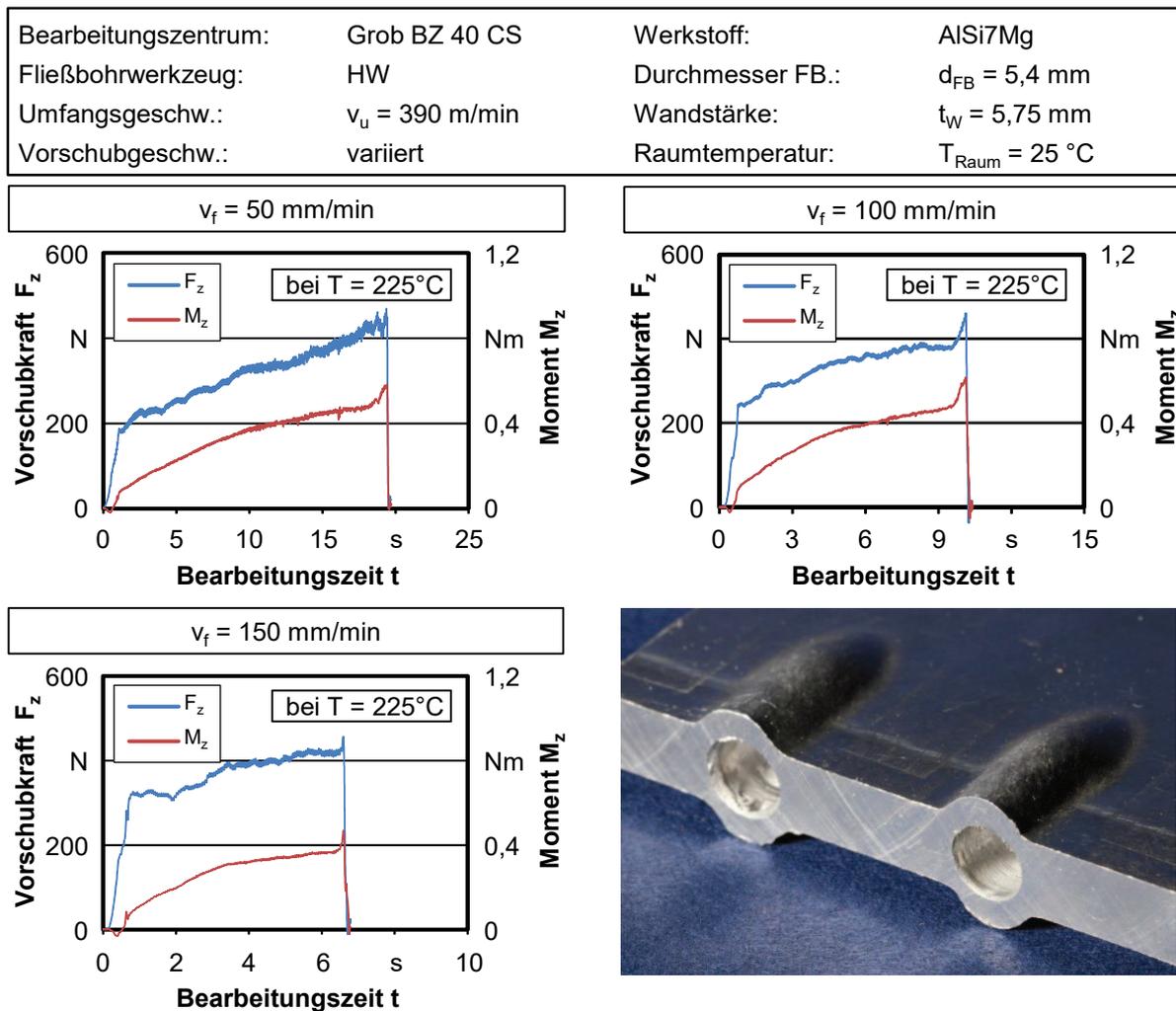


Abbildung 6-27: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Aluminiumgusslegierung AlSi7Mg

Bei der Variation der Vorschubgeschwindigkeit ergeben sich ähnliche Verläufe. Die Vorschubkraft erhöht sich am Anfang des Prozesses. Nachdem die Werkzeugspitze in das Material eingedrungen ist, verlangsamt sich die Erhöhung und die Kraft steigt beinahe linear mit der Bohrtiefe weiter an. Dies ist auch ein Zeichen dafür, dass die Materialfestigkeit sehr früh nachgibt, bevor der konische Werkzeugteil im Eingriff ist. Am Ende des Prozesses ergibt sich noch eine geringe Zunahme der Vorschubkraft, da das entgegen der Vorschubrichtung fließende Material von dem Werkzeugkragen bearbeitet wurde. Die Drehmomentverläufe spiegeln quasi die Werkzeuggestalt wider. Analog zur Vorschubkraft tritt am Ende des Prozesses auch eine geringe Zunahme des Drehmoments auf, da sich das Drehmoment durch die Reibung zwischen dem Werkzeugkragen und dem Material leicht vergrößert.

Die Verläufe der mechanischen Werkzeugbelastung zeigen, dass die Variation der Vorschubgeschwindigkeit den Prozess kaum beeinflusst. Beim Fließbohren des Aluminiumgusswerkstoffs ergeben sich geringe mechanische Werkzeugbelastungen. **Abbildung 6-28** stellt die Mittelwerte der Vorschubkraft und des Drehmoments dar. Die Werte wurden aus vier Messungen ermittelt. Aufgrund der Streubreite lässt sich kein eindeutiger Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die mechanische Belastung erkennen. Sowohl die Vorschubkräfte als auch die Drehmomente befinden sich auf demselben Niveau.

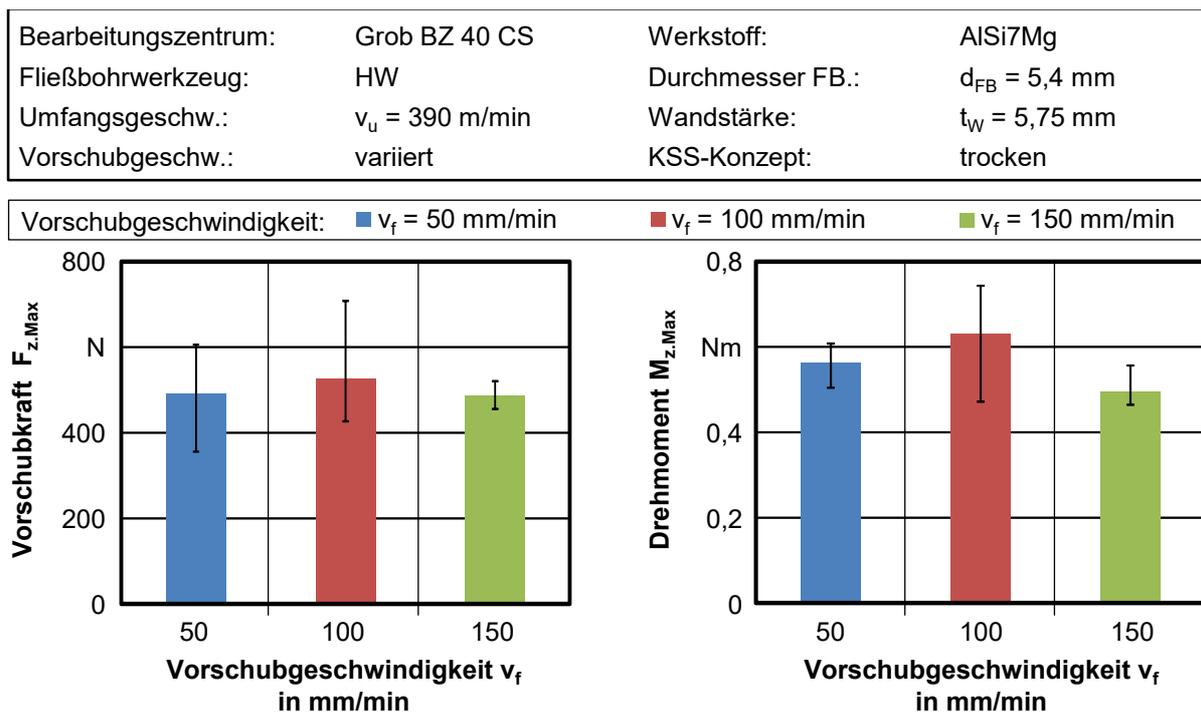


Abbildung 6-28: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$

6.3.3 Durchmesser- und Rundheitsabweichungen

Die Fließbohrungen wurden hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften taktil vermessen, um die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen vom Nenndurchmesser zu ermitteln. Drei Messebenen im Bereich der zylindrischen Bohrung wurden ausgewählt. In **Abbildung 6-29** sind diese Werte in Abhängigkeit von der Messposition dargestellt. Konische Bohrungen wurden beim Fließbohren erzeugt. Die Tendenz der Durchmesserabweichungen zeigt, dass sich der Durchmesser mit einer zunehmenden Bohrtiefe verringert. Am Werkzeugeintritt, was der Messposition $z_1 = -2,5$ mm entspricht, ergeben sich immer größere Durchmesser als das Nennmaß.

Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen lässt sich im Bereich von $v_f = 50 \dots 100$ mm/min aufgrund der großen Streubreite nicht feststellen. Bei der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150$ mm/min ergibt sich die Tendenz, dass sowohl die Durchmesser- als auch die Rundheitsabweichungen mit der zunehmenden Bohrtiefe abfallen. Bei höherer Vorschubgeschwindigkeit lässt sich die Bohrungswand von dem Fließbohrwerkzeug wesentlich stärker aufweiten. Somit vergrößern sich der Durchmesser und die Abweichung zur idealen Bohrung.

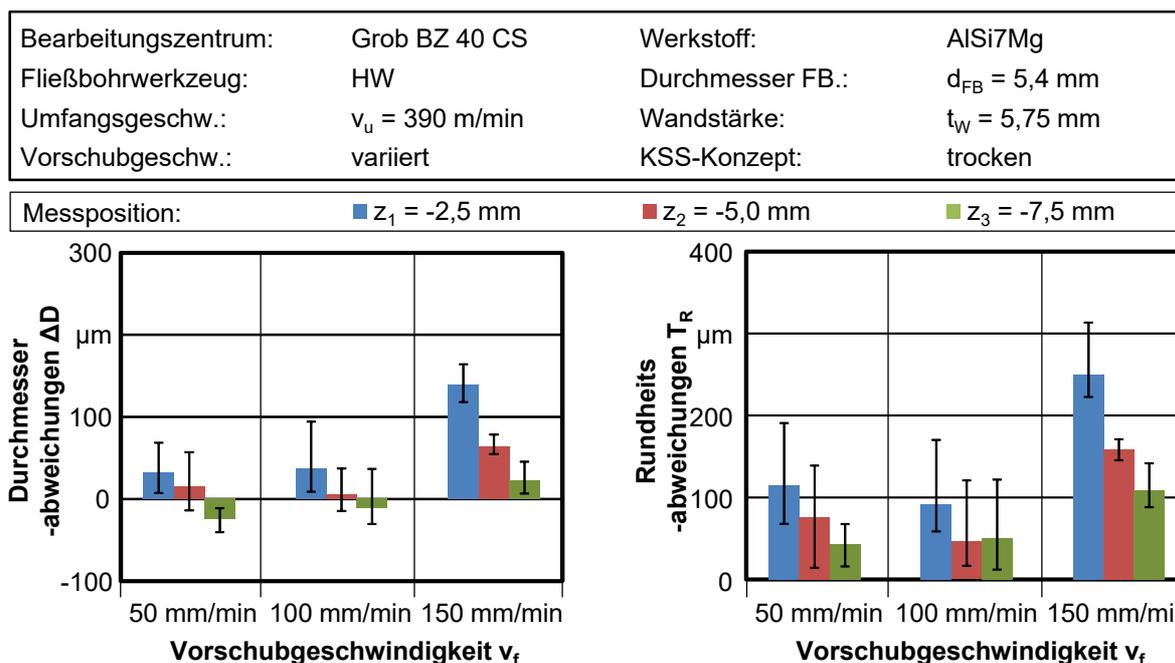


Abbildung 6-29: Durchmesser- und Rundheitsabweichungen der Fließbohrungen aus Aluminiumguss AlSi7Mg

Die Rundheitsmessschiebe der Bohrungen, welche in **Abbildung 6-30** dargestellt sind, unterstützen diese Begründung. Die Y-Achse stellt dabei die Richtung des Aufweitens beim Fließbohren dar. Die Gestalt der Bohrung weicht mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit von einem idealen Kreis ab, sodass die gefertigten Bohrungen größer werden und eine ovale Form aufweisen.

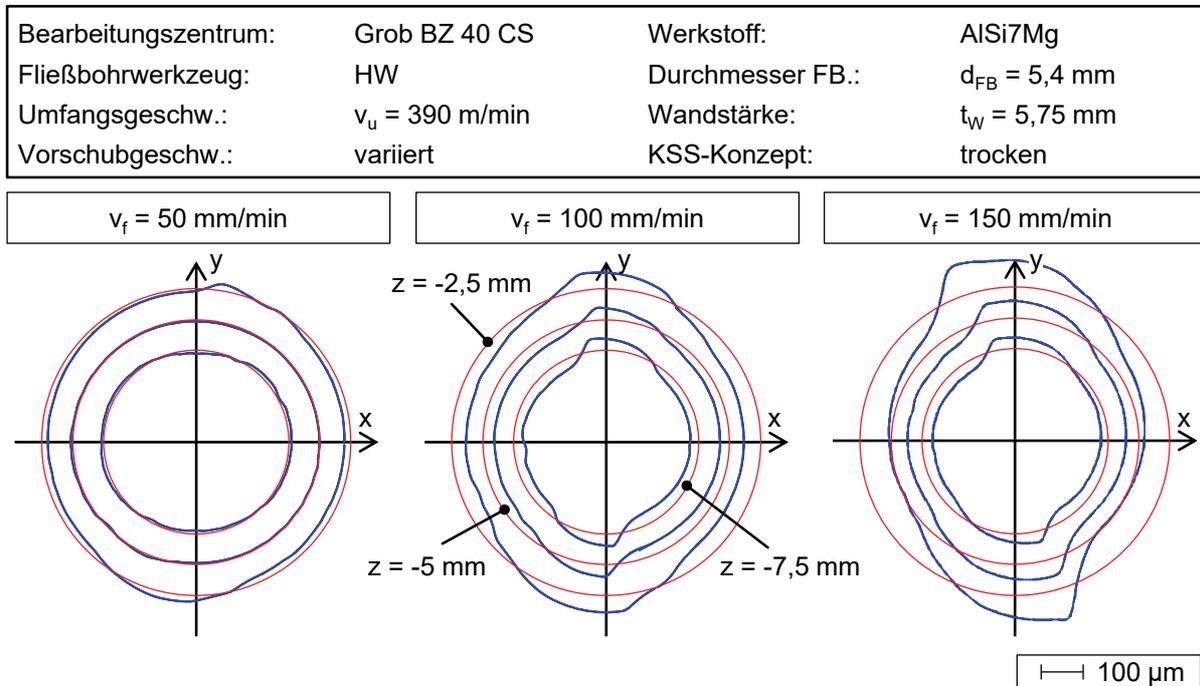


Abbildung 6-30: Rundheitsmessschiebe der Fließbohrungen aus Aluminiumguss AlSi7Mg

6.3.4 Visuelle Beurteilung der Bearbeitungsergebnisse

Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt nicht nur zur größeren Abweichung des Durchmessers und der Bohrungsgestalt, sondern wirkt sich auch auf die Ausformung der Bohrungswand aus. Neben dem geringen Umformungsvermögen enthalten Gusswerkstoffe Mikroporen, die beim Gießen entstehen. Beim schnellen Ausdehnen des Werkstoffes fängt die Rissbildung meistens an einer Stelle an, an der sich diese Mikroporen ansammeln. Zur Beurteilung der Bearbeitungsergebnisse wurde zuerst die ausgeformte Bohrungswand der erzeugten Bohrungen von beiden Richtungen visuell betrachtet.

In **Abbildung 6-31** ist die Ausbildung der Bohrungswand in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150 \text{ mm/min}$ ist die Rissbildung der Bohrungswand eindeutig erkennbar, während sich eine glatte, rissfreie Bohrungswand bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 50 \text{ mm/min}$ erzeugen lässt. Eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer besseren Ausformung der Bohrungswand.

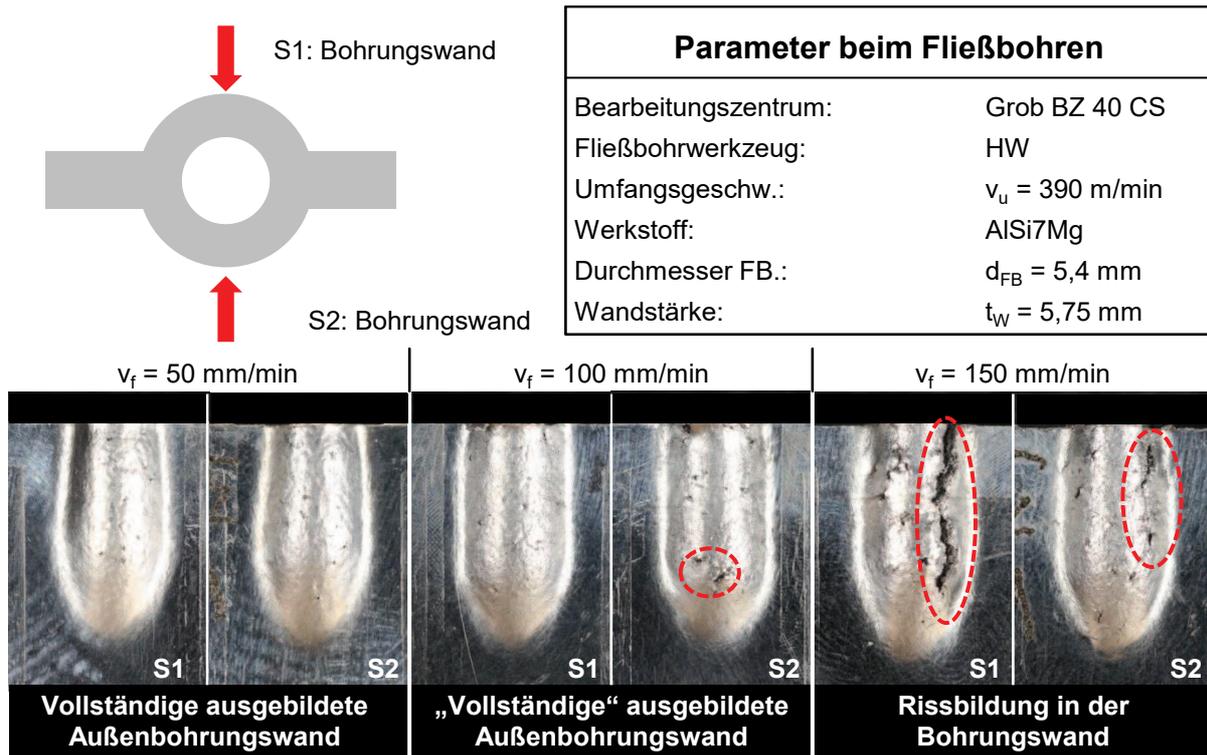


Abbildung 6-31: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Bohrungswand

Beim Fließbohren des Aluminiumwerkstoffes kommt es zu Aufschweißungen auf der Werkzeuoberfläche [48]. Diese Bildung wird von erhöhter Reibungswärme begünstigt und beeinflusst die Oberfläche der Bohrung. Eine höhere Vorschubgeschwindigkeit verringert die Prozessdauer. Im Gegensatz dazu verringert sich die Bildung der Aufschweißungen. In **Abbildung 6-32** sind die Längsschnitte der Fließbohrungen dargestellt. Bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 150$ mm/min ist eine Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit im Bereich der zylindrischen Bohrung sichtbar.

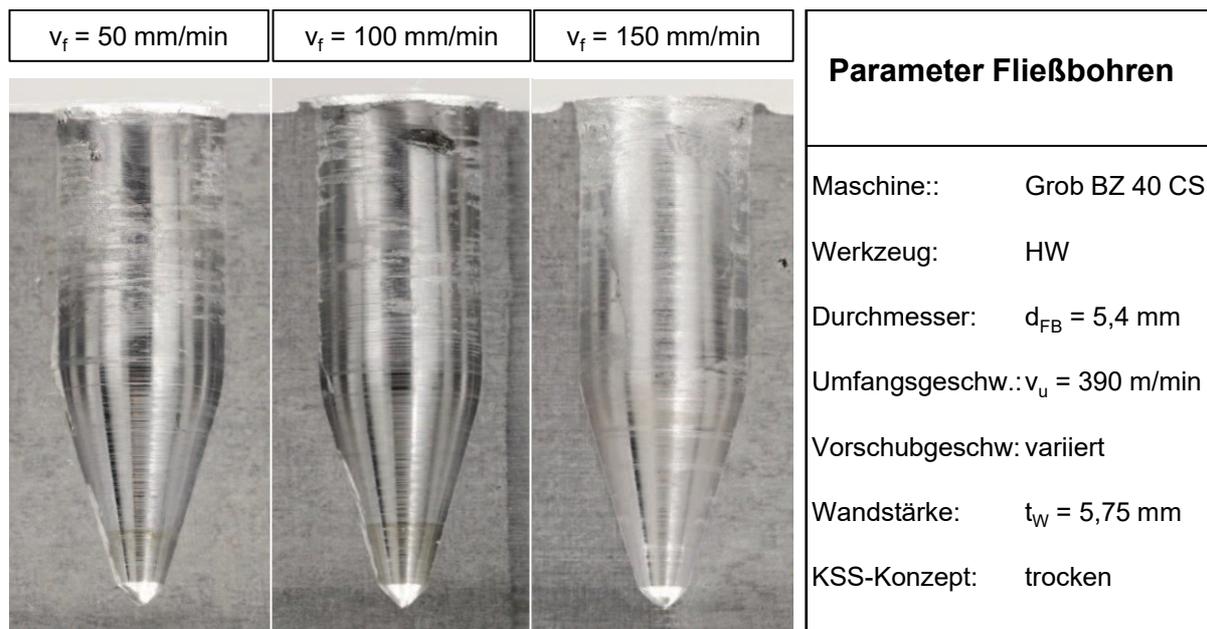


Abbildung 6-32: Längsschnitte der Fließbohrungen aus Aluminiumguss AlSi7Mg

7 Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10

7.1 Problemstellung beim Fließbohren

Das Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10 ist geprägt von der großen thermo-mechanischen Belastung während des Prozesses. Engbert hat gezeigt, dass der flexible Einsatz des Fließbohrens auch auf Stahlwerkstoffe übertragbar ist. Nutzbare Bohrungen lassen sich durch das lokale Aufweiten erzeugen. Aufgrund der starken thermomechanischen Belastungen versagten jedoch die eingesetzten Werkzeuge nach einigen Bohrungen [48]. Nach Heiler können die maximalen Temperaturen beim konventionellen Fließbohren von Stahlprofilen nahe an den Schmelzpunkt des Werkstoffes heranreichen [71]. Das Kobalt, welches im Hartmetall als Bindemittel dient und über eine Schmelztemperatur von $T_s = 1495 \text{ °C}$ verfügt [159], verliert an Festigkeit und führt zum frühzeitigen Werkzeugversagen. Eine Verbesserung kann der Einsatz von Fließbohrern aus keramischem Werkstoff sein, da der Werkstoff eine höhere Warmfestigkeit gegenüber Hartmetallen besitzt [64]. Des Weiteren besteht noch die Möglichkeit darin, die mechanische Werkzeugbelastung zu verringern, indem eine tiefe Vorbohrung vor dem Fließbohren eingebracht wird und somit das Werkzeug insbesondere die Werkzeugspitze entlastet wird.

7.2 Mechanische Werkzeugbelastungen und Einfluss der Vorbohrung

Zunächst werden die Ergebnisse beim Fließbohren mithilfe der Hartmetallwerkzeuge vorgestellt. Bei der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ konnten Fließbohrungen im Bereich der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \dots 80 \text{ m/min}$ und bei den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 100 \dots 200 \text{ mm/min}$ prozesssicher eingebracht werden. Außerhalb der Bereiche versagten die Werkzeuge nach einigen Bohrungen. Bei der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4 \text{ mm}$ konnten Fließbohrungen im Bereich der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60 \dots 100 \text{ m/min}$ bei den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 100 \dots 200 \text{ mm/min}$ prozesssicher eingebracht werden. Außerhalb der Bereiche ist es nicht möglich, Fließbohrungen einzubringen. Das Werkzeug versagte bei diesen größeren Wandstärken schon beim Eindringen in das Profil.

Die Umfangsgeschwindigkeit $v_u = 40 \text{ m/min}$ ist nicht geeignet für alle untersuchten Wandstärken, weil keine ausreichende Reibungswärme erzeugt werden kann, um das Material zu entfestigen. Eine erhöhte Wandstärke verringert zusätzlich die Erwärmung des Versuchskörpers, da die Reibungswärme schnell durch das Material abgeleitet wird. Bei der Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 100 \text{ m/min}$ ist ein prozesssicheres Fließbohren der Profile der Wandstärke von $t_w = 2 \text{ mm}$ ebenfalls nicht mehr möglich, da die Werkzeugspitze frühzeitig versagt. Im Folgenden wird auf die Analyse der mechanischen Werkzeugbelastungen im Bereich der Parameter eingegangen, bei denen der Prozess stabil abläuft.

Abbildung 7-1 stellt die Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ dar. Die Prozesse weisen in den meisten Fällen einen ähnlichen Verlauf auf, obwohl bei den Profilen mit den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4 \text{ mm}$ tiefe Bohrungen vor dem eigentlichen Prozess

eingbracht wurden. In dem Fall wurde das Profil direkt von dem konischen Werkzeugteil aufgeweitet.

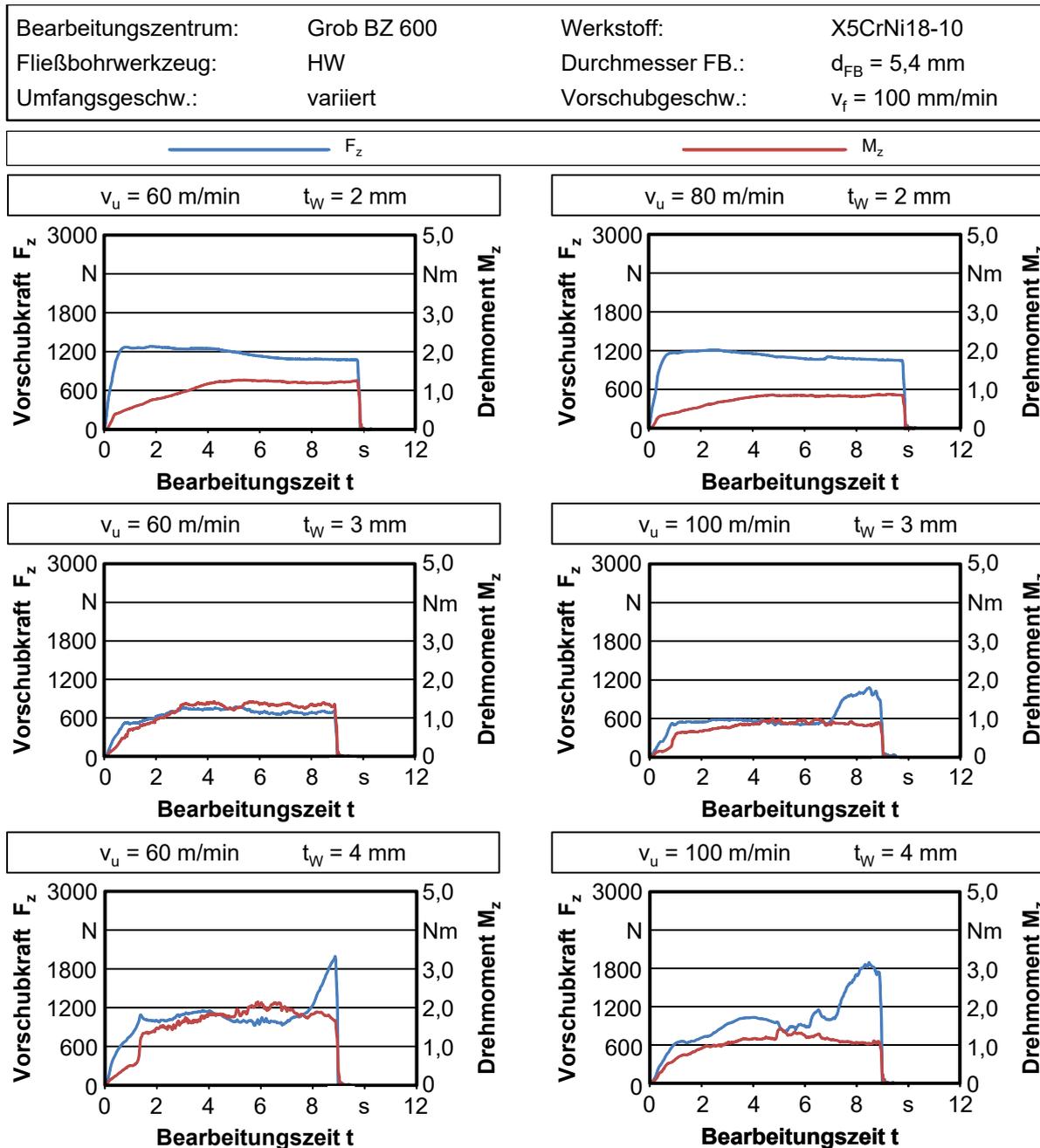


Abbildung 7-1: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem Fließbohrwerkzeug aus Hartmetall bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 100 \text{ mm/min}$

Die Vorschubkraft steigt am Anfang des Prozesses aufgrund der geringen Kontaktfläche zwischen dem Werkzeug und dem Versuchskörper und der daraus resultierten Reibungswärme steil an. Es ergibt sich ein geringeres Drehmoment. Mit zunehmender Bohrtiefe vergrößert sich die Kontaktfläche und die Temperaturen steigen rapide an. Der Werkstoff lässt sich durch eine Temperaturerhöhung schnell entfestigen [122]. Die Temperatur der Kontaktstelle zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff kann ein sehr hohes Niveau erreichen, da eine Warmformgebung des Werkstoffes erst im Temperaturbereich von $T = 850 \dots 1150 \text{ °C}$ stattfinden kann [136]. Die Vorschubkraft erreicht ihr Maximum schon vor

dem Eindringen des Übergangsbereichs zwischen konischem und zylindrischem Teil. Danach verläuft die Vorschubkraft meist konstant oder nimmt leicht ab. Das Drehmoment erreicht erst beim Eindringen des Übergangsbereichs zwischen dem Werkzeugkonus und dem Werkzeugzylinder sein Maximum.

Auffallend ist, dass die Vorschubkraft am Ende des Prozesses stark ansteigt, während das Drehmoment keine signifikante Änderung aufweist. Dies tritt jedoch nur beim Fließbohren der Profile mit den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4$ mm unregelmäßig auf. Beim Fließbohren des Edelstahl entsteht bei der eingestellten Zustelltiefe kein Materialaufwurf am Werkzeugeintritt, welcher diesen Kraftanstieg hervorrufen könnte. Allerdings war das in die Vorbohrung gefüllte Trennmittel für eine Zunahme der Vorschubkraft am Prozessende verantwortlich. Es wurde von dem Werkzeug gegen den Bohrungsgrund der Vorbohrung abgedichtet und fest gepresst. Wegen der bedingten Genauigkeit der manuellen Dosierung des Trennmittels kann es unregelmäßig vorkommen, dass mehr Trennmittel als benötigt befüllt ist. Bei einer Überdosierung des Trennmittels tritt dann der Kraftanstieg auf. Aufgrund des geringen Umfangs der Vorbohrung führte das Pressen des Trennmittels jedoch nicht zu einer Zunahme des Drehmoments. Dieser Kraftanstieg repräsentiert daher keinen Prozesscharakter und wird bei der weiteren Auswertung vernachlässigt.

Das Einbringen der Vorbohrung beeinflusst das stirnseitige Fließbohren positiv. Da der Durchmesser der Vorbohrung größer als der Durchmesser der Werkzeugspitze ist, ist diese insbesondere am Anfang des Fließbohrens entlastet. Anstatt der Werkzeugspitze dringt ein Teil des Werkzeugkonus zum Prozessbeginn in das Material hinein. Die Kontaktfläche zwischen dem Werkzeug und Material vergrößert sich im Vergleich zum Fließbohren ohne eine Vorbohrung. Die vergrößerte Reibfläche ermöglicht einen schnellen Temperaturanstieg und beschleunigt somit die Materialentfestigung. In dem Fall lässt sich der Fließbohrprozess mit der Phase beim konventionellen Fließbohren vergleichen, bei dem die Werkzeugspitze nach dem Durchdringen des Bleches ebenfalls nicht mehr mechanisch belastet ist. Ein weiterer Vorteil der Vorbohrung ist es, dass die Prozesssicherheit enorm erhöht wird. Es kam beim Fließbohren der Profile der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4$ mm nie zu einem Werkzeugversagen.

Abbildung 7-2 stellt die Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min dar. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer Zunahme der mechanischen Werkzeugbelastung. Die Verläufe der beiden Größen über die Bearbeitungszeit weisen jedoch keine signifikante Änderung auf. Ein Vorschubkraftanstieg tritt wieder unregelmäßig durch das bereits beschriebene Phänomen am Prozessende auf.

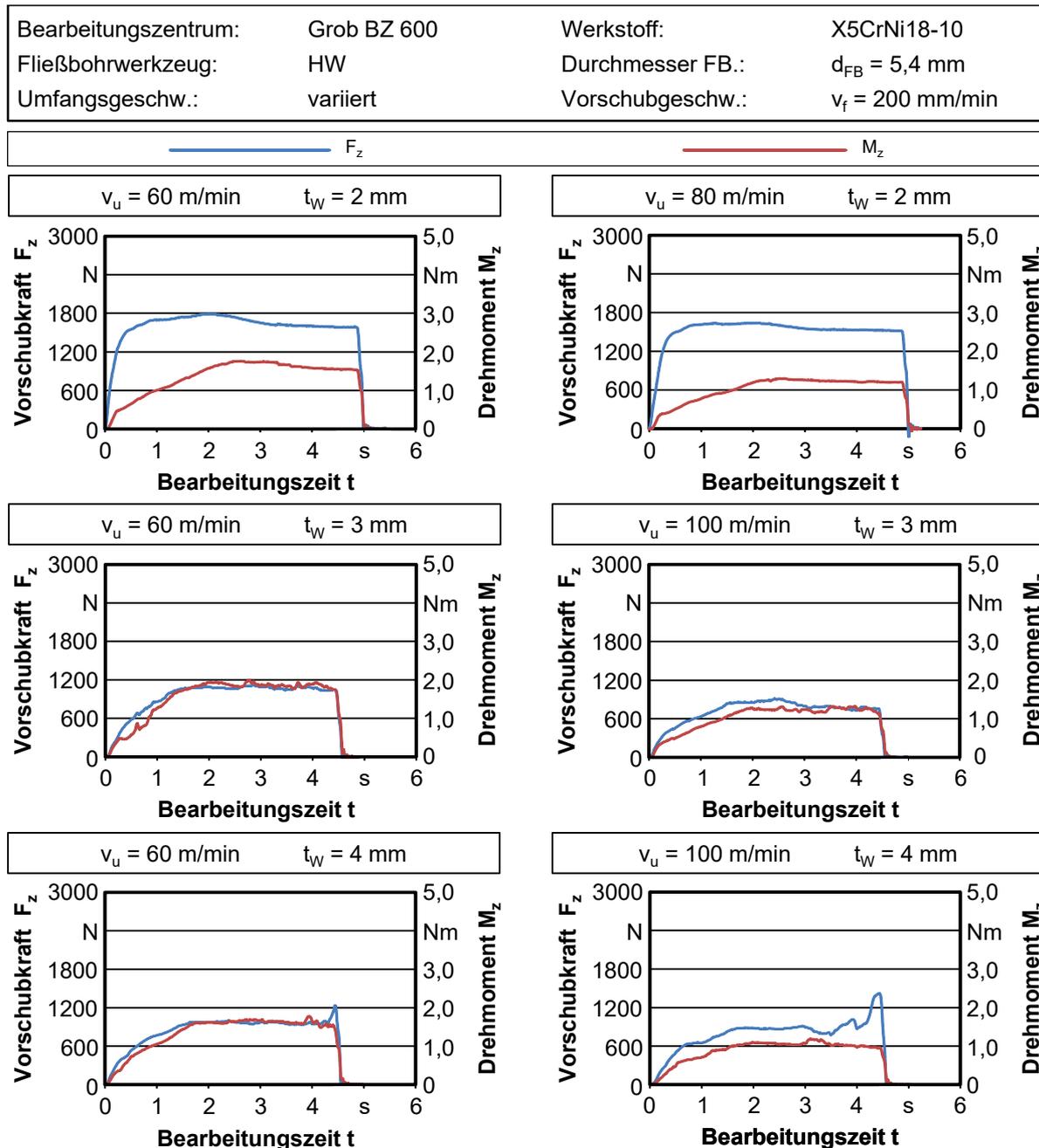


Abbildung 7-2: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem Fließbohrwerkzeug aus Hartmetall bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 200 \text{ mm/min}$

Um den Einfluss des Trennmittels am Prozessende auf die Vorschubkraft festzustellen, wurden Ergänzungsversuche durchgeführt. **Abbildung 7-3** stellt die erfassten Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe sowie eine der erzeugten Fließbohrungen dar. Der Versuchskörper wurde so vorbereitet, dass die tiefe Vorbohrung zu einer Durchgangsbohrung wird. Am Ende des Fließbohrens lässt sich das überdosierte Trennmittel von dem Werkzeug aus der Bohrung verdrängen. Vor dem Fließbohren wurde diese Bohrung vollständig mit dem Trennmittel gefüllt. Die Versuche wurden bei den Profilen der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ in einem Umfangsgeschwindigkeitsbereich von $v_u = 60 \dots 100 \text{ m/min}$ durchgeführt. Eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100 \text{ mm/min}$ wurde ausgewählt. Die Vorschubkraft weist einen quasi konstanten Verlauf auf. Da das Trennmittel ungehindert aus der Vorbohrung verdrängt

werden kann, ergibt sich kein Vorschubkraftanstieg am Prozessende. Somit lässt sich zeigen, dass das Festdrücken des Trennmittels zum Vorschubkraftanstieg am Prozessende führte.

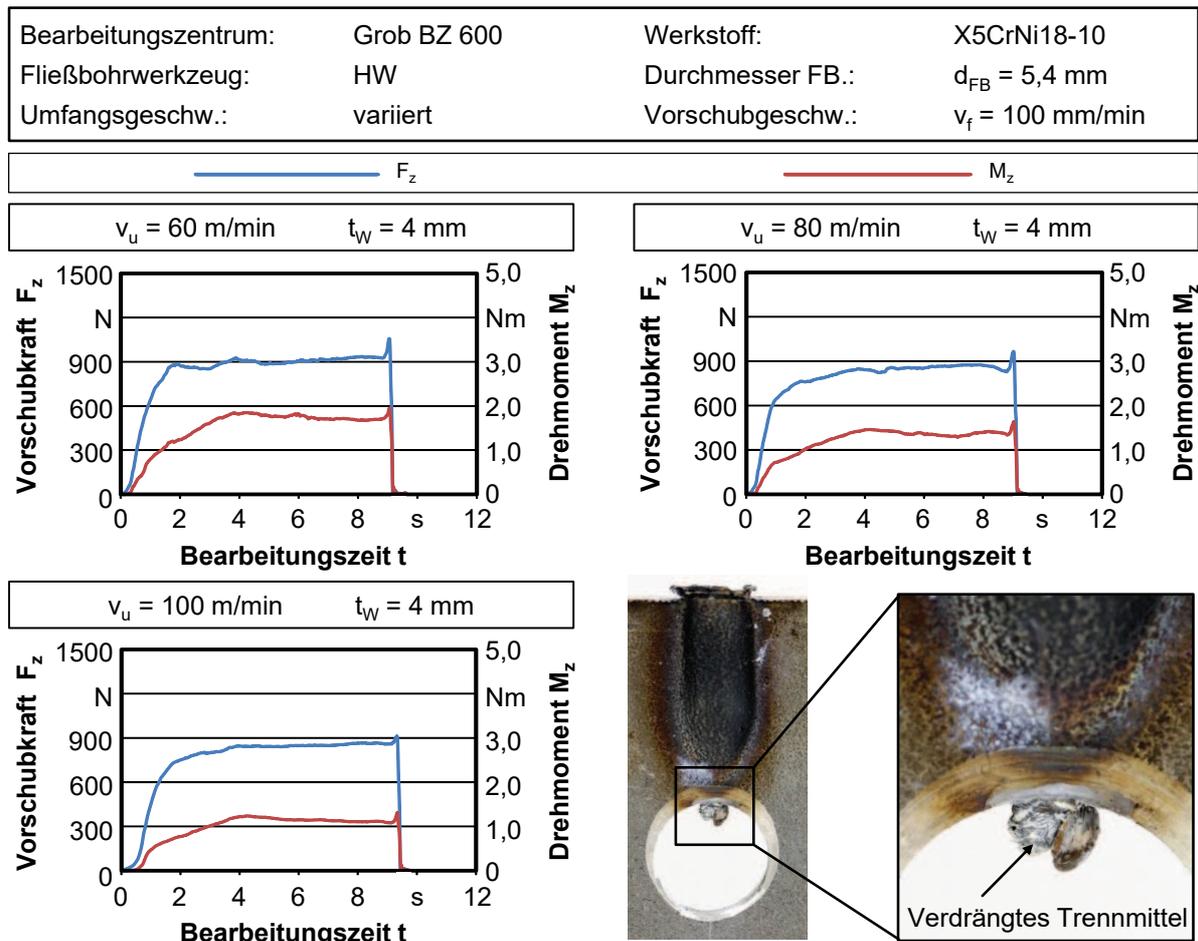


Abbildung 7-3: Einfluss des Trennmittels beim Fließbohren mit einer Vorbohrung

Abbildung 7-4 stellt die maximalen Vorschubkräfte und Drehmomente in Abhängigkeit von den Umfangsgeschwindigkeiten, den Vorschubgeschwindigkeiten sowie den Wandstärken dar. Die Mittelwerte wurden aus drei Messungen ermittelt und die Höhe der Streubreite in diesem Diagramm stellt den minimalen bzw. den maximalen Wert der jeweiligen Parameterkombination dar. Tendenziell nimmt die mechanische Werkzeugbelastung mit einer zunehmenden Umfangsgeschwindigkeit ab, während eine höhere Vorschubgeschwindigkeit zu einer Vergrößerung der Belastung führt. Höhere Drehzahlen begünstigen ein schnelles Herabsetzen der Fließgrenze des Werkstoffes und somit eine niedrige Werkzeugbelastung. Das Einbringen einer Vorbohrung hat dazu beigetragen, dass das Fließbohrwerkzeug bei der Bearbeitung dickerer Profile auch nicht so stark belastet wird. Maximale Vorschubkräfte treten beim Fließbohren der Profile mit der Wandstärke von $t_w = 2 \text{ mm}$ auf. Größere Wandstärken führen zu einem zunehmenden Drehmoment, während deren Einfluss auf die Vorschubkraft aufgrund der Vorbohrung getrennt betrachtet werden muss. Bei den Profilen mit einer Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4 \text{ mm}$, bei denen eine Vorbohrung eingebracht wurde, nimmt die mechanische Belastung mit zunehmender Wandstärke zu.

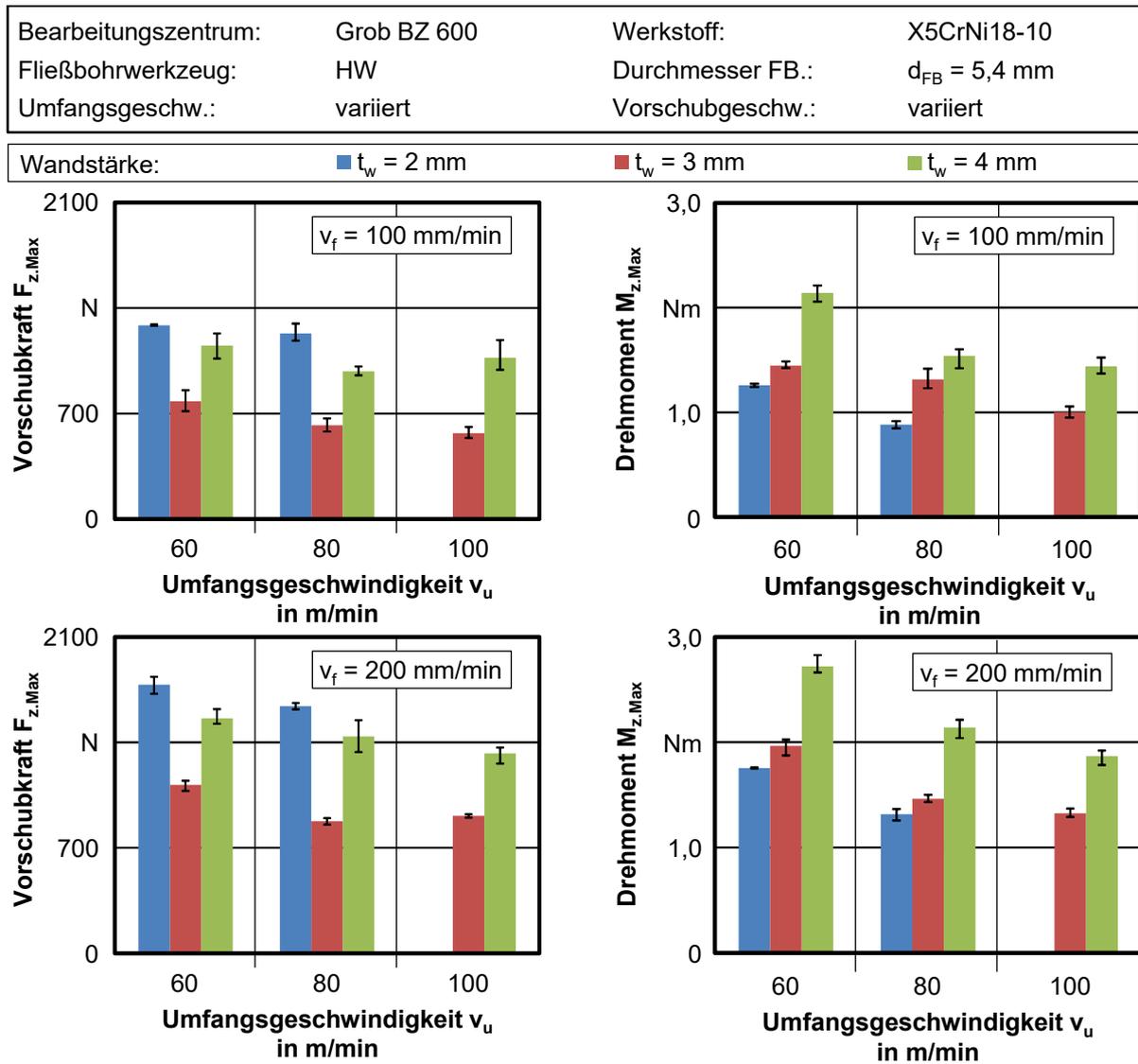


Abbildung 7-4: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$ beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem Fließbohrwerkzeug aus Hartmetall

Ohne eine Vorbohrung ist das stirnseitige Fließbohren des Werkstoffes X5CrNi18-10 mit dem keramischen Werkzeug nicht prozesssicher. Bei den Profilen der Wandstärke von $t_w = 2$ mm lassen sich nur einige Bohrungen bei der Parameterkombination von $v_u = 100$ m/min und $v_f = 100$ mm/min einbringen, danach kommt es zum Werkzeugversagen. Reproduzierbare Ergebnisse lassen sich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich von $v_u = 60 \dots 100$ m/min bei den Profilen der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4$ mm realisieren. Eine Vorbohrung beeinflusst auch hier den Prozess positiv, da die Werkzeugspitze am Anfang des Fließbohrens geringer mechanisch beansprucht wird.

Abbildung 7-5 stellt die Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren des Werkstoffes X5CrNi18-10 bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min mit einem keramischen Werkzeug dar. Es ergeben sich ähnliche Verläufe wie beim Fließbohren mit einem Hartmetallfließbohrer. Die Werkzeugbelastung ist gering aufgrund der ausreichenden Entfestigung des Werkstoffes. Vor dem Prozessende steigt die Vorschubkraft bei einigen Parameterkombinationen an, da das Werkzeug das Trennmittel gegen den Bohrungsgrund der Vorbohrung drückt.

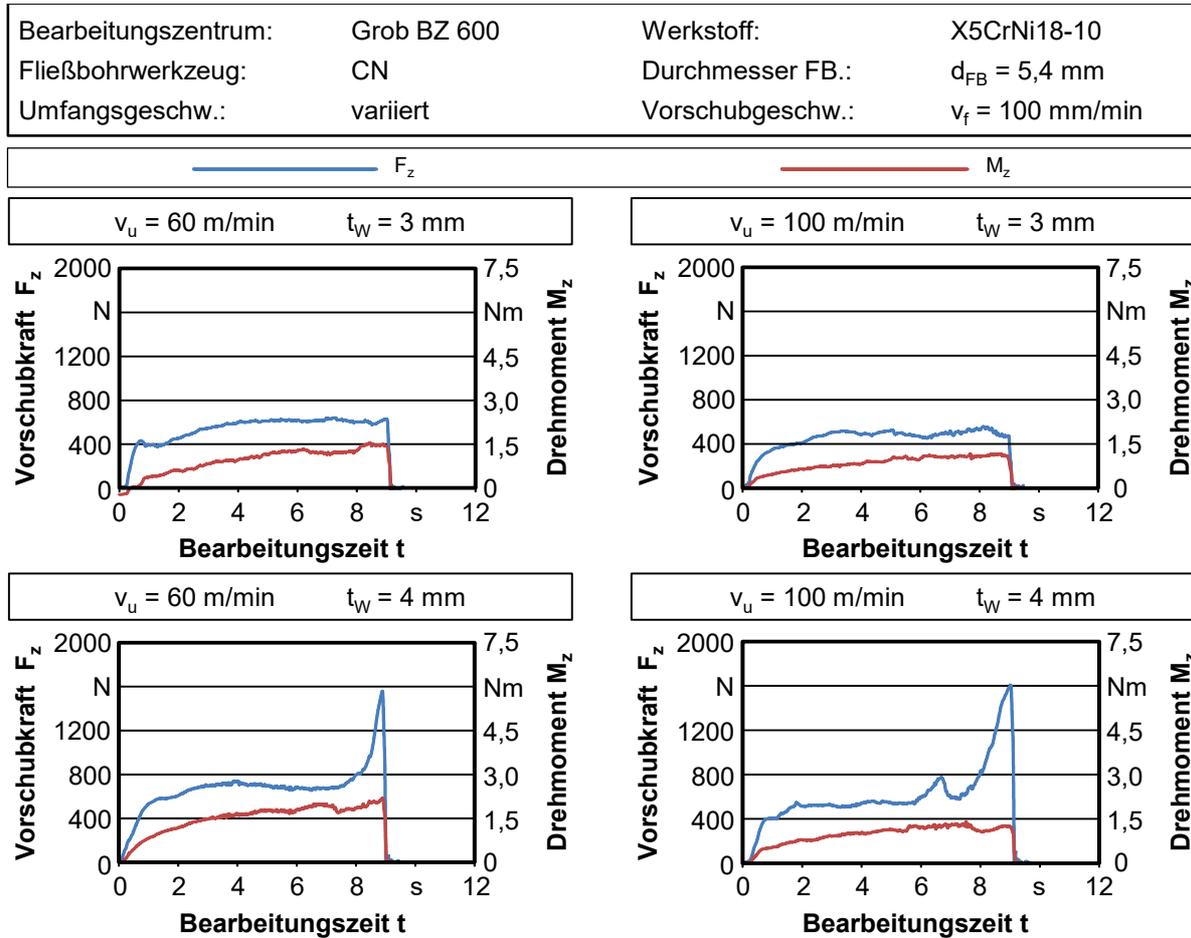


Abbildung 7-5: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem Fließbohrwerkzeug aus Keramik bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 100$ mm/min

Abbildung 7-6 stellt ergänzend die Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe bei der erhöhten Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min dar. Auch hier ist eine geringe Zunahme der mechanischen Belastung zu erkennen.

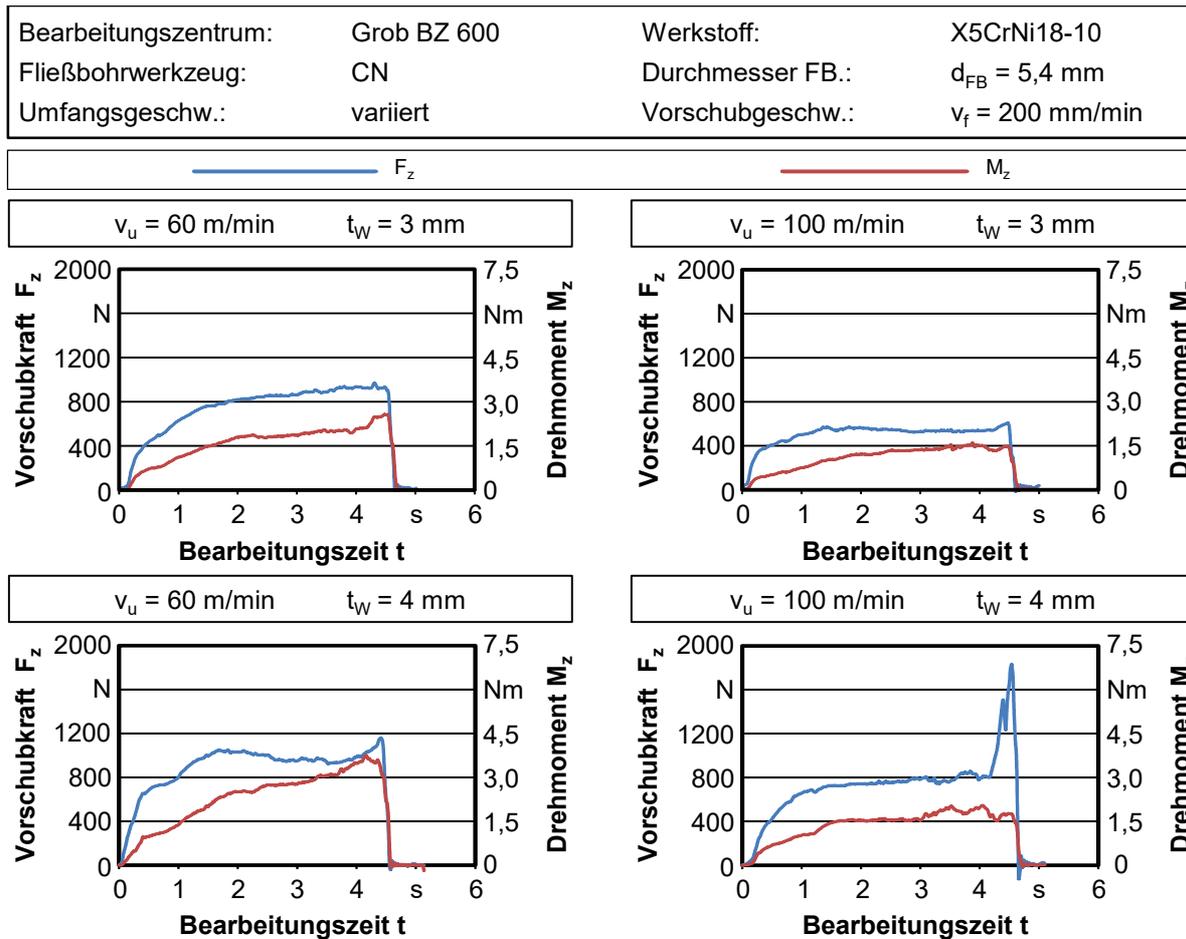


Abbildung 7-6: Vorschubkraft- und Drehmomentverläufe beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem Fließbohrwerkzeug aus Keramik bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 200 \text{ mm/min}$

Abbildung 7-7 stellt die maximalen Vorschubkräfte und Drehmomente beim Fließbohren mit einem keramischen Werkzeug in Abhängigkeit von den Umfangsgeschwindigkeiten, den Vorschubgeschwindigkeiten sowie den Wandstärken dar. Es ergibt sich eine ähnliche Tendenz wie beim Fließbohren mit dem Hartmetallwerkzeug. Während die mechanische Werkzeugbelastung mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit abfällt, steigt diese mit einer erhöhten Vorschubgeschwindigkeit. Die maximale Belastung wächst auch mit zunehmender Wandstärke.

Mit dem keramischen Werkzeug ergibt sich eine geringere Vorschubkraft als beim Hartmetallwerkzeug. Der Grund liegt daran, dass höhere Temperaturen erreicht werden können. Das eingesetzte keramische Fließbohrwerkzeug besteht aus Siliziumnitrid, welches über eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 17...21 \text{ W/mK}$ verfügt [6]. Der Wert ist viel niedriger als der durchschnittliche Wert des Hartmetalls von $\lambda = 100 \text{ W/mK}$ [85]. Beim Fließbohren lässt sich daher die Reibungswärme nicht so schnell durch das keramische Werkzeug ableiten, was zu einer höheren Temperatur führt. Der Werkstoff ist damit stärker entfestigt als beim Fließbohren mit einem Werkzeug aus Hartmetall.

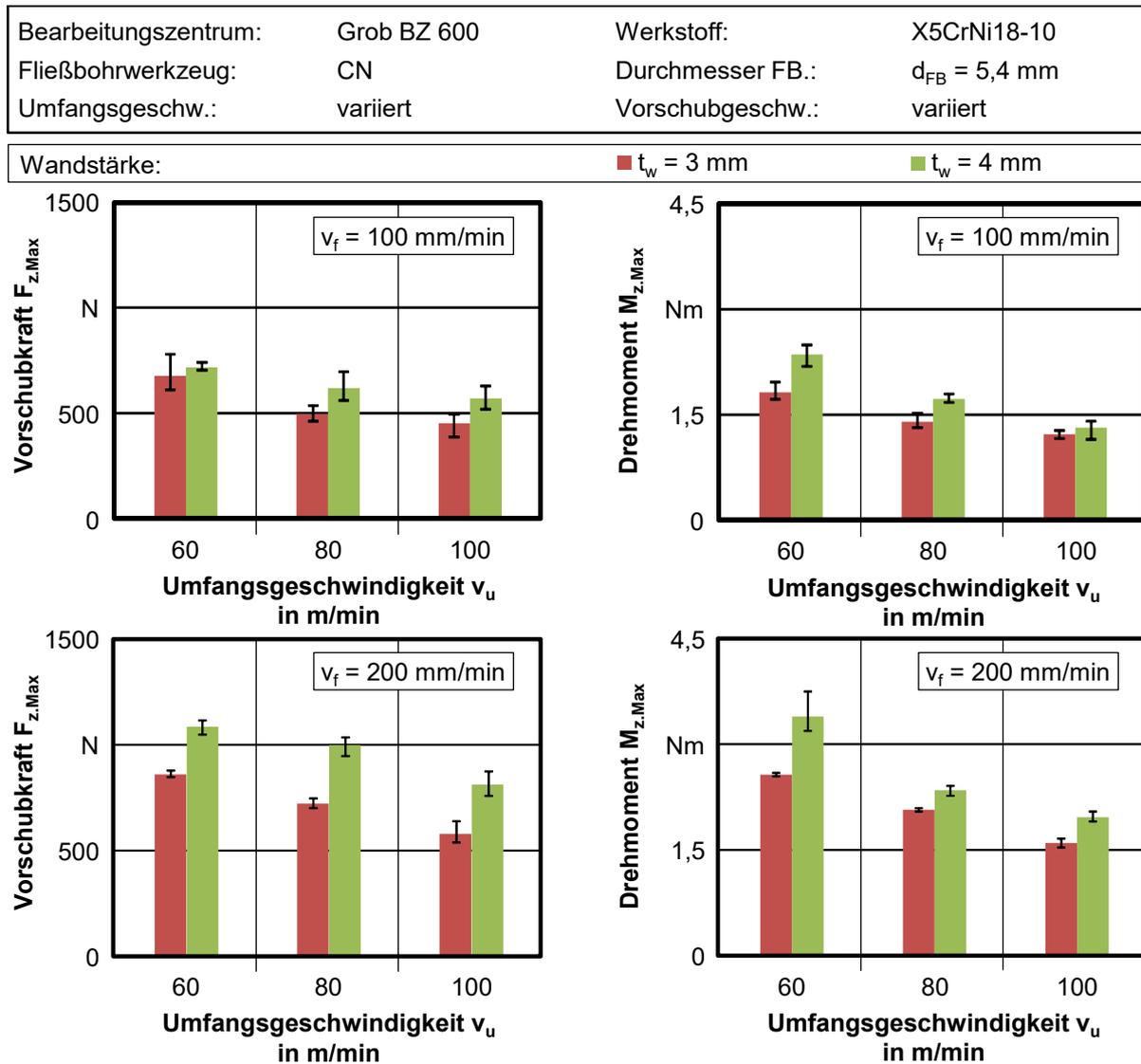


Abbildung 7-7: Maximale Vorschubkräfte $F_{z,Max}$ und Drehmomente $M_{z,Max}$ beim Fließbohren der Legierung X5CrNi18-10 mit einem keramischen Fließbohrwerkzeug

7.3 Thermische Bauteilbelastungen

Ein besonderes Merkmal beim Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10 ist die enorme thermische Belastung. Im Vergleich zum Fließbohren der Kunststoffe und Buntmetalle ergeben sich deutlich höhere Temperaturen. Während der Bearbeitung lässt sich beobachten, dass das Bauteil und das Werkzeug rotglühend sind. Das pastenartige Trennmittel, welches vor dem Prozess auf dem Werkzeug aufgetragen und in die Vorbohrung gefüllt wurde, wird trocken und verliert seine Schmierfunktion. Dies führt zu einer stärkeren Reibung zwischen dem Werkzeug und Werkstoff und vergrößert die thermische Bauteilbelastung. Der Edelstahl X5CrNi18-10 ist ein austenitischer Stahlwerkstoff, welcher über eine hohe Neigung zur Adhäsion mit Hartmetall verfügt [47]. Hohe Temperaturen können dies begünstigen.

Abbildung 7-8 stellt die erfassten Temperaturverläufe der Bohrungswand dar. In einem Umfangsgeschwindigkeitsbereich von $v_u = 60 \dots 100 \text{ m/min}$ wurden die Temperaturen beim Fließbohren des Werkstoffes X5CrNi18-10 mit einer Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$ unter Einsatz der beiden Werkzeugtypen bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt

$v_f = 100$ mm/min. Aufgrund des Abstands von der Messstelle zur Reibfläche sind die ermittelten Temperaturen an der Bohrungswand niedriger als die tatsächliche Temperatur innerhalb der Bohrung. Die Temperatur der Messstelle steigt kontinuierlich bis zum Prozessende an und erreicht ein hohes Niveau. Hohe Temperaturen begünstigen die Aufschweißungen auf dem Werkzeug und können die Oberfläche der erzeugten Bohrungen negativ beeinflussen.

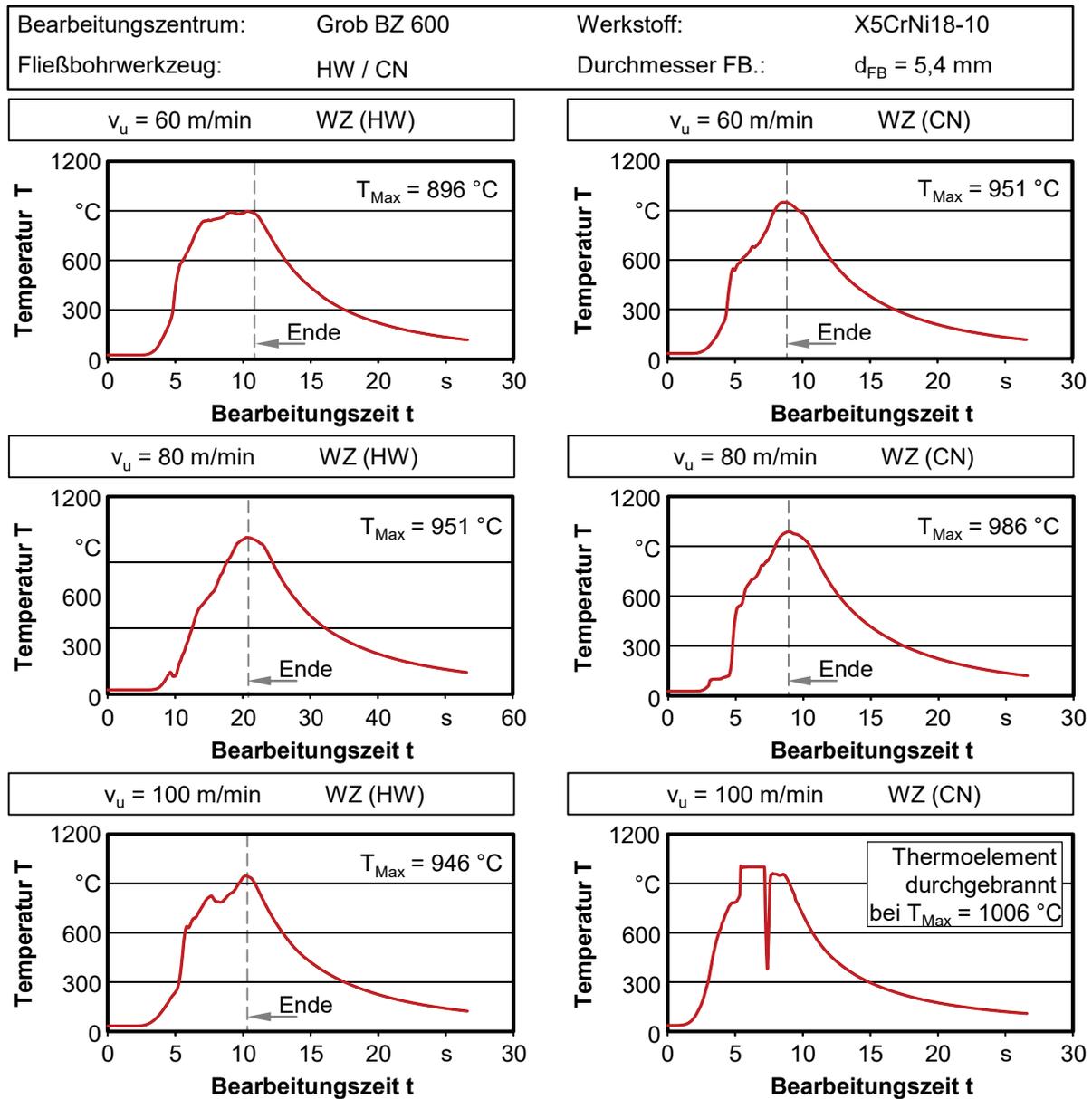


Abbildung 7-8: Thermische Bauteilbelastung beim Fließbohren des Werkstoffes X5CrNi18-10

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Edelstahl von $\lambda = 15$ W/mK [43] lässt sich die Wärme nicht so schnell durch das Material ableiten. Ein Wärmestau innerhalb des Bauteils tritt auf und dieser führt zu einem stetigen Temperaturanstieg. Die Messstelle wurde daher kontinuierlich bis zum Prozessende erwärmt. Tendenziell steigt die maximale Temperatur mit einer erhöhten Umfangsgeschwindigkeit. Höhere Temperaturen lassen sich beim Fließbohren mit einem keramischen Werkzeug erreichen. Bei der Parameterkombination

von $v_u = 100$ m/min und $v_f = 100$ mm/min wurde das Thermoelement sogar bei der Temperatur von $T = 1006$ °C zerstört.

7.4 Durchmesser- und Rundheitsabweichungen

Zur Beurteilung der erzeugten Bohrungen wurden die Bearbeitungsergebnisse taktil vermessen und die Durchmesser- und Rundheitsabweichungen ermittelt. Die Messungen wurden auf mehreren Ebenen mit verschiedenen Abständen zum Werkzeugeintritt durchgeführt. Zwei verschiedene Bohrungstiefen wurden ausgewählt, deren Abstand zur Bohrungseintritt $z_1 = -2,5$ mm und $z_2 = -7,5$ mm betragen.

Abbildung 7-9 stellt die Mittelwerte der Durchmesserabweichungen von zwei Messungen in Bezug auf die Parameter zum Werkzeugdurchmesser von $d_{FB} = 5,4$ mm dar. Ein Hartmetallwerkzeug wurde verwendet. Bei den Profilen der Wandstärke von $t_w = 2$ mm wurden nur die Bohrungen, die im Umfangsgeschwindigkeitsbereich von $v_u = 60 \dots 80$ m/min bearbeitet wurden, in Betracht herangezogen, weil der Prozess in dem Bereich stabil verläuft. Während der obere Teil der Abbildung die Messwerte bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min zeigt, sind in unterem Teil die Messwerte bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 200$ mm/min dargestellt.

Beim Fließbohren des Edelstahl X5CrNi18-10 weisen die erzeugten Bohrungen ebenfalls eine konische Gestalt auf. Die Bohrungen besitzen am Werkzeugeintritt größere Durchmesser als im unteren Bereich der Bohrungen. Der Durchmesser verringert sich also mit zunehmender Bohrtiefe. Am Werkzeugeintritt weisen die Bohrungen vorwiegend geringeres Übermaß auf, während im unteren Bereich der Bohrungen fast nur ein Untermaß vorliegt. Dieses Verhalten lässt sich mit den von hoher thermischen Belastung begünstigten Aufschweißungen auf dem Werkzeug erklären. Die tiefe Messebene von $z_2 = 7,5$ mm liegt nahe an dem Bereich der Bohrung, der von dem Übergangsbereich des Werkzeugs zuletzt bearbeitet wurde. Am Ende des Fließbohrens war der untere Bereich der Bohrungswand am stärksten erwärmt im Vergleich zu dem oberen Teil der zylindrischen Bohrung. Nach dem Prozessende federt dieser Teil der Bohrung auch mehr als der obere Teil der Bohrung zurück. Daher ergibt sich die konische Bohrungsgestalt.

Neben der Umfangsgeschwindigkeit lässt sich der Einfluss der Materialstärke und der Vorschubgeschwindigkeit auf den Durchmesser nicht eindeutig feststellen. Das Einbringen einer tiefen Vorbohrung hat keinen negativen Einfluss auf die Durchmesserabweichungen. Die Bohrungen der Profile mit den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4$ mm weisen ähnliche Durchmesserabweichungen wie die Bohrungen von den Profilen mit der Wandstärke von $t_w = 2$ mm, in einigen Fällen sogar noch geringere Durchmesserabweichung auf.

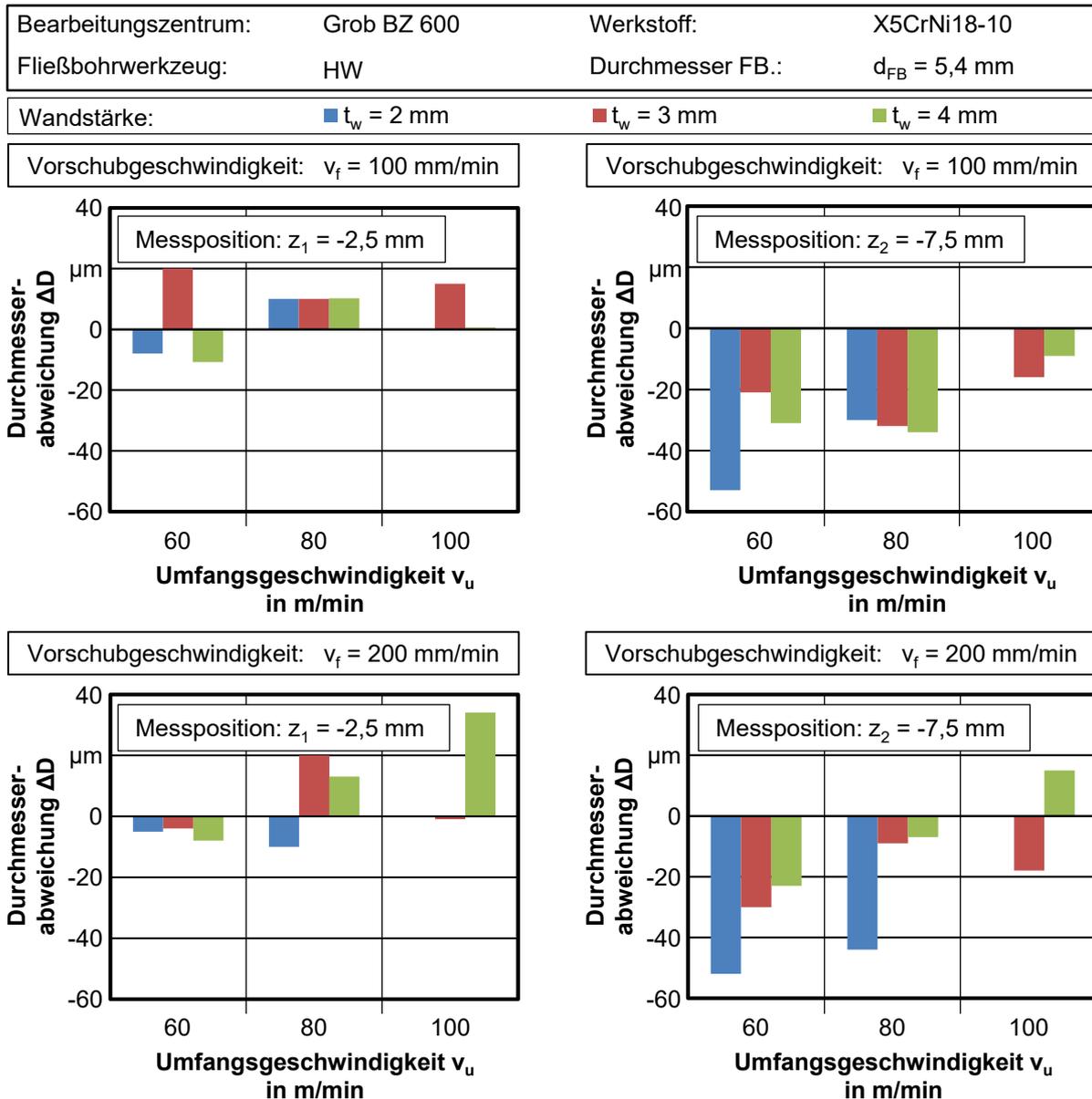


Abbildung 7-9: Durchmesserabweichungen der Fließbohrungen beim Einsatz von einem Hartmetallwerkzeug in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Neben der konischen Gestalt der zylindrischen Bohrungswand weisen die gefertigten Fließbohrungen große Abweichungen zu einer idealen Bohrung auf. **Abbildung 7-10** stellt die zugehörigen Rundheitsabweichungen der Messebene dar. Der Rundheitsfehler nimmt mit zunehmender Bohrtiefe zu. Die Art und Weise, wie die Wärme aus dem Bauteil an die Umgebung abgeleitet wird, hat zu diesem Verlauf der Rundheit geführt. Beim Fließbohren des Edelstahl wurden die Versuchskörper mit einer Vorrichtung, welche aus massivem Baustahl gefertigt ist, eingespannt. In Querrichtung zur Längsachse des Profils verfügt die Vorrichtung Freiräume, die das seitliche Aufweiten des Materials ermöglichen. Da die Luft eine sehr geringere Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$ [16] besitzt, lässt sich die Wärme vorwiegend durch das Profil und die Vorrichtung weiterleiten. Die zweite Ebene von $z_2 = -7,5 \text{ mm}$ wurde am Ende zuletzt vom Werkzeug bearbeitet und kann eine höhere Temperatur aufweisen. Nach dem Rückzug des Werkzeugs fängt die Abkühlung der Bohrung auch zuletzt dort an.

Der thermische Verzug des Versuchskörpers führt schließlich dazu, dass ein großer Rundheitsfehler im unteren Bereich der Bohrung auftritt. Die Parameter beim Fließbohren haben eher geringen Einfluss auf die Rundheit. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit wirkt sich praktisch nicht auf die Rundheit der Bohrung aus. Ein maximaler Rundheitsfehler tritt fast nur bei einer Wandstärke von $t_w = 3$ mm auf.

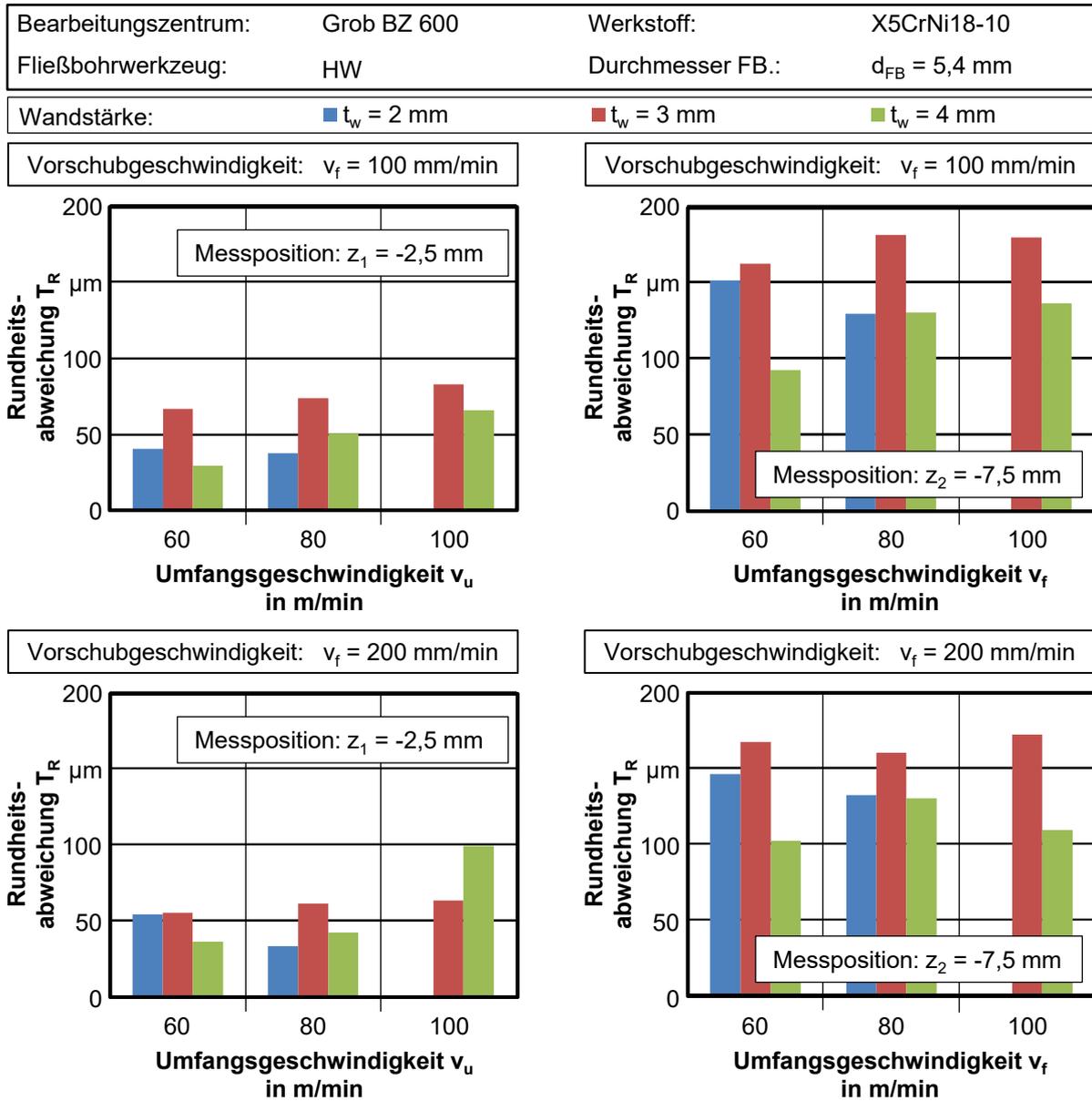


Abbildung 7-10: Rundheitsabweichungen der Fließbohrungen beim Einsatz von einem Hartmetallwerkzeug in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Die Bohrungen weisen ebenfalls eine ovale Form auf und diese Form ist durchgehend im Bereich der zylindrischen Bohrung zu erkennen. Der Verzug des Versuchskörpers führt auch dazu, dass die ausgeformte Bohrungswand zusammengezogen wird und der größte Durchmesser sich in Längsrichtung der Bohrung ergibt. Außerdem lässt sich die eingebrachte Vorbohrung nicht 100% in die ausgeformte Bohrungswand integrieren. Bearbeitungsriefen wurden beim Fließbohren erzeugt und diese führen zu einem zusätzlichen Rundheitsfehler innerhalb der Innenbohrungswand. **Abbildung 7-11** zeigt dieses Verhalten exemplarisch in

Form von Rundheitsmessschrieben bei einer Wandstärke von $t_w = 3$ mm. Die X-Achse zeigt das Aufweiten der Bohrung in Längsrichtung der Versuchskörper, während die Y-Achse die Querrichtung darstellt. Die Pfeile deuten auf Stellen, welche die Bearbeitungsriefen der Vorbohrung darstellen.

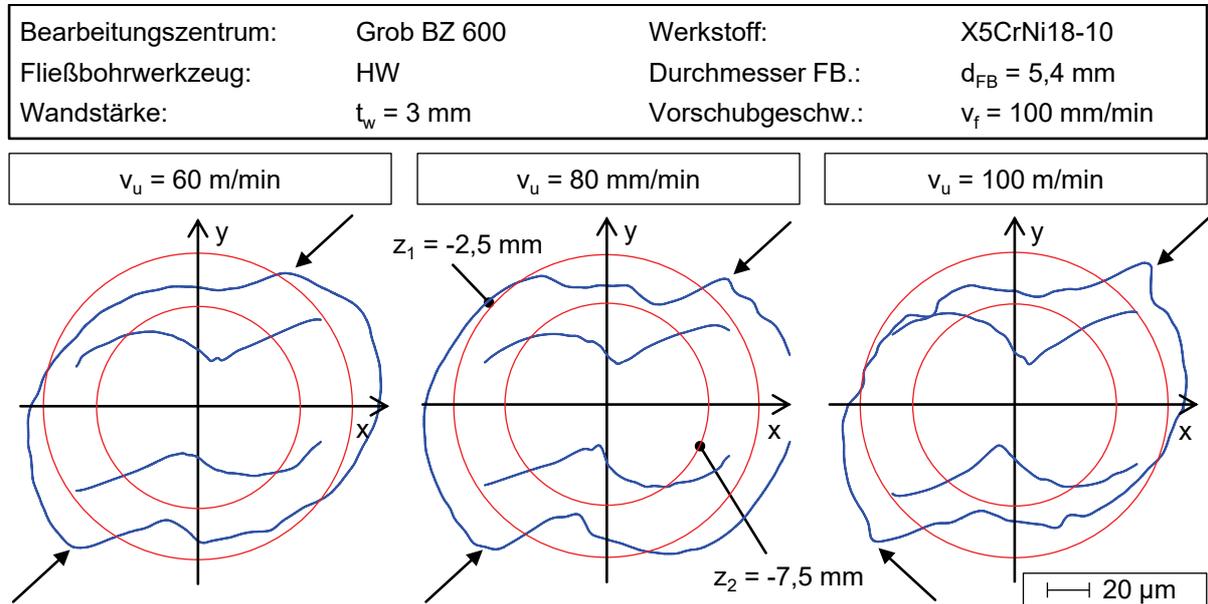


Abbildung 7-11: Rundheitsmessschriebe der Fließbohrungen bei $t_w = 3$ mm

Das verwendete keramische Werkzeug bringt mehr thermische Belastung beim Fließbohren des Edelstahl ein und beeinflusst somit die Gestalt der Bohrungen mehr als das Hartmetallfließbohrwerkzeug. **Abbildung 7-12** stellt die Mittelwerte der Durchmesserabweichungen von zwei Messungen bei einem Werkzeugdurchmesser von $d_{FB} = 5,4$ mm dar. Die Bearbeitung der Profile der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4$ mm werden in der Betrachtung herangezogen. Im Vergleich zu den Bohrungen, die mit Hartmetallwerkzeugen bearbeitet worden sind, wurden Bohrungen mit noch geringeren Durchmessern gefertigt, obwohl die eingesetzten keramischen Werkzeuge über denselben Nenndurchmesser von $D_N = 5,4$ mm verfügen.

Die größere thermische Belastung führt dazu, dass sich die Bohrungen nach dem Prozess auch stärker zurückdehnen. Darüber hinaus verfügen die Fließbohrungen über ein durchgehendes, mit einer zunehmenden Bohrtiefe wachsendes Untermaß. Auch hier wurden leicht konische Bohrungen gefertigt. Am Werkzeugeintritt sind die Durchmesser zwar kleiner als der Nenndurchmesser, jedoch größer als die im unteren Bereich der Bohrung. Der Einfluss der Parameter auf den Durchmesser lässt sich nicht feststellen.

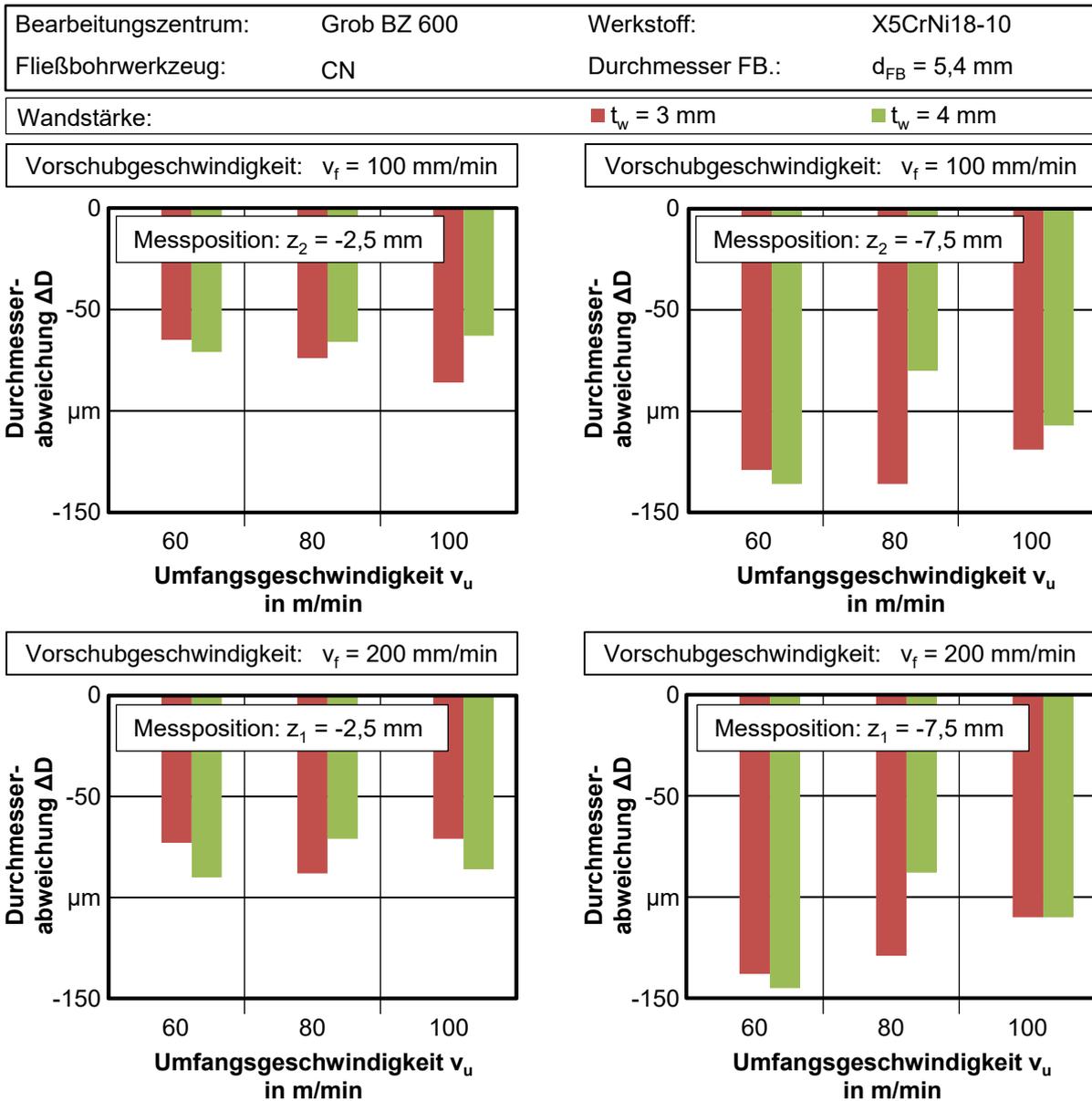


Abbildung 7-12: Durchmesserabweichungen der Fließbohrungen beim Einsatz von einem keramischem Werkzeug in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Analog zu den mit einem Hartmetallwerkzeug bearbeiteten Bohrungen weisen die mit keramischem Werkzeug gefertigten Bohrungen auch große Abweichungen zu einem idealen Kreis auf. **Abbildung 7-13** stellt die Rundheitsabweichungen der Bohrungen dar. Der Rundheitsfehler nimmt mit zunehmender Bohrtiefe zu. Des Weiteren erhöht sich der Rundheitsfehler durch den Einsatz des keramischem Werkzeugs leicht (vgl. Abbildung 7-10).

Dieser Sachverhalt kann auf die geringfügige Erhöhung der thermischen Belastung beim Fließbohren zurückgeführt werden. Nachdem die Bohrungen abgekühlt sind, zieht sich die ausgeformte Außenbohrungswand ein wenig stärker als beim Fließbohren mit dem Hartmetallwerkzeug zusammen. Bei Profilen der Wandstärke $t_w = 3 \text{ mm}$ tritt die größte Rundheitsabweichung auf, weil die dünne Außenbohrungswand stärker zusammengezogen wird als die Profile mit der Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$.

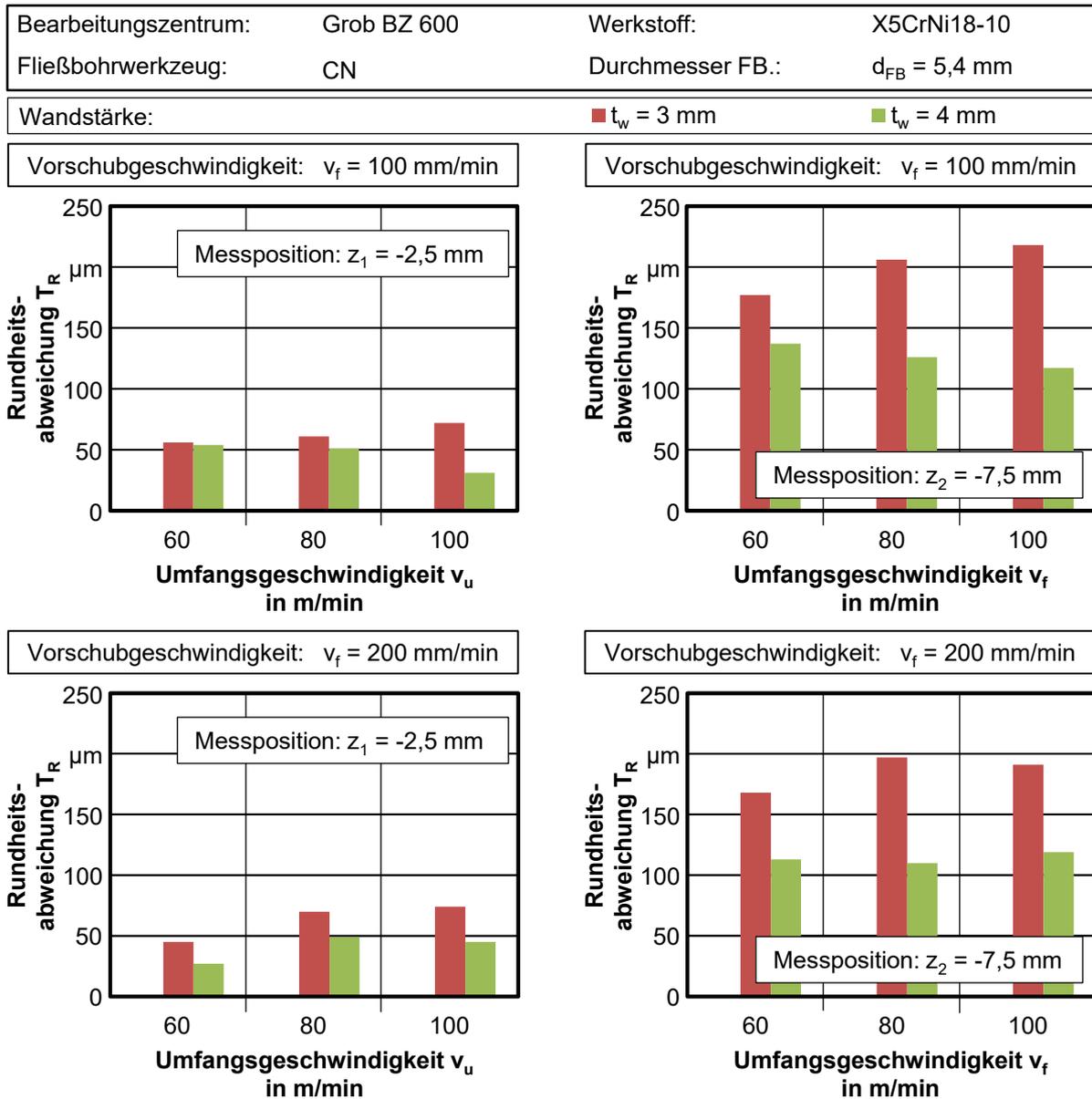


Abbildung 7-13: Rundheitsabweichungen der Fließbohrungen beim Einsatz eines keramischen Werkzeugs in Abhängigkeit der Versuchsparameter

Durch den Verzug der Bohrungswand wurden ovale Bohrungen mit dem keramischen Werkzeug erzeugt. In Längsrichtung des Profils ergeben sich die größten Durchmesser. Im Vergleich zu den Bohrungen, die mit dem Hartmetallwerkzeug bearbeitet worden sind, lässt sich die Vorbohrung besser in dem zylindrischen Bereich der ausgeformten Bohrungswand integrieren. Der Grund lässt sich mit der höheren Temperatur beim Einsatz des keramischen Werkzeugs erklären. Es entsteht keine messtechnisch feststellbare Bearbeitungsriefe in dem Bereich (vgl. Abbildung 7-11). **Abbildung 7-14** veranschaulicht dieses Verhalten am Beispiel der Rundheitsmessschiebe der Profile der Wandstärke von $t_w = 3$ mm.

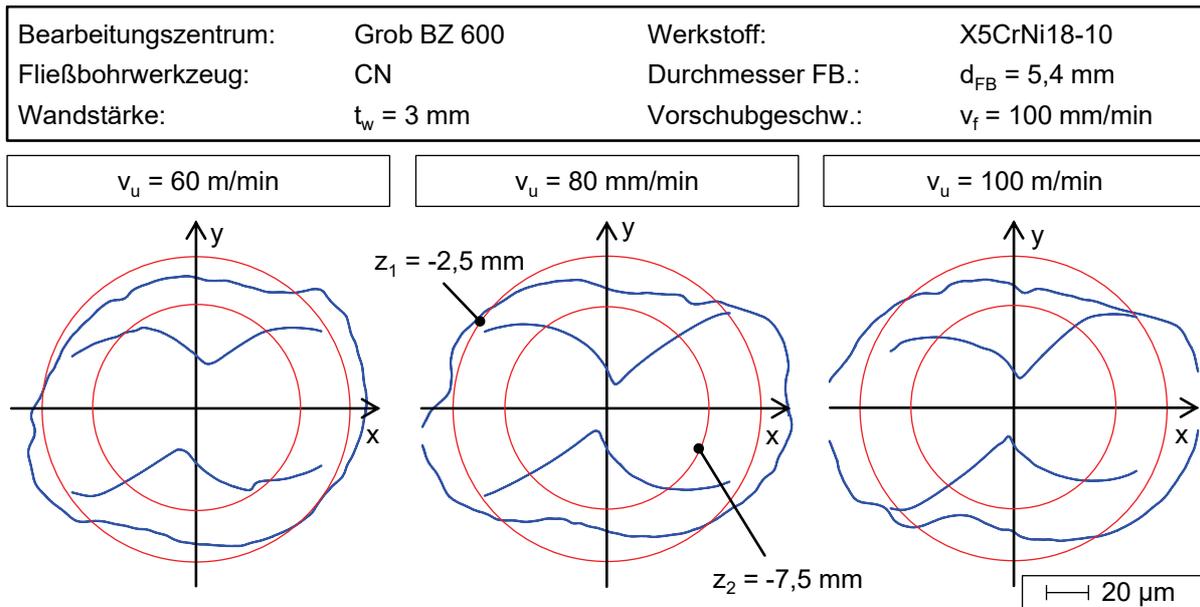


Abbildung 7-14: Rundheitsmessschriebe der Fließbohrungen bei $t_w = 3 \text{ mm}$

7.5 Längsschnitte der Bohrungen und Gewinde

Abbildung 7-15 stellt die Längsschnitte der Fließbohrungen sowie der angebrachten Gewinde verschiedener Wandstärke für den Einsatz des Hartmetallwerkzeugs dar. Bei den dargestellten Parameterkombinationen verläuft der Prozess stabil. Eine geschlossene Bohrungswand lässt sich ohne Rissbildung ausformen. Aufgrund der im Prozess andauernden Bildung und Trennung von Materialaufschweißungen ergibt sich eine raue Oberfläche. Dies ist insbesondere im Bereich der zylindrischen Bohrung zu erkennen. Die enorme thermische Belastung beim Fließbohren hat jedoch deutlich ihre Spuren auf der erzeugten Bohrungswand hinterlassen. Eine leichte blaue Verfärbung der Oberfläche lässt sich bei allen untersuchten Wandstärken im Bereich der konischen- und zylindrischen Bohrung erkennen. Nach dem Gewindeformen ist diese Verfärbung immer noch zu erkennen. Aufgrund des geringen Umfangs der Werkzeugspitze entsteht dort auch geringe Reibungswärme. Im Bereich des spitzen Bohrungsgrunds lässt sich daher keine Verfärbung erkennen. Diese Verfärbung in der zylindrischen Bohrung tritt auch bei den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4 \text{ mm}$ auf.

Diese Verfärbung lässt sich mit der Bildung der Anlauffarben beim Schweißen von Edelstählen vergleichen. Die Oxydation des Werkstoffs durch Sauerstoff verursacht bei den hohen Temperaturen die Bildung dieser Verfärbung, welche das Korrosionsverhalten des Werkstoffes beeinträchtigen [73]. Die Korrosionsbeständigkeit des Edelstahl besteht darin, dass sich eine passive Schutzschicht aus Chromoxid an der Oberfläche bildet. Dies verhindert eine weitere Korrosion des Werkstoffes [3]. Wenn ein Anlaufen der Oberfläche entsteht, ist die Bildung einer Passivschicht nicht mehr möglich und die Bohrungswand ist schutzlos der Oxidationsumgebung ausgesetzt. Die Verfärbung lässt sich chemisch oder mechanisch entfernen, damit der Werkstoff dann korrosionsbeständig wird [66]. Ähnliche Methoden werden eingesetzt, um z. B. die Schweißnähte nach dem Schweißen von Edelstählen nachzubehandeln und somit die Korrosionsbeständigkeit wieder herzustellen.

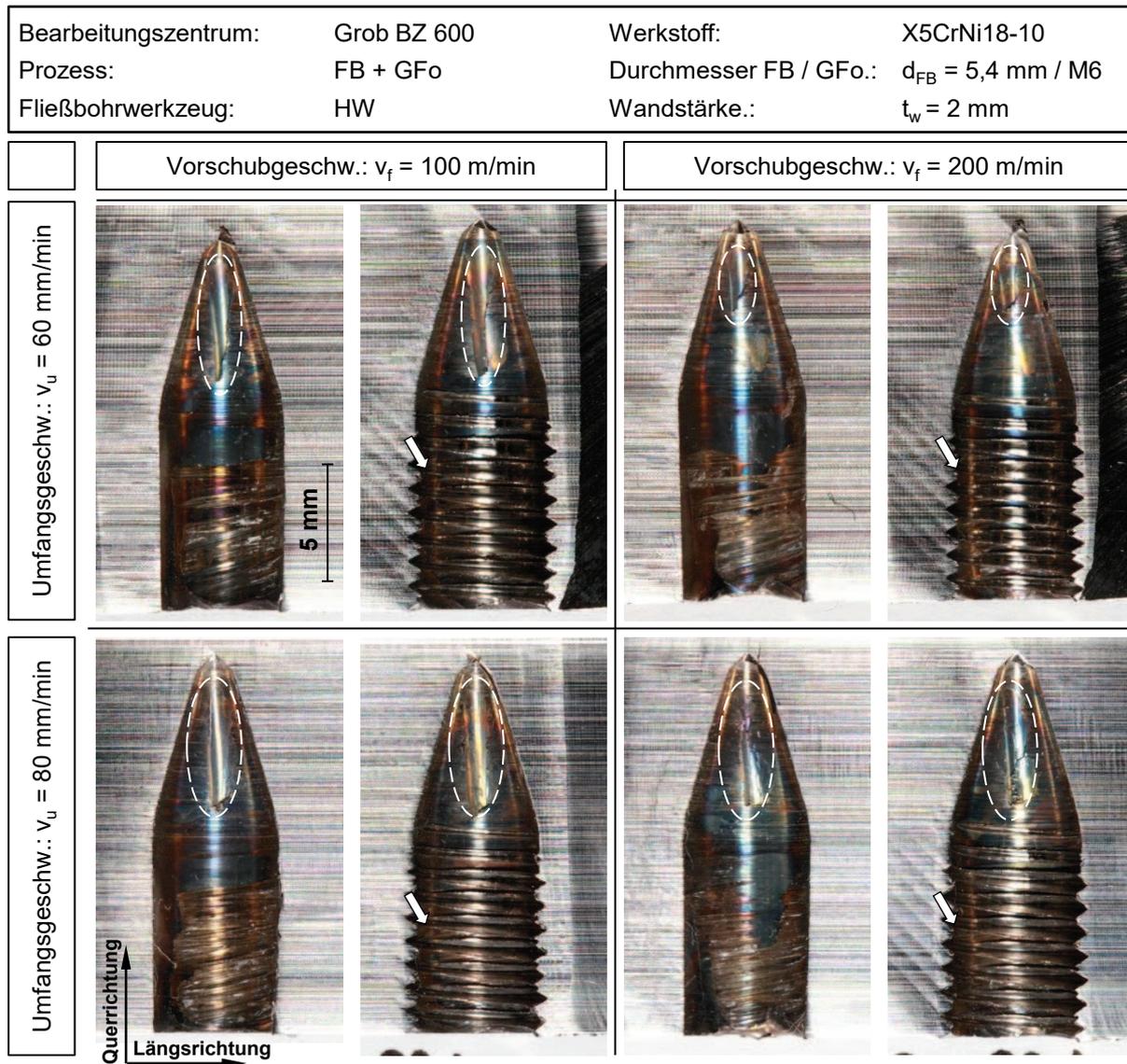


Abbildung 7-15: Längsschnitte der Fließbohrungen beim Einsatz von einem Hartmetallwerkzeug bei einer Wandstärke von $t_w = 2 \text{ mm}$

Beim Fließbohren der geringen Wandstärke von $t_w = 2 \text{ mm}$ entsteht ein Bereich im konischen Bohrungsgrund, der keine Bearbeitungsspuren aufweist. Dieser Bereich fängt ab dem Übergang von der Werkzeugspitze zu dem Werkzeugkonus an. Er verläuft entlang der Bohrungsachse und befindet sich orthogonal versetzt zur Profilebene. Er endet bei dem konisch- zylindrischen Übergangsbereich der Bohrung. Die Variation der Umfangs- und Vorschubgeschwindigkeit hat keinen deutlichen Einfluss auf dessen Bildung. Die Entstehung des Bereichs lässt sich mit der Art und Weise, wie das Material von dem Werkzeug ausgeformt wird, erklären.

Wie die mechanische Werkzeugbelastung zeigt, kann das Aufweiten des Profils als eine Art quasi-statischer Prozess betrachtet werden. Beim Fließbohren der Profile trennt die Werkzeugspitze das zum Teil erweichte Material und verdrängt es in Querrichtung, während der Werkzeugkonus und -übergang das Material weiter aufweiten und schließlich zur Bohrungswand ausformen. Der Übergang von der Werkzeugspitze zum Werkzeugkonus verläuft scharfkantig. In diesem Bereich ergibt sich eine Differenz beim Aufweiten des

Materials. Aufgrund der nicht symmetrischen Materialverteilung um das Werkzeug ist das Material im Bereich der Querrichtung des Profils wenig belastet. Es lässt sich stärker aufweiten als das Material in Längsrichtung. Wegen der Trägheit des Materials kann es nach dem Aufweiten nicht sofort den Werkzeugkonus abdecken und es bildet sich eine entlang der Bohrungsachse verlaufende Vertiefung. Im Bereich des Werkzeugkonus lässt sich ein Teil des Materials durch tangential Verschiebung in die Vertiefung bringen und diese lässt sich dadurch wieder schließen. Engbert beobachtete eine ähnliche Erscheinung beim stirnseitigen Fließbohren der Aluminiumlegierung EN AW-6060, vor allem bei Profilen geringer Wandstärke [48]. Da diese Vertiefung im konischen Bereich auftritt, hat sie praktisch keinen Einfluss auf das Gewinde.

In einem Bereich des Gewindes lässt sich erkennen, dass die Gewindespitzen aufgrund des lokalen größeren Durchmessers der Bohrung eine stärkere Zipfelbildung aufweisen (vgl. Abbildung 7-15).

Bei den Profilen größerer Wandstärke hat das Einbringen der Vorbohrung die Oberfläche der Fließbohrung deutlich beeinflusst. Die Ausformung der Vorbohrung führt dazu, dass eine spaltförmige Riefe im Bereich der Bohrung sichtbar ist. Beim Aufweiten wurde das Material um die Vorbohrung in tangentialer Richtung verschoben. Dadurch verläuft diese Bearbeitungsriefe versetzt zur Bohrungsmittelachse. **Abbildung 7-16** und **Abbildung 7-17** stellen die Längsschnitte der Fließbohrungen und der eingebrachten Gewinde der Profile bei den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4$ mm dar.

Insbesondere bei den Profilen mit der Wandstärke von $t_w = 3$ mm ist diese Riefe von der konischen bis zur zylindrischen Bohrungswand durchgehend erkennbar. Die Riefe lässt sich auch nach dem Gewindeformen in demselben Bereich erkennen. Bei den Profilen der Wandstärke von $t_w = 4$ mm beschränkt sich diese Riefenbildung auf dem konischen Bohrungsbereich. Im zylindrischen Bereich der Bohrung sowie im Bereich des Gewindes ist diese nicht zu erkennen.

Die Bearbeitungsriefe verschlechtert die Oberflächenbeschaffenheit der Bohrung. Da das Material beim Fließbohren auch hoher thermischer Belastungen ausgesetzt ist und somit Anlauffarben aufweist, besteht die Gefahr, dass die Korrosionsbeständigkeit an diesen Stellen am stärksten geschwächt ist. Wenn die erzeugten Gewinde durch festes Anziehen belastet werden, kann zusätzlich Spannungsrisskorrosion im Bereich der Gewindegründe unter Anwesenheit von chloridhaltigen und stark alkalischen Medien bereits bei kleinsten Mengen auftreten [3].

Neben dem Einsatz eines chemischen Beizens, um die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffs wieder herzustellen, ist auch eine Prozessgestaltung unter Schutzgas denkbar, da der Luftsauerstoff, welcher als Oxidationsmittel dient, durch den Einsatz eines Schutzgases ausgeschlossen werden kann. Eine Oxidation der erzeugten Innenbohrungswand lässt sich somit verhindern. Heiler entdeckte, dass die Anlauffarben unter dem Einsatz eines Schutzgases beim konventionellen Fließbohren der austenitischen Edelstähle reduziert wurden und eine erneute Bildung der Passivierungsschicht somit möglich war [71].

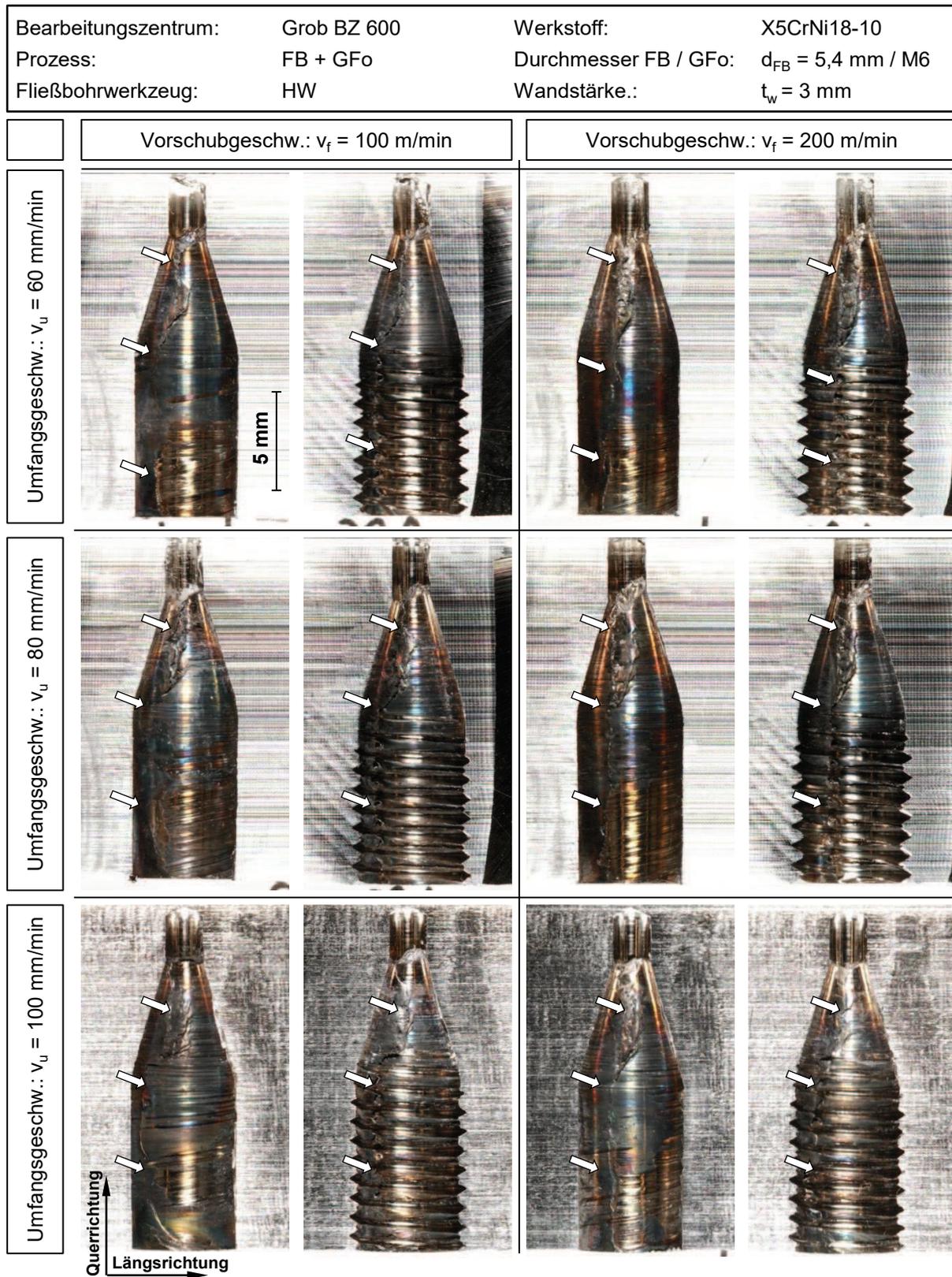


Abbildung 7-16: Längsschnitte der Fließbohrungen bei Einsatz von einem Hartmetallwerkzeug bei einer Wandstärke von $t_w = 3 \text{ mm}$

Bearbeitungszentrum: Grob BZ 600 Prozess: FB + GFo Fließbohrwerkzeug: HW		Werkstoff: X5CrNi18-10 Durchmesser FB / GFo: $d_{FB} = 5,4 \text{ mm} / M6$ Wandstärke.: $t_w = 4 \text{ mm}$		
	Vorschubgeschw.: $v_f = 100 \text{ m/min}$		Vorschubgeschw.: $v_f = 200 \text{ m/min}$	
Umfangsgeschw.: $v_u = 60 \text{ mm/min}$				
	Querrichtung	Längsrichtung		

Abbildung 7-17: Längsschnitte der Fließbohrungen bei Einsatz von einem Hartmetallwerkzeug bei einer Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$

Bohrungen mit ähnlicher Oberflächengüte lassen sich mit Hilfe eines keramischen Werkzeugs fertigen und die eingebrachten Gewinde weisen ebenfalls ein ähnliches Gewindeprofil auf. In **Abbildung 7-18** und **Abbildung 7-19** sind die Längsschnitte der Bohrungen und Gewinde

der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4$ mm dargestellt. Bei den Profilen mit der Wandstärke von $t_w = 3$ mm ergibt sich eine durchgehende Riefenbildung, welche durch die Ausformung der Vorbohrung entsteht. Bei größerer Wandstärke von $t_w = 4$ mm ist diese nicht zu erkennen.

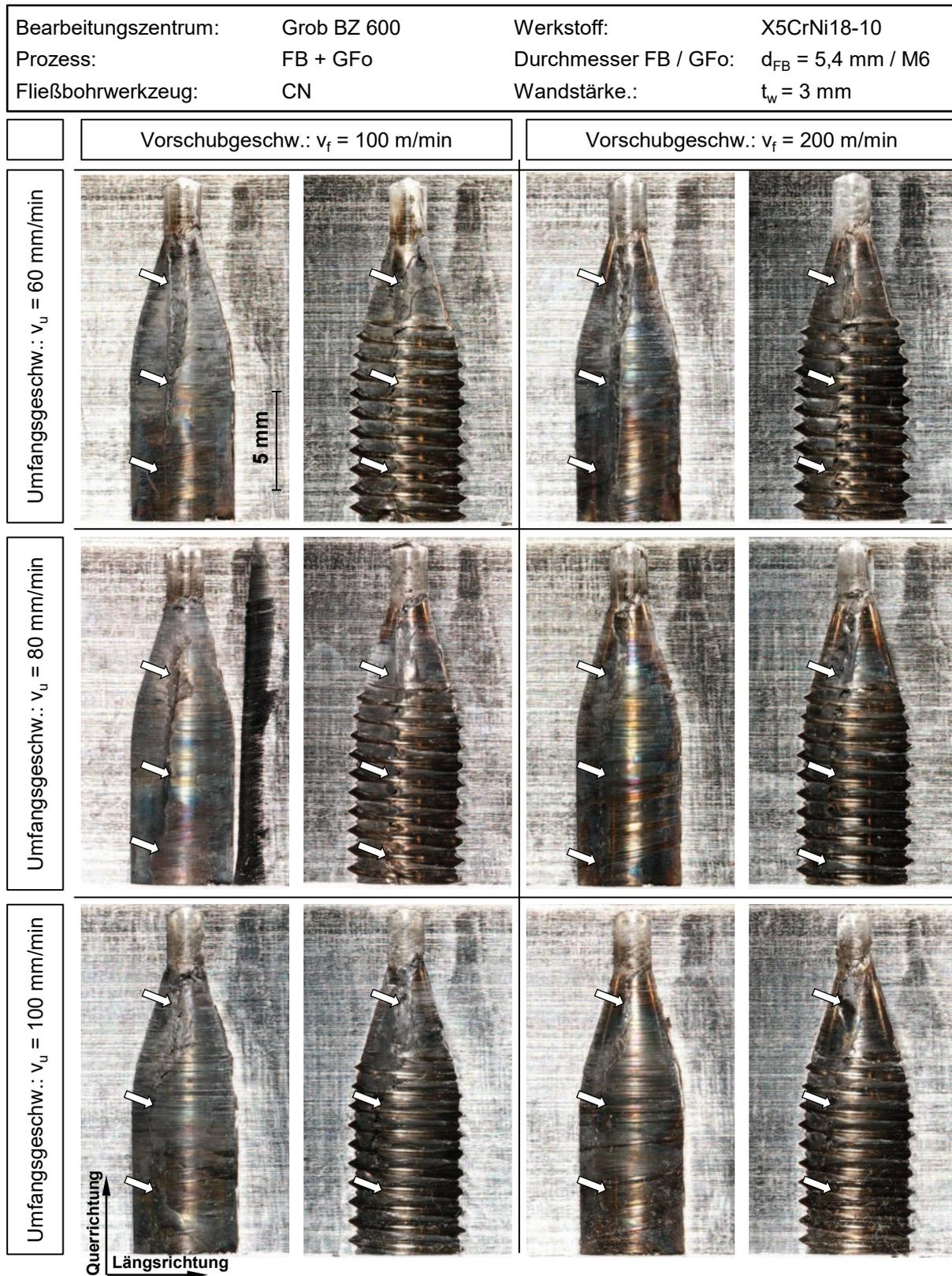


Abbildung 7-18: Längsschnitte der Fließbohrungen bei Einsatz von einem keramischen Werkzeug bei einer Wandstärke von $t_w = 3$ mm

Bearbeitungszentrum: Grob BZ 600 Prozess: FB + GFo Fließbohrwerkzeug: CN		Werkstoff: X5CrNi18-10 Durchmesser FB / GFo: $d_{FB} = 5,4 \text{ mm} / M6$ Wandstärke.: $t_w = 4 \text{ mm}$		
	Vorschubgeschw.: $v_f = 100 \text{ m/min}$		Vorschubgeschw.: $v_f = 200 \text{ m/min}$	
Umfanggeschw.: $v_u = 60 \text{ mm/min}$				
	Querrichtung Längsrichtung			

Abbildung 7-19: Längsschnitte der Fließbohrungen bei Einsatz von einem keramischen Werkzeug bei einer Wandstärke von $t_w = 4 \text{ mm}$

Aufgrund der noch größer gewordenen thermischen Belastung, die bei Einsatz eines keramischen Werkzeugs entsteht, weisen die Bohrungen im Bereich des konischen Bohrungsgrunds bereits eine graue Anlauffarbe auf, was auf eine Bildung einer Zunderschicht hinweist.

Die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes an den Stellen ist somit nicht mehr gegeben. Eine Nachbehandlung der Bohrungswand ist nötig, um den Werkstoff wieder korrosionsbeständig zu machen.

Im Vergleich zum Hartmetallwerkzeug erweist sich der Einsatz eines keramischen Fließbohrwerkzeugs als nicht besonders vorteilhaft. Anhand der durchgeführten Untersuchungen lässt es sich nur bei den Wandstärken von $t_w = 3 \dots 4$ mm einsetzen. Bei der geringsten Wandstärke von $t_w = 2$ mm ist kein stabiler Prozess möglich, während ein Hartmetallfließbohrwerkzeug bei den Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 60 \dots 80$ m/min und den Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 100 \dots 200$ mm/min für diese Wandstärke prozesssicher eingesetzt werden kann. Mit dem keramischen Werkzeug lässt sich mehr Reibungswärme erzeugen und es ermöglicht somit eine noch geringere mechanische Werkzeugbelastung. Die höhere thermische Bauteilbelastung führt jedoch zur Bildung einer Zunderschicht, welche sich negativ auf die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes auswirkt. Die Anschaffungskosten für ein solches Werkzeug sind deutlich höher als für ein Hartmetallfließbohrwerkzeug, was einen wirtschaftlichen Einsatz zusätzlich einschränkt.

7.6 Metallographische Untersuchungen der Bohrungsrandzone

Beim Fließbohren des Edelstahl verändert sich das Grundgefüge durch die enorme thermo-mechanische Belastung. Anhand eines Gefügebildes kann die Gefügeveränderung erläutert werden. Die Sichtbarmachung des Gefüges erfolgt durch den Einsatz von V2A-Beize bei einer Temperatur von $T = 65^\circ$. In **Abbildung 7-20** sind die Gefügestruktur sowie lokale Vergrößerungen eines Querschliffes einer Bohrung für eine Wandstärke von $t_w = 3$ mm dargestellt.

Die Bohrung wurde mit einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 60$ m/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 100$ mm/min bearbeitet. Ein Hartmetallwerkzeug kam dabei zum Einsatz. Die Drehrichtung des Werkzeugs ist nach links bei der dargestellten Ansicht. Der Querschliff hat einen Abstand von $a = 9$ mm zum Profilrand.

Im Bereich des Profils ist das ursprüngliche Gefüge des Werkzeugstoffes noch gut erkennbar (Ausschnitt A). Unmittelbar an der Bohrungsrandzone ist die Auslenkung des Materials in Drehrichtung des Werkzeugs zu erkennen. Im Bereich der ausgeformten Bohrungswand ist die Streckung der Körner festzustellen.

Der Bereich der Riefenbildung kann auch erkannt werden. Ausschnitt B des Gefügebildes stellt einen Teil dieses Bereiches dar. Es bilden sich dort schichtförmige Strukturen aufgrund des großen lokalen Umformgrads. Die Korngröße lässt sich schwer mit optischen Mikroskopen bestimmen. Die schwarze Farbe zwischen den Schichten in dem Bereich stellte eine Trennung des Materials dar, was durch eine Bildung oxidierten Schichten hervorgerufen werden kann. In diesem Bereich kann auch das Material gegen die Drehrichtung fließen, wie die lokale Fließrichtung im Ausschnitt B zeigt.

Die hohe thermische Belastung führt auch dazu, dass sich ein neues rekristallisiertes Gefüge trotz der kurzen Bearbeitungszeit in einem kleinen Bereich der Randzone der Bohrungswand bildet. In Ausschnitt C lassen sich solche orientierungslose Körner beobachten.

Bearbeitungszentrum:	Grob BZ 600	Werkstoff:	X5CrNi18-10
Fließbohrwerkzeug:	HW	Durchmesser FB.:	$d_{FB} = 5,4 \text{ mm}$
Umfangsgeschw.:	$v_u = 60 \text{ m/min}$	Vorschubgeschw.:	$v_f = 100 \text{ mm/min}$

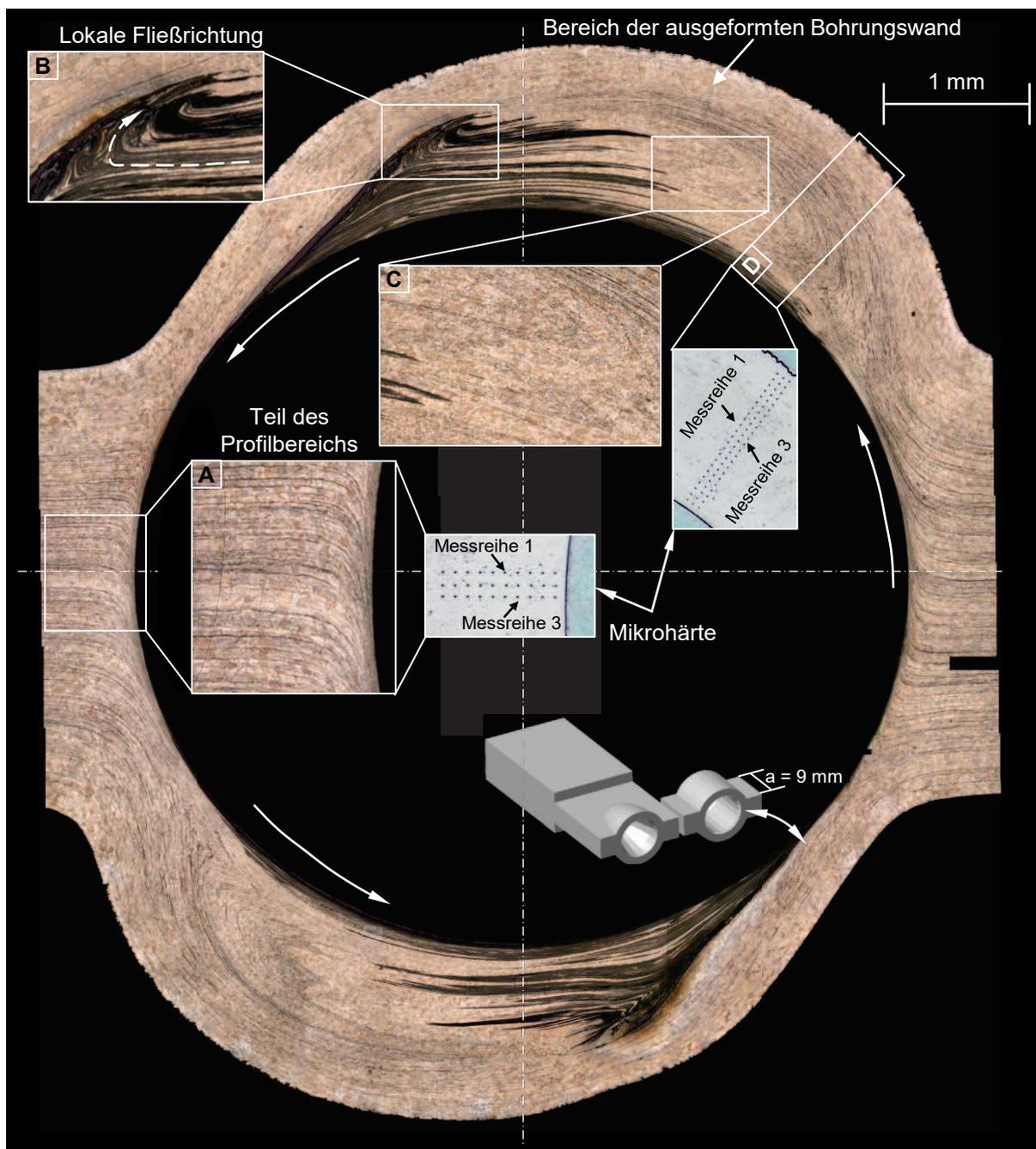


Abbildung 7-20: Gefügestruktur eines Querschnittes einer Fließbohrung

Nach dem Prozess ist die Bohrung direkt der Umgebungsluft ausgesetzt. Eine schnelle Abkühlung führt zu einem Verzug der Bohrung. Eine Restspannung kann innerhalb der Bohrungswand auftreten. Um die Gefügeänderung auf die mechanischen Eigenschaften des Materials zu untersuchen, wurden Mikrohärtmessungen nach Vickers durchgeführt. In Ausschnitt A und D sind die Messanordnungen der Eindrücke dargestellt. In den zwei gewählten Bereichen sind Gefügestrukturen mit verschiedenen Umformgraden vorhanden. Jeweils drei Messreihen in den gewählten Bereichen wurden durchgeführt.

Abbildung 7-21 stellt die Mikrohärteverläufe der beiden Bereiche in dem Gefügebild dar. Eine Härtesteigerung lässt sich trotz der unterschiedlichen Gefügestrukturen nur in unmittelbarer Umgebung zur Bohrungsrandzone erkennen. Mit zunehmendem Abstand zur Bohrungsrandzone fällt die Härte auf einem Wert ab, was als die Grundhärte des Materials betrachtet werden kann. Die im Prozess begleitende Kristallerholung führt zu keiner Härtesteigerung im Werkstoff. Die Härtesteigerung in der Bohrungsrandzone entsteht, da der Bereich am Ende des Fließbohrens ausgeformt ist und die Kristallerholung dort aufgrund der Abkühlung der Umgebungsluft nicht vollständig stattfindet.

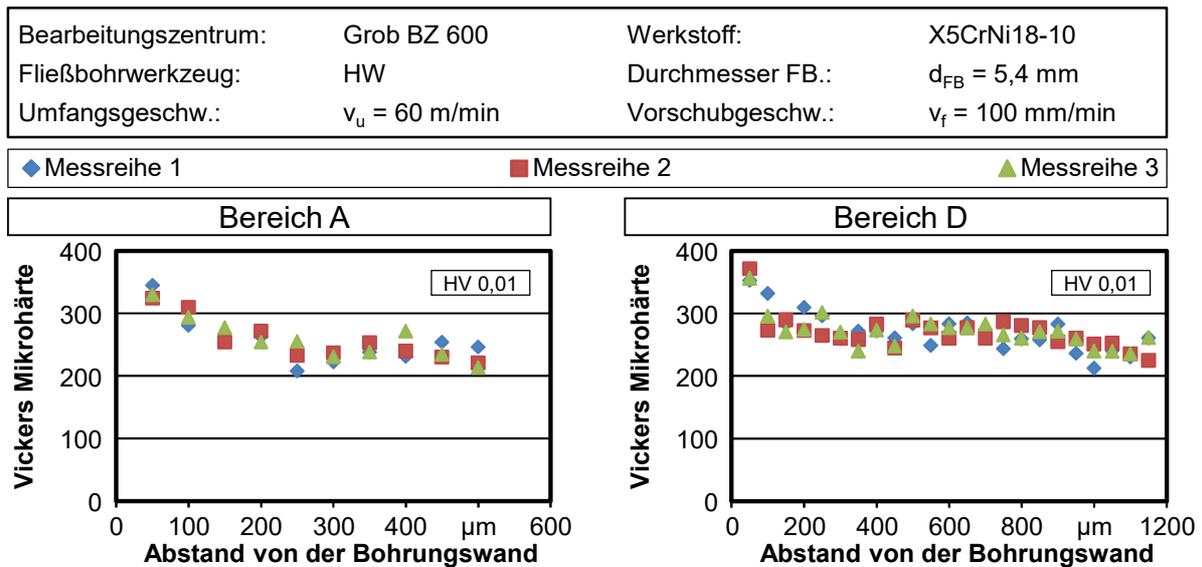


Abbildung 7-21: Mikrohärte in den ausgewählten Bereichen

7.7 Auszugsfestigkeit der Gewinde

Die eingebrachten Gewinde weisen eine hohe statische Festigkeit auf, was lediglich von der Wandstärke des Profils beeinflusst wird. Die Festigkeit wurde mit Hilfe des axialen Zugversuchs ermittelt. Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 wurden eingesetzt. Die Prüfschraube wurde manuell 9 mm tief in das Gewinde eingeschraubt. Die Schrauben-Gewinde-Verbindung wurde dann axial belastet, bis das Gewinde oder die Schraube versagte. **Abbildung 7-22** stellt die Mittelwerte der maximalen Auszugskraft aus zwei Messungen dar. Die Fließbohrungen wurden mit einem Hartmetallwerkzeug bearbeitet. Die Ergebnisse zeigen, dass die höchste Festigkeit des Gewindes bei den Profilen mit einer Wandstärke von $t_w = 3...4 \text{ mm}$ erreicht wurden. Die vor dem Fließbohren eingebrachte Vorbohrung wirkt nicht nachteilig auf die Festigkeit des eingebrachten Gewindes aus. Die Prüfschrauben brechen ab, während das Gewinde noch intakt ist. Die gebrochene Schraube lässt sich manuell aus dem Gewinde entfernen und das Gewinde weist keine Deformation auf. In dem Fall stellt die erfasste maximale Auszugskraft nicht die tatsächliche Festigkeit des Gewindes dar. Sie spiegelt die eigentliche Festigkeit der Schraube wider.

Die Gewinde der Profile mit der Wandstärke von $t_w = 2 \text{ mm}$ sind weniger belastbar als die der größeren Wandstärke. Während des Auszugsversuchs versagen die Gewinde. Trotzdem kann eine Auszugskraft von mehr als $F_z = 22 \text{ kN}$ erreicht werden. Risse an der Bohrungswand sowie eine plastische Verformung des Gewindes lassen sich erkennen. Die Rissbildung

verläuft entlang des Gewindegrunds, da die Materialstärke an der Stelle nach dem Gewindeformen am geringsten ist.

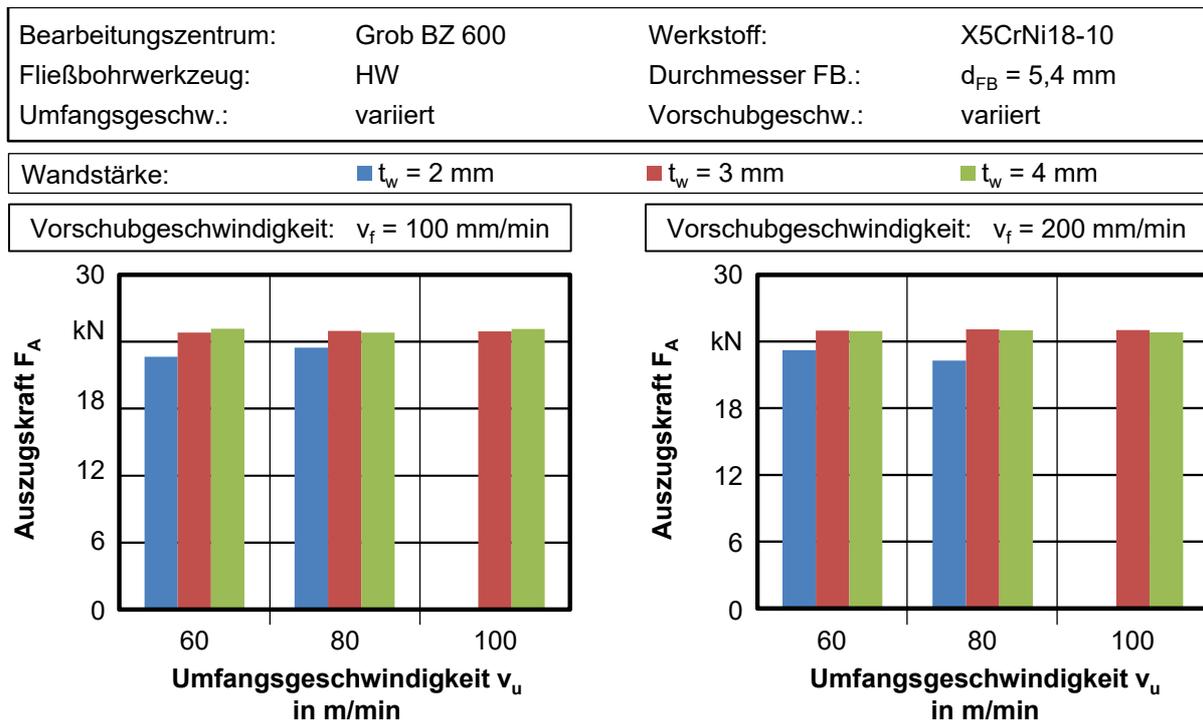


Abbildung 7-22: Auszugsfestigkeit der mit einem Hartmetallwerkzeug bearbeiteten Gewinde

Die Gewinde, deren Vorbohrung mit einem keramischen Werkzeug bearbeitet worden sind, zeigen ähnlich hohe statische Festigkeit. In **Abbildung 7-23** sind die Mittelwerte der maximalen Auszugskraft dargestellt. Auch hier versagen ausschließlich die Prüfschrauben bei einer Einschraubtiefe von $t_{Ge} = 9 \text{ mm}$. Das Gewinde weist keine Deformation nach dem Auszugsversuch auf. Wandstärke und Versuchsparameter beim Fließbohren haben keinen Einfluss auf die Festigkeit.

Die Untersuchungen der Auszugsfestigkeit zeigen, dass die eingebrachten Gewinde trotz der geringen Materialstärke hochfest sind. Es besteht die Möglichkeit, bei beibehaltener Festigkeit eine noch geringere Bohrtiefe und damit auch Gewindelänge zu wählen. Es wurde jeweils an einem Gewinde der Wandstärke von $t_w = 3 \dots 4 \text{ mm}$ Auszugsversuche mit einer Einschraubtiefe von $t_{GE} = 4 \text{ mm}$ durchgeführt. In dem Fall versagen auch nur die Prüfschrauben, während die Gewinde keine Deformation aufweisen.

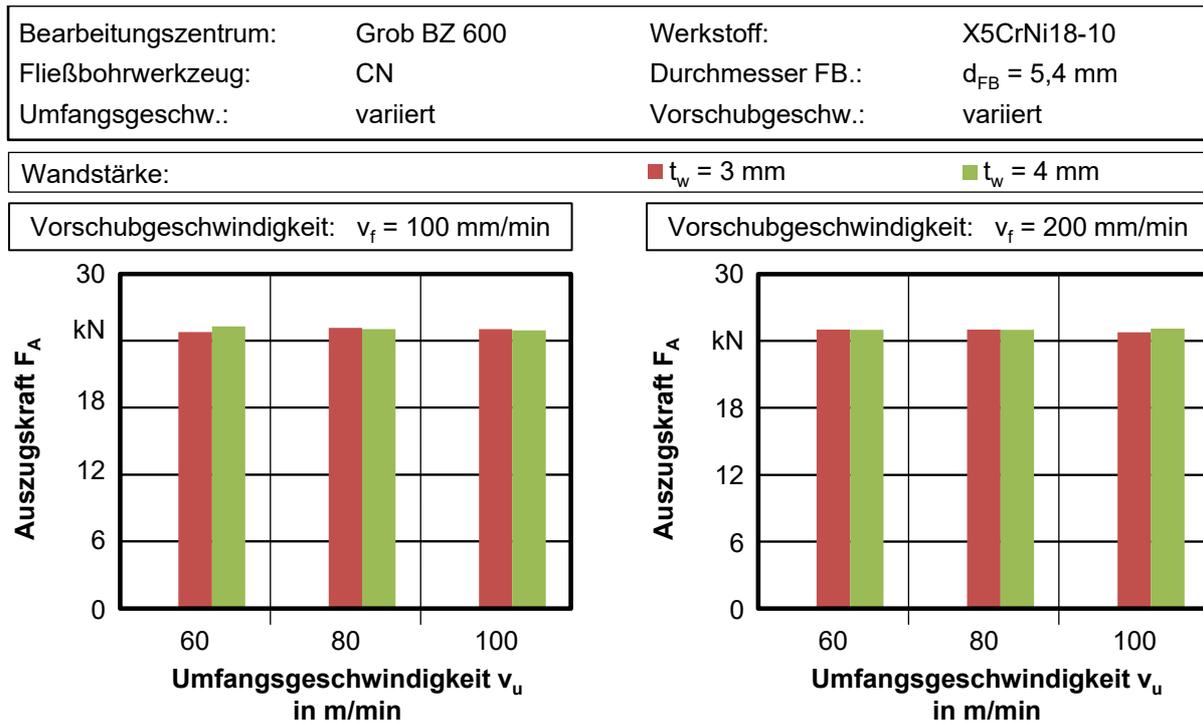


Abbildung 7-23: Auszugsfestigkeit der mit einem keramischen Werkzeug bearbeiteten Gewinde

7.8 Materialanhaftungen am Werkzeug

Aufgrund der im Vergleich zum industriellen Einsatz geringen Anzahl von Versuchen lässt sich keine Aussage über das Verschleißverhalten der verwendeten Werkzeuge treffen. Beim Fließbohren des Edelstahl führt die hohe thermische Belastung zu einer starken Materialanhaftung am konischen Teil des Hartmetallwerkzeugs und diese lässt sich schwer entfernen. Dafür ist die Adhäsionsneigung des Hartmetalls gegenüber Eisen verantwortlich. Nach wenigen Bohrungen sind Anhaftungen deutlich am konischen Werkzeugteil zu erkennen. **Abbildung 7-24** links stellt den konischen Bereich eines unbenutzten Werkzeugs dar, während rechts derselbe Bereich eines Werkzeugs nach 80 Bohrungen gezeigt wird.

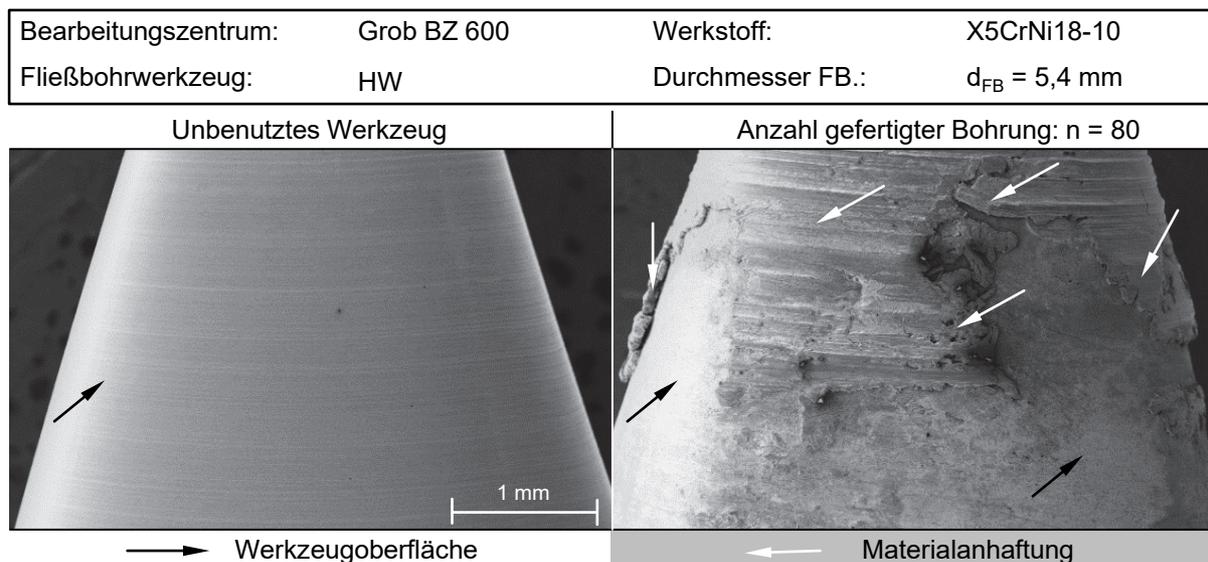


Abbildung 7-24: Aufschweißungen am konischen Werkzeugteil eines Hartmetallfließbohrers

Aufgrund der noch geringen Anzahl der bearbeiteten Bohrungen lässt sich neben Materialanhaftungen keine eindeutige Verschleißerscheinung erkennen. Die Materialanhaftungen können sich bei einer erneuten Bearbeitung von der Werkzeugoberfläche ablösen. Infolge der zwischen dem Werkzeug und Werkstoff herrschenden Adhäsion können Partikel von dem Hartmetallwerkzeug abgetrennt werden und zum Verschleiß führen [83].

An der Oberfläche des keramischen Werkzeugs bilden sich auch Materialanhaftungen aus Zunder und einem Überrest des Trennmittels. In **Abbildung 7-25** sind ein unbenutztes keramisches Werkzeug und ein Werkzeug nach 70 Bohrungen dargestellt. Im Vergleich zu den Anhaftungen an den Hartmetallwerkzeugen lassen sich diese durch die Behandlung mit einem Schleifpapier leicht entfernen.

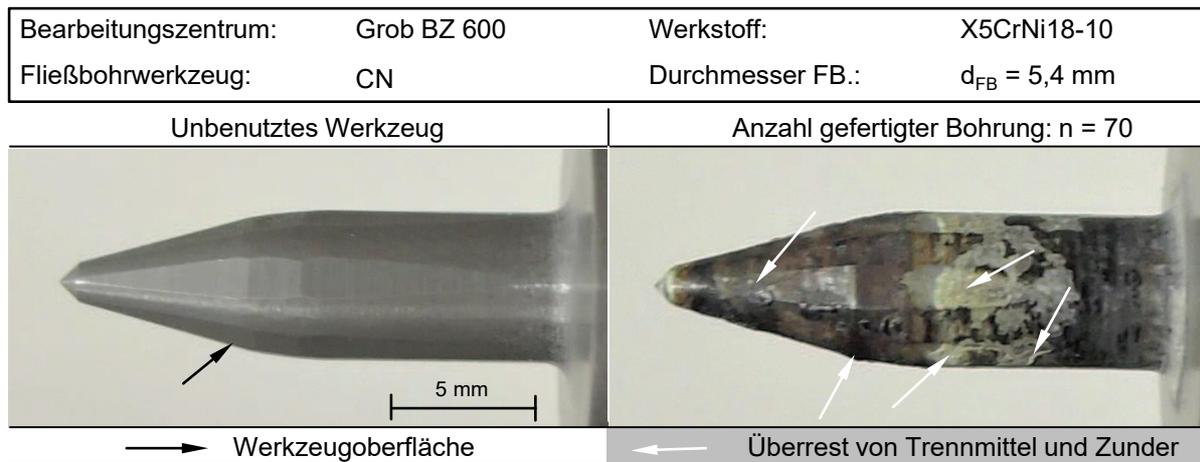


Abbildung 7-25: Materialanhaftungen an einem keramischen Fließbohrer

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit liefern grundlegende Erkenntnisse zu einem neuartigen Anwendungsfall des Fließbohrens bezogen auf ein breites Werkstoffspektrum. Das stirnseitige Fließbohren in Kombination mit einer anschließenden Gewindebearbeitung eröffnet völlig neue Möglichkeiten für die Gestaltung einer Fügestelle in dünnwandigen Bauteilen. Durch ein radiales Aufweiten des Profilmaterials beim Fließbohren ist es möglich, Bohrungen mit einem deutlich größeren Durchmesser als die lokale Materialstärke bei verschiedenen Werkstoffen auszuformen. In die ausgeformten Bohrungen lassen sich Innengewinde zerspantechnisch oder umformtechnisch einbringen. Angesichts der ganz unterschiedlichen Eigenschaften der untersuchten Materialien müssen jedoch individuelle Bearbeitungsmethoden eingesetzt werden, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erlangen. Die Umfangsgeschwindigkeit ist der dominante Faktor beim Fließbohren. Durch diese werden die thermomechanischen Werkzeugbelastungen, die erreichten Temperaturen sowie die Bohrungsqualität maßgeblich bestimmt.

Das stirnseitige Fließbohren der Kunststoffe Polyamid PA66 und Polyvinylchlorid PVC-U erfolgt in einem deutlich niedrigeren Umfangsgeschwindigkeitsbereich als bei metallischen Werkstoffen. Beim Fließbohren des Werkstoffs Polyamid PA66 nimmt die maximale Werkzeugbelastung mit erhöhter Umfangsgeschwindigkeit ab, während diese mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt. Die größten maximalen Werkzeugbelastungen ergeben sich bei der Parameterkombination von $v_u = 10$ m/min und $v_f = 60$ mm/min. Eine höhere Umfangsgeschwindigkeit führt zu höheren Temperaturen im Prozess, die den Schmelzpunkt des Werkstoffes übersteigen können. Aus diesem Grund weisen die erzeugten Bohrungen starke ovale Formen sowie Materialanhaftungen an der Bohrungswand auf. Mit Hilfe des Gewindebohrens lassen sich metrische ISO-Gewinde der Größe M6 bei einer Wandstärke von $t_w = 5$ mm einbringen, welche über gut gebildete Gewindeprofile verfügen. Die erzeugten Gewinde weisen ähnliche maximale Auszugkräfte um ca. $F_{A,Max} = 4$ kN auf. Bei dem Werkstoff PVC-U wirken sich die Parameterkombinationen mit ähnlicher Tendenz auf die thermomechanischen Werkzeugbelastungen sowie die Gestalt der erzeugten Bohrungen aus. Bei einer niedrigen Umfangsgeschwindigkeit von $v_u = 2,5$ m/min können Fließbohrungen mit geringen Materialanhaftungen an der Bohrungswand gefertigt werden. Innengewinde lassen sich ebenfalls mit Hilfe des Gewindebohrens herstellen und diese weisen bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten von $v_u = 2,5 \dots 5$ m/min ähnliche statische Festigkeiten wie bei PA66 auf. Der Einsatz modifizierter Werkzeuge beim Fließbohren der beiden Kunststoffe zeigt, dass mit einer vereinfachten Werkzeuggestalt ähnliche Bohrungsqualitäten wie beim Einsatz von kommerziellen Werkzeugen erreicht werden können. Durch gezielte Änderungen am Prozess, die zu einer noch niedrigeren Temperatur beim Fließbohren führen, kann die Qualität der Bohrungen deutlich erhöht werden. Für künftige Untersuchungen kann eine Variation der Wandstärke sinnvoll sein. Darüber hinaus sollte die Einsatzmöglichkeit von selbstschneidenden Blechschauben untersucht werden, da Schraubenverbindungen somit direkt nach dem Fließbohren am Bauteil realisiert werden könnten.

Das stirnseitige Fließbohren der Magnesiumknetlegierung AZ 31 ermöglicht es, Bohrungen mit einer geschlossenen Bohrungswand bei einem Wandstärkenbereich von $t_w = 4 \dots 7$ mm zu fertigen. Dabei steigen die maximalen mechanischen Werkzeugbelastungen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und Wandstärke an, während diese bei erhöhter Umfangsgeschwindigkeit abnehmen. Wärmebildaufnahmen zeigen, dass die Umfangsgeschwindigkeit das Fließbohren maßgeblich beeinflusst. Höhere Temperaturen entstehen bei hoher Umfangsgeschwindigkeit. Die erzeugten Bohrungen weisen gute Oberflächenbeschaffenheiten auf. Die umformtechnisch erzeugten M6-Gewinde weisen aufgrund der geringen Verformbarkeit der Magnesiumlegierung zwar Mikrorisse im Bereich der Gewindespitze auf, verfügen aber trotzdem über eine hohe statische Festigkeit. Anhand der Ergebnisse der Auszugsversuche bestimmt vor allem die Wandstärke die Festigkeit der Gewinde. Zur Erhöhung der statischen Festigkeit des Gewindes kann das Gewindeformen mit einer Erwärmung des Werkstoffes eingesetzt werden, um bessere Gewindeprofile zu erzeugen. Des Weiteren kommt auch das Gewindenachformen in Frage.

Neben der Magnesiumknetlegierung AZ31 können gute Ergebnisse mit dem stirnseitigen Fließbohren bei dem Messingwerkstoff CuZn37 und sogar bei der Aluminiumgusslegierung AlSi7Mg realisiert werden. Bei dem Messing CuZn37 können Bohrungen mit hoher Oberflächengüte erzeugt werden. Die nachfolgend umformtechnisch eingebrachten M6-Gewinde verfügen über eine statische Festigkeit, die weit über der Festigkeit der als Prüfdorn eingesetzten Schrauben liegt. Während alle Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 in Auszugsversuchen versagen, bleiben die Messinggewinde intakt und weisen keine Deformation im Gewindeprofil auf. Die Aluminiumgusslegierung AlSi7 verfügt über eine sehr gute Gießbarkeit, gilt aber als sehr schlecht umformbar bei Raumtemperatur. Eine Machbarkeitsstudie zum stirnseitigen Fließbohren zeigt, dass sich eine werkstückseitige Erwärmung des Bauteils positiv auf den Prozess auswirkt. Wenn dünne Aluminiumgussprofile vorher erhitzt werden, weisen sie eine verbesserte Vorformbarkeit auf. Somit können Fließbohrungen mit geringen Rissen bzw. keinen Rissen eingebracht werden. Eine werkstückseitige Erwärmung ist jedoch wirtschaftlich betrachtet nicht effizient aufgrund der zu erhitzenden großen Bauteilmasse. Künftig kann eine lokale Erwärmung der zu bearbeitenden Stelle mit Hilfe von Induktionsgeräten oder Gasbrennern durchgeführt werden, um rissfreie Fließbohrungen zu erzeugen. Auch hier zeigt das stirnseitige Fließbohren sein großes Potenzial. Gussteile wie Zylinderköpfe aus der Aluminiumgusslegierung verfügen über viele Verstärkungsrippen, welche potenzial mit der neuen Anwendung des Fließbohrens bearbeitet werden können.

Das stirnseitige Fließbohren des Edelstahl X5CrNi 18-10 erweist sich im Vergleich zu den anderen untersuchten Werkstoffen als schwierig. Die deutlich höhere thermische Belastung bei der Fließbohrbearbeitung und die hohe Festigkeit des Edelstahl stellen die größte Schwierigkeit dar. Messtechnisch kann eine maximale Temperatur im Bereich von $T = 1000$ °C bestimmt werden. Bei einer Wandstärke von $t_w = 2$ mm brechen eingesetzte Werkzeuge schon bei ungünstiger Parameterkombinationen ab, ohne vorher Verschleiß aufzuweisen. Mit Hilfe einer Tiefbohrung mit einem Durchmesser von $D = 2$ mm lässt sich die Werkzeugspitze zum Teil entlasten. Somit ergeben sich auch geringere mechanische Belastungen. Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sogar geringere Vorschub-

kräfte beim Fließbohren der Profile mit einer Wandstärke von $t_w = 3$ mm und einer Vorbohrung als beim Fließbohren der Profile mit einer Wandstärke von $t_w = 2$ mm ohne eine Vorbohrung gemessen werden. Obwohl Material durch die Bearbeitung der Vorbohrung aus dem Profil entnommen wird, verfügen die in die fließgebohrten Bohrungen eingebrachten M6-Gewinde über eine hohe statische Festigkeit. In Auszugsversuchen versagen nur die Gewinde in den Profilen mit der Wandstärke von $t_w = 2$ mm, während Gewinde in größeren Wandstärken von $t_w = 3...4$ mm zum Versagen der Prüfschrauben führen. Der Einsatz eines keramischen Werkzeugs aus Siliziumnitrid erweist sich als nicht vorteilhaft gegenüber Werkzeugen aus Hartmetall. Die Beschaffungskosten sind deutlich höher. Das spröde Werkzeug lässt sich praktisch nicht bei der Wandstärke von $t_w = 2$ mm anwenden und weist eine sehr kurze Standzeit auf. Erst das Einbringen einer Vorbohrung bei dickeren Profilen ermöglicht dessen Einsatz. Über das Verschleißverhalten der Werkzeuge lässt sich aufgrund des im Gegensatz zu den industriellen Anwendungen geringeren Versuchsumfangs keine konkrete Aussage treffen. Materialanhaftungen an beiden Werkzeugtypen treten schon nach einigen Bohrungen auf. Insbesondere sind diese bei Hartmetall schwer zu entfernen. Diese Anhaftungen können auch den Verschleiß eines Hartmetallwerkzeugs beschleunigen, wenn sie sich wiederholt an der Werkzeugoberfläche bilden und dann wieder abgetrennt werden. Es wird trotzdem vorgeschlagen, Hartmetallwerkzeuge in weiteren Untersuchungen einzusetzen. Gegenmaßnahme für die hohe thermische Belastung kann eine widerstandsfähige Werkzeugbeschichtung sein. In dem Fall kann das Hartmetallwerkzeug eventuell durch die abschirmende Wirkung der Beschichtung geringer thermisch belastet werden. Des Weiteren können Werkzeuge mit integrierten Kühlkanälen in Frage kommen, um aktiv die thermische Belastung zu verringern.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E.; Kuhrke, B.; Rothenbücher, S.: Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. In: Wissenschaftsmagazin der TU Darmstadt, 2011, S. 64-67
- [2] Ames, W.A.: US 4.132.097: Method for forming collared holes. US-Patent, 1979
- [3] Bargel, H.J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde, 11. Auflage, Springer Verlag, 2012
- [4] BASF SE.: „Presse-Information“ am 08. 06. 2012. Firmenschrift, P 290/12, 67056, Ludwigshafen
- [5] Becker, W.; Braun, D.: Kunststoff Handbuch – Teil 2: Polyvinylchlorid, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1985
- [6] Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Band III, Springer Verlag, 2013
- [7] Biermann, D.; Grünert, S.; Steiner, M.: A macroscopic approach towards the finite element simulation of tapping and thread milling of continuously reinforced extrusions. In: Production Engineering, 4 (2010) 6, S. 607-613
- [8] Biermann, D.; Hammer, N.; Pantke, K.: Gewindenachformen in Magnesiumwerkstoffen. In: VDI-Z. Integrierte Produktion, (2007) 2, S. 37-40,
- [9] Biermann, D.; Hannich, S.: Analysis of flow drilling and thread forming regarding the angle between workpiece surface and tool axis. In: International Congress and Exhibition on Light Materials (Euro LightMAT), 3.9.-5.9. 2013, Bremen
- [10] Biermann, D.; Hartmann, H.; Liu, Y.; Iovkov, I.: Effizientere Produktion durch gezielte Prozess- und Werkzeugentwicklung. In: Innovations of Sustainable Production for Green Mobility /Energy-Efficient Technologies in Production - 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2014, Proceedings Part 1, 2014, S. 125-143
- [11] Biermann, D.; Liu, Y.: Innovative Flow Drilling on Magnesium Wrought Alloy AZ31. In: Procedia CIRP, PROCIR1448, (2014), S. 209-214
- [12] Biermann, D.; Pantke, K.: Zerspanen und Formen in einem Werkzeug kombiniert. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2009)9, S. 71-74
- [13] Centerdrill GmbH: Centerdrill Praxishandbuch – Gesammeltes Wissen über das Fließlochformen. <http://www.centerdrill.de/> → Download → Technische Informationen → centerdrill_handbuch_2012_de.pdf, Stand: 08.2014
- [14] Chow, H. M.; Lee, S. M.; Yang, L. D.: Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel. In: Journal of Materials Processing technology, 207 (2008) 1-3, S. 180-186
- [15] Crawford, R.J.; Keating, T.G.; Chee, W. Y.; Tan, Y. L.: Flow drilling of plastics. In: Plastics, Rubber and Composites processing and Applications 16 (1991) 4, S. 263-270
- [16] David R. (Hrsg.): Handbook of Chemistry and Physics. Internet Version 2005, S. 6-175
- [17] Dekkers, G.J.: EP 0.150.518 B1: Flowdrill, particularly adapted to be used in a hand drilling machine. European Patent, 1984
- [18] Deutsches Kupferinstitut: Werkstoff-Datenblätter CuZn37. <https://www.kupferinstitut.de/> → Beratung → Werkstoff Datenblätter → Kupfer-Zink (Messing) → CuZn37.pdf. Stand: 08.2014

- [19] DIN 2244: Gewinde – Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [20] DIN 336: Durchmesser für Bohrer für Gewindekerndurchmesser von geschnittenen Gewinden. Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [21] DIN 7592 Teil 3: Blechdurchzüge mit Gewinde – Fertigungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 1983
- [22] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag, 2003
- [23] DIN 8583-5: Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 5: Eindrücken – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [24] DIN 8589-2: Fertigungsverfahren Spanen – Teil 2: Bohren, Senken, Reiben – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [25] DIN EN 10020: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000
- [26] DIN EN 10088-1: Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [27] DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [28] DIN EN 28839: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Schrauben und Muttern aus Nichteisenmetallen. Beuth Verlag, Berlin, 1991
- [29] DIN EN ISO 1043-1: Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen – Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [30] DIN EN ISO 898-1: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regalgewinde und Feingewinde. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [31] DIN EN ISO 898-2: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 2: Muttern mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regalgewinde und Feingewinde. Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [32] DIN ISO 10666: Bohrschrauben mit Blechschraubengewinde Mechanische und funktionelle Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [33] DIN ISO 513: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [34] DIN 13-1: Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nennmaße für Regalgewinde – Gewinde-Nenndurchmesser von 1 mm bis 68 mm. Beuth Verlag, 1999
- [35] DIN 7500-1: Gewindefurchende Schrauben für Metrisches ISO-Gewinde – Teil 1: Technische Lieferbedingungen für einsatzgehärtete und angelassene Schrauben. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [36] DIN 7975: Blechschraubenverbindungen – Anwendung – Richtwerte für Kernlochdurchmesser. Beuth Verlag, Berlin, 1989
- [37] DIN EN 10088-1: Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [38] DIN EN 10095: Hitzebeständige Stähle und Nickellegierungen. Beuth Verlag, Berlin, 1999

- [39] DIN ISO 68-1: Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Grundprofil – Teil 1: Metrisches Gewinde. Beuth Verlag, 1999
- [40] Doege, E.; Janssen, St.; Wieser, J.: Kennwerte für die Magnesiumumformung am Beispiel von AZ31– Characteristic values for the forming of the magnesium alloy AZ31. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 32, 2001, S.48-51
- [41] Dröder, K.G.: Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesium-knetlegierungen. Dissertation, Universität Hannover, 1999
- [42] Düring, M.; Karabet, A.; Viehweger, B.; Lindemann, J.; Zhang, P.; Šupík, V.; Leyens C.: Magnesium-Knetlegierungen: Innovative Leichtbauwerkstoffe für den Automobilbau. In: Forum der Forschung, 19(2006), S. 41-46
- [43] Echtle, L.; Müller, H.: Rißbehaftete Messingrohre. In: Praktische Metallographie, 35 (1998) 9, S.509-512
- [44] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe: Struktur –Eigenschaften –Anwendungen. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1999
- [45] EJOT GmbH & Co. KG.: EJOT FDS® – Die fließlochformende Schraube für höherfeste Blechverbindungen. Informationsbroschüre, <http://www.industrie.ejot.de/> → Produkte → FDS® → Downloads → INFO_EJOT_FDS.pdf, Stand: 14.01.2015
- [46] Emuge-Werk Richard Glimpel.: Handbuch der Gewindetechnik und Frästechnik – Anwendungen, Tipps, Tabellen. Erlangen, Publicis Corp. Publ., 2004
- [47] EN ISO 8734: Zylinderstifte aus gehärtetem Stahl und martensitischem nichtrostendem Stahl. Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [48] Engbert, T.: Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011
- [49] Engbert, T.; Biermann, D.; Zabel, A.: Fließbohren stahlverstärkter Aluminiumstrangpressprofile. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2009) 12, S.35-58
- [50] Engbert, T.; Biermann, D.; Zabel, A.: Fließbohren stahlverstärkter Aluminiumstrangpressprofile. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2009) 12, S. 35-38
- [51] Engbert, T.; Biermann, D.; Zabel, A.: Fließbohren und Gewindeformen an Mehrkammerhohlprofile. In: VDI-Z. Integrierte Produktion, 152 (2010) 3, S. 40-42
- [52] Engbert, T.; Biermann, D.; Zabel, A.: Internal Threads for Thin-Walled Sections. In: Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, 5.9.-9.9. 2010, Yokohama, Japan, S. 601-606
- [53] Engbert, T.; Biermann, D.; Zabel, A.; Pietzka, D.; Tekkaya, A. E.; Ben Khalifa, N.: Composite Extrusion and Threading of Continuously Reinforced Aluminium Profiles. In: International Aluminium Journal, 86 (2010) 4, S. 36-41
- [54] Engbert, T.; Heymann, T.; Biermann, D.; Zabel, A.: Flow drilling and thread forming of continuously reinforced aluminium extrusions. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225 (2011) 3, S. 398-407
- [55] Enghauser, W. L.: US 1.906.953: Method of Forming Manifolds. US-Patent, 1933
- [56] Everett D. Hougen: US 3.559.445: Piercing tool for sheet material. US-Patent, 1971
- [57] Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P. (Hrsg. Alle Drei): Polymer Engineering – Technologien und Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [58] Feher, J.J.: US 3.429.171: Radius Spin drill. US-Patent, 1969
- [59] Fischer, U. (Hrsg.): Tabellenbuch Metall. 43. Auflage, Haan-Gruiten, Verlag, 2005

- [60] Flowdrill Fließlochformwerkzeuge GmbH: Effizient und spanlos verbinden – Flowdrill. Firmenschrift. <http://flowdrill.com/de/downloads/> → Produkt Informationen → Flyer_Flowdrill_De.pdf, Stand: 05.2014
- [61] Flowdrill Fließlochformwerkzeuge GmbH: Flowdrill – Technisches Handbuch, 2002
- [62] Fogle, H.D. et al.: US 2.991.551: Method and apparatus for forming holes in pipes. US-Patent, 1961
- [63] Friedrich, H.E.; Mordike, B.L.: Magnesium Technology Metallurgy. Springer Verlag, 2006
- [64] Fritz A.H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 8. Auflage, Springer Verlag, 2008
- [65] Gies C.: Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE. Dissertation, Universität Kassel, 2005
- [66] Gumpel P.: Rostfreie Stähle – Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungsweise. 2. Auflage, Expert Verlag
- [67] Haberhauer, H.; Bodenstein, F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung. 17. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [68] Hahn, F.; Seidel, W.: Werkstofftechnik Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung. 9. Auflage, Hanser Verlag, 2012
- [69] Head, Jr. et al.: US 4.428.214: Flow drilling process and tool therefor. US-Patent, 1984
- [70] Hechtle, D.; Peter Kopton, P.; Meyer, R.: Punch Tap revolutioniert die Gewindeherstellung. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2014) 9, S. 1-3
- [71] Heiler, R.: Fließlochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen. Dissertation, Universität Kassel, 1999
- [72] Heinrichs, H.J.; Schuth, M.: DE4224131 A1: Verfahren zur Herstellung eines Anschlußstutzens. Deutsches Patent, 1994
- [73] Henkel, G.; Rau, J.; Henkel, B.: Topographie und Morphologie funktionaler Edelstahloberflächen. Expert Verlag, 2008
- [74] Hiby, F.K.: GB 2.091.610A: Flow drilling tools. UK-Patent, 1981
- [75] Hoffman, H.; Neugebauer, R.; spur, G.: Handbuch der Fertigungstechnik. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2012
- [76] Hoogenboom, A.J.: US 4.454.741: Flow drill for the provision of holes in sheet material. US Patent, 1984
- [77] Illgner, K. H.; Esser, J.: Schrauben Vademecum. 9. Auflage, Rasch Verlag, Bramsche, 2001
- [78] InfraTec GmbH.: Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, 2010.
- [79] Jywe, W.; Chen, C.-J.: Developing a tapping and drilling measurement system for a performance test using a laser diode, position-sensing detector, and laser interferometer. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. Engineering Manufacture, 220(2006), S. 2077-2086
- [80] Kalweit, A.; Paul, C.; Peters, S.; Wallbaum, R.: Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. VDI-Buch, Springer Verlag, 2012
- [81] Kinzie, P.A.: Thermocouple Temperature Measurement. John Wiley & Sons Inc, 1973
- [82] Kleiner, S.: Magnesium und seine Legierungen. In: Feinstbearbeitung technischer Oberflächen – 6. Internationales IWF-Kolloquium, 18./19. April, 2002

- [83] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1 – Dreh, Fräsen, Bohren. 8. Auflage, Springer Verlag
- [84] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4 – Umformen. 5. Auflage, Springer Verlag
- [85] Kolaska, H.; Dreyer, K.: Hartmetalle, Cermets und Keramiken als Verschleißbeständige Werkstoffe. In: Metall – Wirtschaft Wissenschaft Technik, Band 45, (1991) Heft 3, S. 224-235
- [86] Koltzenburg, S.; Maskos, M.; Nuyken, O.: Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- [87] Koppka, F.; Sahn, A.: Magnesiumzerspanung auf dem Vormarsch. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2002)10, S. 14-20
- [88] Koppka, F.; Sahn, A.: Magnesiumzerspanung auf dem Vormarsch. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2002)10, S.14, 16, 18, 20
- [89] Kopton, P.: DE 102010054476 A1: Verfahren zum Herstellen eines Gewindes in einem Werkstück. Deutsches Patent, 2012
- [90] Kopton, P.; Hechtle, D.; Glimpel, H.: Verfahren und ein Werkzeug jeweils zum Erzeugen eines Gewindes in einem Werkstück. Deutsches Patent, 2013
- [91] Kretschmer, G.: Ein Betrag zum Fließlochformen von Blechdurchzügen. Dissertation, Universität - Gesamthochschule, 1980
- [92] Kretschmer, G.: Fließlochformen – Verfahren zur spanlosen Herstellung von Durchzügen. In: WT – Werkstattstechnik, 67 (1977) 11, S. 667-669
- [93] Kretschmer, G.: Fließlochformen. In: Fertigungstechnik – Berichte aus Forschung und Praxis, 1996
- [94] Kretschmer, G.: Furchen von Gewinde in fließlochgeformten Durchzügen bei dünnen Werkstücken. In: MM – Maschinenmarkt, Würzburg, 89 (1983) 98, S. 2329-2332
- [95] Kretschmer, G.: Genaue Temperaturbestimmung beim Fließlochformen schont Werkzeug und Spindel. In: MM – Maschinenmarkt, Würzburg, 87 (1981) 96, S. 2087-2090
- [96] Kretschmer, G.: Schmiermittel macht es möglich Fließlochformen und Gewindefurchen zum Herstellen von Durchzügen in Bauteilen eignet sich auch für Aluminium. In: MM – Maschinenmarkt, Würzburg, 93 (1987) 18, S. 80-83
- [97] Kurek, R.: Karosserie-Leichtbau in der Automobilindustrie – Theorie und Praxis. Vogel Verlag, Würzburg, 2011
- [98] Larikka, L.: US 3.884.060: Automatic flanging drill apparatus, US-Patent, 1975
- [99] Lee, S. M.; , Chow, H. M.; Huang, F. Y.; Yan, B. H.: Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49 (2009) 1, S. 81-88
- [100] Lee, S. M.; Chow, H. M.; Yan, B. H.: Friction Drilling of IN-713LC Cast Superalloy. In: Materials and Manufacturing Processes, 22 (2007) 7/8, S. 893–897
- [101] Lehmann, A.: Metallbrände richtig löschen. In: Feuerwehr – Retten Löschen Bergen, HUSS-Verlagsgruppe Berlin München, Oktober 2010, S. 54-55
- [102] Leroy, A.: FR 1.189.384: Procédé et outil de formation de collets, et collets résultant de ce procédé. French Patent, 1959
- [103] Lieneweg, F.: Handbuch Technische Temperaturmessung. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1976

- [104] Liu, Y.; Schumann, S.; Biermann, D.: Thermomechanische Betrachtung des Fließbohrens – Grundlagenuntersuchung der Bohrungsbearbeitung dünnwandiger Kupferprofile. In: wt - Werkstattstechnik online, 104 (2014) 1/2, S. 10-15
- [105] Liu, Y.; Hannich, S.; Biermann, D.: Fügestellen erzeugen – Fließbohren der Magnesium-Knetlegierung AZ31. In: WB – Werkstatt und Betrieb, 147 (2014) 3, S. 22-26
- [106] Lopes, J. C. O.: Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des Fließlochformens. Dissertation, Universität Kassel, 1999
- [107] Lux, S.; Zeppelin, B.: Herstellung von Innengewinden. Verlag Moderne Industrie, 2000
- [108] Michelfeit, S.: Werkstoffgesetze einer AlSi-Gusslegierung unter Hochtemperaturbeanspruchung in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012
- [109] Miller, S. F.: Experimental Analysis and Numerical Modeling of the Friction Drilling Process. Dissertation, University of Michigan, 2006
- [110] Miller, S. F.; Blau, P. J.; Shih, A. J.: Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium. In: Journal of Materials Engineering and Performance, 14 (2005) 5, S. 647-653
- [111] Miller, S. F.; Li, R.; Wang, H.; Shih, A. J.: Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128 (2006) 3, S. 802-810
- [112] Miller, S. F.; Tao, J.; Shih, A. J.: Friction drilling of cast metals. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46 (2006) 12/13, S. 1526-1535
- [113] Mordike, B.; Denkena, B.: Fügen von Magnesiumwerkstoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 147, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [114] Murtfeldt Kunststoffe GmbH & Co. KG.: Technische Daten Murylon® A <http://www.murtfeldt.de> → Produkte → Kunststoffe → Technische Kunststoffe → Murylon® A Technische Daten → td_ws_tws2_murylon_a_de.pdf, Stand: 04.2014
- [115] Neugebauer, R.; Ortmann, S.: Revolution am Kragen – Neues Verfahren ermöglicht effektive und kostengünstige Herstellung von Blechdurchzügen an Rohren und Hohlprofilen. In: MM – Maschinenmarkt, (2006) 17, S.90-93
- [116] Neugebauer, R.; Rabe, M.; Jesche, F.: Grundlagenuntersuchungen zum neuen Fügeverfahren Fließbohrfügen (x-tack). EFB-Forschungsbericht, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, AiF-Forschungsbericht, Band 340, 2011
- [117] Oettel, H.; Schumann, H. (Hrsg.); Metallografie. 14. Auflage, Wiley-Vch Verlag, Weinheim
- [118] Ontool GmbH: In zwei Schritten zum hochbelastbaren Gewinde – Fließend produzieren. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2011) 4, S.61
- [119] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. 2. Auflage, Springer Verlag, 2007
- [120] Otto Fuchs KG.: Magnesiumlegierungen – Strangpressprodukte und Schmiedestücke. Informationsbroschüre, <http://www.otto-fuchs.com/> → Werkstoff → Magnesium → Werkstoffinformationen → Magnesium. Fuchs_WI_Mg_D_Scr.pdf, Stand: 07.2014

- [121] Otto Suhner AG: Fließbohren als Basis für das Gewinden in dünnwandige Werkstoffe – Bohren, wo es am dünnsten ist. In: WB – Werkstatt und Betrieb, (2008) 10, S. 104-105
- [122] Pasternak, H.; Hoch, H.U.; Füg, D.: Stahltragwerke im Industriebau. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 2012
- [123] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien. 12. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008
- [124] Ramsay, J. M. G.: Fließlochformen und Gewindefurchen in dünne Bleche und Rohre aus Kupfer und Kupferlegierungen. Dissertation, Universität Kassel, 2008
- [125] Rautenberg J.; Engbert, T.; Andreas Zabel, A.; Biermann, D.: Mechanische Bearbeitung von verbundstranggepressten Aluminiumprofilen und Leichtbauverbindungselementen. In: Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen. Zwischenbericht Phase 2, Fortschritt – Berichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009, S. 85-114
- [126] Richard, V.; Müller, A.: Kunststoff Handbuch, Band VI – Polyamide: Herstellung, Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, München, 1966
- [127] Schäfer, M.: Analyse und Beschreibung des Innengewindefertigungsverfahrens Gewindefurchen aus Basis eines Modellversuchs. Dissertation, Universität Kassel, 2004
- [128] Schröder, H. (Hrsg.): Lexikon der Feuerwehr. 2. Auflage 2001, Kohlhammer Verlag, 3. Auflage, 2005
- [129] Schwarz, O.: Kunststoffkunde. 8. Auflage, Vogel Business Media Verlag, Würzburg, 2005
- [130] Schwarzmann, P.: Thermoformen in der Praxis. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [131] Silke, M.: Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen. In: Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen, Band 29, Technische Universität Chemnitz, 2008
- [132] Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 – Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 8. Auflage, Springer Verlag, 2012
- [133] Streppel, A.H.; H J J Kals, H.J.J.: Flowdrilling: a Preliminary Analysis of a New Bush-Making Operation. In: CIRP Annals, 32 (1983) 1, S.167-171
- [134] T-DRILL Industries Inc.: Tube Fabrication – Solutions for Automotive and HVAC Industries. <http://www.t-drill.com/> → Technology → Tee Forming → Tee Forming – Brazed joint → Solutions_for_Automotive_and_HVAC_Industries.pdf, Stand: 12.07.2014
- [135] THERMOCOAX GmbH.: Which thermocouple to choose ? Informationsschrift. <http://www.thermocoax.com> → Products → Thermocouples →E193_4_TC_English.pdf, Stand: 08.2014
- [136] ThyssenKrupp Materials International: Werkstoffdatenblatt Austenitischer korrosionsbeständiger Stahl, Werkstoffnummer: 1.4301. http://www.edelstahl-service-center.de/tl_files/ThyssenKrupp/PDF/Datenblaetter/1.4301.pdf
- [137] ThyssenKrupp Plastics GmbH: Technische Kunststoffe im Überblick. <http://www.thyssenkrupp-plastics.de> → Downloads → Technische Kunststoffe im Überblick → 0750_Techn_Kunststoffe_150dpi.pdf

- [138] Tikal, F.; Vollmer, C.; Pecher, U.: Heiße Furcher für Magnesiumgewinde. In: MAV - Maschinen Anlagen Verfahren, Oktober 1997, S.68-71
- [139] Tikal, F.; Heiler, R.: Fließbohren in Stahl-Hohlprofilen bis 12,5 mm Wanddicke. In: Bänder Bleche Rohr, 35 (1994) 6, S. 32-33, 36-38
- [140] Tikal, F.; Heiler, R.: Gewinde in Aluminiumlegierungen – Höchste Produktqualität beim Fließlochformen und Gewindefurchen. In: wt –Produktion und Management, 86 (1996) 10, S. 511-515
- [141] Tikal, F.; Heiler, R.; Müller-Kraus, F.U.: Fließlochformen und Gewindefurchen in austenitischen Edelstählen. In: Maschinenmarkt, 102 (1996) 47, S. 28-33
- [142] Tikal, F.; Vollmer, C.; Zeißler, M.: Gewindefurchen in Magnesiumlegierungen. In: WB – Werkstatt und Betrieb, 130 (1997) Heft 3, Seite 161-163
- [143] Tikal, F.; Vollmer, C.; Zeißler, M.: Magnesium – Werkstoff der Zukunft. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 28 (1997) 6, S. 276-279
- [144] Tikal, F.; Vollmer, C.; Zeißler, M.: Magnesiumgewinde kalt gefurcht. In: Mav: Maschinen, Anlagen, Verfahren, Heft 6, 1997, S. 61
- [145] Tikal, F.; Weingaertner, W.L.; Heiler, R.; Lopes, J.C.: Fließlochformen und Gewindefurchen in Baustahl St37. In: Bänder Bleche Rohre, 38 (1997) 7/8, S. 50,52,54-57
- [146] Tikal, F.; Gies, C.: Thermofließlochformen in Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen. In: Aluminium – International Journal for Industry, Research an Application, 81 (2005) 4, S. 301-307
- [147] Tikal, F.; Gies, C.; Holsten, S.: Neue Anforderungen neue Werkzeuge – Thermofließlochformen in Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen. In: Fertigungstechnik, VDI-Z Integrierte Produktion, 146 (2004) 7/8, S. 40-42
- [148] Tschätsch, H.; Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. Springer Verlag, 2010
- [149] Van Geffen, J.A.: US 3.939.683: Piercing tools. US-Patent, 1976
- [150] Van Geffen, J.A.: US 4.175.413: Methods and apparatuses for forming by frictional heat and pressure holes surrounded each by a boss in a metal plate or the wall of a metal tube. US-Patent, 1979
- [151] Van Geffen, J.A.: US 4.177.659: Rotatable piercing tools for forming holes surrounded each by a boss in metal plates or the wall of metal tubes. US-Patent, 1979
- [152] Van Geffen, J.A.: US 4.185.486: Rotatable piercing tools for forming bossed holes. US-Patent, 1980
- [153] VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen. Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [154] VDI Richtlinie 3334 – Blatt 1: Maschinelle Innengewindefertigung. Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [155] VDI Richtlinie 3359: Blechdurchzüge Kragenziehen. Beuth Verlag, 2013
- [156] Vollmer, C.: Beitrag zu den Möglichkeiten der spanlosen Innengewindeherstellung in Magnesiumlegierungen. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 523, Düsseldorf, VDI Verlag, 1999
- [157] Waldmann, O.: EP2705916 A2: Bohrwerkzeug sowie Verwendung eines Bohrwerkzeugs. Europäisches Patent, 2014
- [158] Weißbach, W: Werkstoffkunde. 16. Auflage, Vieweg Verlag, 2007

-
- [159] Welsch, N.; Schwab J.; Liebmann C. Chr.: Materie – Erde, Wasser, Luft und Feuer. Springer Spektrum, 2013
- [160] Wiese, S.: Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau und Verbindungstechnik – Das Verhalten im Mikrobereich. Springer Verlag, 2010
- [161] Wittke, P.; Walther, F.; Liu, Y.; Biermann, D.: Charakterisierung des quasistatischen und zyklischen Verformungsverhaltens von fließgebohrten Aluminium-Innengewinden aus EN AW-6060. In: Tagung Werkstoffprüfung – Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis, 28.11.-29.11. 2013, S. 121-126
- [162] Wosnitza, F.; Hilgers, H.: Energieeffizienz und Energiemanagement – Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012
- [163] Zurawski, W.: Leistungssteigerung bei der Innengewindefertigung. Carl Hanser Verlag, Wien, 1990

Bisher erschienene Bände in der Schriftreihe des ISF

- Band H2 Zabel, A.: Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen.
Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
ISBN: 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse.
Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005.
ISBN: 3-8027-8760-9
- 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 Durchmesserern.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016.
ISBN: 978-3-8027-8791-1, URI: <http://hdl.handle.net/2003/35829>
- Band 86 Goeke, S.: Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinishen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016.
ISBN: 978-3-8027-8790-4, URI: <http://hdl.handle.net/2003/35742>
- Band 85 Iovkov, I.: Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016,
ISBN: 978-3-8027-8787-4, URI: <http://hdl.handle.net/2003/35377>
- Band 84 Rautert, C.: Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016.
ISBN: 978-3-8027-8789-8

- Band 83 Hartmann, H.: Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016.
ISBN: 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016.
ISBN: 978-3-8027-8785-0, URI: <http://hdl.handle.net/2003/35116>
- 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 80 Odendahl, S.: Entwicklung eines multiskaligen Simulationssystems zur Analyse und Optimierung von Zerspanprozessen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8786-7
- Band 79 Steiner, M.: Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edelstahls X5CrNi18-10.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8781-2
- Band 77 Heymann, T.: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8782-9

- Band 74 Peuker, A.: Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8779-9
- Band 73 Schlenker, J.: Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015.
ISBN: 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014.
ISBN: 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013.
ISBN: 978-3-8027-8775-1
- Band 70 Sacharow, A.: Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013.
ISBN: 978-3-8027-8774-4
- Band 69 Baschin, A.: Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8772-0
- Band 66 Heilmann, M.: Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8770-6

- Band 65 Scheidler, A. V.: Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8768-3
- Band 64 Pantke, K.: Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8769-0
- Band 63 Terwey, I.: Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8766-9
- Band 62 Würz, E.: Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8764-5
- Band 60 Felderhoff, J. F.: Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012.
ISBN: 978-3-8027-8765-2
- Band 59 Kessler, N.: Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8763-8
- Band 58 Paffrath, K.-U.: Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8762-1
- Band 57 Faraz, A.: Experimental Study On Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8761-4

- Band 56 Hossam, M.: Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8759-1
- Band 55 Kersting, P.: Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8757-7
- Band 54 Marschalkowski, K.: Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011.
ISBN: 978-3-8027-8758-4
- Band 53 Weckerle, T.: Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
ISBN: 978-3-8027-8756-0
- Band 52 Kahleyß, F.: Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünfachsigem Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
ISBN: 978-3-8027-8753-9
- Band 51 Mohn, T.: Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
ISBN: 978-3-8027-8751-5
- Band 49 Rautenberg, J.: Simultane fünfachsigem Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbauteilen.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010.
ISBN: 978-3-8027-8754-6
- Band 48 Enk, D.: Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräs Werkzeugen zur HSC-Bearbeitung.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009.
ISBN: 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren.
Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009.
ISBN: 978-3-8027-8749-2

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

- Band 36 Kötter, D.: Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2
- Band 35 Hesterberg, S.: Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle - Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5
- Band 34 Damm, P.: Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8
- Band 33 Surmann, T.: Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsiges Fräsen von Freiformflächen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1
- Band 32 Stautner, M.: Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4
- Band 31 Peters, C.: Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8731-5, ISBN 978-3-8027-8731-7
- Band 30 Hagedorn, M.: Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen - Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006.
ISBN: 3-8027-8730-7, ISBN 978-3-8027-8730-0
- Band 29 Kalveram, M.: Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005.
ISBN: 3-8027-8729-3, 978-3-8027-8729-4
- Band 28 Koehler, W.: Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
ISBN: 3-8027-8728-5

- Band 27 Loichinger, A.: Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
ISBN: 3-8027-8726-9
- Band 26 Du, S.: Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
ISBN: 3-8027-8726-9
- Band 25 Schulte, M.: Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
ISBN: 3-8027-8725-0
- Band 24 Lange, M.: Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003.
ISBN: 3-8027-8724-2
- Band 23 Guntermann, G.: Aspekte des Hochgeschwindigkeitshartfräsens im Werkzeug- und Formenbau.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
ISBN: 3-8027-8723-4
- Band 22 Johlen, G.: Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003.
ISBN: 3-8027-8722-6
- Band 21 Schwietering, C.: Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003.
ISBN: 3-8027-8721-8
- Band 20 Zabel, A.: Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräswerkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003.
ISBN: 3-8027-8720-x
- Band 19 Opalla, D.: Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003.
ISBN: 3-8027-8716-1

- Band 18 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 Enseltmann, A.: HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999.
ISBN: 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, Ch.: Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998.
ISBN: 3-8027-8702-1
- Band 2 Friedhoff, J.: Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997.
ISBN: 3-8027-8701-3
- Band 1 Adams, F.-J.: Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern.
Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996.
ISBN 3-8027-8700-5