Industrielle Gemeinschaftsforschung

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20029 N

Thema

Entwicklung angepasster Werkzeuge und Prozesse zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit beim Fräsen innovativer bleifreier Kupferwerkstoffe

Berichtszeitraum

01.07.2018 bis 31.12.2020

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.

Wallstraße 58-59

10179 Berlin

Forschungseinrichtung

RWTH Aachen University

Werkzeugmaschinenlabor WZL

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

Campus-Boulevard 30 52074 Aachen

Aachen, den 16.06.2021

Ort, Datum

Dipl.-Ing. D. Schraknepper

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Forschungsnetzwerk Mittelstand

WVMETALLE STIFTER VERBAND METALLE

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20029 N der Forschungsvereinigung Stifterverband Metalle e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

Zusammenfassung

Kupferwerkstoffe eignen sich aufgrund ihrer hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie ihrer antibakteriellen Wirkung für vielfältige Anwendungen in der Sanitär-, Elektro und Schlossindustrie. Das Zulegieren von m_{Pb} = 1 - 4 % Blei zu Kupferwerkstoffen verbessert die Zerspanbarkeit dieser Werkstoffe maßgeblich, sodass sie häufig für die Massenfertigung vieler Bauteile aus diesen Branchen verwendet werden. Da Blei umwelt- und gesundheitsschädlich ist schreiben eine Reihe von Gesetzesinitiativen (RoHS, REACH, TrinkwasserV, ELV-Richtlinie, Safe Drinking Water Act, China-RoHS, etc.) zukünftig strenge Grenzwerte für den Bleigehalt von Kupferwerkstoffen vor. Kupferwerkstoffe und Zinkknetlegierungen, die diesen Grenzwerten entsprechen, weisen eine wesentlich schlechtere Zerspanbarkeit auf. In Vorgängerprojekten wurden Werkzeuge und Prozesse für das Drehen, Bohren und Gewinden von bleifreien Kupferwerkstoffen ausgelegt. Zur prozesssicheren Massenfertigung auch von komplexen Bauteilen sind zusätzlich Handlungsempfehlungen für die Prozessauslegung beim Fräsen dieser Werkstoffe erforderlich.

Ziel dieses Vorhabens war es daher, durch die Entwicklung angepasster Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien die Prozesssicherheit und Produktivität beim Fräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen zu steigern. Zusätzlich sollte die Zerspanbarkeit von innovativen bleifreien Kupferwerkstoffen bewertet und das Potential zur Substitution von Dreh- und Bohrprozessen durch Fräsprozesse untersucht werden.

Für die Fräsuntersuchungen wurden zwei grundlegend verschiedene Prozessvarianten definiert. Das Vollnutenfräsen mit einem Werkzeugdurchmesser von d = 10 mm war eine Prozessvariante, die in einem weiten Parameterbereich eine hohe Prozesssicherheit aufwies. Beim Tauchfräsen mit einem Werkzeugdurchmesser von d = 2 mm wurde die Prozesssicherheit durch hohe Zerspankraftkomponenten, eine geringe Bearbeitungsqualität, vereinzelte Werkzeugbrüche und hohen Werkzeugverschleiß herabgesetzt. Ursache dafür war primär mangelhafter Spanabtransport. Durch die Kombination von einer werkstoffspezifisch angepassten Werkzeuggeometrie mit einer geeigneten KSS-Strategie konnte die Bearbeitungsgenauigkeit und Prozesssicherheit gegenüber dem Stand der Technik gesteigert werden. Die Substitution von Dreh- und Bohrprozessen zeigte an einem Anwendungsbeispiel aus der Elektroindustrie hohes Potential zur Steigerung der Prozesssicherheit bei der Innenbearbeitung. Zusätzlich wurden die Zerspanbarkeit von innovativen bleifreien Kupferwerkstoffen bewertet.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Verfasser: Stefan Baier, M.Sc., Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren,
Dipl.-Ing. Daniel Schraknepper
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Danksagung

Die Forschungsstelle, das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, bedankt sich herzlich

- bei der AiF und dem BMWi für die Förderung des Forschungsvorhabens
- beim Stifterverband Metalle für die gute Betreuung während der Durchführung des Forschungsvorhabens
- beim Deutschen Kupferinstitut für die Unterstützung bei der Antragsstellung und Durchführung des Forschungsprojekts
- bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses:
  - Aurubis Stolberg GmbH & Co. KG
  - Bruse GmbH & Co. KG, Attendorn
  - Carl Leipold GmbH, Wolfach
  - CEP – Compound Extrusion Products GmbH, Freiberg
  - Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., Düsseldorf
  - Diehl Stiftung & Co. KG, Röthenbach a. d. Pegnitz
  - Flühs Drehtechnik GmbH, Lüdenscheid
  - Grillo-Werke AG, Duisburg
  - Gühring KG, Albstadt
  - Gebr. Kemper GmbH + Co. KG, Olpe
  - HME Copper Germany, Berlin
  - Jokisch GmbH, Oerlinghausen
  - Jul. Niederdrenk GmbH & Co. KG, Velbert-Tönisheide
  - Kennametal Deutschland GmbH, Rosbach v. d. H.
  - Kiehn KG, Iserlohn
  - Lebronze alloys Germany GmbH
  - Mennekes Elektrotechnik GmbH & Co. KG
  - Otto Dunkel GmbH, Mühldorf a. Inn
  - Phoenix Contact Deutschland GmbH, Blomberg
  - Rebmann GmbH, Eberdingen
  - Rother Technologie GmbH & Co. KG, Bad Urach
  - Rink & Bettig GmbH, Attendorn
  - Rudolf Brokamp GmbH & Co. KG
  - Sundwiger Messingwerk GmbH, Hemer
  - Sure Tec GmbH, Lage
  - Viega Deutschland GmbH & Co. KG, Attendorn
  - Wieland Electric GmbH, Bamberg
  - Wieland Werke AG, Ulm

  für die Unterstützung der Forschungsarbeiten durch die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe, der Zerspanwerkzeuge und Kühlschmiermedien, für die stets konstruktiven, anregenden und hilfreichen Diskussionen im Rahmen der Projekttreffen und darüber hinaus.

wieland
LEIPOLD
The Precision Group
MENNEKES
MY POWER CONNECTION
GÜHRING
DIEHL
Metall
viega
ODU
A PERFECT ALLIANCE.
EDC
F l ü h s
D r e h t e c h n i k
KEMPER
FORTSCHRITT MACHEN
JuNie
wieland
jokisch
Aurubis
uba
lebronze alloys
GRILLO
SUNDWIGER
Messingwerk
KENNAMETAL
BRUSE
BROKAMP
Zerspanungstechnik
SURE
SCHMIEDETECHNIK
ROTHER
TECHNOLOGIE
CEP
Compound Extrusion Products
HME
Deutsches
Kupferinstitut

Inhalt

Zusammenfassung 3

Danksagung 4

1 Einleitung 8

2 Zielsetzung und Vorgehensweise des Forschungsprojektes 10

2.1 Zielsetzung 10

2.2 Vorgehensweise und Arbeitsprogramm 10

3 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe 12

4 Tauchfräsen mit d = 2 mm 14

4.1 Versuchsaufbau 15

4.2 Grundlagenuntersuchungen zur Analyse der werkstoffspezifischen Zerspanprobleme (AP 2) 18

4.3 Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge (AP 3) 19

4.3.1 Werkzeuggeometrie und Schnittparameter 20

4.3.2 Kühlschmierstoffstrategie 31

4.3.3 Schneidstoff und Beschichtung 33

4.4 Handlungsempfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen 36

5 Vollnutenfräsen mit d = 10 mm 38

5.1 Versuchsaufbau 38

5.2 Bewertung und Optimierung der Zerspanbarkeit beim Vollnutenfräsen 39

5.3 Handlungsempfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Nutenfräsen in bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen 47

6 Substitution von Dreh- und Bohrprozessen durch Fräsprozesse (AP 4) 47

7 Analyse der Zerspanbarkeit neu entwickelter Werkstoffe (AP5) 52

7.1 Versuchswerkstoffe 52

7.2 Versuchsaufbau und Vorgehensweise 53

7.3 Erstellung von Spanformdiagrammen 54

7.4 Bewertung der Zerspanbarkeit anhand von Zerspanbarkeitsindizes 56

7.4.1 Vorbemerkung 56

7.4.2 Bewertung der Zerspanbarkeitskriterien 57
7.4.3 Ermittlung von Zerspanbarkeitsindizes 61
8 Validierung der Projektergebnisse 66
9 Literaturverzeichnis 70
10 Anhang 71
10.1 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn37 71
10.2 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn42 74
10.3 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P 77
11 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 80
12 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU, ihr innovativer Beitrag und ihre industriellen Anwendungsmöglichkeiten 80
13 Transfermaßnahmen und Veröffentlichungen 81

1 Einleitung

Die Zugabe von 2 - 4% Blei als Legierungselement in Kupferwerkstoffen verbessert die Zerspanbarkeit dieser Werkstoffe drastisch. Das Blei bildet einen Schmierfilm zwischen der Spanfläche des Werkzeugs und dem ablaufenden Span aus und mindert so den Werkzeugverschleiß. Zusätzlich setzt das Legierungselement Blei das Formänderungsvermögen des Werkstoffs herab. Dadurch entstehen unter fast beliebigen Zerspanparametern kurzbrüchige Späne, die problemlos abgeführt werden können. Blei ist jedoch gesundheits- und umweltschädlich. Die Aufnahme erfolgt hauptsächlich über das Trinkwasser oder über das Einatmen bleihaltiger Stäube. Blei hat im menschlichen Körper unter Anderem negative Auswirkungen auf die kognitiven Fähigkeiten, das Herz-Kreislauf-System sowie die Fortpflanzung und kann zudem karzinogen wirken. Blei reichert sich im Körper an und hat dort eine Halbwertszeit von mehr als 20 Jahren. Auch in der Umwelt hat Blei ähnliche negative Auswirkungen auf Flora und Fauna. [FALB95, SCHI11]

Aufgrund dieser gesundheits- und umweltschädlichen Wirkung von Blei sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Gesetzesinitiativen erlassen worden, die direkt oder indirekt ein Verbot, beziehungsweise eine drastische Senkung des Bleigehalts in Kupferwerkstoffen erfordern. In Deutschland und in der EU sind insbesondere die deutsche Trinkwasserverordnung TrinkwV 2001 [BGB01] sowie die Richtlinien 2000/53/EG (Regelung für das Recycling von schwermetallhaltigen Fahrzeugteilen) [AEG00] und 2002/95/EG (RoHS: Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten) [AEG02] des Europäischen Parlamentes und Rates relevant. In den USA und weiten Teilen Asiens gelten ähnliche Bestimmungen.

Im Rahmen von zwei Vorgängerprojekten am WZL der RWTH Aachen wurde festgestellt, dass bei der Zerspanung von bleifreien Kupferwerkstoffen mit derzeit für bleihaltige Werkstoffe verwendeten Werkzeugen häufig lange Band- und Wirrspäne auftreten (Abbildung 1.1). Zudem verursacht die erhöhte Zerspankraft und -temperatur, aufgrund der höheren Reibung, einen beschleunigten Werkzeugverschleiß [NOBE13]. Dies kann durch Einsatz einer geeigneten Beschichtung reduziert werden [FUSS08]. Für Betriebe, in denen Kupferwerkstoffe zerspant werden, bedeutet die Umstellung auf bleifreie Werkstoffe eine maßgebliche Verschlechterung von Produktivität und Prozesssicherheit und somit einen Anstieg der Fertigungskosten.

Daraus folgt ein dringlicher Bedarf seitens der Anwender, die in der kupferverarbeitenden Industrie häufig kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind, nach angepassten Werkzeugen und Bearbeitungsstrategien. Diese sollten es idealerweise ermöglichen, bleifreie Kupferwerkstoffe mit der von den derzeit eingesetzten bleihaltigen Werkstoffen bekannten Produktivität und Prozesssicherheit zu bearbeiten. Um die Wettbewerbsfähigkeit von KMU ohne

eigene Werkzeug- und Prozessentwicklung auch nach der Umstellung auf bleifreie Kupferwerkstoffe zu erhalten, ist es notwendig, angepasste Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien für sämtliche spanenden Bearbeitungsvarianten zu entwickeln.

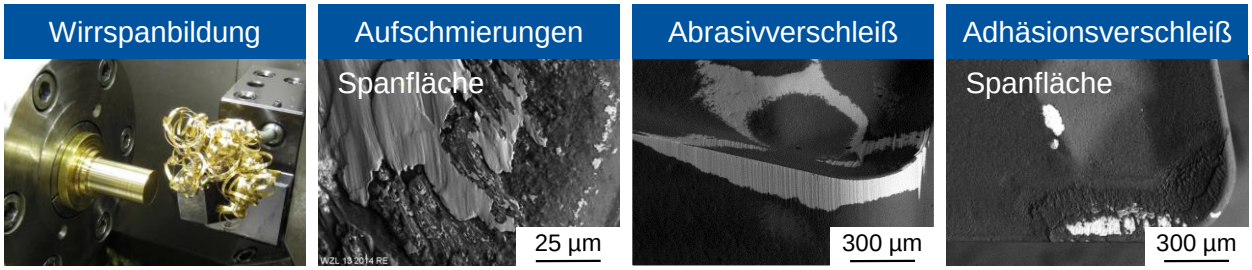


Abbildung 1.1: Wirrspanbildung, Aufschmierungen, abrasiver und adhäsiver Verzeugverschließ beim Drehen von bleifreien Kupferwerkstoffen [NOBE13]

In den Vorgängerprojekten (16867N und 17953N) wurde dies für das Drehen und Bohren durchgeführt. Ein Fertigungsverfahren mit hoher Relevanz für die kupferverarbeitenden KMU ist das Fräsen. Um auch Bauteile mit komplexen Geometrien fertigen zu können, ist die Fräsbearbeitung notwendig. In der Sanitärindustrie werden häufig Bauteile mit Nuten benötigt, beispielsweise als Wasserdurchlass in Ventilen oder Armaturen. In der Elektroindustrie werden häufig rechteckige Durchbrüche in Kleinteilen benötigt, beispielsweise um im fertigen Produkt geklemmte Kontaktierungen zu realisieren. Diese Durchbrüche werden durch das Verfahren Räumen gefertigt. In der Vorbereitung wird mittels Tauchfräsen möglichst viel Material zerspant, sodass lediglich ein kleines Aufmaß geräumt werden muss. In der Schlossindustrie müssen die Nuten, in denen die Schließnase befestigt ist, durch Fräsen hergestellt werden. Für diese Anwendungen kommen jeweils geeignete Werkstoffe, zum Beispiel mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit in der Elektroindustrie, mit einer guten Korrosionsbeständigkeit in der Sanitärindustrie und mit einer guten Verschleißsicherheit in der Schlossindustrie zum Einsatz.

Zum Fräsen von Kupferwerkstoffen gab es bisher nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen. In diesem Projekt wurde daher eine systematische Werkzeug- und Prozessauslegung für das Tauch- und Nutenfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen durchgeführt.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise des Forschungsprojektes

2.1 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung angepasster Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien für die Fräsbearbeitung bleifreier Kupferwerkstoffe und Zinkknetlegierungen zur Steigerung der Prozesssicherheit und Produktivität.

Zur Realisierung dieser Zielsetzung wurde ein Tauchfräsprozess mit Werkzeugdurchmesser d = 2 mm sowie ein Nutenfräsprozess mit Werkzeugdurchmesser d = 10 mm untersucht. Im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen wurden im ersten Untersuchungsschritt die werkzeug- und prozessspezifischen Herausforderungen identifiziert. Davon ausgehend erfolgte eine Anpassung der Werkzeuggeometrie, der Schnittparameter und der Kühlschmierstoffstrategie. Aus diesen Erkenntnissen wurden anschließend Empfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung in der industriellen Praxis abgeleitet.

Darüber hinaus waren die Abschätzung des Potentials von Fräsprozessen, Dreh- und Bohrprozesse zu substituieren und die Bewertung der Zerspanbarkeit von neu entwickelten Kupferwerkstoffen Ziele des Vorhabens. Letztere erfolgte anhand einer Methode zur Ermittlung von sogenannten Zerspanbarkeitsindizes, die im Rahmen des Vorgängerprojektes IGF 16867 N entwickelt wurde.

2.2 Vorgehensweise und Arbeitsprogramm

Die Zielsetzung, die Prozesssicherheit und Produktivität beim Fräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen zu steigern, erforderte eine optimale Abstimmung von Schneidstoff und Beschichtung, Werkzeuggeometrie, Schnittparametern und Bearbeitungsstrategie hinsichtlich der Anforderungen der betrachteten Bearbeitungsaufgaben. Zur Realisierung dieser Zielsetzung wurden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den folgenden Ebenen durchgeführt:

- Grundlagenuntersuchungen zur Identifikation der werkzeug- und prozessspezifischen Herausforderungen
- Optimierungs- und Verifizierungsversuche zur Steigerung von Prozesssicherheit und Produktivität
- Bewertung der Zerspanbarkeit von neu entwickelten bleifreien Kupferwerkstoffen
- Untersuchung des Potentials von Fräsprozessen zur Substitution von Dreh- und Bohrprozessen

- Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Anwendbarkeit der Erkenntnisse in der industriellen Praxis

Es wurden zwei grundsätzlich verschiedene Prozessvarianten untersucht: Das Vollnutenfräsen mit einem Werkzeugdurchmesser von d = 10 mm deckte Anwendungsfälle aus der Sanitär- und Schlossindustrie ab. Zusätzlich wurde das Tauchfräsen mit einem Werkzeugdurchmesser von d = 2 mm untersucht. Auf Anregung des projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurde dieser Prozess als Kerninhalt des Vorhabens festgelegt, da dort aufgrund der kleinen Abmessungen und der hohen Genauigkeitsanforderungen die größere zerspantechnologische Herausforderung als beim Vollnutenfräsen bestand.

Im Anschluss an die Charakterisierung der Versuchswerkstoffe wurden zunächst in sogenannten Grundlagenuntersuchungen (AP 2) die werkstoff- und prozessspezifischen Zerspanbarkeitsprobleme identifiziert. Im Anschluss wurde im Rahmen von AP 3 der Einfluss der Schnittparameter, Werkzeuggeometrie, der KSS-Strategie sowie Schneidstoff und Beschichtung auf die Zerspanbarkeitskriterien Werkzeugverschleiß, Spanabtransport, Bauteilqualität und Zerspankraft untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurden Empfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung für das Tauch- und Nutenfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen abgeleitet. In AP 4 wurde eine Potentialabschätzung für die Substitution von Dreh- und Bohrprozessen durch Fräsprozesse anhand eines Beispielbauteils aus der Anwendung eines PA-Mitglieds durchgeführt. Zudem wurde in AP 5 die Zerspanbarkeit von neu entwickelten bleifreien Kupferwerkstoffen anhand einer im Vorgängerprojekt (IGF 16867 N) entwickelten Methode bewertet. Die zum Projektabschluss vorgesehene Validierung der Projektergebnisse (AP 6) wurde anhand eines fiktiven Musterbauteils am WZL durchgeführt.

3 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe

Für die Untersuchungen zum Fräsen wurden sechs verschiedene Versuchswerkstoffe aus verschiedenen Gruppen von Kupferwerkstoffen ausgewählt. Der Durchmesser der Rundstangen für die Untersuchungen zum Nutenfräsen betrug d = 40 mm. Die Untersuchungen zum Tauchfräsen wurden mit Halbzeugen mit Stangendurchmesser d = 10 mm durchgeführt. Aus der Gruppe der Reinkupferwerkstoffe wurden der Werkstoff Cu-HCP für das Nutenfräsen und der Werkstoff Cu-OFE für das Tauchfräsen von der Fa. HME BRASS GERMANY bereitgestellt. Der Werkstoff CuZn37 wurde von der Fa. DIEHL METALL als Vertreter der Messinge mit homogenem α-Gefüge bereitgestellt. Der Werkstoff CuZn42 wurde aus der Gruppe der Messinge mit heterogenem α-β-Gefüge ausgewählt und von der Fa. AURUBIS STOLBERG für das Vorhaben bereitgestellt. Das siliziumhaltige Sondermessing CuZn21Si3P und der bleihaltige Referenzwerkstoff CuZn39Pb3 wurden von den WIELAND WERKEN bereitgestellt. Aus der Gruppe der Bronzen stelle die Fa. KEMPER OLPE den Rotguss CuSn4Zn2PS-C für das Vorhaben bereit. Die GRILLO WERKE unterstützen das Vorhaben durch die Lieferung der Zinkknetlegierung ZnAl15Cu1Mg0,03.

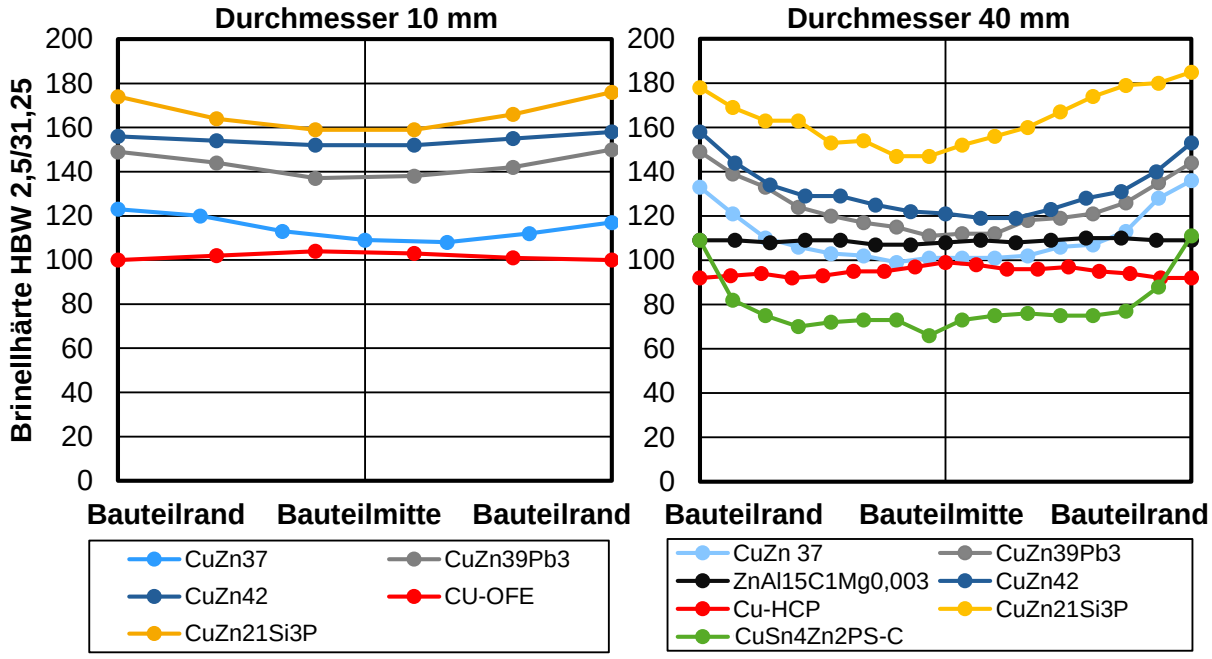


Abbildung 3.1: Verlauf der Brinellhärte über den Querschnitt der Versuchshalbzeuge

Der Verlauf der Brinellhärte über den Querschnitt der Halbzeuge ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Bei der Halbzeugherstellung werden die Werkstoffe zur Einstellung der Festigkeits-, Maßhaltigkeits- und Oberflächeneigenschaften durch Kaltziehen bearbeitet. Aufgrund der Reibung zwischen den Halbzeugen und den Matrizen findet im Randbereich eine höhere Kaltverfestigung statt. Bei den meisten Werkstoffen lag deshalb im Randbereich eine höhere Härte als im Werkstoffinneren vor. Aus diesem Grund lag die Härte und Festigkeit der Halbzeuge

mit einem Durchmesser von d = 10 mm in der Bauteilmitte höher als bei Stangen mit einem Durchmesser von d = 40 mm bei gleicher chemischer Zusammensetzung (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Mechanische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe (Bauteilmitte)

Werkstoff	**Hersteller-bezeichnung**	**Halbzeug-durch-messer D / mm**	**Zug-festigkeit R_m / MPa**	**Dehngrenze $R_{p0.2}$ / MPa**	**Bruchdehnung A / %**
Cu-HCP	KME Cu-HCP	40	220 - 360*	< 140*	4 - 33*
Cu-OFE	KME Cu-OFE	10	200 - 350*	120 - 320*	5 - 35*
CuZn21Si3P	Wieland SW1	40	605 - 622	329 - 347	39 - 41
CuZn21Si3P	Wieland SW1	10	674 - 687	455 - 466	25 - 39
CuSn4Zn2PS-C	Kemper Rg+	40	200*	90*	13*
CuZn37	Diehl 023	40	348	206	43,5
CuZn37	Diehl 023	10	400	320	-
CuZn42	Aurubis PNA 277	40	506	406	34
CuZn42	Aurubis PNA 277	10	595	495	18
CuZn39Pb3	Wieland Z32	40	459	305	26
CuZn39Pb3	Wieland Z32	10	544	461	11
ZnAl15Cu1Mg0,03	Grillo ZEP 1510	40	450 - 500*	420 - 480*	6 - 11*
*Norm- bzw. Datenblattangaben					

Die Reinkupferwerkstoffe Cu-OFE und Cu-HCP weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung aus reinem Kupfer eine über den Querschnitt gleichmäßige, geringe Härte auf. Der Rotguss CuSn4Zn2PS-C wies aufgrund seiner Zusammensetzung ein reines α-Gefüge (Abbildung 3.2) und aufgrund des Gussgefüges eine geringe Härte und Zugfestigkeit auf. Bei diesem Werkstoff war der Anstieg der Härte zum Rand des Halbzeugs besonders deutlich ausgeprägt.

Das Gefüge des Messingwerkstoffs CuZn37 bestand vollständig aus α-CuZn (Abbildung 3.2). Aufgrund des höheren Zinkgehaltes bildete der Werkstoff CuZn42 etwa φ_β = 50 % der β-CuZn-Phase aus. Diese ist deutlich härter und spröder als α-CuZn. Die makroskopische Werkstoffhärte lag deshalb höher als bei CuZn37. Das Silizium im Sondermessing CuZn21Si3P bildet mit Kupfer und Zink die nochmals härtere sogenannte κ-Phase aus. Aufgrund des Anteils von etwa φ_κ = 40 % dieser Phase wies dieser Werkstoff die höchste Härte (HBW ≈ 150 - 180) unter den Versuchswerkstoffen auf. Die Zinkknetlegierung ZnAl15Cu1Mg0,03 wies eine über den

Querschnitt des Halbzeugs homogene Härte auf, die im Mittel auf einem ähnlichen Niveau wie bei CuZn37 lag (HBW = 110).

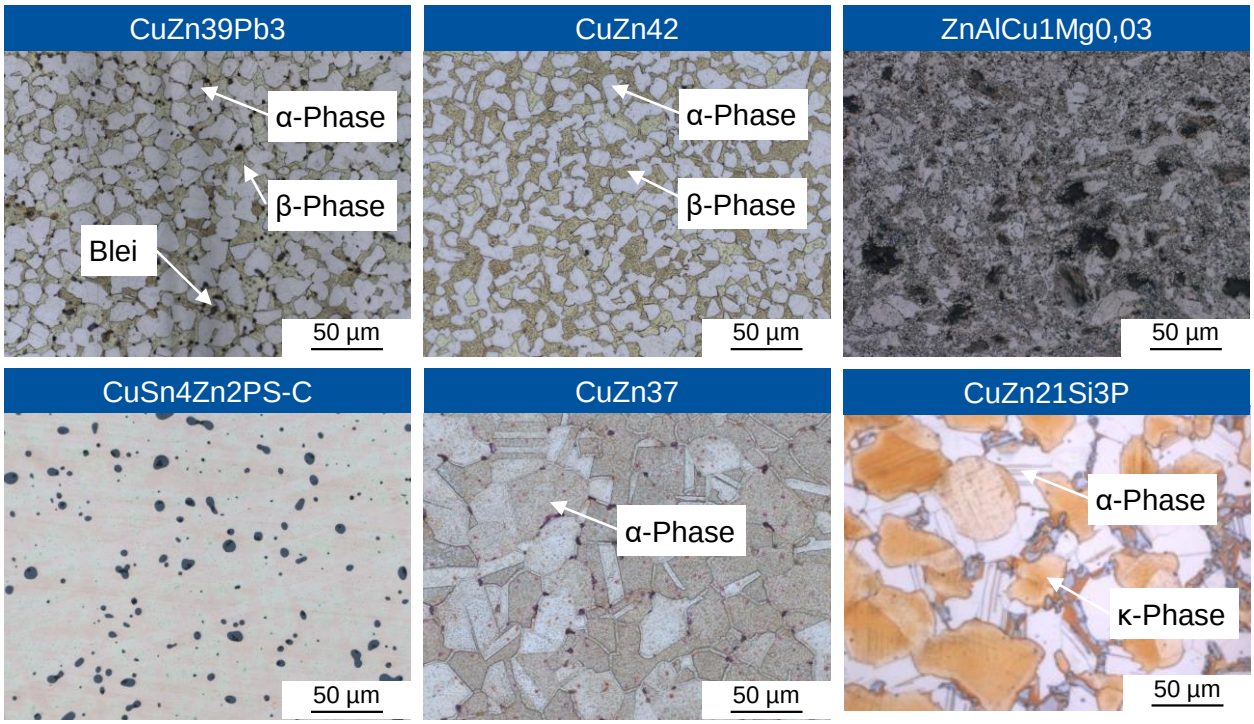


Abbildung 3.2: Metallografische Schliffbilder der Versuchswerkstoffe

4 Tauchfräsen mit d = 2 mm

Bei der Herstellung von elektrotechnischen Verbindungselementen wie Durchgangsklemmen oder Leiterplattenklemmen müssen häufig rechteckige Querschnitte in bleifreien Kupferwerkstoffen spanend gefertigt werden. In diese Querschnitte werden in der Anwendung elektrische Leiter eingeführt und mit Schrauben fixiert. Typischerweise erfolgt die Fertigung dieser Bauteile ausgehend von einem Profildrahtabschnitt, in den zunächst eine Bohrung eingebracht wird (Abbildung 4.1). Ausgehend von dieser Bohrung wird in einem oder mehreren Tauchfräshüben mit radialer Zustellung und axialem Vorschub der Querschnitt erweitert. Die Endkontur wird anschließend durch Räumen gefertigt. Da die langen und schmalen Räumwerkzeuge eine geringe Steifigkeit aufweisen, werden sie durch die tauchgefräste Kontur geführt. Herausfordernd beim Tauchfräsen war deshalb die Einhaltung einer möglichst geringen geometrischen Abweichung der tauchgefrästen Kavität im Bereich von $\Delta x < 50$ µm. Aus zerspantechnologischer Sicht war neben der Einhaltung der Bauteilgenauigkeit auch das gleichzeitige Sicherstellen eines ausreichenden Spanabtransports und eines moderaten Werkzeugverschleißes eine Herausforderung.

4.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen zur Bewertung von Spanform, Zerspankraftkomponenten und Bauteilqualität wurden auf einem Bearbeitungszentrum vom Typ NHX 5000 von DMG MORI durchgeführt (Abbildung 4.1). Die Untersuchungen zur Bewertung des Werkzeugverschleißes wurden aufgrund der höheren Produktivität auf dem Stangendrehzentrum NZX 1500 von DMG MORI durchgeführt. Dieser Aufbau wird in Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

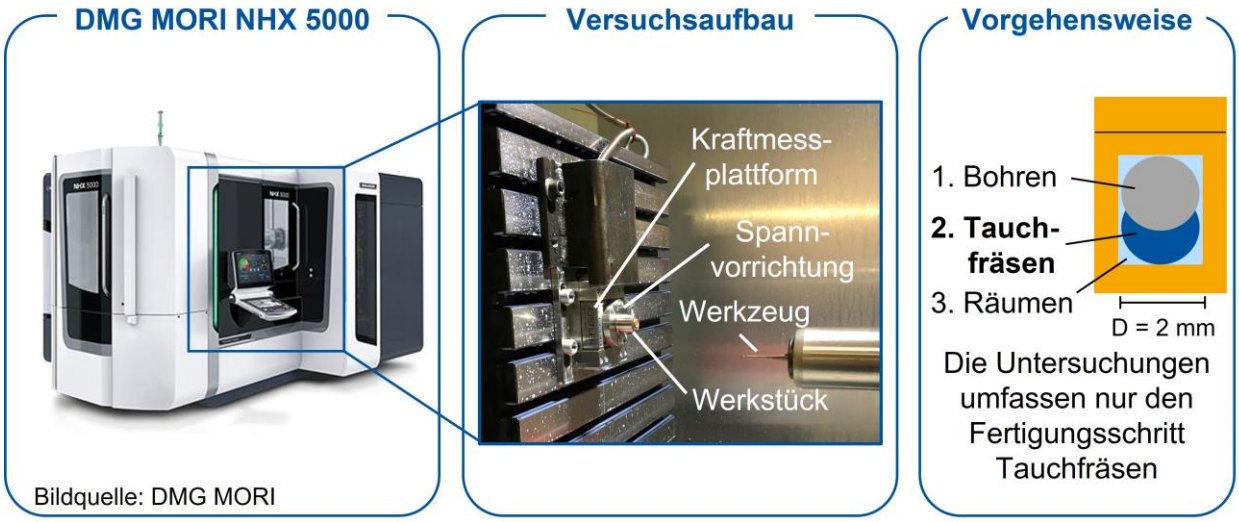


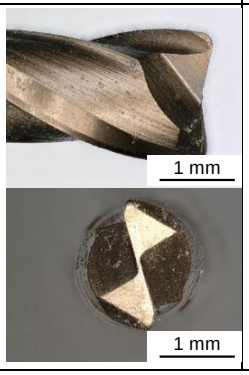
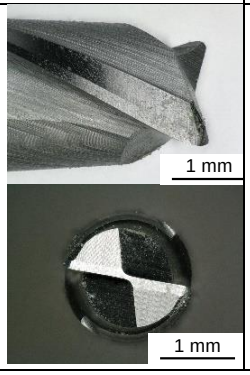
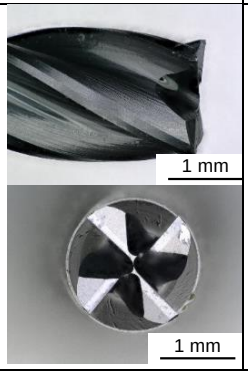
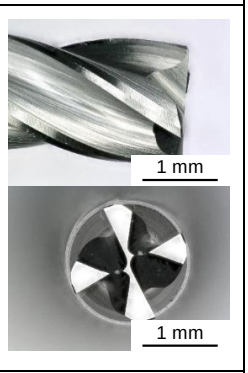
Abbildung 4.1: Versuchsaufbau für das Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen mit Messung der Zerspankraftkomponenten

Auf dem Maschinentisch des Bearbeitungszentrums war an einem steifen Winkel die piezoelektrische Kraftmessplattform vom Typ 9119AA2 von der Fa. KISTLER angebracht. Daran war ein analoger Ladungsverstärker und eine digitale Messkarte angeschlossen. In einer speziell angefertigten Spannvorrichtung wurden die zylindrischen Versuchswerkstücke aufgespannt. Die Anlage des Werkstücks in der Spannvorrichtung erfolgte auf einer Kante, sodass das Werkzeug frei aus dem Werkstück austreten konnte. Die Werkstücke waren Abschnitte der Werkstoffstangen mit d = 10 mm Durchmesser, die in der Aufspannung auf eine Länge von L = 14 mm plangefräst wurden, um einen definierten Werkzeugeintritt zu gewährleisten. Die Versuchswerkzeuge wurden mittels Hydrodehnspannfutter gespannt, um eine möglichst geringe Rundlaufabweichung zu erhalten.

Von der im PA vertretenen Firma Gühring wurden die Versuchswerkzeuge für das Tauchfräsen bereitgestellt. Dabei wurden die Serienwerkzeuge mit der Bezeichnung 3865 und 6716 jeweils mit und ohne Beschichtung (Zusatzbezeichnung „HB8“) eingesetzt. Die Geometrie der Werkzeuge ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Das zweischneidige Werkzeug 3865 wies mit r_ε = 0,2 mm einen wesentlich größeren Eckenradius als die restlichen Werkzeuge auf. Bei diesem Werkzeug ergaben sich aus der Beschichtung wesentliche Unterschiede im Schneidkantenradius: Das unbeschichtete Werkzeug 3965 HB8 hatte einen geringen Schneidkantenradius von r_β = 5,0 µm, der durch das Beschichten auf r_β = 15,9 µm anstieg. Bei

dem vierschneidigen Werkzeug 6716 war diese Differenz wesentlich geringer ausgeprägt. Die Messung der Schneidkantenradien erfolgte per Streifenlichtmikroskop (µCAD, Fa. ALGONA). Deshalb war eine Messungenauigkeit von etwa ± 3 µm zu berücksichtigen.

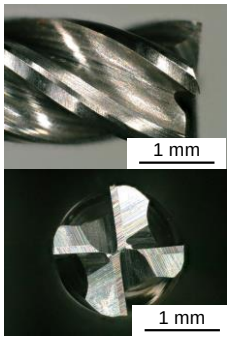
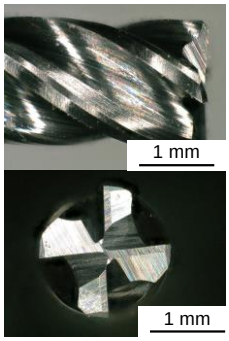
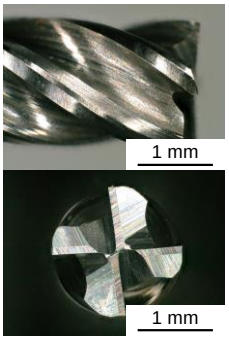
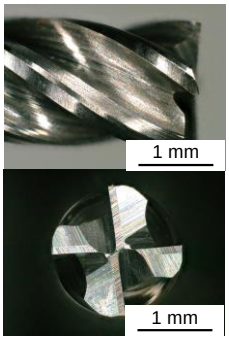
Tabelle 4.1: Geometrie der Serienwerkzeuge zum Tauchfräsen

Bezeichnung	3865	3865 HB8	6716	6716 HB8
Makro-geometrie				
Werkzeug-hersteller	Gühring KG			
Schneidstoff	Hartmetall, TiAlN-Schicht (Signum)	Hartmetall, unbeschichtet	Hartmetall, TiAlN-Schicht (SuperA)	Hartmetall, unbeschichtet
Durchmesser d / mm	2			
Zähnezahl z / -	2	2	4	4
Drallwinkel δ / °	30	30	30	30
Bearb.-tiefe $a_{p,max}$ / mm	18	18	14	14
Eckenradius r_ε oder Fasenbreite und -winkel b_γ / mm	r_ε = 0.2 mm	r_ε = 0.2 mm	b_γ = 0.1 mm x 45°	b_γ = 0.1 mm x 45°
Radialer Spanwinkel γ_r / °	8	8	3	3
Stirnspan-winkel γ_s / °	5	5	2	2
Freiwinkel α_s / °	12	12	10	10
Modifikation	-	-	-	-
Schneid-kantenradius r_β / µm	15,9	5,0	8,8	8,4

Zusätzlich zu den Serienwerkzeugen wurden mehrere Varianten des Sonderwerkzeugs mit der Bezeichnung 303576129 eingesetzt (Tabelle 4.2). Diese vierschneidigen Werkzeuge wiesen eine durch die Fa. GÜHRING angepasste Geometrie auf und unterschieden sich hinsichtlich der Breite der Fase an der Schneidenecke und der Gestaltung der Stege und des Werkzeugkerns. Letzteres

betraf die Werkzeuge mit den Zusatzbezeichnungen V1 und V2. Beim Design beider Werkzeuge war das Ziel, die Steifigkeit zu erhöhen. Dazu wurde bei beiden Werkzeugen die Breite der Stege, also der auf dem Werkzeugkern positionierten Schneiden, erhöht. Bei dem Werkzeug mit der Bezeichnung V1 wurde zusätzlich der Kern stärker ausgelegt.

Tabelle 4.2: Geometrie der Varianten der Sonderwerkzeugs 303576129 für das Tauchfräsen

Bezeichnung	303576129 F0,02	303576129 F0,08	303576129 V1	303576129 V2
Makro-geometrie				
Werkzeug-hersteller	Gühring KG			
Schneidstoff	Hartmetall, unbeschichtet			
Durchmesser d / mm	2			
Zähnezahl z / -	4	4	4	4
Drallwinkel δ / °	35	35	35	35
Bearb.-tiefe $a_{p,max}$ / mm	14,5	14,5	14,5	14,5
Eckenradius r_ε oder Fasenbreite und –winkel b_γ / mm	b_γ = 0.02 mm x 45°	b_γ = 0.08 mm x 45°	b_γ = 0.08 mm x 45°	b_γ = 0.08 mm x 45°
Radialer Spanwinkel γ_r / °	3	3	3	3
Axialer Spanwinkel γ_s / °	5			
Freiwinkel α_s / °	10	10	10	10
Modifikation	-	-	Größere Stegbreite und Kernanstieg	Größere Stegbreite
Schneidkanten-radius r_β / µm	6,8	8,1	7,2	7,4

4.2 Grundlagenuntersuchungen zur Analyse der werkstoffspezifischen Zerspanprobleme (AP 2)

Ziel der sogenannten Grundlagenuntersuchungen zum Tauchfräsen im Rahmen von AP 2 war die Identifikation der werkstoff- und prozessspezifischen Zerspanbarkeitsprobleme. Dazu wurden mit den Werkstoffen CuZn21Si3P, CuZn37, CuZn39Pb3, CuZn42 und Cu-HCP Zerspanuntersuchungen unter Verwendung des zweischneidigen Werkzeugs 3865 durchgeführt. Der Zahnvorschub wurde im Bereich von 0,001 mm ≤ f_z ≤ 0,01 mm und der Pitch im Bereich von 0,2 mm ≤ p ≤ 1 mm variiert. Die Bearbeitungstiefe betrug L = 12 mm.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bilden die Motivation für die anschließenden ausführlichen Untersuchungen im Rahmen von AP 3 und sind in Abbildung 4.2 anhand des Beispiels CuZn37 zusammengefasst. Maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilqualität und damit auf die Prozesssicherheit hatte das seitliche Verlaufen des Fräsers, was zu einem Versatz der tauchgefrästen Kavität relativ zu ihrer Soll-Position führte. In der industriellen Anwendung sind enge geometrische Toleranzen im Bereich Δx < 50 µm anzuwenden, da diese Kavität als Führung für den anschließenden Räumprozess fungiert (vgl. Abschnitt 4). Am Übergang zwischen den Tauchfräshüben bildeten sich Grate. Dadurch wurde das Aufstauen von Spänen im Inneren der Kavität begünstigt. Im unteren Teil von Abbildung 4.2 ist die Vorschubkraft F_f beim Tauchfräsen der Versuchswerkstoffe in Abhängigkeit vom Zahnvorschub f_z dargestellt. Diese steigt bei allen Werkstoffen nur geringfügig mit zunehmendem Zahnvorschub an. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Mindestspanungsdicke unterschritten wurde und die Zerspanung von Reib- und Quetschvorgängen bestimmt wurde. Die Vorschubkraft korrelierte primär mit der Härte der Versuchswerkstoffe. Diese lag am höchsten bei CuZn42 und am niedrigsten bei dem Reinkupferwerkstoff Cu-HCP.

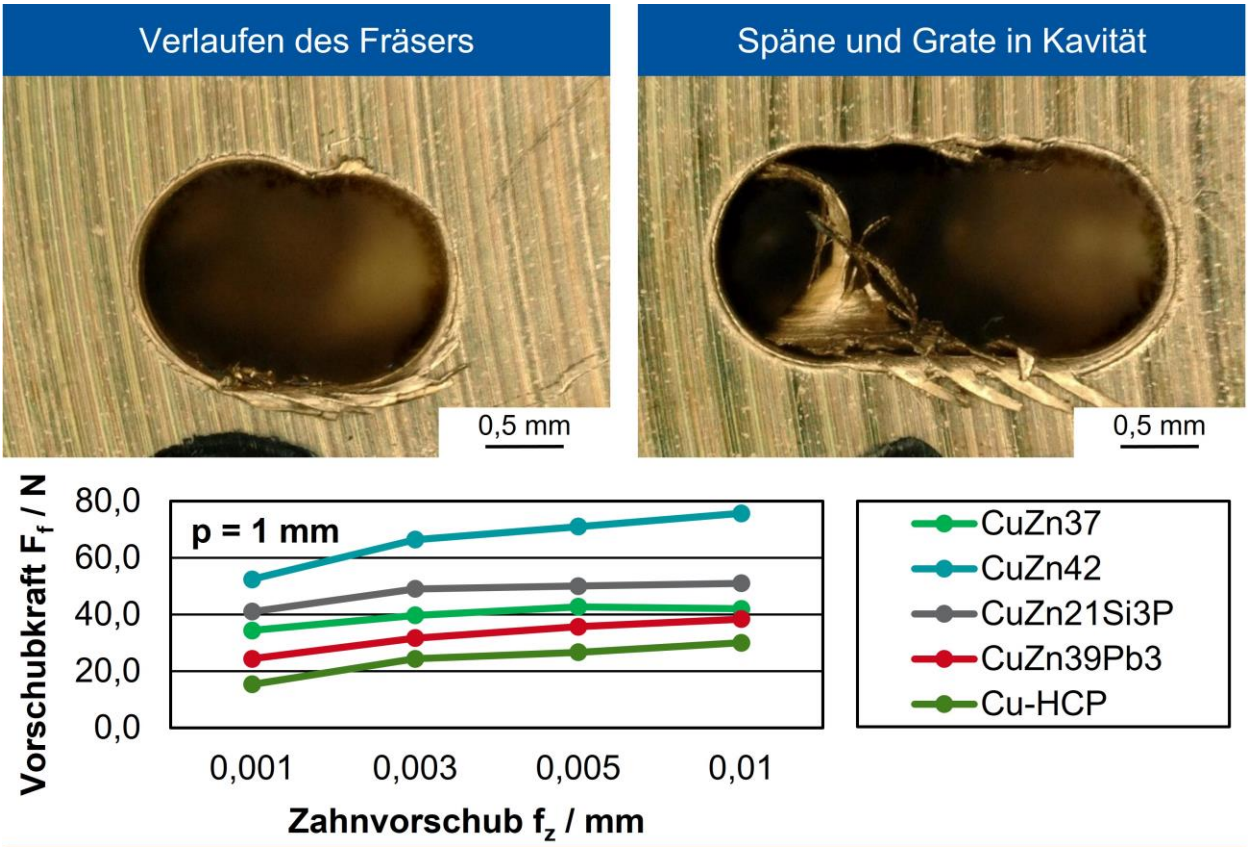


Abbildung 4.2: Zusammenfassung der Zerspanbarkeitsprobleme beim Tauchfräsen von CuZn37

Diese Ergebnisse zeigten, dass für das Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen ein erheblicher Optimierungsbedarf hinsichtlich der Werkzeug- und Prozessauslegung bestand. Dieser war wesentlich größer als beim Nutenfräsen mit d = 10 mm Werkzeugdurchmesser. Anwenderberichte von Mitgliedern des PA bestätigten, dass bei diesem Prozess die Prozesssicherheit maßgeblich geringer ist als bei allen anderen branchenüblichen Fräsoperationen. Auf Anregung des PA wurde daher festgelegt, dass das Tauchfräsen als primärer Prozess für die Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge in AP 3 genutzt werden sollte. Dabei wurde besondere Aufmerksamkeit auf die Analyse und Optimierung der Werkzeuggeometrie und Schnittparameter gelegt.

4.3 Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge (AP 3)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung des Einflusses von Schnittparametern, Werkzeuggeometrie, Schneidstoff und KSS-Strategie auf die Zerspanbarkeit. Als Bewertungskriterien wurden die Zerspanbarkeitskriterien Werkzeugverschleiß, Spanabtransport, Bauteilqualität und die Zerspankraftkomponenten herangezogen. Die Versuchswerkstoffe

CuZn37, CuZn42 und CuZn21Si3P für dieses Arbeitspaket wurden in Abstimmung mit dem PA ausgewählt.

4.3.1 Werkzeuggeometrie und Schnittparameter

Besonderen Einfluss auf das Zerspanergebnis beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen hatten die Werkzeuggeometrie und die Schnittparameter. Da das Zusammenspiel dieser beiden Größen ebenfalls Einfluss auf die Zerspanbarkeit hat, wurden die Untersuchungen zusammengefasst.

Die Zerspanuntersuchungen wurden unter den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Randbedingungen durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit wurde zwischen v_c = 50 m/min und v_c = 100 m/min variiert. Der Pitch p bezeichnet den radialen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schnitten (Abbildung 4.3). Sein Betrag entspricht dem maximalen Arbeitseingriff des Werkzeugs am Scheitelpunkt einer Werkzeugumdrehung. Das Zusammenspiel von Pitch p und Zahnvorschub f_z bestimmt den Spanungsquerschnitt und hatte daher wesentlichen Einfluss auf die Zerspankraftkomponenten und Bauteilqualität. Deshalb wurden Pitch p und Zahnvorschub f_z in vier Parameterpunkten vollfaktoriell variiert. Der Pitch lag dabei bei p = 0,2 mm oder p = 0,5 mm und der Zahnvorschub wurde auf f_z = 0,015 mm oder f_z = 0,03 mm eingestellt. Auf jedem Versuchswerkstück wurden zwei Kavitäten mit je vier Tauchfrässchnitten gefertigt. Dabei kamen stets die gleichen Schnittparameter zum Einsatz, sodass jeder Versuch einmal wiederholt wurde. Als Bewertungskriterien wurden primär die Zerspankraftkomponenten und die erzeugte Bauteilqualität herangezogen.

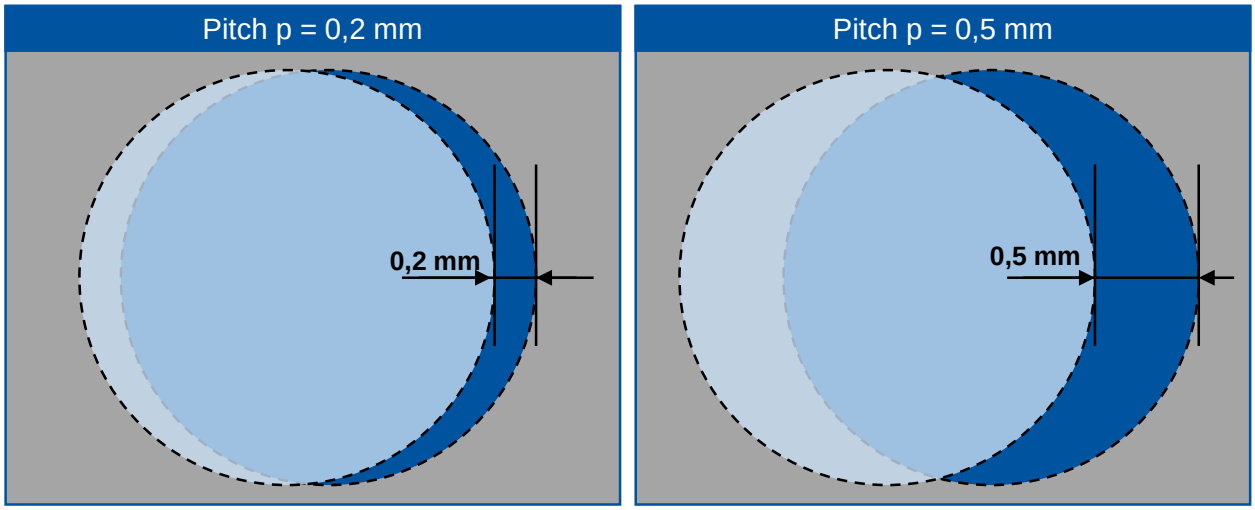


Abbildung 4.3: Maßstabsgetreue Darstellung des Querschnitts zwischen zwei Tauchfräshüben im Abhängigkeit des Pitch p beim Tauchfräsen

Die Bauteilqualität wurde primär anhand des axialen Versatzes des tauchgefrästen Kanals bewertet. Mit einem Auflichtmikroskop vom Typ VHX-6000 von Keyence wurden Aufnahmen von der Werkstückober- und -unterseite angefertigt (Abbildung 4.4). Dann wurde jeweils ausgehend von den Mittelpunkten der Ausgangsbohrung der seitliche Versatz des Tauchfräshubs ermittelt.

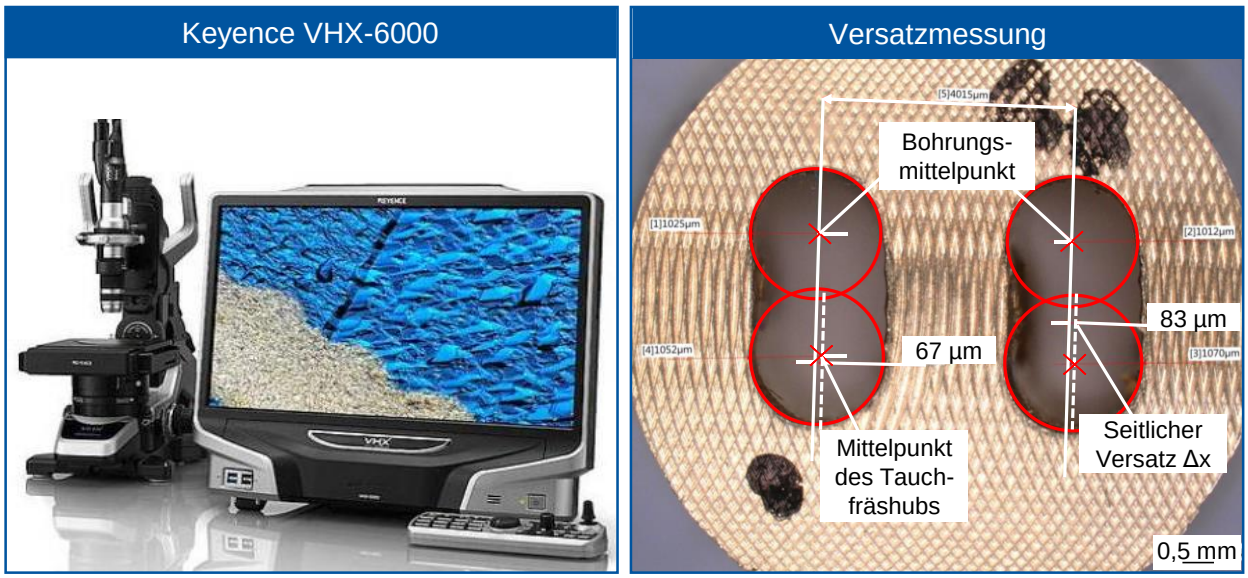


Abbildung 4.4: Messung des Versatzes des Tauchfräshubes am Auflichtmikroskop

Aufgrund des kleinen Spanungsquerschnitts wurden nur kleine Späne erzeugt. Im Versuchsablauf konnten daher nur einzelne Späne gesammelt und dokumentiert werden (Abbildung 4.5). Im Bereich des relativ großen Eckenradius von $r_\varepsilon = 0{,}1$ mm traten beim Tauchfräsen mit dem Werkzeug 3865 HB8 erhebliche Reib- und Quetscheffekte auf. Durch den Radius wurde die Mindestspanungsdicke im Übergangsbereich zwischen der Schneidenecke und den Umfangsschneiden unterschritten. Dadurch wurden Fransen am Rand der so erzeugten Späne gebildet.

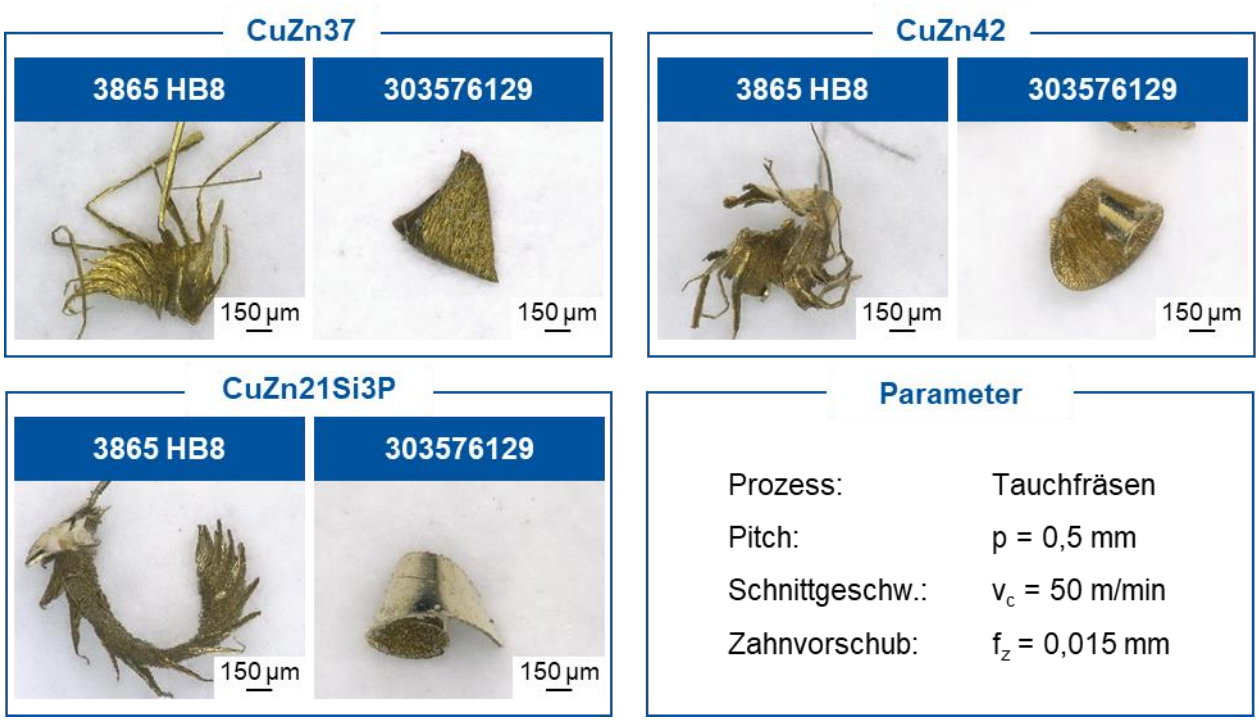


Abbildung 4.5: Exemplarische Spanformen beim Tauchfräsen mit verschiedenen Werkzeugen

Bei den Untersuchungen verklemmten sich häufig Späne in den Spannuten und der gefrästen Kavität. Dies wird im Folgenden kurz als Spanstau bezeichnet. Die zusammenhängenden Späne

wurden jedoch beim Rückhub des Werkzeugs zumeist durch den KSS ausgespült oder beschädigt, sodass der Nachweis im Regelfall über die Auswertung der Bauteilqualität und der Zerspankraftkomponenten sowie deren Dynamik erfolgte. Abbildung 4.6 zeigt ein Beispiel für durch Spanstau ineinander verklemmte Späne vom Tauchfräsen von CuZn42.

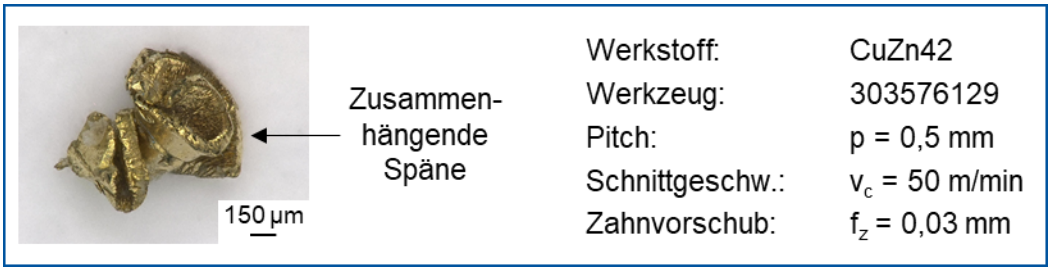


Abbildung 4.6: Spanstau beim Tauchfräsen von CuZn42

Die Definition der Zerspankraftkomponenten ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Vorschubkraft F_f liegt in der Z-Richtung des Messaufbaus und wird mit F_z bezeichnet. In radialer Richtung greifen die Kraftkomponenten F_y in Pitch-Richtung und F_x orthogonal dazu am Werkzeug an. Idealerweise werden beim Tauchfräsen ausschließlich Kraftkomponenten in axialer Richtung eingeleitet, da radial angreifende Kraftkomponenten zu einer Biegung des Werkzeugs und damit zum Versatz des gefrästen Kanals führen.

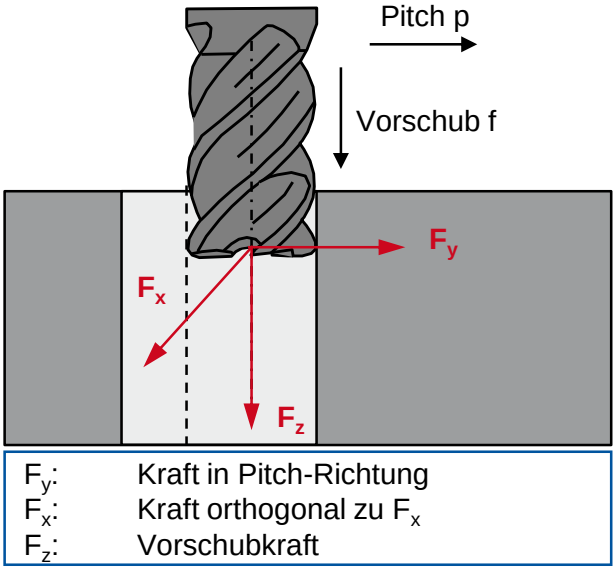


Abbildung 4.7: Definition der Zerspankraftkomponenten für die Tauchfräsuntersuchungen

Ein Beispiel für einen exemplarischen Kraftverlauf beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen zeigt Abbildung 4.8. Die Kraftkomponenten F_x, F_y und F_z wurden über die Zeit der vier Tauchfräshübe aufgetragen. Die Rohdaten wurden aufgrund der hohen Dynamik des Prozesses über 50 Messpunkte gemittelt und anschließend ausgewertet. Die Kraftkomponente in Y-Richtung war dabei stets negativ, da das Werkzeug aus der Kavität hinausgedrückt wurde.

Innerhalb eines Schnitts stiegen die Kraftkomponenten bei den meisten Versuchspunkten an. Gegen Ende eines Schnittes wurde häufig ein Maximum erreicht. Der Anstieg der Kraft war dabei

in einigen Fällen linear über die Länge des Schnitts und in einigen Fällen, wie dem Beispiel in Abbildung 4.8, erst kurz vor dem Ende des Schnitts ausgeprägt. Diese Kraftanstiege wurden durch die Kombination aus geringerer Wirkung des Kühlschmierstoffs im Inneren der Kavität und zunehmenden Spanstau bedingt.

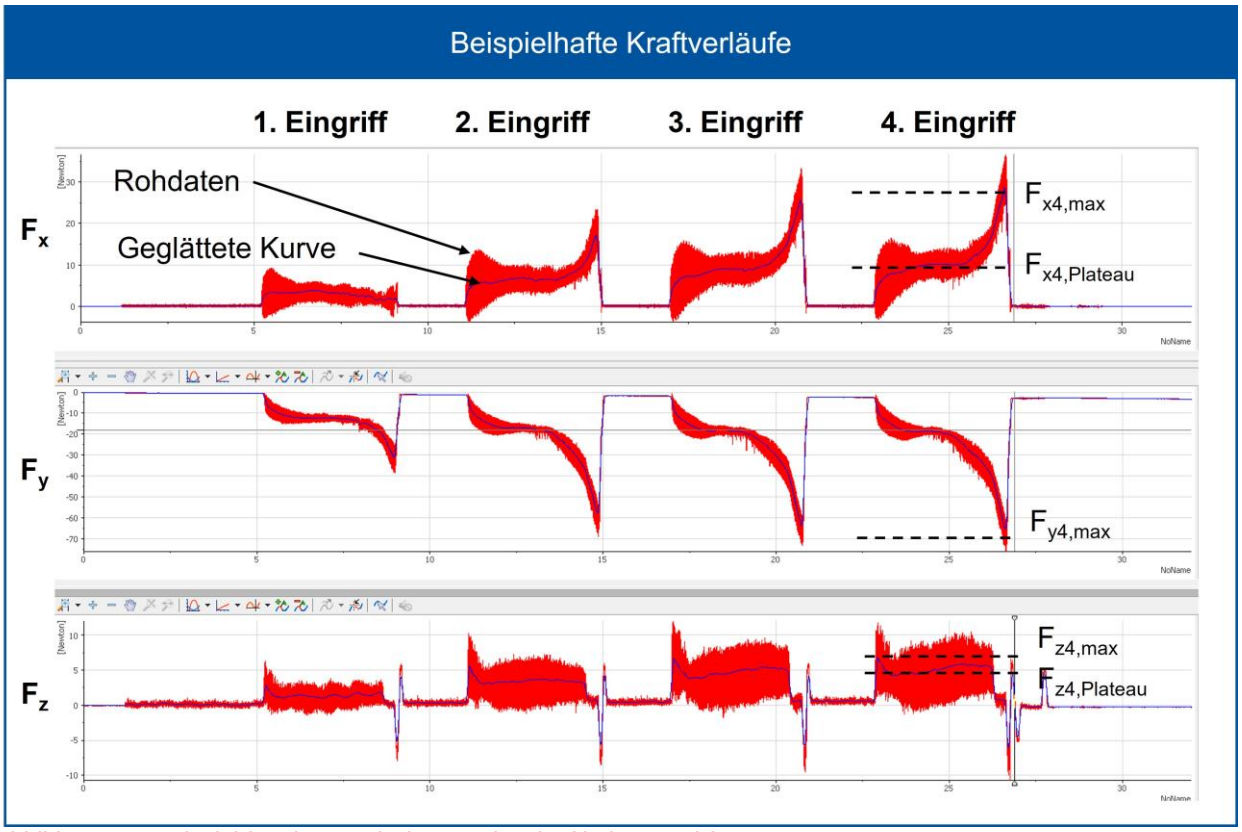


Abbildung 4.8: Beispiel für einen typischen Kraftverlauf beim Tauchfräsen

Über den Verlauf der vier Schnitte je tauchgefräster Kavität nahmen die Kraftkomponenten bei den meisten Versuchspunkten zu, das Maximum und der Plateauwert der Kraftkomponenten F_x und F_y lagen somit stets höher als beim vorherigen Schnitt. Diese Werte waren in den meisten Fällen mit einer Abweichung von $\Delta F < 10$ N über die Wiederholversuche reproduzierbar. Ein zufälliger Einfluss konnte so ausgeschlossen werden. Es wurde angenommen, dass dieser Anstieg auf den wiederholten Eingriff eines Werkzeugs in eine bereits durch den vorherigen Schnitt versetzte Kavität und dem daraus resultierenden abweichenden Spanungsquerschnitt begründet wurde.

Die maximalen Kraftkomponenten beim Tauchfräsen mit dem Sonderwerkzeug 303567129 mit $b_\gamma = 0{,}08$ mm Fasenbreite sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Im Allgemeinen waren die Kraftkomponenten beim Tauchfräsen von CuZn37 am höchsten, gefolgt von CuZn42 und CuZn21Si3P. Dies wurde auf die größere Spanstauchung mit geringerer Segmentierung bei der Bearbeitung von CuZn37 im Vergleich zu den anderen Werkstoffen mit partieller (CuZn42) oder vollständig segmentierter Spanbildung bei der Zerspanung von CuZn21Si3P zurückgeführt [NOBE13]. Die Beträge der Kraftkomponenten F_x und F_y in radialer Richtung waren stets um

einen Faktor von drei bis zehn größer als die axiale Kraftkomponente F_z. Dies wurde auf einen erheblichen Anteil von Reib-und Quetschvorgängen an der Schneidenecke, insbesondere am Schneidenein- und -austritt zurückgeführt. Ein Ziel der Prozessoptimierung war daher, das Verhältnis der radialen zur axialen Kraftkomponente zu minimieren.

Eine Erhöhung des Pitch von p = 0,2 mm auf p = 0,5 mm verursachte höhere Kraftkomponenten F_x und F_z beim Tauchfräsen von allen Versuchswerkstoffen. Dies war auf den größeren Spanungsquerschnitt zurückzuführen. Der Kraftanstieg war bei CuZn42 und CuZn21Si3P annähernd proportional zum Anstieg des Pitch, bei CuZn37 jedoch etwa doppelt so hoch. Dies wurde mit der höheren Neigung zur Adhäsion zwischen Werkzeug und Werkstückwerkstoff und der Stärkeren Neigung zum Spanstau in der Spannut des Werkzeugs in CuZn37 im Vergleich zu den anderen Werkstückmaterialien erklärt. Die Erhöhung des Pitch führte beim Tauchfräsen von CuZn42 und CuZn21Si3P zu abnehmenden Schnittkraftkomponenten F_y in Richtung des Pitch. Der größere Werkzeugeingriffswinkel von Φ_c = 208,9° bei p = 0,5 mm verringerte im Vergleich zu Φ_c = 191,5° bei p = 0,2 mm die Schwingung der Werkzeugspitze, was zu geringeren Kraftkomponenten in Y-Richtung führte. Dies galt nicht für das Tauchfräsen von CuZn37 aufgrund der ausgeprägten Neigung zu Spanstau in den Innennuten der Werkzeuge und den engen Kavitäten der Werkstücke. Bei CuZn37 führte eine Verdopplung des Zahnvorschubs von f_z = 0,015 mm auf f_z = 0,03 mm zu einem Anstieg aller Schnittkraftkomponenten. Aufgrund der höheren Reibung war dieses Wachstum beim Tauchfräsen von CuZn37 und CuZn42 größer als bei CuZn21Si3P.

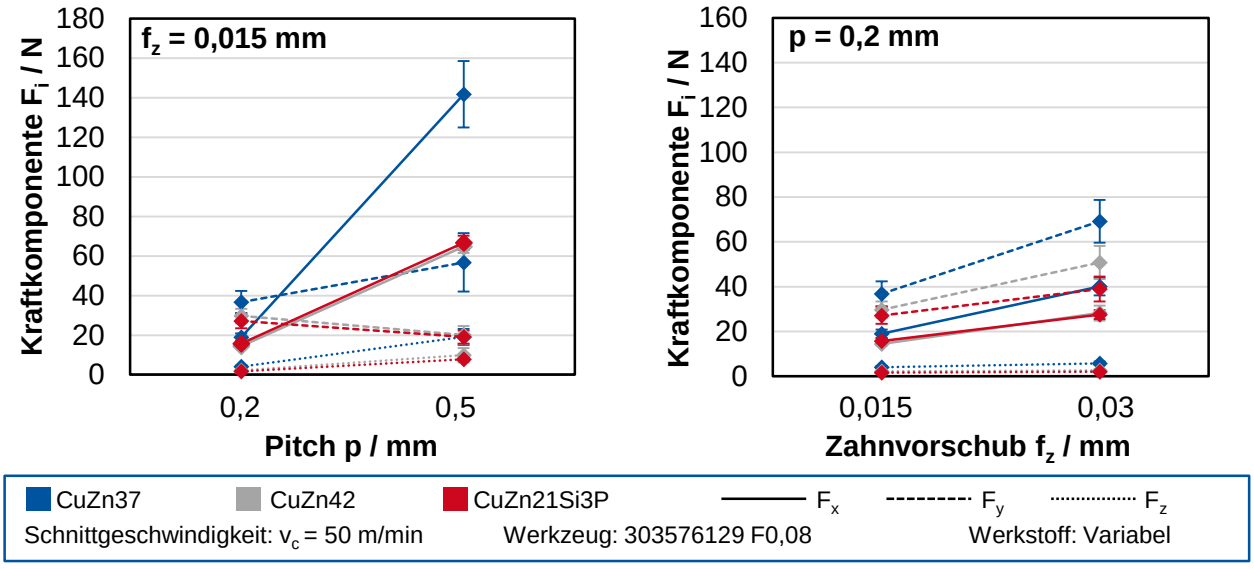


Abbildung 4.9: Maximale Kraftkomponenten beim Tauchfräsen von CuZn37, CuZn42 und CuZn21Si3P

Der Einfluss der Werkzeuggeometrie mit dem Serienwerkzeug 3865 HB8 und den vier Varianten des Sonderwerkzeugs 303576129 auf die Kraftkomponente F_x und den Versatz der Kavität beim Tauchfräsen von CuZn42 wurde mit denselben vier Sätzen von Schnittparametern bezüglich Teilung und Vorschub pro Zahn bei einer konstanten Schnittgeschwindigkeit von v_c = 50 m/min

analysiert (Abbildung 4.10). F_x bezeichnete die radial am Werkzeug und senkrecht zur Pitchrichtung angreifende Kraftkomponente, die in gleicher Richtung orientiert war wie der seitliche Versatz der gefrästen Kavität. Dabei hatte die Erhöhung der Pitch eine größere Auswirkung auf die Zerspankraftkomponenten als die Erhöhung des Vorschubs. Bei höheren Pitches wurden jedoch günstigere Verhältnisse von axialen zu radialen Zerspankraftkomponenten erzielt, die sich positiv auf die Bearbeitungsgenauigkeit auswirkten. Dies war auf den geringeren Anteil der Schnittlänge zurückzuführen, bei dem nur Schneidenecke im Eingriff ist (vgl. Abbildung 4.3).

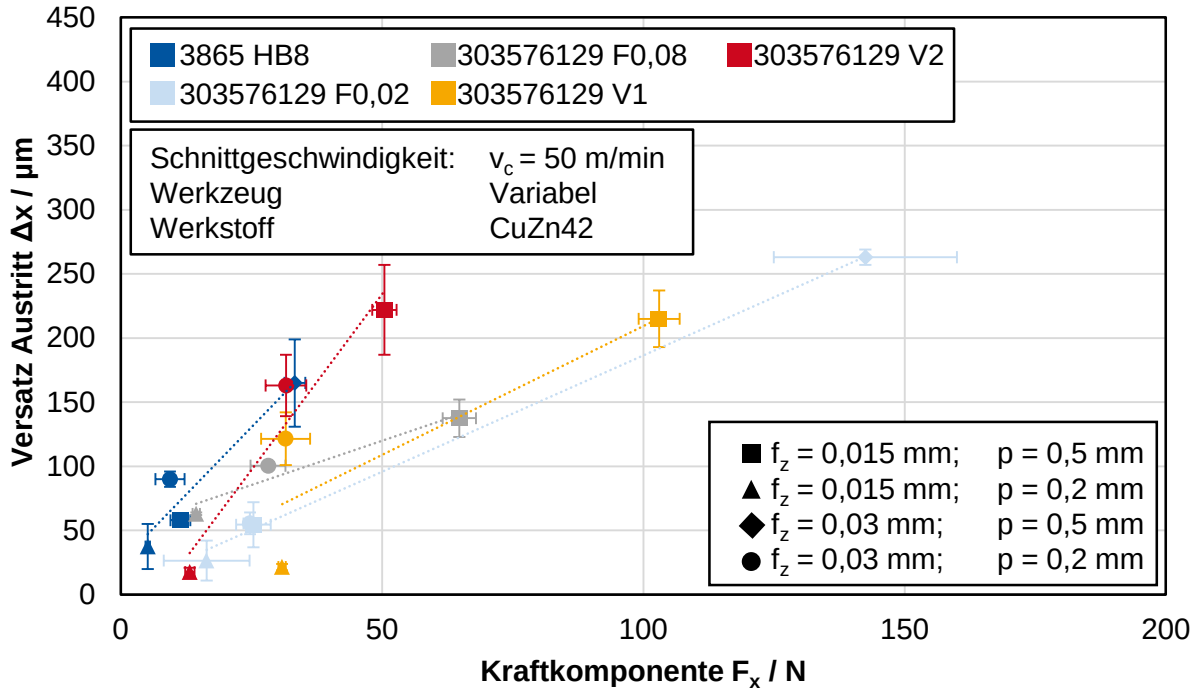


Abbildung 4.10: Zusammenfassung der Auswirkung der Werkzeuggeometrie und der Schnittparameter auf die Kraftkomponente F_x und den Versatz der gefrästen Kavität

Die Korrelation zwischen der Radialkraft F_x und der Werkzeugspitzenverschiebung Δx in Abbildung 4.10 entsprach im statischen Fall der Biegesteifigkeit des Werkzeugs. Die Anzahl von nur vier Parameterpunkten pro Werkzeug schränkte die Genauigkeit dieser Korrelationen aufgrund der Häufung von Punkten am unteren Ende der Linie ein. Bei Anwendung des größten Spanungsquerschnitts (p = 0,5 mm und f_z = 0,03 mm) brachen die Werkzeuge 303576129 mit Fasenbreite b_γ = 0,08 mm sowie die Varianten V1 und V2 aufgrund unzureichender Spanabfuhr. Auch die Variante mit kleiner Eckenfase war einer hohen radialen Kraft von F_x = 145 N ausgesetzt, sodass der Prozess nicht als stabil angesehen werden konnte. Dies deutete darauf hin, dass die Spannuten dieser Werkzeuge nicht ausreichend groß für die Menge und Größe der gebildeten Späne waren. Beim Tauchfräsen mit dem zweischneidigen Werkzeug 3865 HB8 wurde mit F_x = 33 N nur etwa ein Fünftel dieser Kraft gemessen. Der Spanabtransport bzw. das Verklemmen von Spänen in der gefrästen Kavität hatte demzufolge maßgeblichen Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit.

Das Werkzeug 3865 HB8 zeigte das höchste Verhältnis von Kraft F_x zu Weg Δx, was durch seine größere Auskraglänge als bei den Sonderwerkzeugen erklärt wurde. Dies entsprach einer geringeren Gesamtsteifigkeit. Aufgrund der zwei Schneiden bei Werkzeug 3865 HB8 statt vier Schneiden bei den Sonderwerkzeugen war die Spanabfuhr unproblematisch. Dies war der Grund dafür, dass das Fräsen mit Werkzeug 3865 HB8 bei höheren Schnittparametern im Vergleich zu den anderen Werkzeugen zu geringeren Kraftkomponenten F_x und Versätzen Δx führte, obwohl der Eckenradius $r_\varepsilon = 0{,}5$ mm viel größer war als die Fasen $b_\gamma \leq 0{,}08$ mm der anderen Werkzeuge.

Bei einem Pitch von $p = 0{,}2$ mm erzeugte das Sonderwerkzeug 3030576129 mit Fasenbreite $b_\gamma = 0{,}02$ mm kleinere Versätze und im Durchschnitt etwas geringere Kraftkomponenten F_x als die Werkzeugvariante mit $b_\gamma = 0{,}08$ mm. Dies war durch den geringeren Anteil des radialen Eingriffs an der Werkzeugecke bedingt. Bei dem höheren Pitch $p = 0{,}5$ mm wurde mit der Variante mit $b_\gamma = 0{,}02$ mm nur ein geringer Versatz erzeugt. Es war die einzige Variante des Sonderwerkzeugs, die bei $p = 0{,}5$ mm und $f_z = 0{,}03$ mm nicht durch eingeklemmte Späne in der Spannut brach. Bei den Versuchen kam es zu keinen weiteren Werkzeugbrüchen.

Die Werkzeugvarianten 303576129 V1 und V2 sollten die Steifigkeit des Werkzeugs im Vergleich zum Referenzwerkzeug C erhöhen, indem die Breite des Kerns (V2) und der Stege („Zähne“) (V1 und V2) vergrößert wurde. Die höhere theoretische Steifigkeit dieser Werkzeuge reduzierte nur bei $f_z = 0{,}015$ mm und $p = 0{,}2$ mm den Versatz des gefrästen Kanals. Im Fall von Variante V1 war die Kraftkomponente F_x bei diesen Parametern aufgrund der Reibung der Späne in den kleinen Spannuten des Werkzeugs deutlich höher als bei dem Sonderwerkzeug ohne Kernanstieg und erhöhte Stegbreite.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass die Verbesserung der Spanabfuhr der Haupteinflussfaktor für die Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit und zur Vermeidung von Werkzeugbrüchen war. Dies führte dazu, dass das Werkzeug 3865 HB8 mit der niedrigsten Schneidenanzahl ($z = 2$) den geringsten radialen Versatz beim Eintauchen erzeugte. Die Variationen des Sonderwerkzeugs 303567129 zeigten, dass eine Erhöhung der Werkzeugsteifigkeit durch Verstärkung der Schneiden (V1 und V2) aufgrund der schlechteren Spanabfuhr durch die kleineren Spannuten dieser Werkzeuge nicht zielführend war.

Den Einfluss des Werkzeugs beim Tauchfräsen von CuZn37 mit einem Pitch von $p = 0{,}5$ mm, einem Vorschub von $f_z = 0{,}015$ mm und einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 50$ m/min auf die Zerspankraftkomponenten und die Bearbeitungsgenauigkeit zeigt Abbildung 4.11. Die Balkendiagramme zeigen je Werkzeug die gemessenen Kraftkomponenten F_x, F_y und F_z sowie den Versatz des tauchgefrästen Kanals auf der Eintritts- und Austrittsseite. Bei allen Versuchspunkten lagen die radialen Kraftkomponenten F_x und F_y höher als die axiale Kraftkomponente F_z. Die geringsten Kraftkomponenten und die beste Bauteilqualität wurde

aufgrund des besseren Spanabtransports mit dem zweischneidigen Werkzeug 3865 HB8 erzielt. Beim Tauchfräsen mit den vierschneidigen Werkzeugen 6716 und 30357129 traten wesentlich höhere radiale Zerspankraftkomponenten auf als mit Werkzeug 3865 (HB8). Dies wurde auf mangelhaften Spanabtransport in den kleineren Spankammern dieser Werkzeuge zurückgeführt.

Der Vergleich des unbeschichteten Werkzeugs 3865 HB8 mit einem kleinen Schneidkantenradius r_β = 5,0 µm mit dem beschichteten Werkzeug 3865 (r_β = 15,9 µm) deutete darauf hin, dass bei größeren Schneidkantenradien maßgeblich mehr Reib- und Quetscheffekte auftraten. Dies verursachte höhere Zerspankraftkomponenten und reduzierte die Bearbeitungsgenauigkeit.

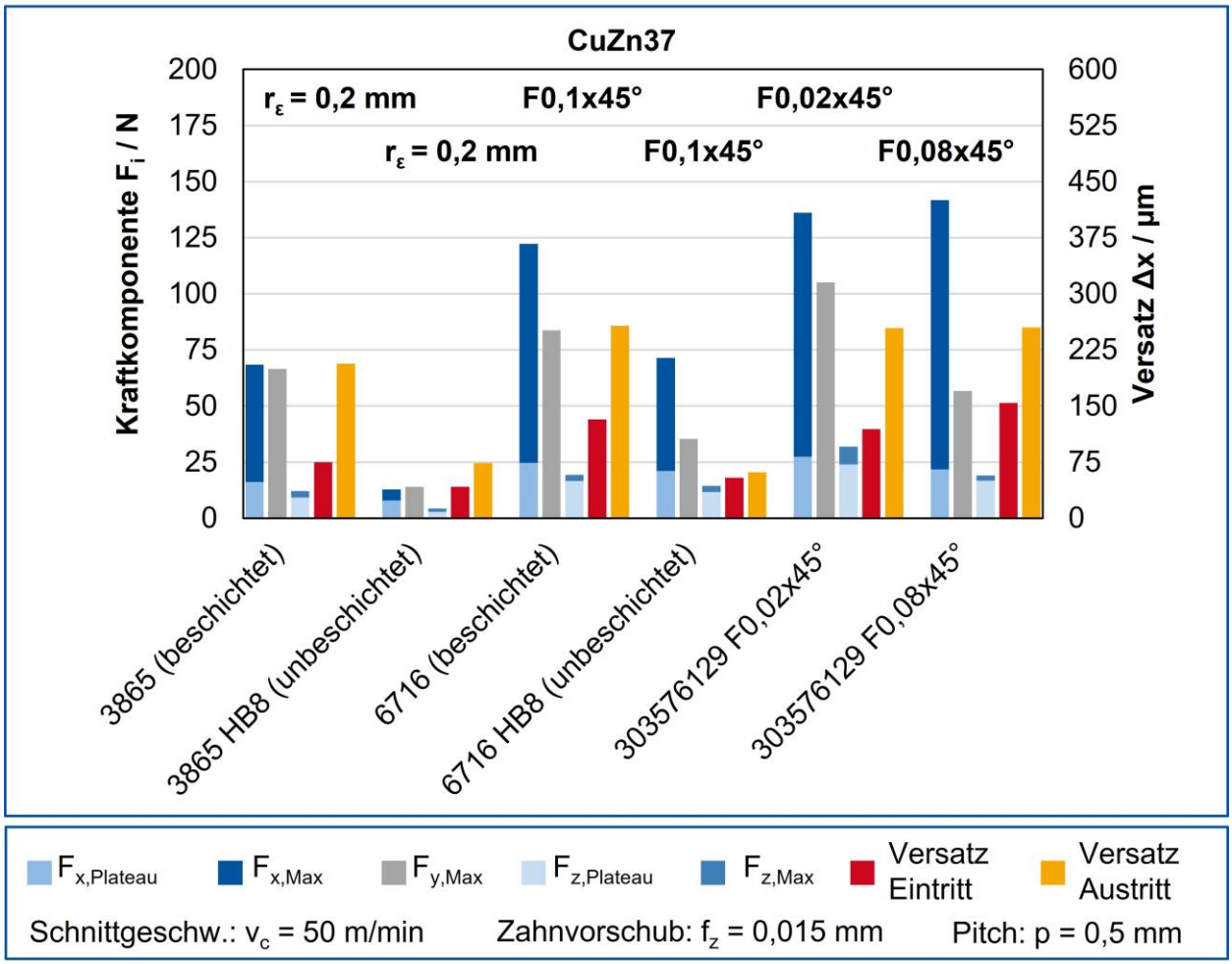


Abbildung 4.11: Kraftkomponenten und Versatz der Kavität beim Tauchfräsen von CuZn37 mit verschiedenen Werkzeugen

Beim Fräsen mit dem Werkzeug 6716 war der Unterschied hinsichtlich des Schneidkantenradius zwischen der unbeschichteten Version 6716 HB8 (r_β = 8,8µm) und der TiAlN-beschichteten Variante (r_β = 8,4µm) geringer als bei Werkzeug 3865. Die höheren Kraftkomponenten und geringerer Bearbeitungsgenauigkeit wurde hier auf eine möglicherweise höhere Reibung zwischen der TiAlN-Beschichtung und dem Werkstoff zurückgeführt. Der Einfluss der Fasenbreite des Sonderwerkzeugs 303576129 auf die Bearbeitungsgenauigkeit lag unterhalb der

Messgenauigkeit. Ergebnisse zum Tauchfräsen von CuZn37 unter anderen Schnittparametern befinden sich im Anhang unter Abschnitt 10.1.

Beim Drehen bildet CuZn42 Späne mit höherem Segmentierungsgrad und kleineren Spankrümmungsradien als CuZn37 aus [NOBE16]. Beim Tauchfräsen von CuZn42 war analog dazu der Spanabtransport weniger problematisch und die Bearbeitungsgenauigkeit insgesamt besser als bei der Bearbeitung von CuZn37 (Abbildung 4.12). Aufgrund der kleineren Spankrümmungsradien wurde die Bearbeitungsqualität beim Tauchfräsen mit vierschneidigen Werkzeugen weniger beeinträchtigt als beim Tauchfräsen von CuZn37. Aufgrund der höheren Produktivität mit verdoppelter Schneidenzahl wurde daher für die Praxis der Einsatz solcher Werkzeuge empfohlen. Im Gegensatz zur Bearbeitung von CuZn37 erzielte das Tauchfräsen mit dem Werkzeug 303576129 mit der Fasenbreite b_γ = 0,02 mm eine höhere Bearbeitungsgenauigkeit als das gleiche Werkzeug mit einer Fasenbreite von b_γ = 0,08 mm. Ergebnisse zum Tauchfräsen von CuZn42 unter anderen Schnittparametern befinden sich im Anhang unter Kapitel 10.2.

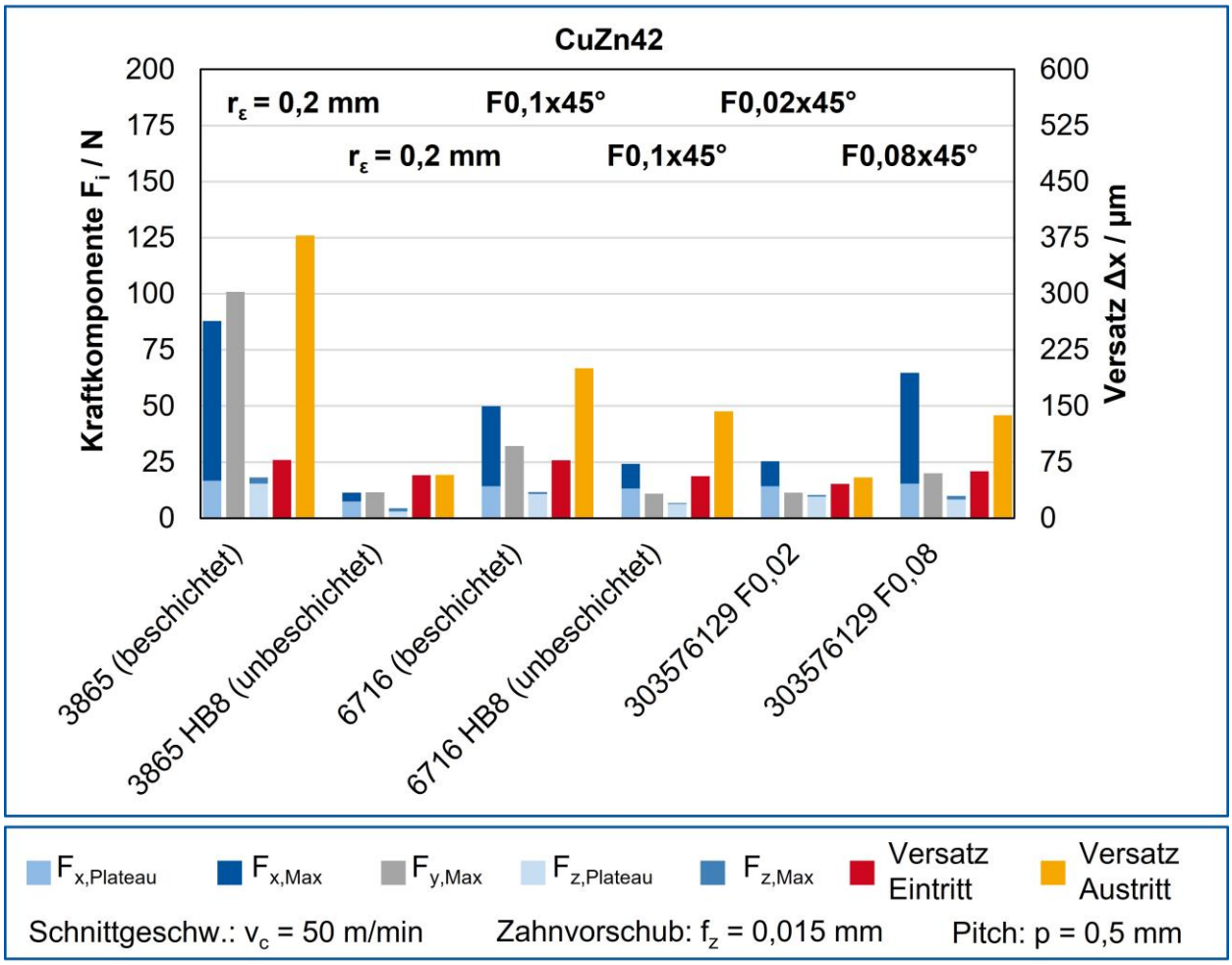


Abbildung 4.12: Kraftkomponenten und Versatz der Kavität beim Tauchfräsen von CuZn42 mit verschiedenen Werkzeugen

Beim Tauchfräsen von CuZn21SiP mit dem zweischneidigen Werkzeug 3865 (HB8) lagen die Zerspankraftkomponenten im Mittel um etwa 20% höher als bei der Bearbeitung von CuZn42 (Abbildung 4.13). Dies war in der höheren Festigkeit dieses Werkstoffs begründet. Aufgrund der nochmal höheren Spansegmentierung [NOBE16] und des dadurch verbesserten Spanabtransports lagen die Zerspankraftkomponenten bei Nutzung der vierschneidigen Werkzeuge 6716 (HB8) und 30357619 etwas niedriger als bei der Bearbeitung von CuZn42. Ergebnisse zum Tauchfräsen von CuZn21Si3P unter anderen Schnittparametern befinden sich im Anhang unter Abschnitt 10.3.

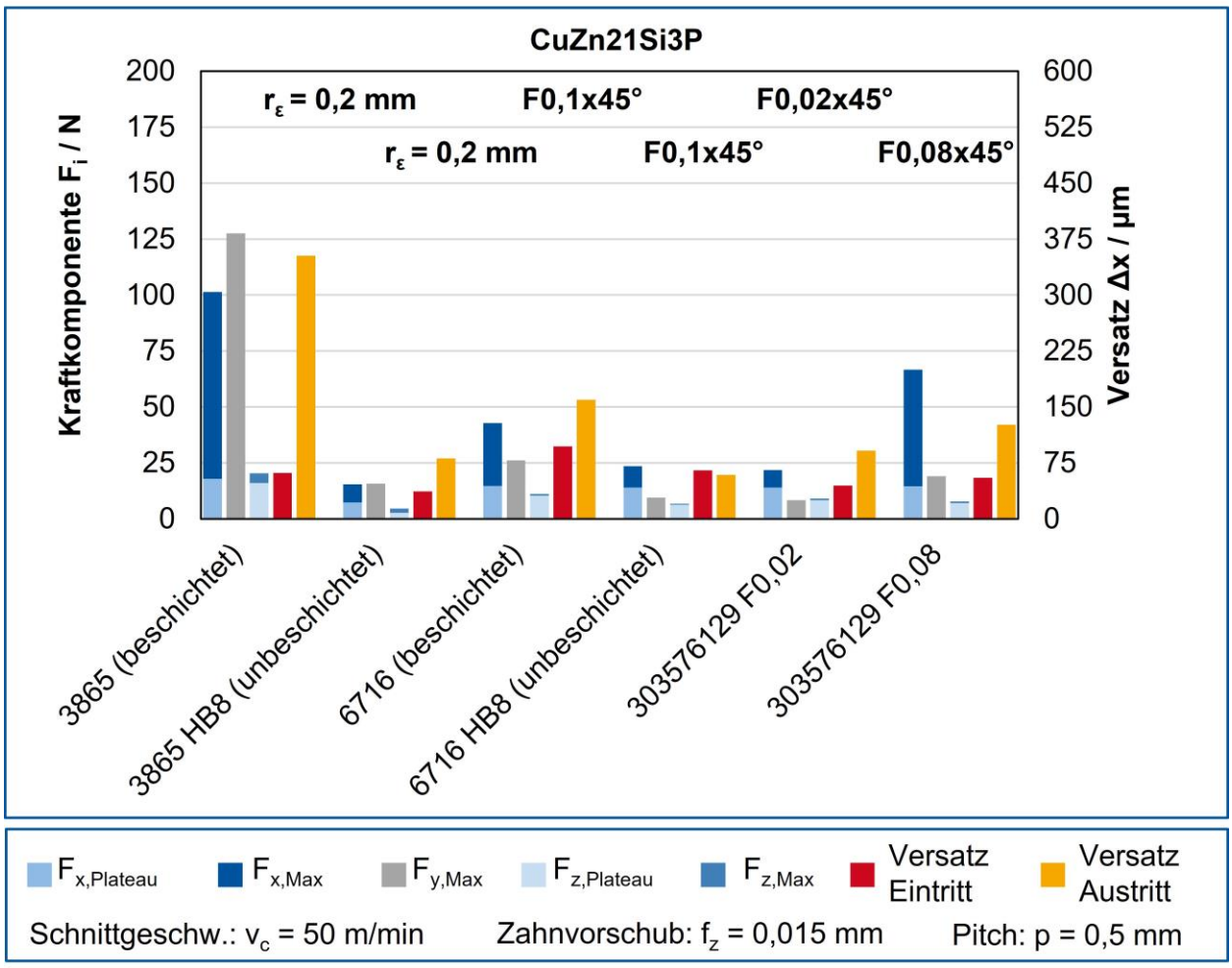


Abbildung 4.13: Kraftkomponenten und Versatz der Kavität beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P mit verschiedenen Werkzeugen

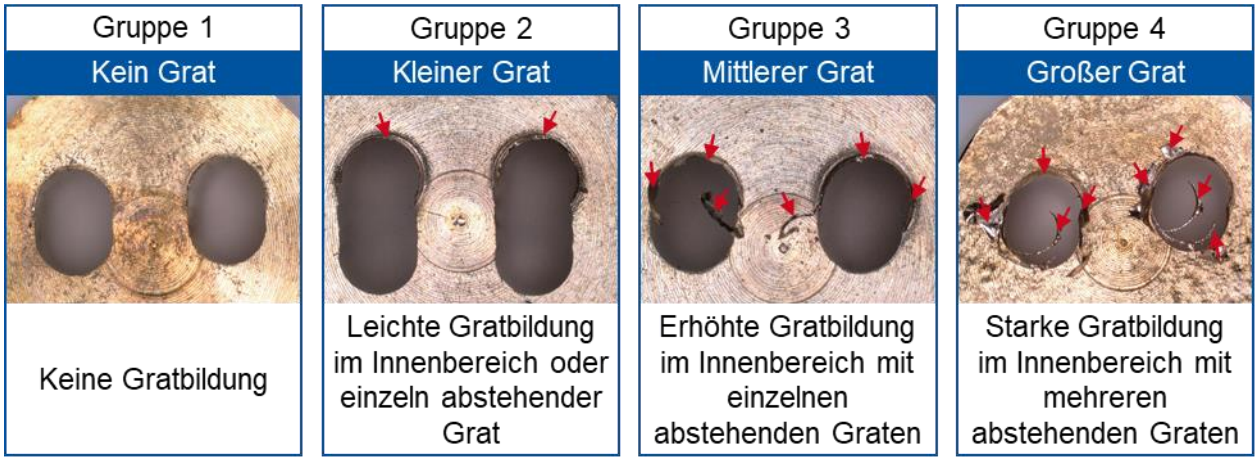


Abbildung 4.14: Qualitative Bewertung der Gratbildung beim Tauchfräsen auf der Werkzeugaustrittsseite

Die Gratbildung wurde qualitativ an der Werkzeugaustrittsseite der Versuchsbauteile bewertet (Abbildung 4.14). Dabei war qualitativ erkennbar, dass bei mit einer Vergrößerung des Spanungsquerschnitts und des Eckenradius bzw. der Eckenfase die Gratbreite zunahm (Abbildung 4.15).

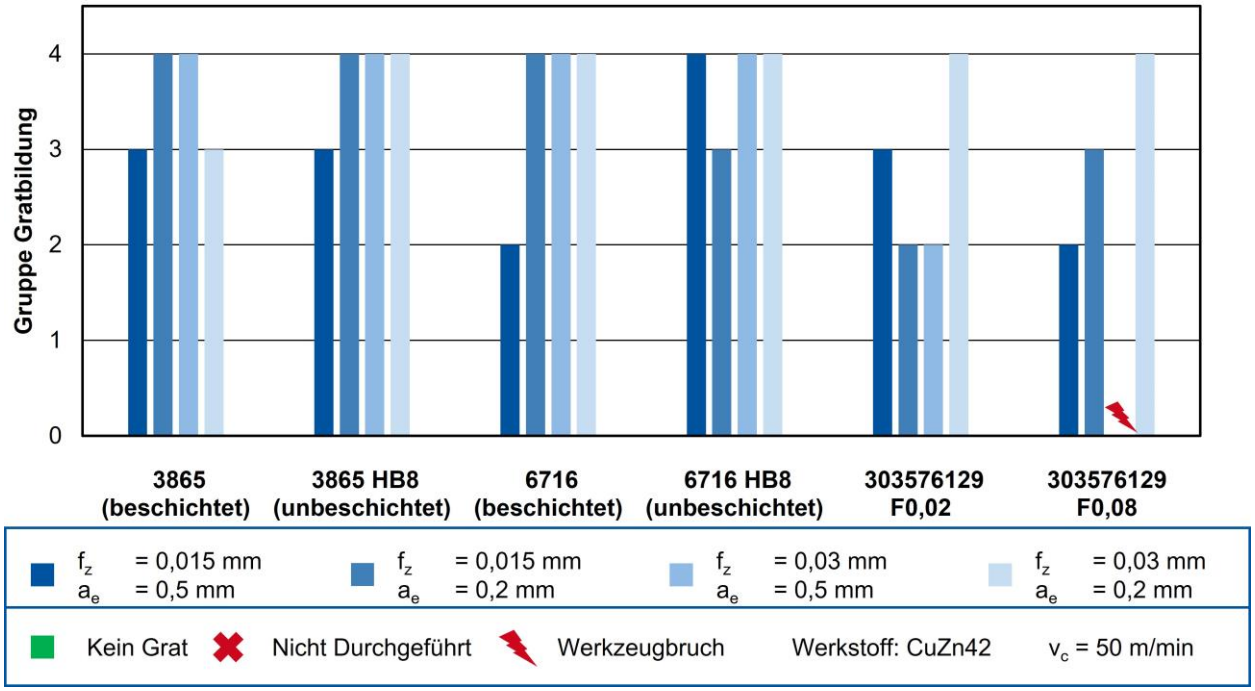


Abbildung 4.15: Gratbildung beim Tauchfräsen von CuZn42 auf der Werkzeugaustrittsseite

Zusammenfassend ließ sich festhalten, dass die Bearbeitungsgenauigkeit und die Zerspankraftkomponenten maßgeblich durch den Spanabtransport beeinflusst wurden. Aufgrund des größeren Spanraums als bei vierschneidigen Werkzeugen waren für das Tauchfräsen von CuZn37 nur zweischneidige Werkzeuge geeignet. Bei der Bearbeitung von CuZn21Si3P und CuZn42 wurde mit vierschneidigen Werkzeugen eine ähnliche Bearbeitungsgenauigkeit bei doppelter Produktivität erreicht. Der Schneidkantenradius r_β eines beschichteten Werkzeugs lag in der Nähe des angewandten Vorschubs von $f_z = 0{,}015$ mm. Beim Tauchfräsen mit diesem

Werkzeug wurden aufgrund der Unterschreitens der Mindestspanungsdicke hohe Zerspankraftkomponenten und eine geringe Bearbeitungsgenauigkeit erzeugt.

Hinsichtlich der Schnittparameter zeigte sich, dass die geringsten Zerspankraftkomponenten bei niedrigem Pitch p und Zahnvorschub f_z erreicht wurden. Zur Steigerung der Produktivität war eine Erhöhung des Pitch p anstelle des Vorschubs f_z zielführender, da damit ein günstigeres Verhältnis von radialen zu axialen Kraftkomponenten erzielt wurde als bei einer Steigerung des Vorschubs je Zahn f_z.

4.3.2 Kühlschmierstoffstrategie

Die in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Untersuchungen zeigten, dass der Spanabtransport insbesondere beim Tauchfräsen maßgeblichen Einfluss auf die erzielbare Bauteilqualität hatte. Daher wurden Untersuchungen zur Optimierung der KSS-Strategie beim Tauchfräsen durchgeführt und anhand der gefertigten Bauteilqualität bewertet. Die Untersuchungen wurden auf dem Drehzentrum NZX 1500 von DMG MORI durchgeführt. Die Fräswerkzeuge wurden als angetriebene Werkzeuge eingespannt. Die Bauteile (vgl. Kapitel 4.1) wurden in einem Spannzangenfutter gespannt. Aufgrund der kurzen Bauteillänge befanden die Werkstücke sich fast vollständig im Inneren des Futters. Die Bearbeitungsfolge mit Vorbohren, vier davon ausgehenden Tauchfräshüben je Kavität sowie die Messung des Versatzes der Kavität erfolgte analog zu Abschnitt 4.3.1. Als Versuchswerkzeug wurde der vierschneidige Schaftfräser 303576129 von der Fa. GÜHRING mit einer Fasenbreite von b_γ = 0,02 mm verwendet (Abbildung 4.16, vgl. Tabelle 4.2). Dieses Werkzeug wies Kühlkanäle im Schaft auf, die zur Zerspanstelle hin orientiert sind. Der KSS-Strahl traf folglich eng fokussiert direkt auf die Bearbeitungsstelle auf. Die Untersuchungen wurden mit den Werkstoffen CuZn37, CuZn42 und CuZn21Si3P durchgeführt.

Kühlkanäle, die im Werkzeuginneren bis zur Werkzeugspitze ausgeführt sind, erreichen die Zerspanstelle noch direkter. Dies resultiert jedoch auch in einer Reduzierung der mechanischen Belastbarkeit der Tauchfräser bei den untersuchten Werkzeugdurchmessern von d = 2 mm. Da die Zerspanwerkzeuge beim untersuchten Tauchfräsprozess einer hohen Biegebelastung ausgesetzt sind (vgl. Kapitel 4.3.1) wurde nach Abstimmung mit dem PA auf die Untersuchung von solchen Werkzeugen verzichtet.

Der ölbasierte Kühlschmierstoff mit der Bezeichnung Blasomill GT 22 von BLASER SWISSLUBE wurde per Überflutungskühlung oder durch die Kühlkanäle im Werkzeugschaft („interne Zufuhr“) mit drei Druckstufen zugeführt. Zusätzlich wurde die Trockenbearbeitung ohne Kühlschmierstoff untersucht. Der Einsatz von Minimalmengenschmierung war nicht möglich, da aufgrund der kleinen Bauteilabmessungen weder eine Möglichkeit zur externen noch zur internen Zufuhr bestand.

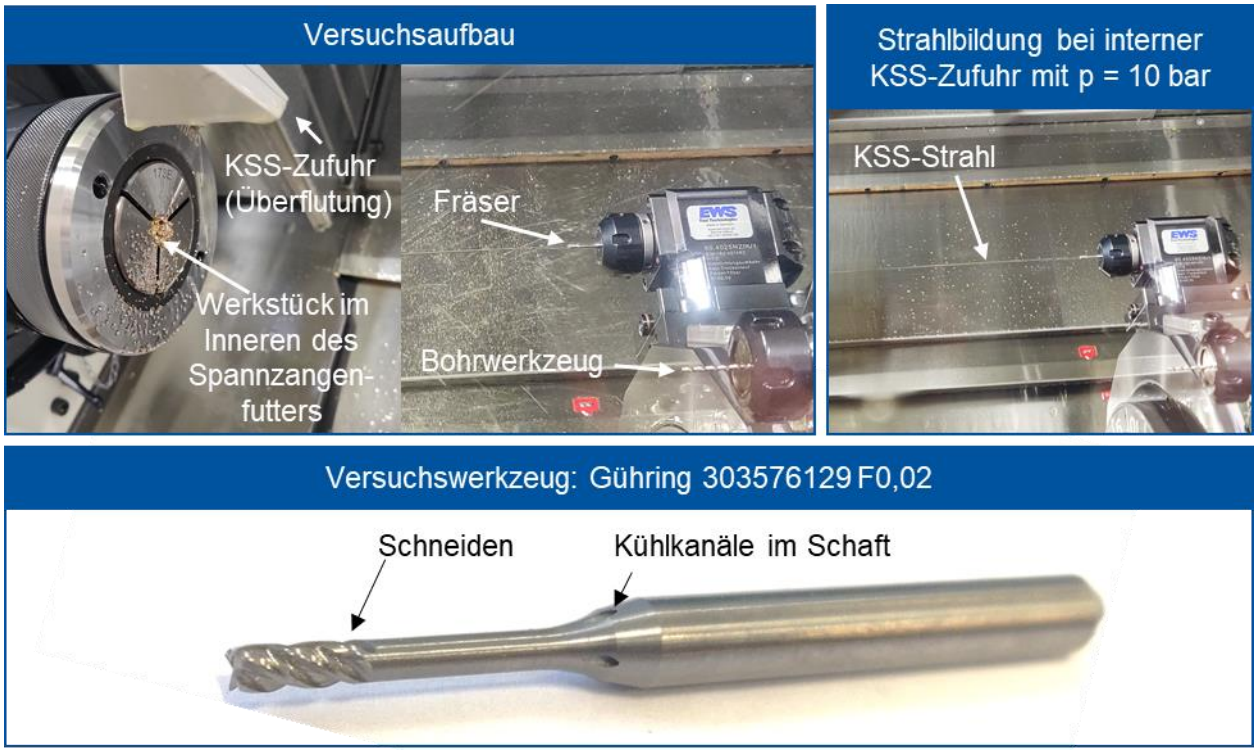


Abbildung 4.16: Versuchsaufbau zur Untersuchung der KSS-Strategie beim Tauchfräsen

Der seitliche Versatz Δx der tauchgefrästen Kavität bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 50 m/min, Vorschub f_z = 0,015 mm und einem Pitch von p = 0,5 mm in Abhängigkeit von der KSS-Strategie und dem Werkstoff ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Unabhängig vom betrachteten Werkstoff war die Bearbeitungsgenauigkeit beim Einsatz von Trockenbearbeitung geringer als mit Überflutungskühlung. Die wurde auf die höhere Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, insbesondere an den Umfangsschneiden, zurückgeführt. Der Kühlschmierstoffstrahl traf direkt auf die Kavität auf, in der der Zerspanprozess stattfand. Daher konnte der Spanabtransport in Abhängigkeit vom Zufuhrdruck entweder durch das Ausspülen von Spänen aus der Kavität verbessert oder durch das Hineinpressen von Spänen in die Kavität schlechter ausfallen als bei Verzicht auf die direkte KSS-Zufuhr. Es konnte daher ein Optimum hinsichtlich des Zufuhrdruckes bei interner KSS-Zufuhr ermittelt werden, das von den Schnittparametern und dem Werkstoff abhing. Aufgrund der großen Spanstauchung und der hohen Adhäsionsneigung bei der Zerspanung von CuZn37 lag das Optimum hinsichtlich des Spanabtransports und der Bearbeitungsgenauigkeit bei einem Druck von p_{KSS} = 40 bar. Beim Tauchfräsen von CuZn42 und CuZn21Si3P wurde die höchste Bearbeitungsgenauigkeit bei einem Druck von p_{KSS} = 10 bar erzielt. Dies war durch die Bildung kürzerer Späne, die sich weniger verklemmen, begründet. Weitere Untersuchungen zeigten, dass bei größeren Spanungsquerschnitten höhere KSS-Zufuhrdrücke erforderlich waren, um ein Optimum hinsichtlich des Spanabtransports und der Bauteilqualität zu erreichen.

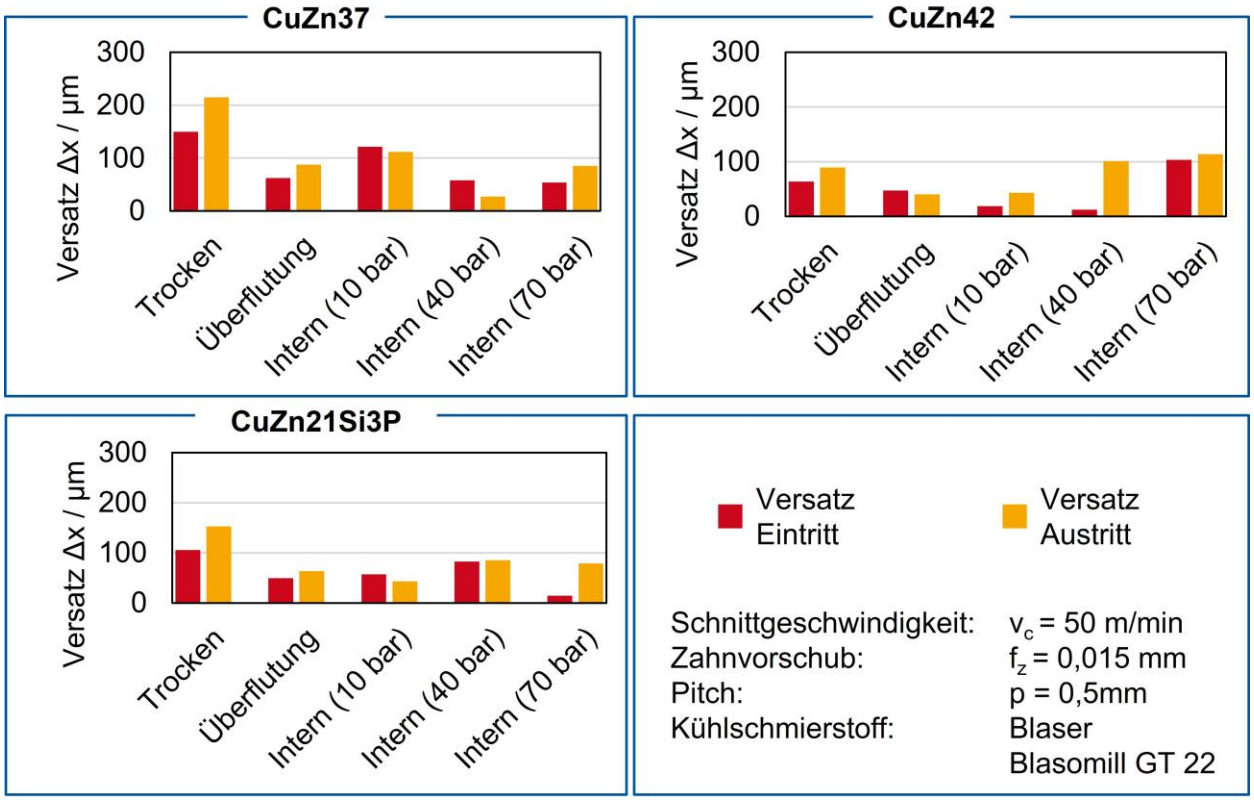


Abbildung 4.17: Seitlicher Versatz der tauchgefrästen Kavitäten in Abhängigkeit von KSS-Strategie und Versuchswerkstoff

Die Kühlschmierstrategie hatte erheblichen Einfluss auf den Spanabtransport und die Bauteilqualität beim Tauchfräsen. Durch die interne Zufuhr von KSS mit einem zum Werkstoff und den Schnittparametern passenden Zuführdruck konnte der Spanabtransport gegenüber dem Einsatz von Überflutungskühlung verbessert werden.

4.3.3 Schneidstoff und Beschichtung

Bei den Untersuchungen zur Bewertung von Schneidstoff und Beschichtung stand die Bewertung des Werkzeugverschleißes im Fokus. Die Beschichtung der Werkzeuge hatte zudem Einfluss auf die Bauteilqualität und die Zerspankraftkomponenten. Da dies primär durch die Änderung der Schneidenmikrogeometrie begründet war, wurden diese Aspekte in Abschnitt 4.3.1 beschrieben.

Die Zerspanuntersuchungen zur Bewertung des Werkzeugverschleißes beim Tauchfräsen wurden auf einem Stangendrehzentrum vom Typ NZX 1500 von DMG MORI durchgeführt. Der ölbasierte Kühlschmierstoff Blasomill GT 22 von BLASER SWISSLUBE wurde per Überflutungskühlung zugeführt. Die Untersuchungen wurden im Rahmen von AP 2 mit den Werkstoffen Cu-OFE, CuZn42 und CuZn21Si3P mit dem Werkzeug 6716 durchgeführt. Im Rahmen von AP 3 wurden anschließend Untersuchungen mit längerer Schnittzeit im Werkstoff CuZn42 durchgeführt. Als Versuchswerkzeuge wurden die Werkzeuge 6716 und 3865 von der Fa. GÜHRING jeweils in der TiAlN-beschichteten Variante und unbeschichtet mit dem Namenszusatz HB8 eingesetzt (vgl.

Tabelle 4.1). Die Untersuchungen wurden unter den folgenden, konstanten Schnittparametern durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit von v_c = 62,8 mm wurde durch die Maximaldrehzahl des angetriebenen Werkzeugs bestimmt.

- Schnittgeschwindigkeit v_c = 62,8 m/min
- Pitch p = 0,5 mm
- Vorschub je Zahn f_z = 0,015 mm
- Vorschubweg je Schnitt bzw. Bearbeitungstiefe l_c = 12 mm

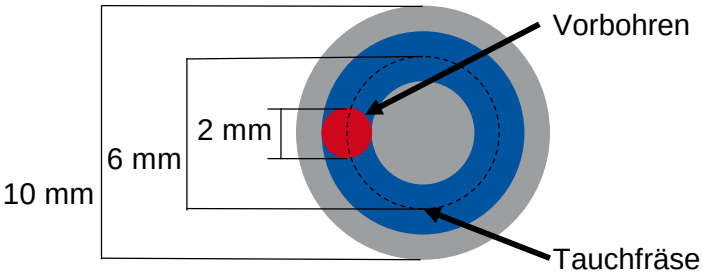


Abbildung 4.18: Versuchsablauf bei den Verschleißuntersuchungen zum Tauchfräsen

Die Bearbeitung erfolge an der Stirnseite der Rundstangen. Als Ausgangspunkt für die Tauchfräsbearbeitung wurde eine Pilotbohrung gefertigt (Abbildung 4.18). Davon ausgehend wurden je Bauteil 33 Tauchfrässchnitte in ringförmiger Anordnung durchgeführt. Der Durchmesser der Mittelpunktsbahn betrug d = 6 mm. Die Messung des Werkzeugverschleißes erfolgte an einem Auflichtmikroskop vom Typ VHX 6000 von KEYENCE. Da die Versuchswerkzeuge unterschiedliche Schneidenzahlen aufwiesen wurde die Verschleißmarkenbreite bezogen auf den Vorschubweg je Zahn ausgewertet.

Abbildung 4.19 zeigt die qualitativen Verschleißmerkmale beim Tauchfräsen von den beispielhaft ausgewählten Werkstoffen CuZn42 und Cu-OFE. Bei der Tauchfräsbearbeitung von CuZn42 mit dem unbeschichteten Hartmetallwerkzeug 3865 traten neben geringem Reibverschleiß an der Stirnschneide auch Ausbrüche an den Umfangsschneiden in der Nähe der Schneidenecke auf. Aufgrund der Prozesskinematik befand sich dieser Bereich der Schneiden nominell nicht im Eingriff. Aufgrund der hohen Prozessdynamik (vgl. Kapitel 4.3.1) waren die Umfangsschneiden periodisch im Eingriff und wurden zusätzlich durch sich verklemmende Späne belastet. Dies verursachte die Ausbrüche an den Umfangsschneiden des unbeschichteten Werkzeugs 3865 HB8. Bei der mit einer Nanocomposite-TiAlN-Beschichtung („Signum“, Fa. GÜHRING) beschichteten Variante desselben Werkzeugs traten keine Ausbrüche, sondern lediglich Reibverschleiß an den Umfangsschneiden auf. Beide Werkzeuge erreichten einen Vorschubweg von $l_{f,z}$ = 43,2 m je Schneide mit einer geringen maximalen Verschleißmarkenbreite von VB_{max} = 18 µm (unbeschichtet) bzw. VB_{max} = 10 µm mit Beschichtung (Abbildung 4.20).

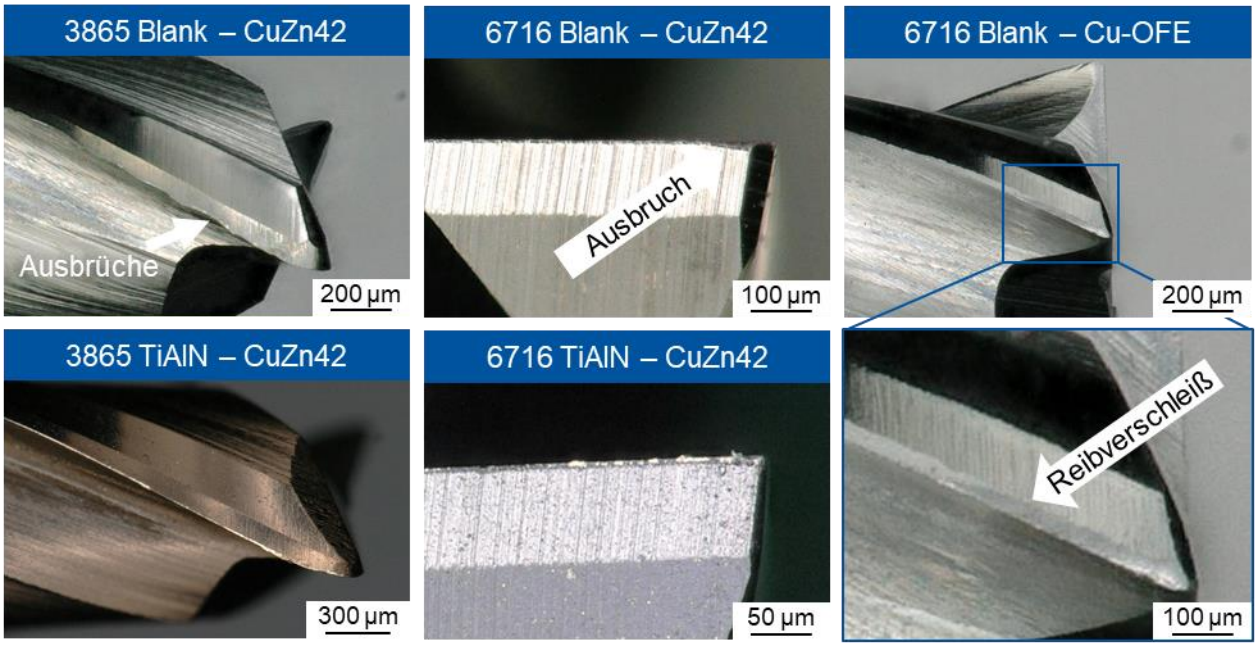
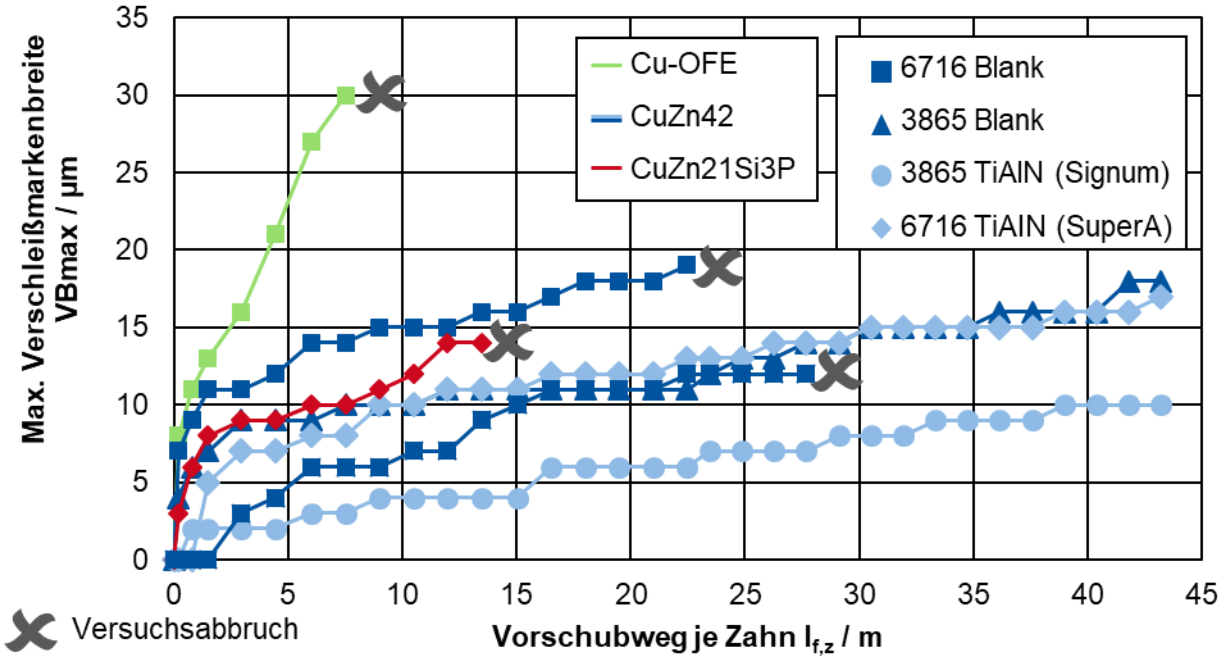


Abbildung 4.19: Verschleißmerkmale beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen



Prozess: Tauchfräsen	Werkzeug: Gühring 6716-Blank
Schnittgeschw.: v_c = 62,83 m/min	Zahnvorschub: f_z = 0,015 mm
KSS-Strategie: Konv. Überflutung	KSS: Blasomill GT22

Abbildung 4.20: Verschleißfortschritt beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen

Bei der Tauchfräsbearbeitung von CuZn42 mit dem vierschneidigen Werkzeug 6716 HB8 ohne Beschichtung trat nach einem Vorschubweg von $l_{f,z}$ = 27,7 m je Zahn ein Ausbruch an der Schneidenecke auf, der auf die mechanische Wechselbelastung in diesem Bereich zurückgeführt wurde. Die maximale Verschleißmarkenbreite betrug zu diesem Zeitpunkt lediglich VB_{max} = 12 µm. In einem Wiederholversuch wurde nach einem Vorschubweg je Zahn von $l_{f,z}$ = 22,3 m eine größere Verschleißmarkenbreite von VB_{max} = 19 µm gemessen. Die mit einer

TiAlN-Beschichtung („SuperA“, Fa. GÜHRING) versehene Variante desselben Werkzeugs erreichte einen Vorschubweg je Zahn von $l_{f,z}$ = 43,2 m mit VB_{max} = 17 µm.

Bei der Bearbeitung von Cu-OFE war der Verschleißfortschritt aufgrund der höheren Adhäsionsneigung des Werkstoffs wesentlich schneller als beim Tauchfräsen von CuZn42. Der Versuch wurde nach einem Vorschubweg von $l_{f,z}$ = 7,5 m je Zahn aufgrund eines Eckenausbruchs abgebrochen. Zusätzlich trat aufgrund der Prozessdynamik adhäsiver Reibverschleiß an der Umfangsschneide auf. Das Tauchfräsen von CuZn21Si3P mit dem TiAlN-beschichteten Werkzeug 6716 erzeugte einen höheren Werkzeugverschleiß als bei der Bearbeitung von CuZn42. Der Versuch wurde aufgrund eines Werkzeugbruchs nach einer Messung abgebrochen.

4.4 Handlungsempfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen

Beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen bestand die maßgebliche Herausforderung in der Einhaltung der industrieüblichen Toleranzen zum seitlichen Verlaufen der gefrästen Kavität. Aufgrund der kleinen Abmessungen von Werkzeug und Kavität hatte der Spanabtransport maßgeblichen Einfluss auf die erzielbare Bearbeitungsgenauigkeit. Durch die Auswahl von Werkzeugen mit ausreichend großen Spankammern konnte der Spanabtransport verbessert und so Spanstau vermieden werden. Die direkte Zufuhr von Kühlschmierstoff unter einem an Werkstoff und Schnittparameter angepasstem Druck verhinderte Spanstau und verbesserte damit die Bearbeitungsqualität. Einen negativen Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit hatte die Verwendung von Werkzeugen mit größeren Schneidkantenradien r_β, wodurch die Mindestspanungsdicke unterschritten und die Bearbeitungsgenauigkeit reduziert wurde. Es wird daher der Einsatz von Werkzeugen mit möglichst kleinen Schneidkantenradien empfohlen. Durch das Aufbringen von Schichtsystemen auf TiAlN-Basis auf die eingesetzten Vollhartmetallschaftfräser wurde der Verschleißfortschritt verlangsamt und das Auftreten von Ausbrüchen an den Schneidenecken und Umfangsschneiden vermieden. Der Schneidkantenradius r_β sollte durch die Beschichtung nicht über ca. r_β = 10 µm ansteigen.

Aufbauend auf den dargestellten Untersuchungsergebnissen wurden die in Tabelle 4.3 zusammengefassten Empfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung abgeleitet. Dabei wurde die Einhaltung von maximal Δx = 50 µm seitlichem Versatz der gefrästen Kavität vor der Produktivität und geringem Werkzeugverschleiß priorisiert. Aufgrund der duktileren Spanbildung trat beim Tauchfräsen von CuZn37 häufiger Spanstau auf, sodass für diesen Werkstoff trotz der damit verbundenen Produktivitätseinbußen der Einsatz von zweischneidigen Schaftfräsern mit

großen Spankammern empfehlenswert sind. Beim Tauchfräsen von CuZn42 und CuZn21Si3P war eine höhere Produktivität mit vierschneidigen Werkzeugen möglich.

Tabelle 4.3: Empfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen

Stellgröße	**CuZn37**	**CuZn42**	**CuZn21Si3P**
Schnittgeschwindigkeit v_c / m/min	50 - 100	50 - 100	50 - 100
Vorschub je Zahn f_z / mm	0,015	0,015	0,015
Pitch p / mm	≤ 0,5	≤ 0,5	≤0,5
Schneidenzahl z / -	2	4	4
Eckenradius r_ε bzw. Fasenbreite b_γ / mm	b_γ ≤ 0,08 mm	b_γ ≤ 0,08 mm	b_γ ≤ 0,08 mm
Drallwinkel δ / °	30 - 35	35	35
Stirnspanwinkel γ_s / °	5	5	2
Stirnfreiwinkel α_s / °	12	10	10
Schneidstoff	Hartmetall, unbeschichtet	Hartmetall, ggf. TiAlN-beschichtet	Hartmetall, ggf. TiAlN-beschichtet
Werkzeugempfehlung	Gühring 3865 HB8	Gühring 303576129 F0,02	Gühring 6716 HB8
KSS-Strategie	Direkte Zufuhr, p = 40 bar	Direkte Zufuhr, p = 10 bar	Direkte Zufuhr, p = 10 bar

5 Vollnutenfräsen mit d = 10 mm

Das Vollnutenfräsen mit einem Werkzeugdurchmesser von d = 10 mm wurde als Beispielprozess für die konventionelle Fräsbearbeitung ausgewählt. Prozesse dieser Art finden primär in der Sanitärindustrie sowie in Anwendungen des allgemeinen Maschinenbaus Anwendung.

5.1 Versuchsaufbau

Die Zerspanuntersuchungen zur Bewertung der Bauteilqualität, der Spanformen und der Zerspankraftkomponenten wurden auf einem Bearbeitungszentrum vom Typ NHX 5000 von DMG MORI durchgeführt. Auf dem Maschinentisch war auf einem Winkel die piezoelektrische Kraftmessplattform vom Typ 9255 von KISTLER aufgespannt, die zur Messung der Zerspankraftkomponenten genutzt wurde. Aus den Werkstoffstangen mit Durchmesser d = 40 mm wurden die in Abbildung 5.1 dargestellten barrenförmigen Versuchsbauteile herausgetrennt. Diese wurden in einem hydraulischen Schraubstock gespannt.

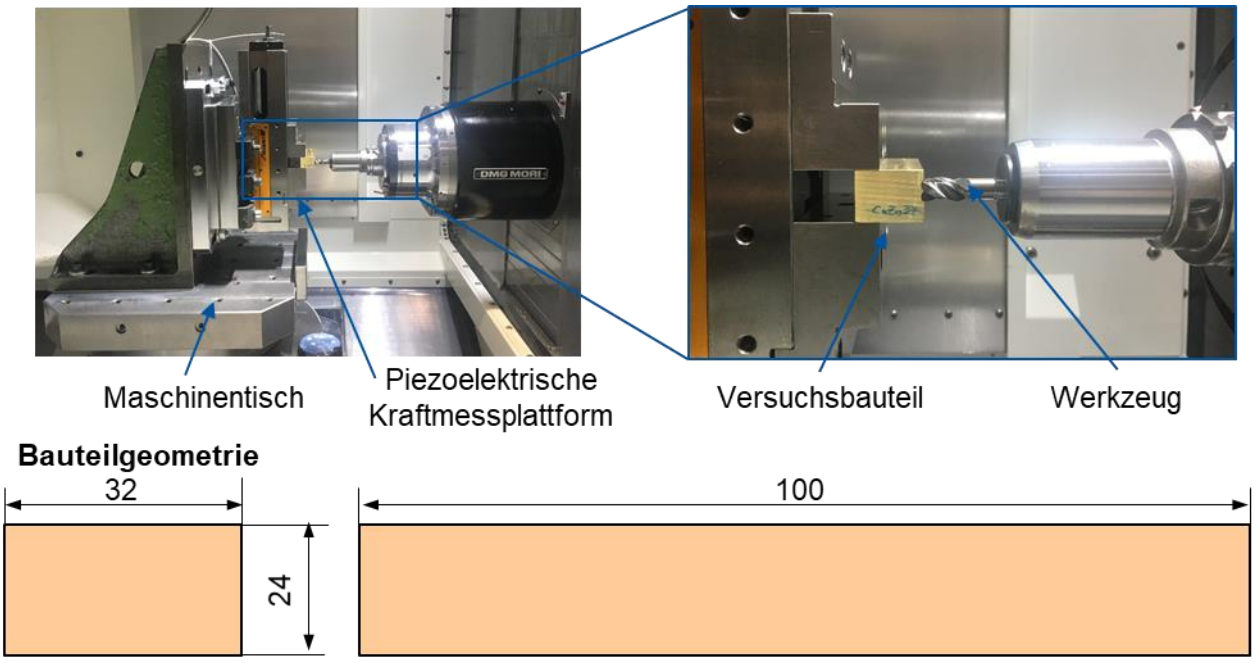
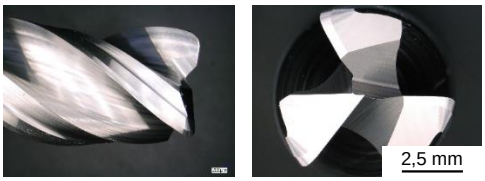


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau und Werkstückgeometrie beim Nutenfräsen

Als Versuchswerkzeug stellte die Fa. KENNAMETAL Schaftfräser des Typs ABDE1000A3ARG (vgl. Tabelle 5.1) für die Untersuchungen zur Verfügung. Diese wurden in einem Hydrodehnspannfutter aufgespannt, um eine geringe Rundlaufabweichung bei der Bearbeitung sicherzustellen. Die Vollnuten wurden über die gesamte Stirnfläche gefräst, sodass die Bauteilqualität am Werkzeugein- und -austritt bewertet werden konnte. Der wassermischbare Kühlschmierstoff mit der Bezeichnung Vasco TP 519 von der Fa. BLASER SWISSLUBE wurde als Emulsion mit einer Konzentration von 9% per Überflutungskühlung zugeführt. Die Schnittparameter wurden im folgenden Bereich variiert:

- Schnittgeschwindigkeit v_c = 50 - 300 m/min
- Zahnvorschub f_z = 0,05 - 0,2 mm
- Schnitttiefe a_p = 1 - 3 mm

Tabelle 5.1: Geometrie des Versuchswerkzeugs für das Nutenfräsen

Werkzeugbezeichnung	**ABDE1000A3ARG**
Makrogeometrie	
Hersteller	KENNAMETAL
Bezeichnung	Schaftfräser
Substrat	Hartmetall
Beschichtung	Unbeschichtet
Werkzeugdurchmesser d / mm	10
Schneidenanzahl z / -	3
Drallwinkel δ / °	40
Max. Frästiefe $a_{p,max}$ / mm	30
Schneidenlänge / mm	15
Eckenradius $r_ε$ / mm	1

5.2 Bewertung und Optimierung der Zerspanbarkeit beim Vollnutenfräsen

Die Spanbildung beim Nutenfräsen wurde primär durch die Spansegmentierung beeinflusst (Abbildung 5.2). Bei den Werkstoffen Cu-HCP und CuZn37 trat Fließspanbildung auf. Diese Späne wurden primär durch die Spankammer geformt. Beim Vollnutenfräsen der anderen Versuchswerkstoffe waren die Späne aufgrund von höherer Spansegmentierung enger gekrümmt. Im Gegensatz zum Tauchfräsen trat bei keinem Versuchspunkt Spanstau auf.

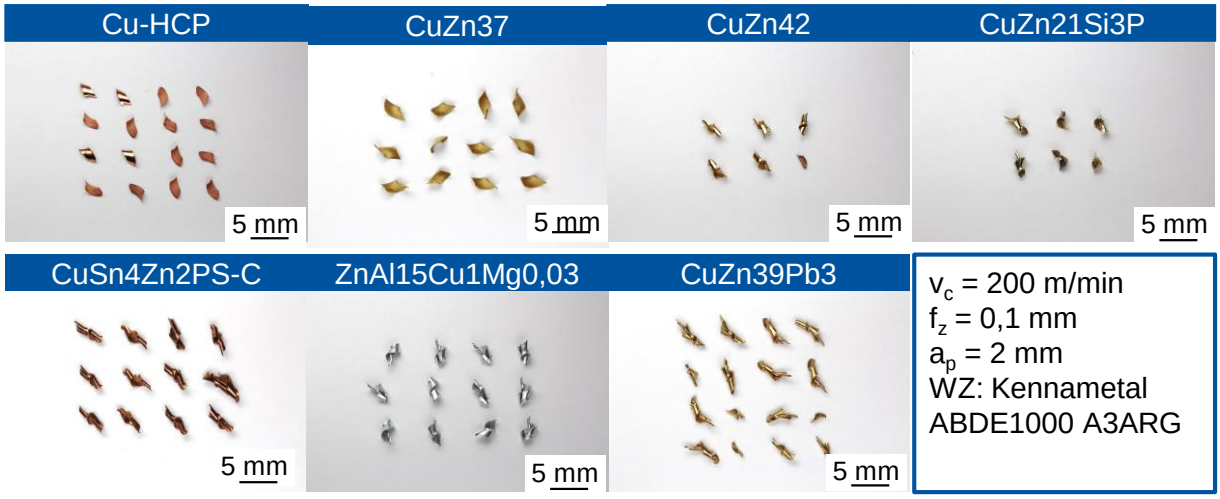


Abbildung 5.2: Unterschiedliche Spankrümmungsradien beim Vollnutenfräsen in Abhängigkeit vom Werkstoff

Der Spanungsquerschnitt hatte im untersuchten Parameterbereich lediglich Einfluss auf die Abmessungen des Spans, nicht jedoch auf die Spanform. Dies galt für alle Versuchswerkstoffe. Abbildung 5.3 zeigt dies anhand des Versuchswerkstoffs CuZn37. Die Schnittgeschwindigkeit hatte im untersuchten Parameterbereich ebenfalls keinen Einfluss auf die Spanform (Abbildung 5.4). Zusätzliche Untersuchungen mit dem Ziel der Verbesserung der Spanform oder des Spanabtransports waren daher nicht erforderlich.

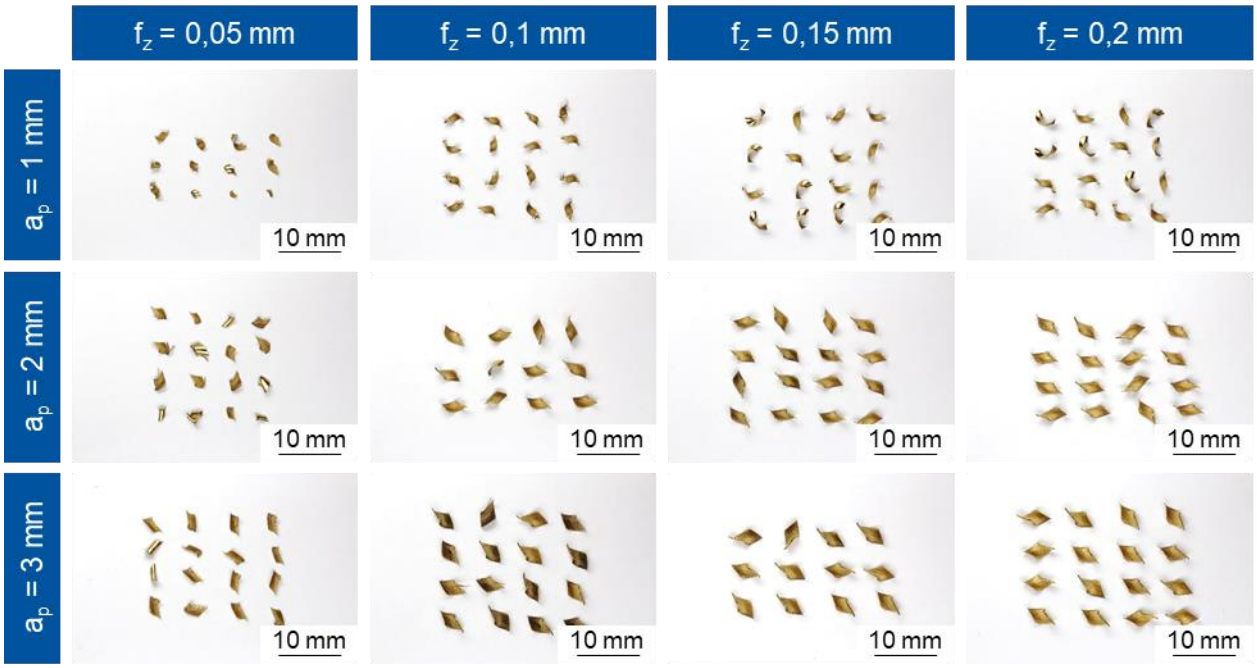


Abbildung 5.3: Spanformen beim Vollnutenfräsen von CuZn37 bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min

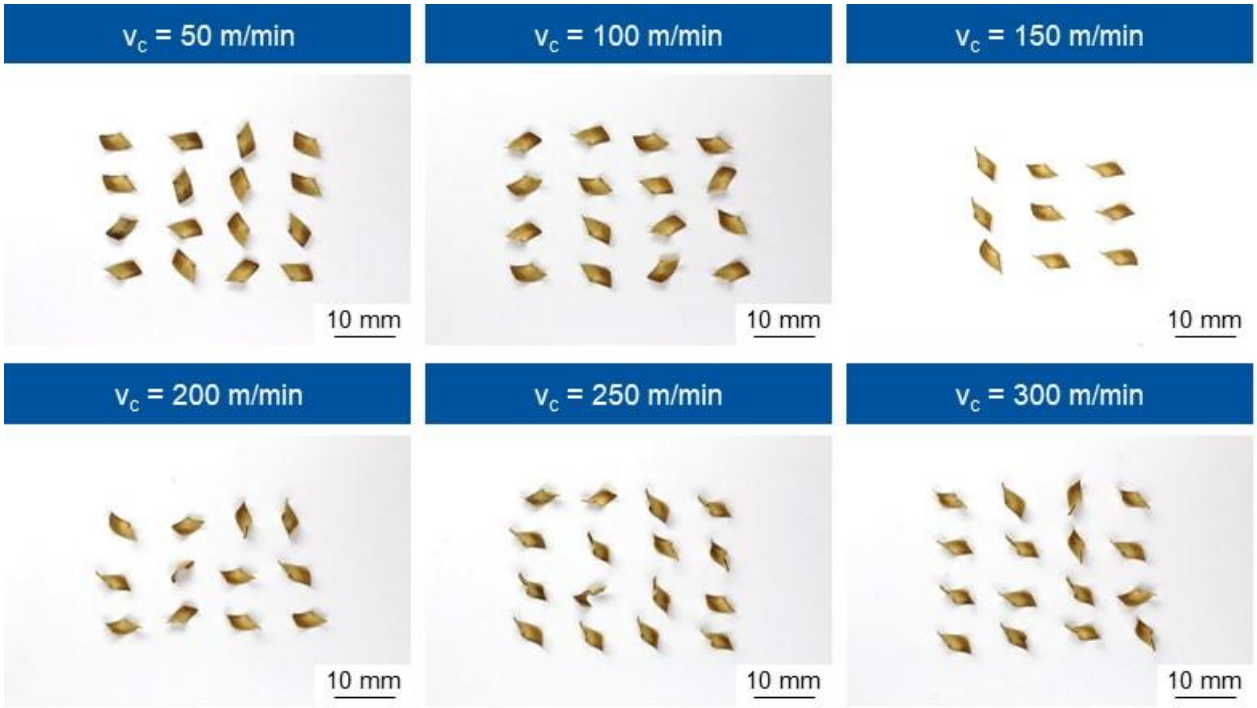


Abbildung 5.4: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Spanform beim Vollnutenfräsen von CuZn37 mit einem Zahnvorschub von f_z = 0,1 mm und einer Eingriffstiefe von a_p = 2 mm

Die Zerspankraftkomponenten wurden anhand der Aktivkraft F_a bewertet. Dies bezeichnet die vektorielle Addition der Vorschubkraft F_f und der dazu in der Schnittebene orthogonalen Vorschubnormalkraft F_{fn} (Abbildung 5.5). Die Aktivkraft F_a fiel mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit v_c aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupferbasiswerkstoffen nur geringfügig ab. Die Zinkknetlegierung ZnAl15Cu1Mg0,03 erzeugte bei $v_c > 100$ m/min die geringste Aktivkraft F_a, die noch unterhalb der, bei der Bearbeitung des bleihaltigen Referenzwerkstoffs CuZn39Pb3 gemessenen Aktivkraft lag. Bei der Bearbeitung der Messingwerkstoffe CuZn37 und CuZn42 lag die Aktivkraft F_a etwa um 50%, höher als bei der Bearbeitung von CuZn39Pb3. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 300 m/min wurde beim Vollnutenfräsen von allen Versuchswerkstoffen ein erheblicher Anstieg der Prozessdynamik festgestellt. Dies wurde in einer späteren Analyse auf die Dynamik der Werkzeugmaschine zurückgeführt und war nicht durch den Zerspanprozess begründet.

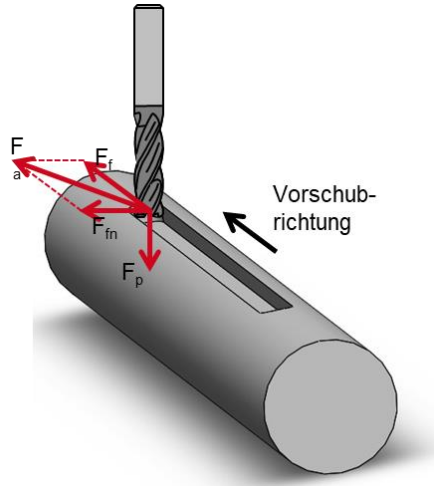
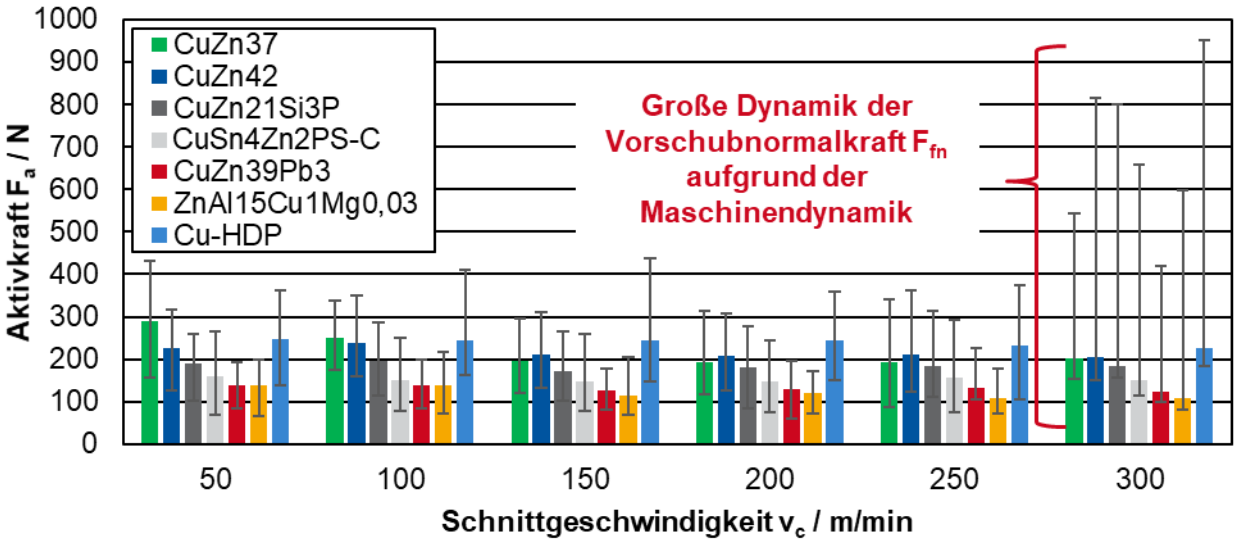


Abbildung 5.5: Orientierung der Zerspankraftkomponenten beim Vollnutenfräsen



Prozess:	Nutenfräsen	Werkzeug:	ABDE1000A3ARG
Zahnvorschub:	f_z = 0,1 mm	Maschine:	DMG MORI NHX 5000
Werkzeuggeom.:	Schaftfräser (10 mm)	Eingriffstiefe:	a_p = 2 mm
KSS:	Emulsion	Werkstoff:	Variabel

Abbildung 5.6: Aktivkraft beim Vollnutenfräsen in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit v_c und dem Versuchswerkstoff

Die Aktivkraft stieg beim Vollnutenfräsen aller Versuchswerkstoffe nahezu linear mit dem Spanungsquerschnitt (Abbildung 5.7). Dabei lag das Niveau der Aktivkraft bei der Bearbeitung von Cu-HCP aufgrund der hohen Zähigkeit dieses Werkstoffs am höchsten. Im Vergleich zum Referenzwerkstoff CuZn39Pb3 lag die Aktivkraft beim Vollnutenfräsen von CuZn37 und CuZn42 um etwa 80%, bei CuZn21Si3P und CuSn4Zn2PS-C um ca. 40% höher. Die geringste mechanische Werkzeugbelastung wurde beim Fräsen der Zinkknetlegierung ZnAl15Cu1Mg0,03 gemessen.

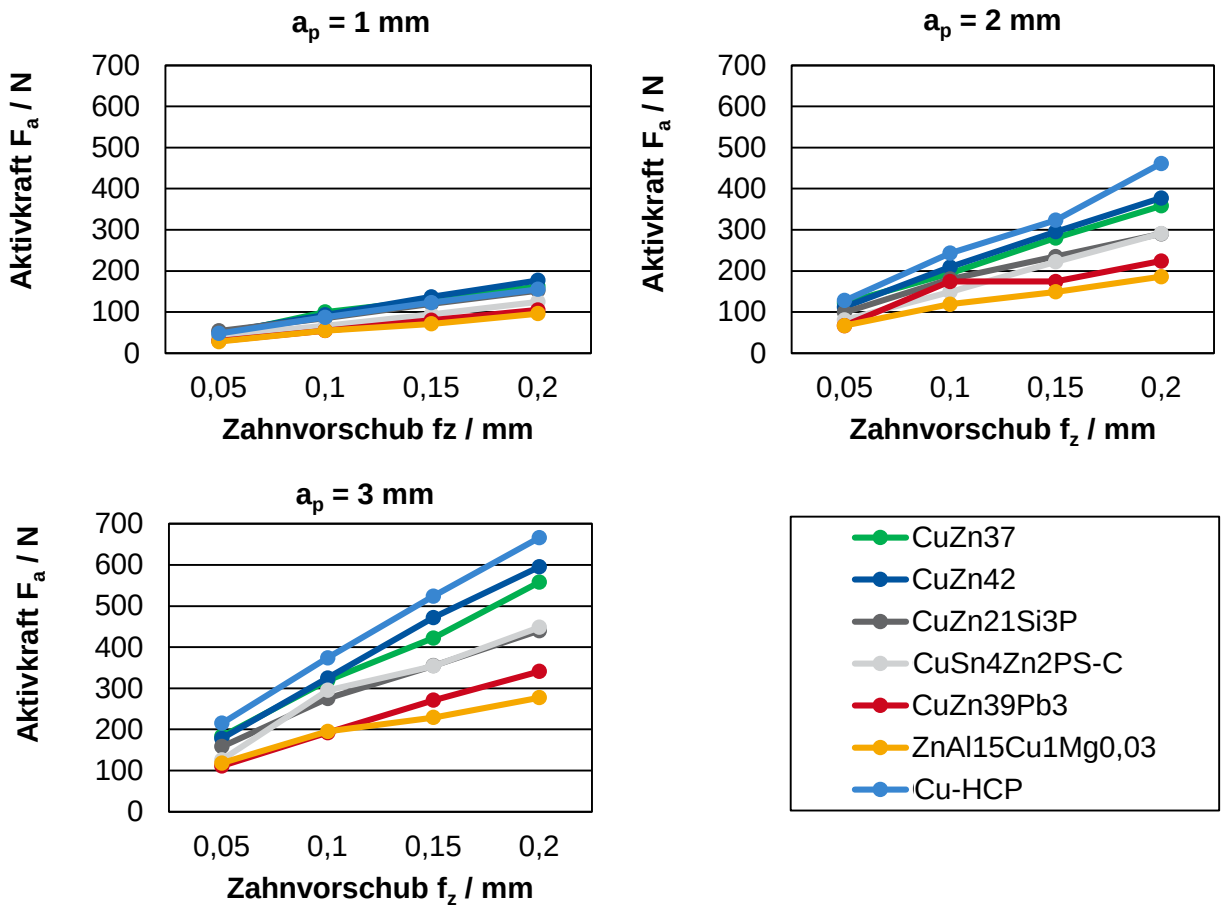
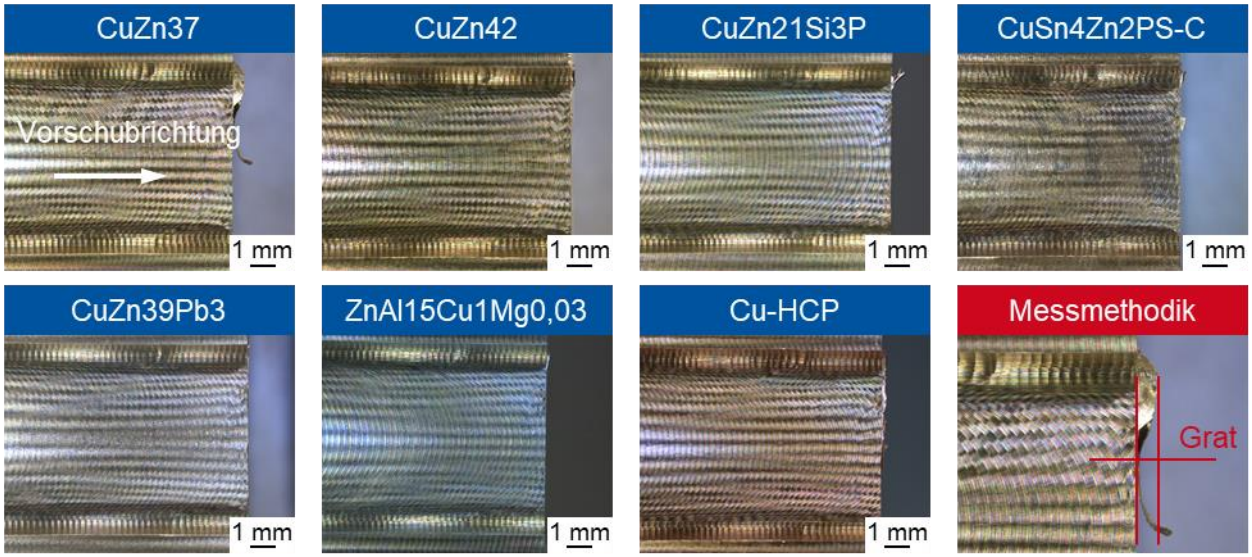


Abbildung 5.7: Aktivkraft beim Vollnutenfräsen in Abhängigkeit von Zahnvorschub f_z und Schnitttiefe a_p bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min

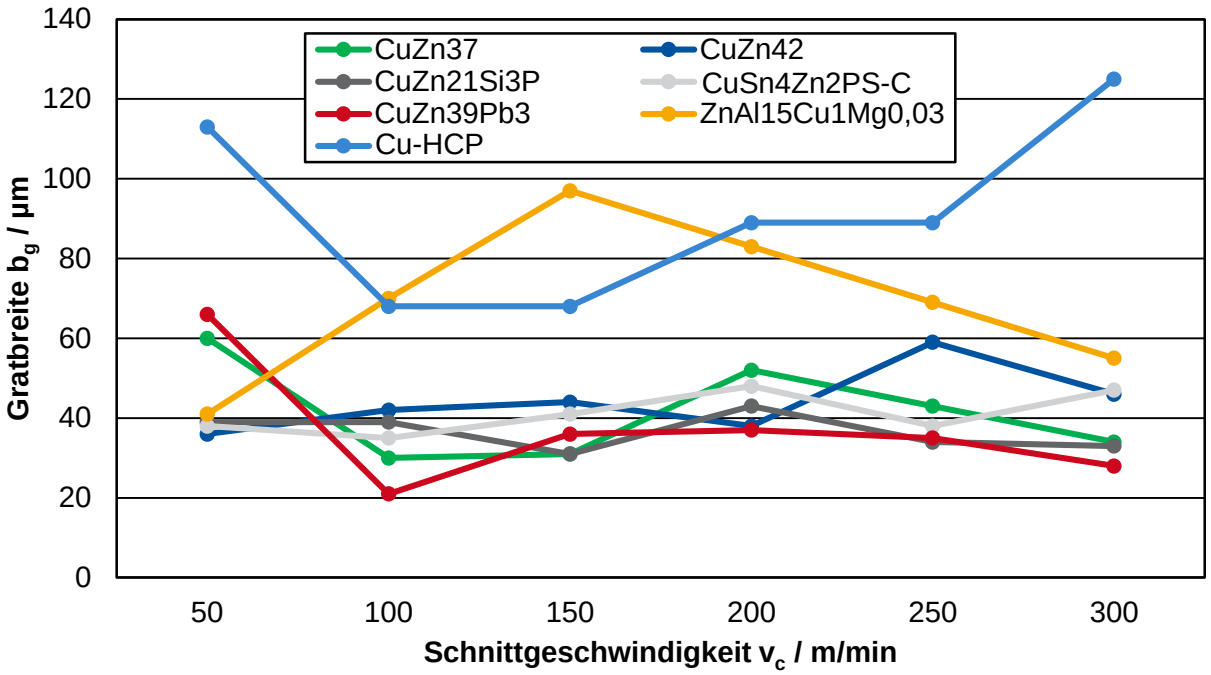
Zur Bewertung der Bauteilqualität wurde die Gratbildung herangezogen (Abbildung 5.8). Diese trat primär am Austrittspunkt des Werkzeugs aus dem Werkstück auf. Die Gratbildung wurde anhand der Breite des über die Nut überstehenden Grates b_g bewertet. Größere Grate traten beim Fräsen der relativ weichen Werkstoffe Cu-HCP, CuZn37 und ZnAl15Cu1Mg0,03 auf. Die Gratbildung erfolgte dabei stets an der Gegenlaufseite. Dort schob die Schneide beim Austritt einen Span vor sich her, der nicht vollständig getrennt wurde und daher zum Grat wurde.

Die Schnittgeschwindigkeit v_c hatte bei einigen Werkstoffen Einfluss auf die Gratbreite am Werkzeugaustritt (Abbildung 5.9). Die Gratbildung war bei den Werkstoffen CuZn39Pb3, CuZn37 und Cu-HCP bei einer geringen Schnittgeschwindigkeit von v_c = 50 m gegenüber dem Fräsen der anderen Versuchswerkstoffe erhöht. Dies wurde auf Aufbauschneidenbildung zurückgeführt. Der Werkstoff ZnAl15Cu1Mg0,03 erzeugte ein Maximum der Gratbreite beim Fräsen mit v_c = 150 m. Als Ursache hierfür wurde die thermische Entfestigung des Werkstoffs bei höheren Schnittgeschwindigkeiten vermutet. Eine Reduktion der Gratbildung ist in der Praxis durch eine Anpassung der Bahnplanung mit geringem Aufwand möglich. Durch das Hinzufügen eines Radius am Werkstückaustritt kann die Bearbeitung im Gegenlauf am Austritt und damit die Entstehung von Graten vermieden werden.



Prozess:	Nutenfräsen	Werkzeug:	ABDE1000A3ARG
Zahnvorschub:	f_z = 0,1 mm	Maschine:	DMG MORI NHX 5000
Werkzeuggeom.:	Schaftfräser	Schnitttiefe:	a_p = 2 mm
KSS:	Emulsion	Schnittgeschw.:	v_c = 200 m/min

Abbildung 5.8: Gratbildung am Werkzeugaustritt beim Vollnutenfräsen



Prozess:	Nutenfräsen	Werkzeug:	ABDE1000A3ARG
Zahnvorschub:	f_z = 0,1 mm	Maschine:	DMG MORI NHX 5000
Werkzeuggeom.:	Schaftfräser	Schnitttiefe:	a_p = 2 mm
KSS:	Emulsion	Schnittgeschw.:	v_c = Variabel

Abbildung 5.9: Gratbreite am Werkzeugaustritt in Abhängigkeit von Werkstoff und Schnittgeschwindigkeit

Neben der Gratbildung wurde die Rautiefe Rz zur Bewertung der Bauteilqualität herangezogen. Abbildung 5.10 zeigt den Verlauf der Rautiefe Rz in Abhängigkeit vom Zahnvorschub f_z und der Schnitttiefe a_p. Mit zunehmender Schnitttiefe a_p wurden geringere Rautiefen erzeugt, da sich

aufgrund des Dralls des Werkzeugs im Mittel eine höhere Anzahl der Schneiden im Eingriff befand und deswegen die Prozessdynamik reduziert wurde. Der Eckenradius des Versuchswerkzeugs erzeugte im Übergangsbereich zwischen Schneidenecke und Stirnschneide Ploughing-Effekte. Dies führte aufgrund der Kinematik des Prozesses zu einem Maximum der Rautiefe Rz bei einem Vorschub von f_z = 0,15 mm.

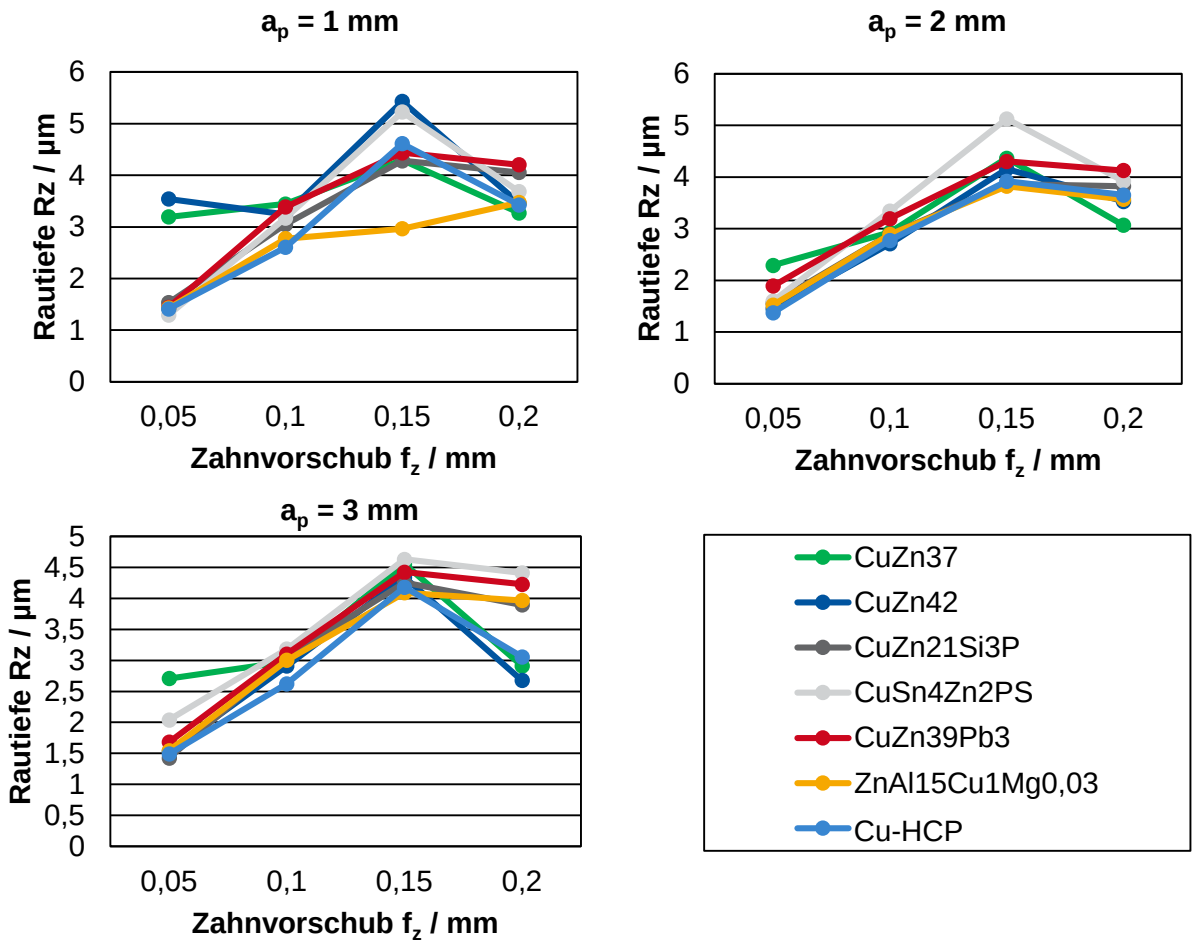


Abbildung 5.10: Rautiefe Rz beim Vollnutenfräsen mit einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min

Aufgrund der langen zu erwartenden Werkzeugstandzeiten wurde der Werkzeugverschleiß beim Fräsen mit dem Versuchswerkzeug ABDE1000A3ARG mit einer abweichenden Prozesskinematik untersucht. Die Bearbeitung erfolgte auf dem Stangendrehzentrum NZX1500 von DMG MORI (vgl. Abbildung 4.18). Der Fräsprozess wurde als zirkularer Umfangsfräsprozess mit einer Eingriffsbreite von a_e = 3 mm, einer Eingriffstiefe von a_p = 2 mm und einem Zahnvorschub von f_z = 0,1 mm bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 150 m/min durchgeführt. Um den bereitgestellten Versuchswerkstoff bestmöglich auszunutzen wurde die Bearbeitung an der Stirnseite der Werkstoffstangen in konzentrischen Kreisbahnen durchgeführt (Abbildung 5.11). Auf diesem Wege wurde ein Vorschubweg von l_f = 214 m je Versuchspunkt zurückgelegt. Dies entsprach einer Schnittzeit von t_c = 150 min.

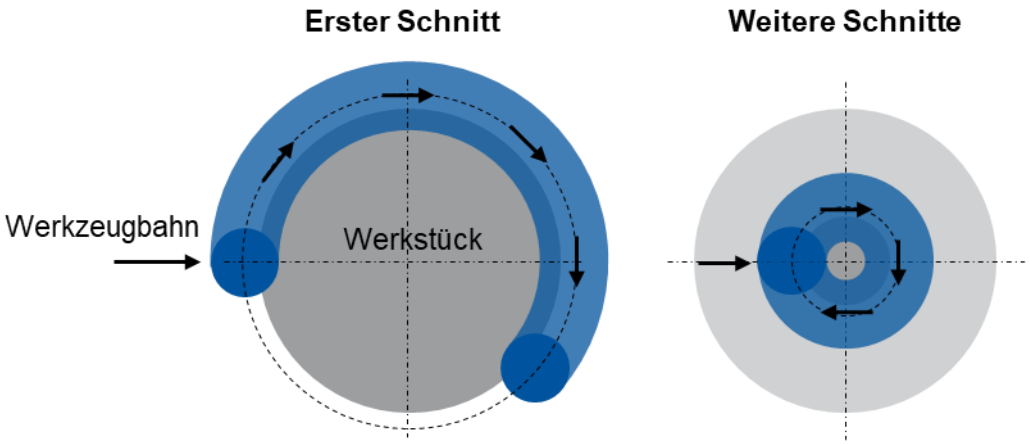


Abbildung 5.11: Kinematik der Verschleißuntersuchungen zum Fräsen mit Werkzeugdurchmesser d = 10 mm an der Stirnseite der Rundstangen

Der Werkzeugverschleiß wurde anhand der maximalen Verschleißmarkenbreite VB_{max} bewertet (Abbildung 5.12). Eine ausgeprägte Verschleißmarke bildete sich nur beim Fräsen von Cu-HCP aus. Beim Fräsen der anderen Legierungen entstanden kleine Ausbrüche an den Schneidkanten. Nach Cu-HCP waren diese Ausbrüche beim Fräsen der eher weichen Werkstoffe CuZn37 und ZnAl15Cu1Mg0,03 mit hoher Adhäsionsneigung größer als bei der Bearbeitung der restlichen Versuchswerkstoffe. Es wurde daher angenommen, dass die Zähigkeit des Schneidstoffs für die betrachtete Bearbeitungsaufgabe nicht ausreichend war. Dazu sei angemerkt, dass Werkzeuge mit Schneidkantendefekten in dieser Größenordnung in der Serienfertigung typischerweise weiter eingesetzt werden.

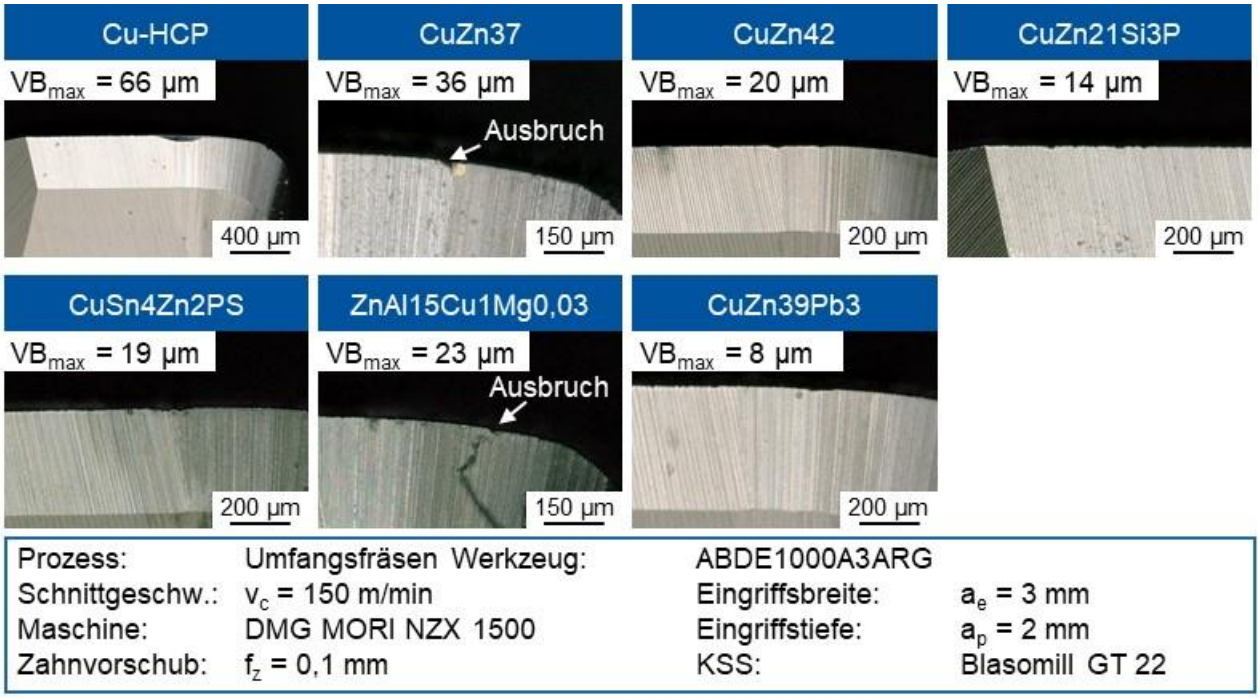


Abbildung 5.12: Werkzeugverschleiß beim Umfangsfräsen nach einem Vorschubweg von l_f = 214 m

Zur Prozessoptimierung wird daher der Einsatz einer TiAlN-Beschichtung zur Reduzierung von Schneidkantenausbrüchen empfohlen (vgl. Kapitel 4.3.3). Aufgrund der

Schneidkantenausbrüche bei den Verschleißuntersuchungen wurde ein geringerer Vorschub als Empfehlung für die Prozessauslegung abgeleitet (vgl. Kapitel 5.3).

5.3 Handlungsempfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Nutenfräsen in bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen

Die Fräsbearbeitung von bleifreien Kupferwerkstoffen mit Werkzeugdurchmesser d = 10 mm war insgesamt deutlich weniger herausfordernd als der zusätzlich untersuchte Tauchfräsprozess (vgl. Kapitel 4). Der Prozess erzeugte in einem weiten Schnittparameterbereich günstige Spanformen, die keinerlei Probleme beim Spanabtransport verursachten. Die Oberflächenqualität wurde primär durch die Prozesskinematik bestimmt. Die Gratbildung am Werkzeugaustritt beim Fräsen von duktilen Kupferwerkstoffen kann in der Praxis durch eine Anpassung der Bahnplanung eliminiert werden. Auf Anregung des PA wurde aus diesem Grund ein Großteil der Projektressourcen für die Optimierung des Tauchfräsprozesses verwendet.

Für das Nutenfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen wurden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Schnittgeschwindigkeit: v_c = 50 - 500 m/min. Bei ausgeprägter Gratbildung, v_c erhöhen.
- Vorschub je Zahn: $f_z \leq 0{,}05$ mm zur Vermeidung von Ausbrüchen (mit beschichtetem Werkzeug ggf. höherer Vorschub anwendbar)
- Schnitttiefe: a_p = 1 - 3 mm
- Bahnplanung: Zur Vermeidung von Gratbildung am Werkzeugaustritt auf Gegenlaufseite Radius in Richtung der Gegenlaufseite vorsehen
- Schneidstoff: Vollhartmetall, ggf. mit TiAlN-Beschichtung (vgl. Kapitel 4.3.3)
- Kühlschmierstoff: Überflutungskühlung zum Spanabtransport ausreichend
- Werkzeuggeometrie: Drallwinkel δ = 40°, Schneidenzahl z = 3

6 Substitution von Dreh- und Bohrprozessen durch Fräsprozesse (AP 4)

Bei der Dreh- und Bohrbearbeitung von bleifreien Kupferwerkstoffen kann in der industriellen Praxis trotz Prozessoptimierung in einigen Fällen die Bildung von langen Spänen nicht vermieden werden. Diese ungünstigen Spanformen können insbesondere aus engen Kavitäten häufig nicht sicher abtransportiert werden und reduzieren deshalb die Prozesssicherheit maßgeblich. Durch den Einsatz von Fräs- anstelle von Bohr- oder Drehprozessen ist es möglich, Spanbruch zu erzwingen und potentiell die Prozesssicherheit zu steigern. Ziel dieses Arbeitspakets war es

daher, das Potential von Fräsprozessen zur Substitution kritischer Dreh- und Bohrprozesse abzuschätzen.

Dazu wurde ein Anwendungsfall definiert, der an die industrielle Bauteilfertigung eines Buchsenkontakts von der im PA vertretenen Fa. Mennekes Elektrotechnik angelehnt ist. Bei der Innenbearbeitung ist eine herausfordernde Kontur zu fertigen. Der Konus weitet sich vom Werkzeugeintritt aus auf (Abbildung 6.1). In der Praxis wird dieses Bauteil durch Bohren und anschließendes Drehen der Innenkontur gefertigt. Aufgrund der geringen Abmessungen und dem zur Öffnung hin verjüngten Konus ist in der Praxis der Spanabtransport insbesondere beim Innendrehen erschwert.

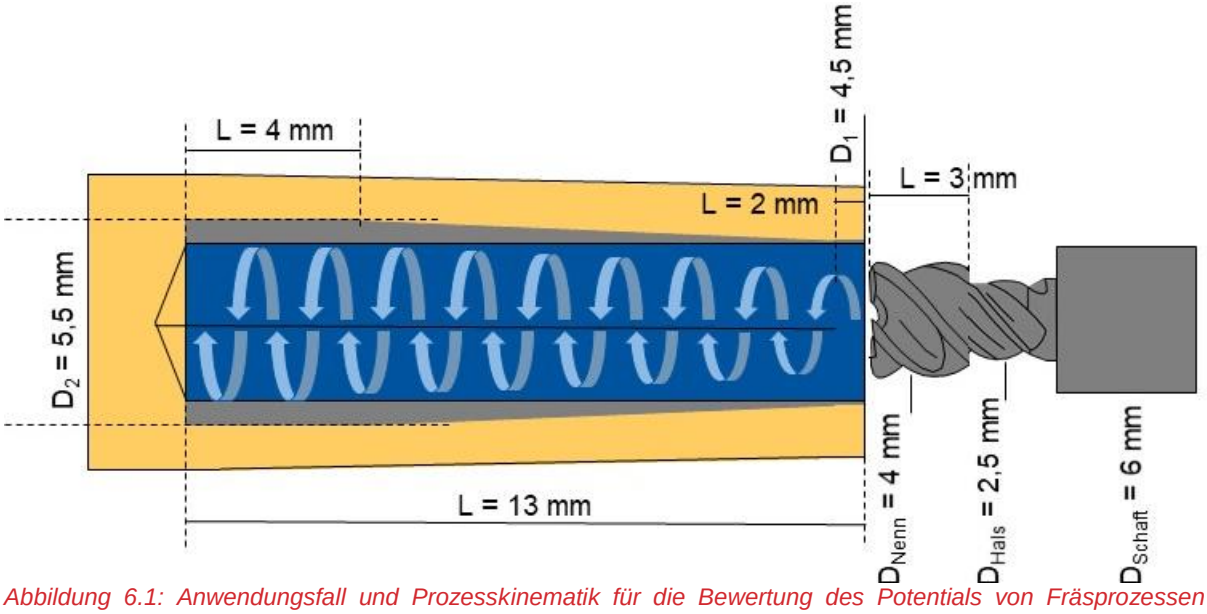


Abbildung 6.1: Anwendungsfall und Prozesskinematik für die Bewertung des Potentials von Fräsprozessen zur Substitution von Dreh- und Bohrporzessen

Die Zerspanuntersuchungen wurden auf dem Stangendrehzentrum NZX 1500 von DMG MORI durchgeführt (Abbildung 6.2). Für die Untersuchungen wurde ein modifiziertes Fräswerkzeug vom Typ 6716 von der Fa. Gühring eingesetzt, dass einen Nenndurchmesser von d_{Nenn} = 4 mm aufwies und im Bereich des Halses auf einen reduzierten Durchmesser von D_{Hals} = 2,5 mm abgesetzt wurde, um den Konus fräsen zu können (Werkzeuggeometrie vgl.

Tabelle 4.1).

Um die Bauteilkontur zu fertigen, wurde eine sich über die Bauteiltiefe aufweitende Helixbahn programmiert (Abbildung 6.1). Die Bearbeitung erfolgte aufgrund von Beschränkungen der NC-Steuerung im Gegenlauf. Im Bereich des Konus wurde die Oberfläche durch die abgesetzte, „hintere“ Schneidenecke des Werkzeugs erzeugt. Im zylindrischen Abschnitt des Werkstücks im Bauteilinneren war die gesamte Umfangsschneide des Werkzeugs im Eingriff. Der ölbasierte Kühlschmierstoff Blasomill GT 22 von BLASER SWISSLUBE wurde per Überflutungskühlung zugeführt.

Zur Bewertung der Substitution von Drehprozessen wurde vor der Fräsbearbeitung eine Bohrung mit d = 4 mm gefertigt. In einem nachfolgenden Versuch wurde keine Bohrung erzeugt, um die Substitution des Dreh- und Bohrprozesses in einem Schnitt abzubilden. Die eingestellten Schnittparameter und die sich daraus ergebenden Hauptzeiten sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Untersuchungen wurden mit den Versuchswerkstoffen CuZn42 und CuZn21Si3P in Form von Rundstangen mit d = 10 mm Durchmesser durchgeführt.

Tabelle 6.1: Schnittparameter bei den Untersuchungen zur Substitution von Dreh- und Bohrprozessen durch Fräsprozesse

Schnittgeschw. v_c / m/min	**Zahnvorschub f_z / mm**	**Helixsteigung p / mm**	**Hauptzeit t_h / s**
50	0,015	0,5	20,79
		1	10,77
	0,03	0,5	10,39
		1	5,39
100	0,015	0,5	10,39
		1	5,39
	0,03	0,5	5,20
		1	2,69

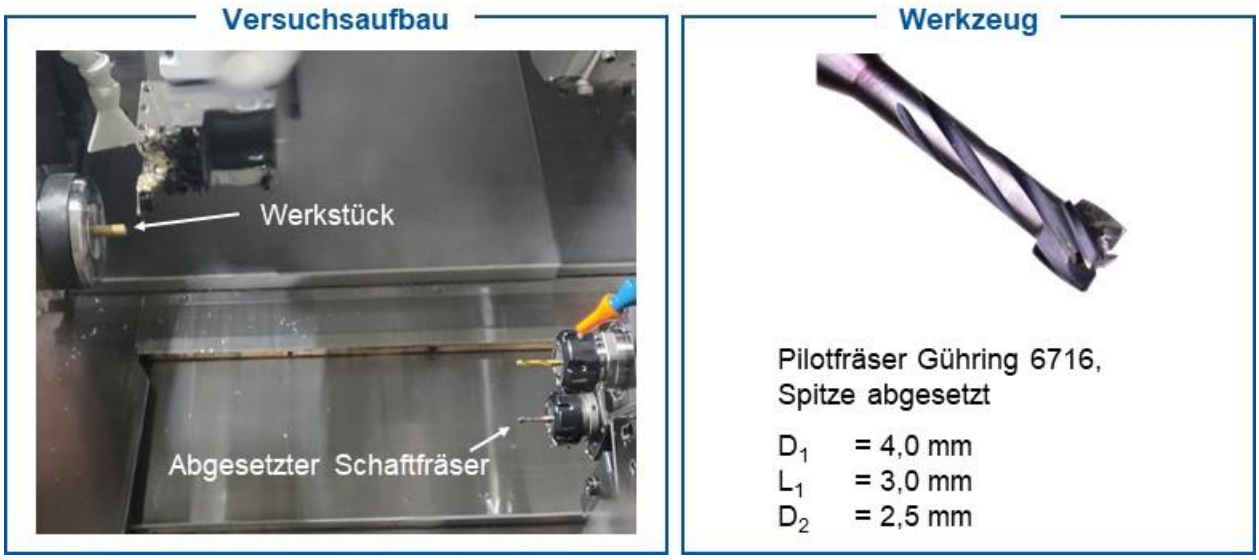


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau und abgesetztes Versuchswerkzeug

Abbildung 6.3 zeigt das Innere des durch Helixfräsen gefertigten Werkstücks. Am Konus entstanden aufgrund der sich aufweitenden, helixförmigen Prozesskinematik Rillen, deren Abstand der Helixsteigung p = 0,5 mm entsprach. Dies war auch bei der Messung der Oberflächenrauheit sichtbar (Abbildung 6.4). Im Inneren des Werkstücks sind deutlich Rattermarken zu erkennen. Bei keinem der Versuche verblieben Späne im Werkstück. Dadurch wurde eine maßgebliche Verbesserung der Prozesssicherheit im Vergleich zum Innendrehen erzielt. Für die Umsetzung in der industriellen Praxis kann die Rillenbildung durch Applikation

einer Fase an der hinteren Schneidenecke des Werkzeugs wesentlich reduziert oder ganz vermieden werden.

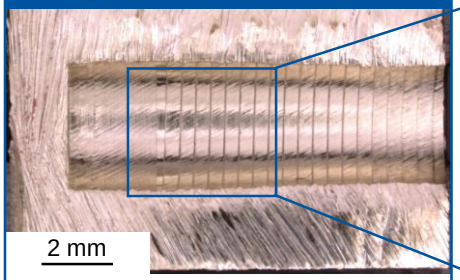
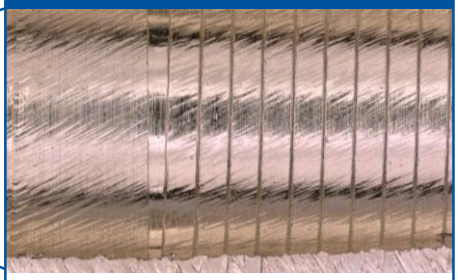
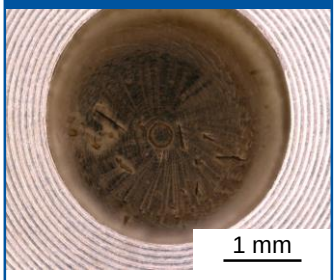
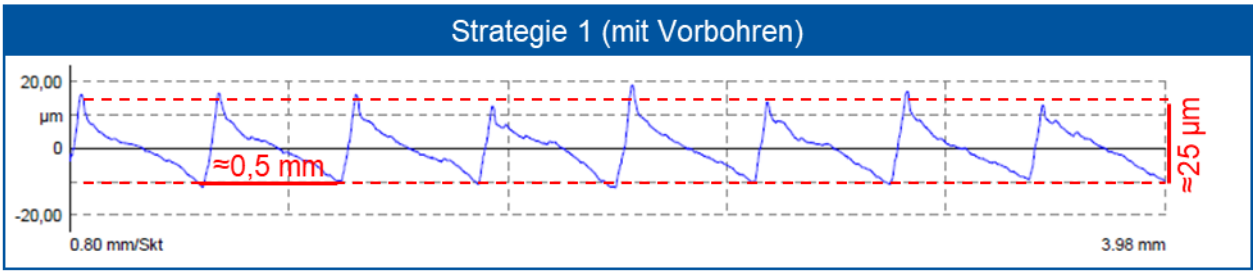
Aufgetrenntes Bauteil	Rillenabstand aufgrund Kinematik	Werkstück-innenansicht
		
Werkstoff: CuZn42 Schnittgeschw.: v_c = 100 m/min Vorschub: f_z = 0,03 / mm Helixsteigung: p = 0,5 mm Strategie: Mit Vorbohren Werkzeug: Pilotfräser 6716 D4,0 (Halseinstich)	Mittenrauwert: Ra = 5,001 µm Rautiefe: Rz = 27,325 µm Der Abstand der Stufen entsprach der Helixsteigung p	Sehr guter Spanabtransport und keine Gratbildung an den Eintrittsseiten der Werkstücke unabhängig von den Schnittparametern

Abbildung 6.3: Versuchsergebnisse beim Helixfräsen mit vorherigen Bohren (Substitution des Innendrehens durch das Helixfräsen)



Werkstoff:	CuZn42	Schnittgeschw.:	v_c = 100 m/min
Maschine:	DMG MORI NZX 1500	Helixsteigung:	p = 0,5 mm
Werkzeug:	Pilotfräser 6716	Vorschub:	f_z = 0,03 mm

Abbildung 6.4: Rillenbildung im Bauteilinneren aufgrund der Kinematik

Im Folgenden wurde iterativ versucht, die Produktivität weiter zu steigern. Dazu wurde in einer zweiten Bearbeitungsstrategie keine Bohrung vor dem Helixfräsen gefertigt, sodass auch das Bohren durch den Fräsprozess substituiert wurde. Dabei wurde aufgrund der größeren Eingriffsbreite des Werkzeugs die Prozessdynamik reduziert und es traten keine Rattermarken im Bereich des Konus auf (Abbildung 6.5). Die Rattermarken im zylindrischen Abschnitt wurden auf Vibrationen des Werkzeugs während der programmierten Verweilzeit des Werkzeugs am Grund des Bauteils zurückgeführt. Durch den Entfall des Vorbohrens ist die Produktivität des Helixfräsens auf einem ähnlichen Niveau wie in der Serienfertigung mit Bohren und Innendrehen.

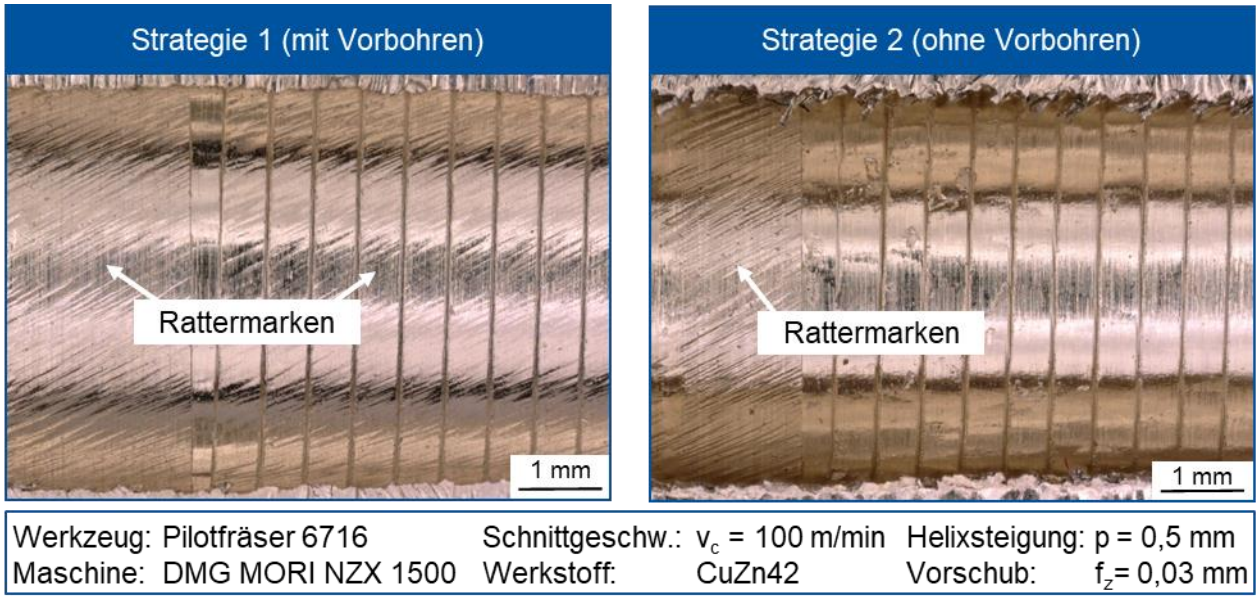


Abbildung 6.5: Vergleich der Bauteilqualität beim Helixfräsen mit und ohne vorheriger Bohrbearbeitung

Abbildung 6.6 zeigt einen Vergleich der Bauteilqualität zwischen dem Versuchswerkstoffen CuZn42 und CuZn21Si3P. Beim Helixfräsen von CuZn21Si3P traten neben Rattermarken auch Oberflächendefekte auf. Diese wurden durch Quetscheffekte aufgrund der geringen Spanungsdicke der umfangsseitigen Bearbeitung verursacht.

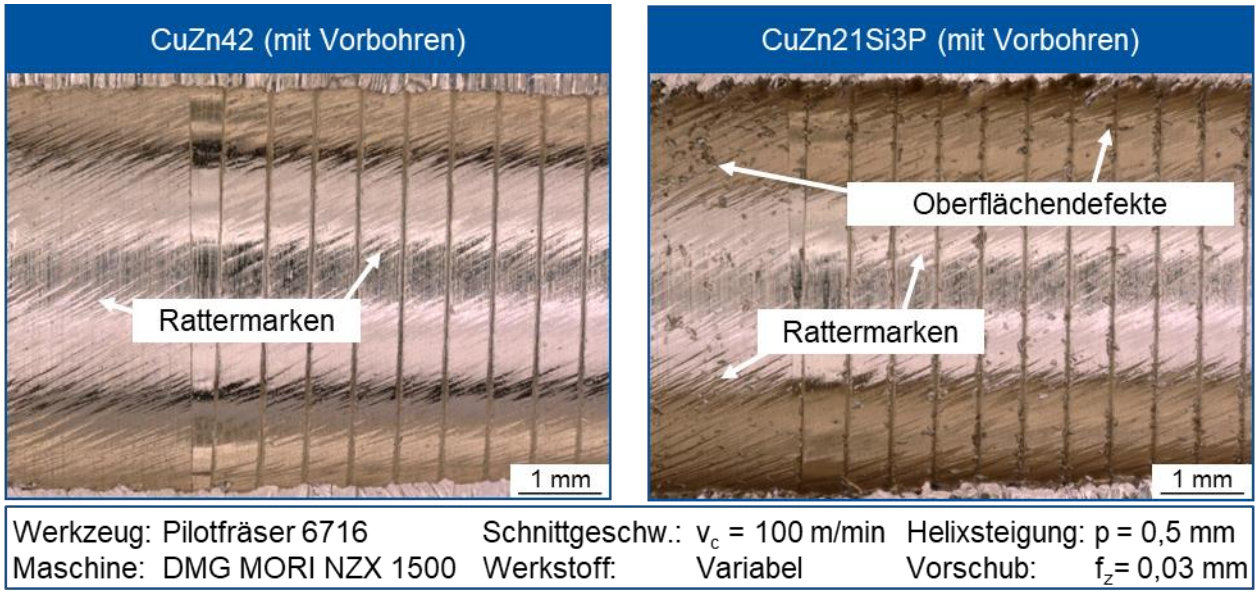


Abbildung 6.6: Vergleich der Bearbeitungsgenauigkeit zwischen den Versuchswerkstoffen CuZn42 und CuZn21Si3P

Im untersuchten Anwendungsbeispiel konnten die zwei Prozessschritte Bohren und Drehen durch einen einzelnen Fräsprozess ersetzt werden, sodass die Produktivität gleichwertig mit der Dreh- und Bohrbearbeitung war. Beim Innendrehen wurde die Prozesssicherheit und Produktivität durch den Spanabtransport beschränkt. Bei der Helixfräsbearbeitung traten keinerlei Probleme bezüglich des Spanabtransports auf. Für die industrielle Umsetzung sollte jedoch ein Werkzeug genutzt werden, dass die Rillenbildung im Bereich des Konus reduziert.

Die Untersuchungen zum Helixfräsen zeigten, dass Fräsprozesse ein großes Potential zur Steigerung der Prozesssicherheit von kontinuierlichen Zerspanprozessen boten. In weiteren Untersuchungen sollte die Werkzeug- und Prozessauslegung für das Außen- und Innenrundfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen eingehender untersucht werden.

7 Analyse der Zerspanbarkeit neu entwickelter Werkstoffe (AP5)

Seit den ersten am WZL durchgeführten Untersuchungen zur Zerspanung bleifreier Kupferwerkstoffe [NOBE13] wurden seitens der Werkstoffhersteller neue Werkstoffvarianten mit dem Ziel der Verbesserung der Zerspanbarkeit entwickelt. Voraussetzung für die Ausschöpfung des Potentials dieser innovativen Werkstoffe ist eine objektive Einschätzung der Zerspanbarkeit. Ziel dieses Arbeitspunkts war daher die Bewertung der Zerspanbarkeit neu entwickelter, bleifreier Kupferwerkstoffe, die noch nicht im großem Maßstab in industrieller Anwendung sind.

Im Vorgängerprojekt 16867N [NOBE13] wurde bereits eine Methode zur Erstellung von Zerspanbarkeitsindizes für bleifreie Kupferwerkstoffe entwickelt und auf eine breite Palette damals verfügbarer Werkstoffe angewendet. Als Bewertungskriterien wurden die Spanform, der Werkzeugverschleiß, die Zerspankraft und die Oberflächenqualität herangezogen. Mit der gleichen Methodik wurden die damals durchgeführten Untersuchungen in diesem Vorhaben fortgesetzt und so das Potential weiterer innovativer Werkstoffe mit den bekannten Werkstoffen verglichen. Zusätzlich wurden Spanformdiagramme erstellt.

7.1 Versuchswerkstoffe

Von den im PA vertretenen Halbzeugherstellern wurden sechs Werkstoffe für die Untersuchungen in Form von Rundstangen mit einem Durchmesser von d = 40 mm bereitgestellt, Tabelle 7.1. Der Werkstoff mit der Bezeichnung PNA 279 von der Fa. AURUBIS ist eine CuZn42-Legierung, die zur Verbesserung der Zerspanbarkeit mit geringe Mengen Indium (In) dotiert ist. Mit EnviB 58 bezeichnet der Hersteller LEBRONZE ALLOYS eine CuZn42-Legierung, die sich neben guter Zerspanbarkeit zusätzlich durch eine gute Warmumformbarkeit auszeichnet. Die Fa. DIEHL METALL stellte die Werkstoffe CuZn38 und das Sondermessing CuZn30Mn3Al2SiNiFe für die Untersuchungen bereit. Mit dem Sondermessing CuZn34Mn2SiAlNi mit der Bezeichnung S34 stellten die WIELAND WERKE einen Werkstoff für die Untersuchungen bereit, der sich durch seine gute Kaltumformbarkeit und Relaxationsbeständigkeit für Anwendungen mit spanabhebender und umformender Bearbeitung eignet. Die Legierung CuSn4Zn2PS-C mit der Bezeichnung Rg+ von der Fa. KEMPER eignet sich aufgrund ihrer guten Gieß- und Zerspanbarkeit besonders für die urformende Fertigung von trinkwasserführenden Komponenten mit spanender Nachbearbeitung.

Tabelle 7.1: Versuchswerkstoffe für AP 5

Hersteller	Handelsbezeichnung	Chem. Zusammensetzung
Aurubis	PNA 279	CuZn42 ML
Lebronze	EnviB58	CuZn42
Diehl Metall	475	CuZn30Mn3Al2SiNiFe
Diehl Metall	814	CuZn38
Kemper	Rg+	CuSn4Zn2PS-C
Wieland Werke	S34	CuZn34Mn2SiAlNi

Der Verlauf der Brinellhärte über den Querschnitt der Stangen ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Bei der Stangenfertigung werden die Stangen durch Matrizen gezogen. Die Kaltverfestigung ist aufgrund der Reibung des Halbzeugs mit der Matrize im Randbereich besonders hoch und verursacht typischerweise eine höhere Härte und ein feineres Gefüge im Randbereich im Verglich zur Bauteilmitte. Aufgrund ihres nahezu vollständig aus α-Phase bestehenden Gefüges wiesen die Werkstoffe CuSn4Zn2PS-C und CuZn38 die geringste Härte auf. Der Werkstoff CuZn34Mn2SiAlNi wies aufgrund der im Gefüge enthaltenden Silizide die höchste Härte auf.

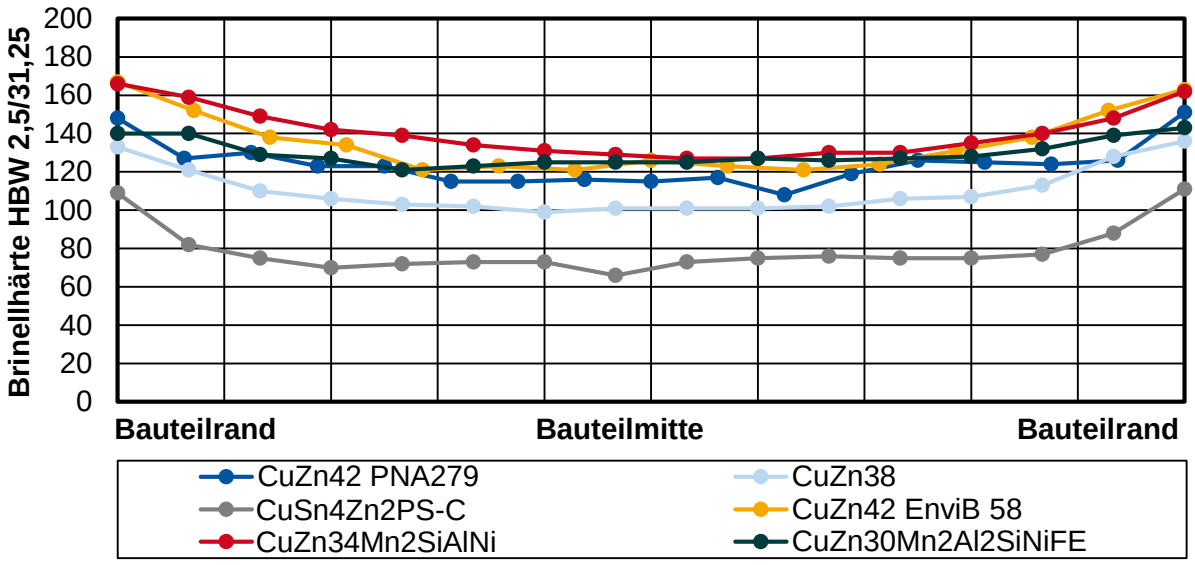


Abbildung 7.1: Härteverlauf über den Stangenquerschnitt der Versuchswerkstoffe

7.2 Versuchsaufbau und Vorgehensweise

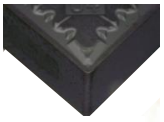
Das Vorgehen bei den Untersuchungen zur Bewertung der Zerspanbarkeit richtete sich nach der im Vorgängerprojekt AiF-IGF 16867 N entwickelten Methodik zur Ermittlung von Zerspanbarkeitsindizes [NOBE13]. Die Zerspanbarkeitskriterien Spanform, Werkzeugverschleiß,

Zerspankraft und Oberflächengüte wurden beim Außenlängsdrehen der Versuchswerkstoffe untersucht und jeweils auf einer Skala von null bis 100 Punkten bewertet. Die Skalierung orientiert sich am Referenzwerkstoff CuZn39Pb3, dessen Zerspanbarkeit als Optimum angesehen wird und 100 Punkten entspricht. Für die Ermittlung der Zerspanbarkeitsindizes wurde stets eine Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min, ein Vorschub f = 0,1 m und eine Schnitttiefe von a_p = 1 mm eingestellt. Zusätzlich zur Ermittlung von Zerspanbarkeitsindizes wurden Spanformdiagramme ermittelt, die den Verlauf der Spanform in Abhängigkeit des Spanungsquerschnitts bei einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min abbilden.

Die Wendeschneidplatte CNMG 120408 FP von der Fa. KENNAMETAL wurde als Versuchswerkzeug eingesetzt. Die Drehuntersuchungen wurden auf einem Stangendrehzentrum vom Typ NZX 1500 von der Fa. DMG MORI durchgeführt, Abbildung 7.2. Die Halbzeugstangen wurden per Spannzangenfutter gespannt. Zur Messung der Schnittkraft wurde eine piezoelektrische Kraftmessplattform vom Typ 9119AA2 von der Fa. KISTLER verwendet. Der ölbasierte Kühlschmierstoff BlasoMill GT 22 von der Fa. BLASER SWISSLUBE wurde per Überflutungskühlung zugeführt.

Werkzeuggeometrie

Kennametal CNMG120408FP



Spanwinkel γ_0	15°
Freiwinkel α_0	0°
Neigungswinkel λ_s	-6°
Schneidstoff	HM, TiAlN besch.
SK-Radius r_β	10 - 30 µm

Drehzentrum DMG MORI NZX 1500

Abbildung 7.2: Geometrie des Versuchswerkszeugs und Versuchsaufbau für AP 5

7.3 Erstellung von Spanformdiagrammen

Spanformdiagramme stellen den Übergang zwischen Gebieten unterschiedlicher Spanformen in Abhängigkeit vom Vorschub f und der Schnitttiefe a_p dar. Sie ermöglichen in der Praxis eine erste Einschätzung der Schnittparameter, bei denen günstige Spanformen auftreten.

Bei stets konstanter Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min wurde die Schnitttiefe in 8 Stufen von a_p = 0,25 mm bis a_p = 3 mm eingestellt. Für jede dieser Stufen wurden die Übergänge zwischen verschiedenen Spanformen in Abhängigkeit vom Vorschub f ermittelt.

Abbildung 7.3 zeigt die Spanformdiagramme der Werkstoffe CuSn4Zn2PS-C und CuZn38, die unter den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Bedingungen ermittelt wurden. Beim Drehen von CuZn38 war bei a_p > 1 mm ein Vorschub von etwa f > 0,06 mm erforderlich, um kurze Bröckelspäne zu erzeugen. Bei kleinen Spanungsquerschnitten unterhalb von a_p = 1 mm fand

der Übergang vom Wendel- zum Bröckelspan erst bei wesentlich höheren Vorschüben bis zu f = 0,45 m bei a_p = 0,25 mm statt. Bei kleinen Spanungsquerschnitten ist die Nachgiebigkeit des Spans größer, sodass der Bruch des Spans erschwert wird. Bei kleinen Vorschüben ist es zudem möglich, dass der Span nicht auf den Rücken der Spanformrille trifft und deshalb nicht gebrochen wird [NOBE13]. Dies erklärt den typischen Verlauf der Spanbruchkennlinien bei CuZn38 und den anderen Messingwerkstoffen. Einen Übergang vom Wendelspan zum Wirrspan gab es beim Unterschreiten eines Vorschubs von f = 0,03 mm unabhängig von der Schnitttiefe. Der Werkstoff CuSn4Zn2PS-C erzeugte beim Drehen mit dem ausgewählten Werkzeug in einem sehr großen Parameterbereich kurze Bröckelspäne. Lediglich im Umfeld um eine Schnitttiefe von a_p = 2 mm herum wurden bei Vorschüben unterhalb von f = 0,03 mm Wendel- und Wirrspäne erzeugt. Dies wurde auf die chemische Zusammensetzung des Rotgusses sowie sein Gussgefüge zurückgeführt [NOBE16].

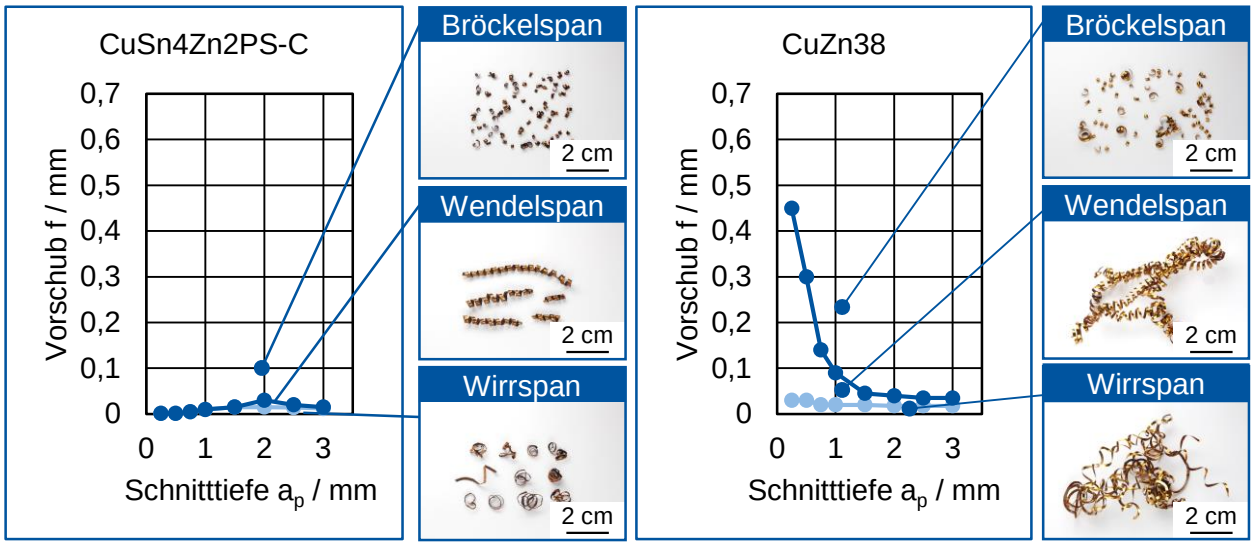


Abbildung 7.3: Spanformdiagramme der Werkstoffe CuSn4Zn2PS-C und CuZn38

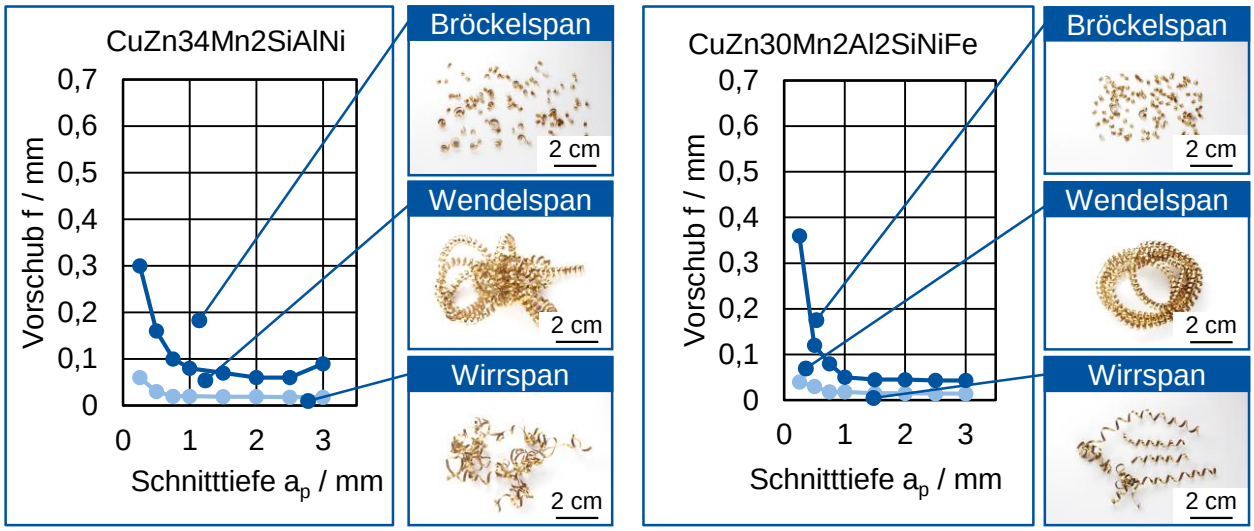


Abbildung 7.4: Spanformdiagramme der Werkstoffe CuZn34Mn2SiAlNi und CuZn30Mn2Al2SiNiFe

Bei den beiden Sondermessingen CuZn34Mn2SiAlNi und CuZn30Mn2Al2SiNiFe bildeten sich bei sehr kleinen Vorschüben Wirrspäne (Abbildung 7.4). Einen zweiten Übergang der Spanform vom Wendelspan zum Bröckelspan gab es bei etwas höheren Vorschüben. Auch hier lag aufgrund der Duktilität dünner Späne bei geringen Schnitttiefen der Übergang bei höheren Vorschüben. Diese Grenzen lagen daher bei CuZn34Mn2SiAlNi aufgrund der höheren Duktilität, bzw. Kaltumformbarkeit, höher als bei CuZn30Mn2Al2SiNiFe.

Der Werkstoff CuZn42 mit der Bezeichnung EnviB58 weist eine gute Warmumformbarkeit auf. Dafür muss das Gefüge eine gewisse Restzähigkeit aufweisen. Deshalb waren beim Drehen relativ hohe Vorschübe erforderlich, um Bröckelspäne zu erzeugen (Abbildung 7.5). Bei dem mit In dotierten CuZn42ML bewirkten die enthaltenen In-Partikel eine schnellere Rissausbreitung bei der Spanbildung. Deshalb waren deutlich kleinere Spanungsquerschnitte für das Erzeugen von kurzen Spanformen erforderlich. Dies zeigte, dass auch Werkstoffe, die einander in der chemischen Zusammensetzung ähneln deutliche Unterschiede in der Zerspanbarkeit aufweisen können. Diese können auf die Gefügeausbildung, Kaltverfestigung und Legierungselemente mit geringer Konzentration zurückzuführen sein.

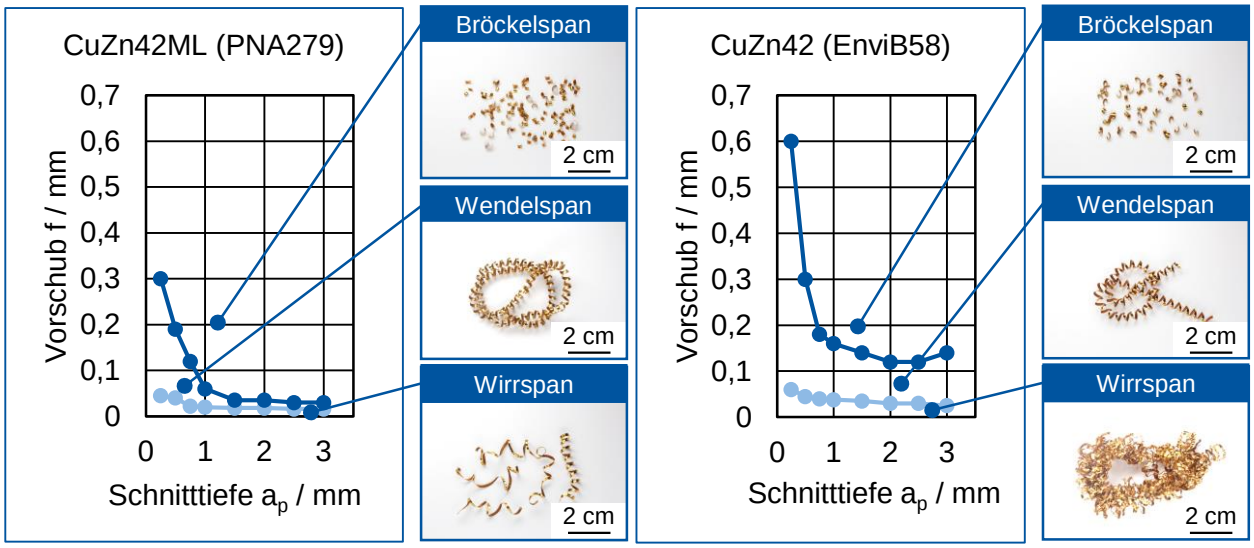


Abbildung 7.5: Spanformdiagramme der Werkstoffe CuZn42 ML (PNA 279) und CuZn42 (EnviB58)

7.4 Bewertung der Zerspanbarkeit anhand von Zerspanbarkeitsindizes

7.4.1 Vorbemerkung

Der Zerspanprozess findet in einem komplexen Gesamtsystem statt. Wesentlichen Einfluss auf das Zerspanergebnis haben die folgenden Einflussgrößen:

- Werkzeugmaschine und Spannsituation
- Die Schnittparameter
- Geometrie, Schneidstoff und Zustand des Werkzeugs

- Werkstoff
- Kühlschmiermedium und -zufuhrstrategie
- Umgebungsbedingungen

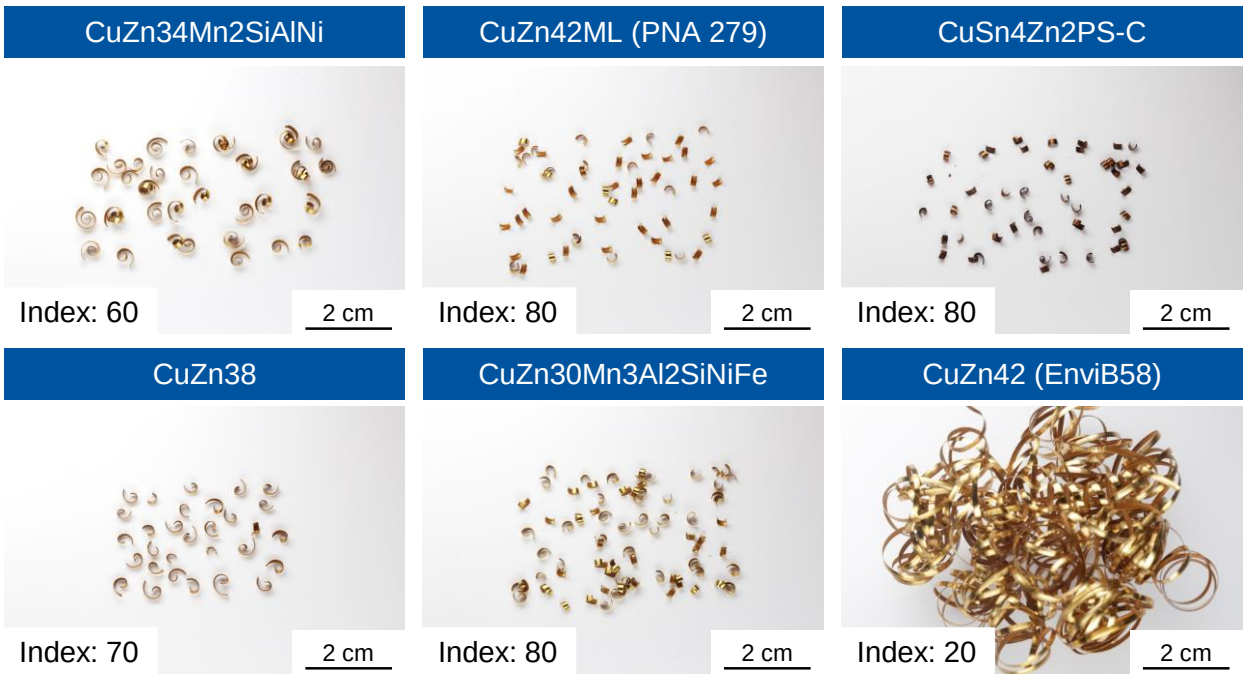
Der Begriff Zerspanbarkeit bezeichnet die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich unter gegebenen Randbedingungen spanend bearbeiten zu lassen. Zur Bewertung der Zerspanbarkeit werden zumeist die Zerspanbarkeitskriterien Spanform, Bauteilqualität, Werkzeugverschleiß und Zerspankraft genutzt. In Abhängigkeit von dem betrachteten Prozess können diese Kriterien anhand unterschiedlicher Merkmale bewertet und unterschiedlich gewichtet werden. Dadurch entsteht ein subjektiver Einfluss auf die Bewertung von Zerspanprozessen. [DENK11, KLOC18]

Die nachfolgenden Ergebnisse vergleichen Werkstoffe bei einem festen Satz von Schnittparametern. In jedem Anwendungsfall kann durch eine gezielte Prozessoptimierung ein wesentlich besseres Zerspanergebnis erreicht werden. Als Beispiel hierfür sei genannt, dass bei dem Werkstoff CuZn42 durch Erhöhung des Vorschubs eine wesentlich günstigere Spanform erzielt werden könnte (vgl. Abbildung 7.5 rechts). Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu gewährleisten, musste auf eine solche Optimierung verzichtet werden.

Aus diesen Gründen sei deshalb angemerkt, dass im Rahmen dieses Projekts ermittelten Zerspanbarkeitsindizes nur einen ersten Anhaltspunkt für die Zerspanbarkeit der untersuchten Werkstoffe geben können. In der industriellen Praxis werden stets abweichende Randbedingungen bei der Zerspanung vorherrschen und es ist möglich, jeden Prozessschritt einzeln zu optimieren. Außerhalb der kupferverarbeitenden Industrie ist deshalb die Angabe von Zerspanbarkeitsindizes heutzutage unüblich.

7.4.2 Bewertung der Zerspanbarkeitskriterien

Vorbereitend für die Ermittlung der Zerspanbarkeitsindizes wurde die Schnittkraft F_c, die Spanform, die Oberflächenrauheit und der Werkzeugverschleiß nach einer Schnittzeit von t_c = 150 min in Relation zu den anderen Werkstoffen verglichen. Dabei wurden ein Vorschub von f = 0,1 mm, eine Schnitttiefe von a_p = 1 mm und eine Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min eingestellt. Die genauen Randbedingungen sind in Abschnitt 7.2 beschrieben Das genaue Vorgehen zur Zuordnung von Punktwertungen zu den einzelnen Zerspanbarkeitskriterien beschrieben NOBEL ET AL. im Abschlussbericht des Vorgängerprojektes AiF-IGF 16867 N [NOBE13].



Plattengeom.:	CNMG 120408 FP	Schnittgeschw.:	v_c= 200 m/min
Maschine:	DMG MORI NZX 1500	Schneidstoff:	KC5010
Schnitttiefe:	a_p= 1 mm	KSS:	Ecocut / Blaser Blasomill GT22
Werkstoff:	Variabel	Vorschub:	f = 0,1 mm

Abbildung 7.6: Spanformen unter den Bedingungen aus Abschnitt 7.1 und deren Bewertung als Zerspanbarkeitskriterium

Die Spanformen beim Drehen der Versuchswerkstoffe unter den festen Randbedingungen sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Beim Drehen von CuSn4Zn2PS-C, CuZn30Mn3Al2SiNiFe und CuZn42ML entstanden kurze Bröckelspäne, denen jeweils ein Wert von 80 Punkten zugeordnet wurde. Die günstigen Spanformen entstanden aufgrund der enthaltenen Inhomogenitäten bzw. Dotierungen im Fall von CuZn30Mn3Al2SiNiFe und CuZn42ML beziehungsweise aufgrund der geringen Bruchdehnung des Rotgusses CuSn4Zn2PS-C. Das Drehen der vorliegenden CuZn38-Legierung erzeugte trotz des geringen Zinkgehalts des Werkstoffs kurze Spiralspäne, die mit 70 Punkten bewertet wurden. Dies war vermutlich auf eine besonders günstige Kombination der natürlichen Spanbildung des Werkstoffs und der am Referenzwerkzeug vorhandenen Spanformrillengeometrie zurückzuführen. Die Spiralspäne aus dem Drehen des etwas zäheren CuZn34Mn2SiAlNi waren etwas länger und wurden mit 60 Punkten bewertet. Das Drehen des Werkstoffs CuZn42 mit der Bezeichnung EnviB58 erzeugte aufgrund seiner hohen Zähigkeit unter den vorliegenden Randbedingungen Wirrspäne, die mit 20 Punkten bewertet wurden.

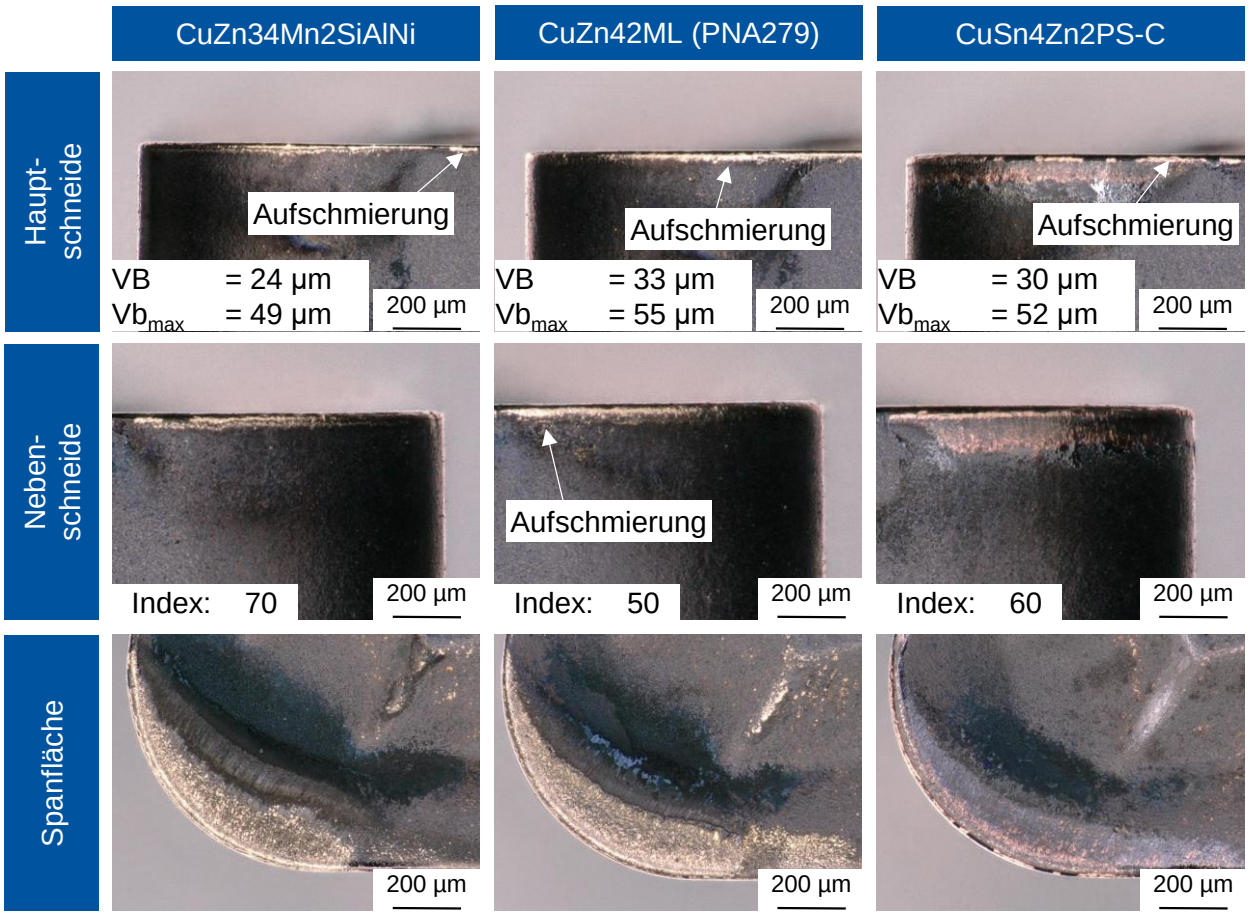


Abbildung 7.7: Werkzeugverschleiß beim Drehen der Werkstoffe CuZn34Mn2SiAlNi, CuZn42ML und CuSn4Zn2PS-C nach t_c = 150 min Schnittzeit

Den Werkzeugverschleiß nach t_c = 150 min Schnittzeit und dessen Bewertung als Zerspanbarkeitskriterium zeigen Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8. Die Bewertung erfolgte nach [NOBE13] anhand der mittleren Verschleißmarkenbreite VB. Beim Drehen aller Werkstoffe traten Aufschmierungen an den Freiflächen und auf den Spanflächen auf. Aufgrund der hohen Adhäsionsneigung war dies bei der Zerspanung von CuSn4Zn2PS-C besonders deutlich ausgeprägt. Aufgrund der mangelhaften Spanform bei den vorgegebenen Schnittparametern wurde der Verschleißversuch beim Drehen der CuZn42-Legierung mit der Bezeichnung EnviB58 abgebrochen. Ein Versuch mit anderen Schnittparametern wurde nicht durchgeführt, da dies die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigt hätte.

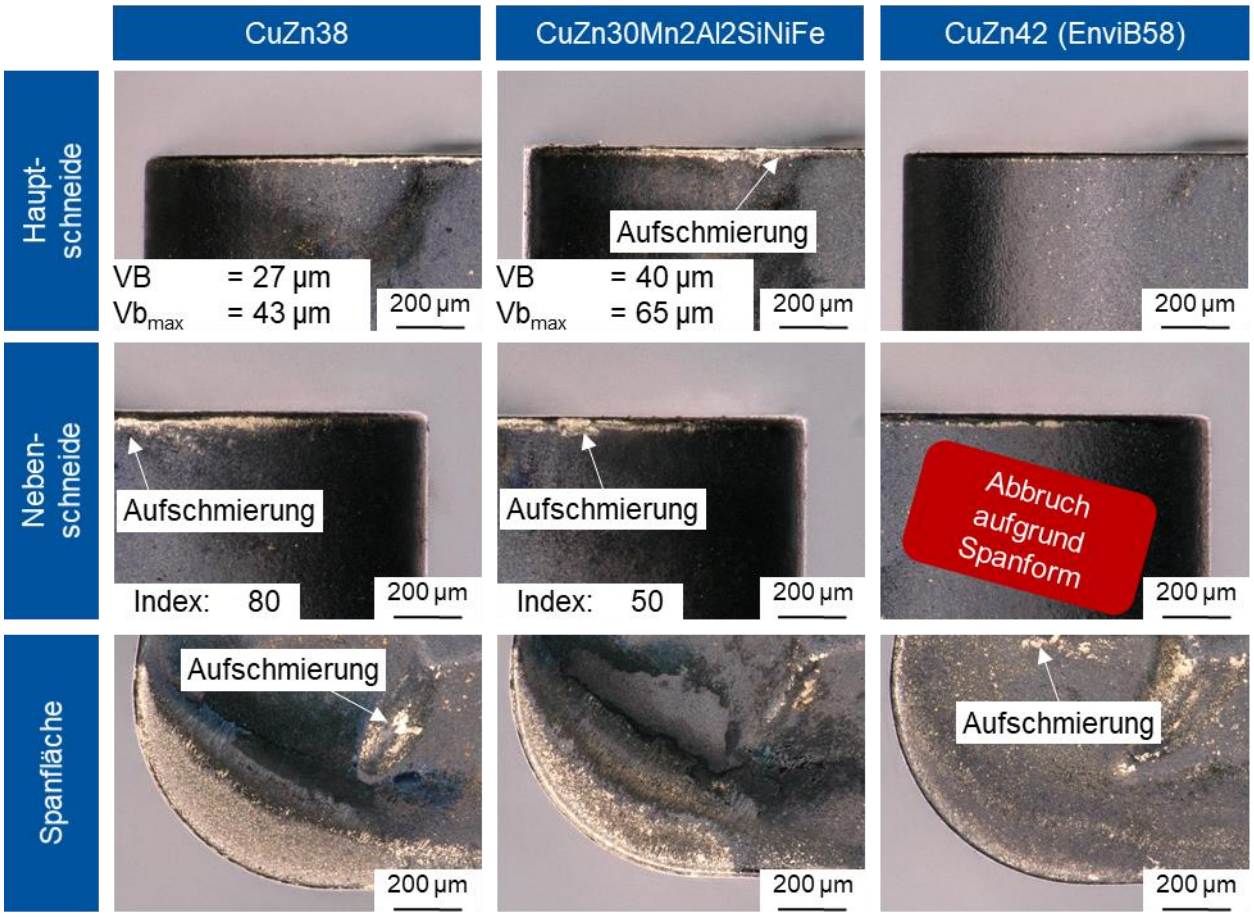


Abbildung 7.8: Werkzeugverschleiß beim Drehen der Werkstoffe CuZn38, CuZn30MN3Al2SiNiFe und CuZn42 nach t_c = 150 min Schnittzeit

Das Zerspanbarkeitskriterium der Zerspankraft wurde anhand der Schnittkraft F_c bewertet und entsprechende Werte nach [NOBE13] für den Zerspanbarkeitsindex zugeordnet, Tabelle 7.2. Die höchste Schnittkraft von F_c = 191,1 N war beim Drehen von CuZn30Mn3Al2SiNiFe erforderlich. Dies wurde auf die hohe Härte dieses Werkstoffs zurückgeführt. Analog benötigte das Drehen des Werkstoffs CuSn4Zn2PS mit der geringsten Härte die niedrigste Schnittkraft F_c = 146,2 N.

Tabelle 7.2: Schnittkraft beim Drehen und zugeordnete Zerspanbarkeitsindizes

Werkstoff	**Schnittkraft F_c / N**	**Zerspanbarkeitsindex Werkzeugverschleiß**
CuZn34Mn3SiAlNi	177,9	35
CuZn42ML	182,6	30
CuSn4Zn2PS-C	146,2	50
CuZn38	176,6	35
CuZn30Mn2Al2SiNiFe	191,1	30
CuZn42 (EnviB58)	178,7	35

Zur Bewertung der Bauteilqualität wurde der Mittenrauwert Ra verwendet. Dieser wurde als Mittelwert aus drei Wiederholmessungen mit dem Rauheitsmessgerät MarSurf XR 20 von der Fa. Mahr ermittelt. In Abbildung 7.9 sind der Mittenrauwert Ra und die Rautiefe Rz aus den Untersuchungen dargestellt. Nach [NOBE13] wurden dem Mittenrauwert die in Tabelle 7.3 zusammengefassten Zerspanbarkeitsindizes zugeordnet.

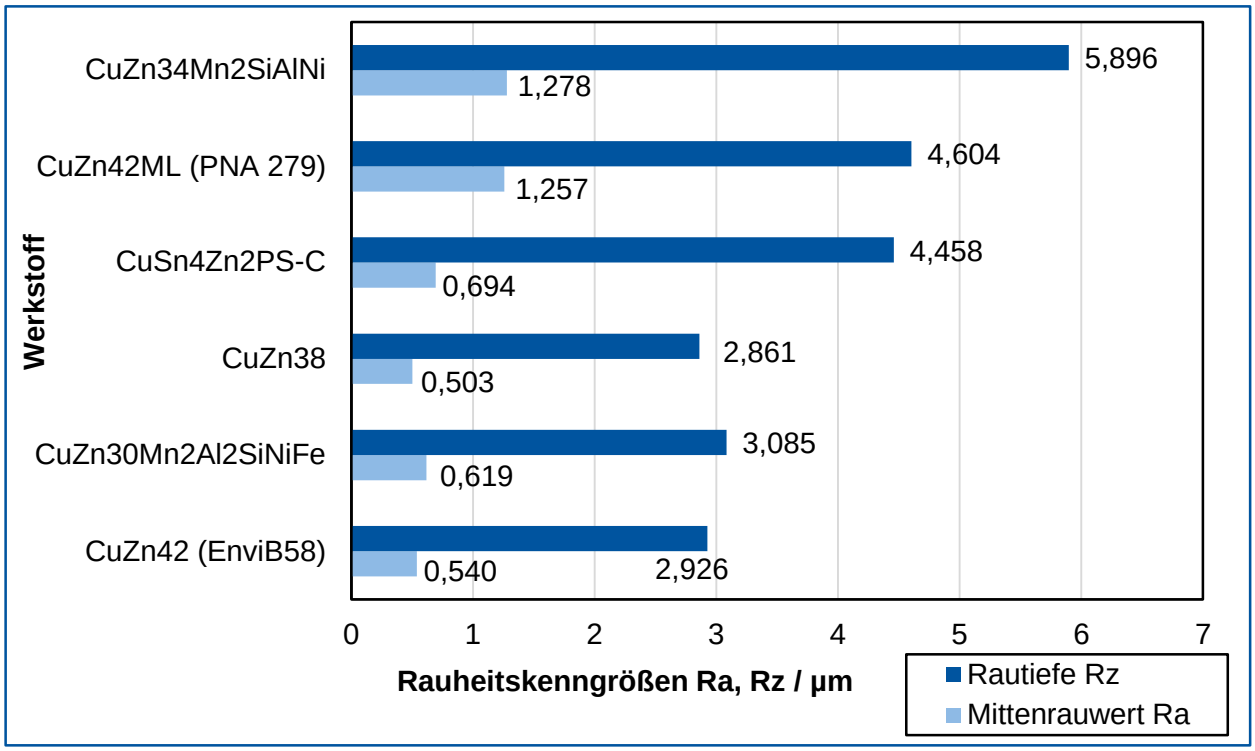


Abbildung 7.9: Mittenrauwert und Rautiefe

Tabelle 7.3: Zuordnung von Zerspanbarkeitsindizes zum Mittenrauwert Ra

Werkstoff	Mittenrauwert Ra / µm	Zerspanbarkeitsindex Oberflächengüte
CuZn34Mn3SiAlNi	1,28	40
CuZn42ML	1,26	40
CuSn4Zn2PS-C	0,69	50
CuZn38	0,50	70
CuZn30Mn2Al2SiNiFe	0,62	60
CuZn42 (EnviB58)	0,54	70

7.4.3 Ermittlung von Zerspanbarkeitsindizes

Aus den in Kapitel 7.4.2 bewerteten Zerspanbarkeitskriterien Spanform, Werkzeugverschleiß, Zerspankraft und Oberflächengüte wurden durch die Anwendung von verschiedenen Gewichtungen Zerspanbarkeitsindizes ermittelt. Die einzelnen Bewertungen der Zerspanbarkeitskriterien sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Diese Werte geben einen differenzierten Überblick über die Zerspanbarkeit eines Werkstoffs unter den gegebenen Randbedingungen.

Tabelle 7.4: Übersicht über die Bewertung der Zerspanbarkeitskriterien aus Abschnitt 7.4.2 (fett) und dem Vorgängerprojekt [NOBE13]

Werkstoff	**Spanform**	**WZ-Verschleiß**	**Zerspankraft**	**Oberfläche**
Cu-ETP	$w_{1,1} = 20$	$w_{2,1} = 20$	$w_{3,1} = 20$	$w_{4,1} = 20$
CuCr1Zr	$w_{1,2} = 20$	$w_{2,2} = 25$	$w_{3,2} = 20$	$w_{4,2} = 20$
CuZn37	$w_{1,3} = 30$	$w_{2,3} = 50$	$w_{3,3} = 30$	$w_{4,3} = 50$
CuZn38As	$w_{1,4} = 40$	$w_{2,4} = 50$	$w_{3,4} = 40$	$w_{4,4} = 70$
CuZn38	$w_{1,5} = 70$	$w_{2,5} = 80$	$w_{3,5} = 35$	$w_{4,5} = 70$
CuZn42	$w_{1,6} = 50$	$w_{2,6} = 50$	$w_{3,6} = 50$	$w_{4,6} = 70$
CuZn42 (EnviB58)	$w_{1,7} = 20$	Versuchsabbruch	$w_{3,7} = 35$	$w_{4,7} = 70$
CuZn42ML	$w_{1,8} = 80$	$w_{2,8} = 50$	$w_{3,8} = 30$	$w_{4,8} = 40$
CuZn21Si3P	$w_{1,9} = 80$	$w_{2,9} = 45$	$w_{3,9} = 70$	$w_{4,9} = 70$
CuZn30Mn2Al2SiNiFe	$w_{1,10} = 80$	$w_{2,10} = 50$	$w_{3,10} = 30$	$w_{4,10} = 60$
CuZn34Mn2SiAlNi	$w_{1,11} = 60$	$w_{2,11} = 70$	$w_{3,11} = 35$	$w_{4,11} = 40$
CuSn12-C	$w_{1,12} = 90$	$w_{2,12} = 90$	$w_{3,12} = 65$	$w_{4,12} = 90$
CuSn4Zn2PS-C	$w_{1,13} = 80$	$w_{2,13} = 60$	$w_{3,13} = 50$	$w_{4,13} = 50$
CuZn39Pb3	$w_{1,14} = 100$	$w_{2,14} = 100$	$w_{3,14} = 100$	$w_{4,14} = 90$

Die drei Bewertungsszenarien mit gleicher Gewichtung aller Faktoren, Schrupp- und Schlichtbearbeitung wurden aus dem Vorhaben AiF-IGF 16867 N übernommen (Tabelle 7.5, [NOBE13]). Das Szenario 1 gewichtet alle Bewertungskriterien gleich und repräsentiert damit eine ausgewogene Mischung aus verschiedenen Bearbeitungsszenarien. Das Szenario Schruppbearbeitung gewichtet den Werkzeugverschleiß und die Zerspankraft höher, da diese bei der Schruppbearbeitung eine größere Bedeutung für das Bearbeitungsergebnis haben als die erzielte Oberflächenqualität oder die Spanform. Die Gewichtung der Spanform erfolgte hier vor allem nach dem Kriterium, dass lange Späne Oberflächenschädigungen am Bauteil verursachen können [NOBE13]. Der Aspekt des erschwerten Spanabtransports bei langen Spänen wurde nicht berücksichtigt. Umgekehrt dazu werden beim dritten Szenario „Schlichtbearbeitung“ die Spanform und die Oberflächengüte höher bewertet als der Werkzeugverschleiß und die Zerspankraft.

Abbildung 7.10 zeigt die so ermittelten Zerspanbarkeitsindizes mit gleicher Gewichtung aller Kriterien. Auf die Angabe der Zahlenwerte für den Zerspanbarkeitsindex wurde aufgrund der in Abschnitt 7.4.1 beschriebenen Unschärfe eines solchen Indexes verzichtet. Auffällig ist dabei der hohe Zahlenwert für die Zerspanbarkeit von CuZn38. Dieser binäre Messingwerkstoff weist aufgrund seines Zinkgehalts nur einen geringen Anteil an β-CuZn-Phase auf. Der Vergleich mit

dem mit As dotierten CuZn38As, der im Vorgängerprojekt untersucht wurde zeigte, dass neben der chemischen Zusammensetzung auch andere Werkstoffkenngrößen und Randbedingungen maßgeblichen Einfluss auf die Zerspanbarkeit haben. Der Werkstoff CuZn42ML erzeugte aufgrund des enthaltenen Indium günstigere Spanformen als der im Vorgängerprojekt untersuchte CuZn42, verursachte aufgrund seiner höheren Härte jedoch einen höheren Werkzeugverschleiß, was insgesamt zu einer schlechteren Bewertung führte.

Tabelle 7.5: Gewichtungsfaktoren für die Bewertung der Zerspanbarkeitskritereien nach verschiedenen Szenarien

	Spanform	**Verschleiß**	**Zerspankraft**	**Oberflächengüte**
Gewichtungsfaktor	g_1	g_2	g_3	g_4
Szenario 1: Gleiche Gewichtung aller Kriterien	0,25	0,25	0,25	0,25
Szenario 2: Schruppbearbeitung	0,2	0,4	0,3	0,1
Szenario 3: Schlichtbearbeitung	0,4	0,2	0,1	0,3

Die Zerspanbarkeitsindizes für das Szenario „Schruppbearbeitung“ sind in Abbildung 7.11 dargestellt. Durch die Veränderung der Gewichtungsfaktoren gemäß Tabelle 7.5 steigt im Vergleich zum ersten Szenario die Bewertung des Werkstoff CuZn34Mn2SiAlNi an, da er beim Drehen geringen Werkzeugverschleiß erzeugte. Aufgrund des höheren Verschleißes beim Drehen von CuZn30Mn3Al2SiNiFe gilt für diesen Werkstoff das Gegenteil.

Im Szenario „Schlichtbearbeitung“ wurden insbesondere die Werkstoffe besser bewertet, die wie CuZn42ML unter den gegebenen Randbedingungen günstige Spanformen erzielten (Abbildung 7.12).

Die hier erzielten Ergebnisse zeigten, dass die Bewertung der Zerspanbarkeit anhand einer einzigen Kennzahl nur eingeschränkt möglich ist. Trotz größtmöglicher Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung und dem Abgleich mit den Ergebnissen des Vorgängerprojekts unterlagen die Zerspanbarkeitsindizes chemisch ähnlicher Werkstoffe wie CuZn38As und CuZn38 erheblichen Abweichungen. Dies war neben den geringfügigen Abweichungen im Versuchsaufbau (anderes ölbasiertes KSS-Medium) auf eine Vielzahl weiterer Einflussgrößen zurückzuführen. Dazu gehörten insbesondere die Festigkeit, die Härte und die Bruchdehnung des untersuchten Werkstoffs. Diese Größen können sich auch bei gleicher chemischer Zusammensetzung zweier Halbzeuge maßgeblich unterscheiden. Die Legierung CuZn42 ist beispielsweise in Halbzeugen mit Zugfestigkeiten zwischen etwa R_m = 350 MPa und R_m = 750 MPa lieferbar.

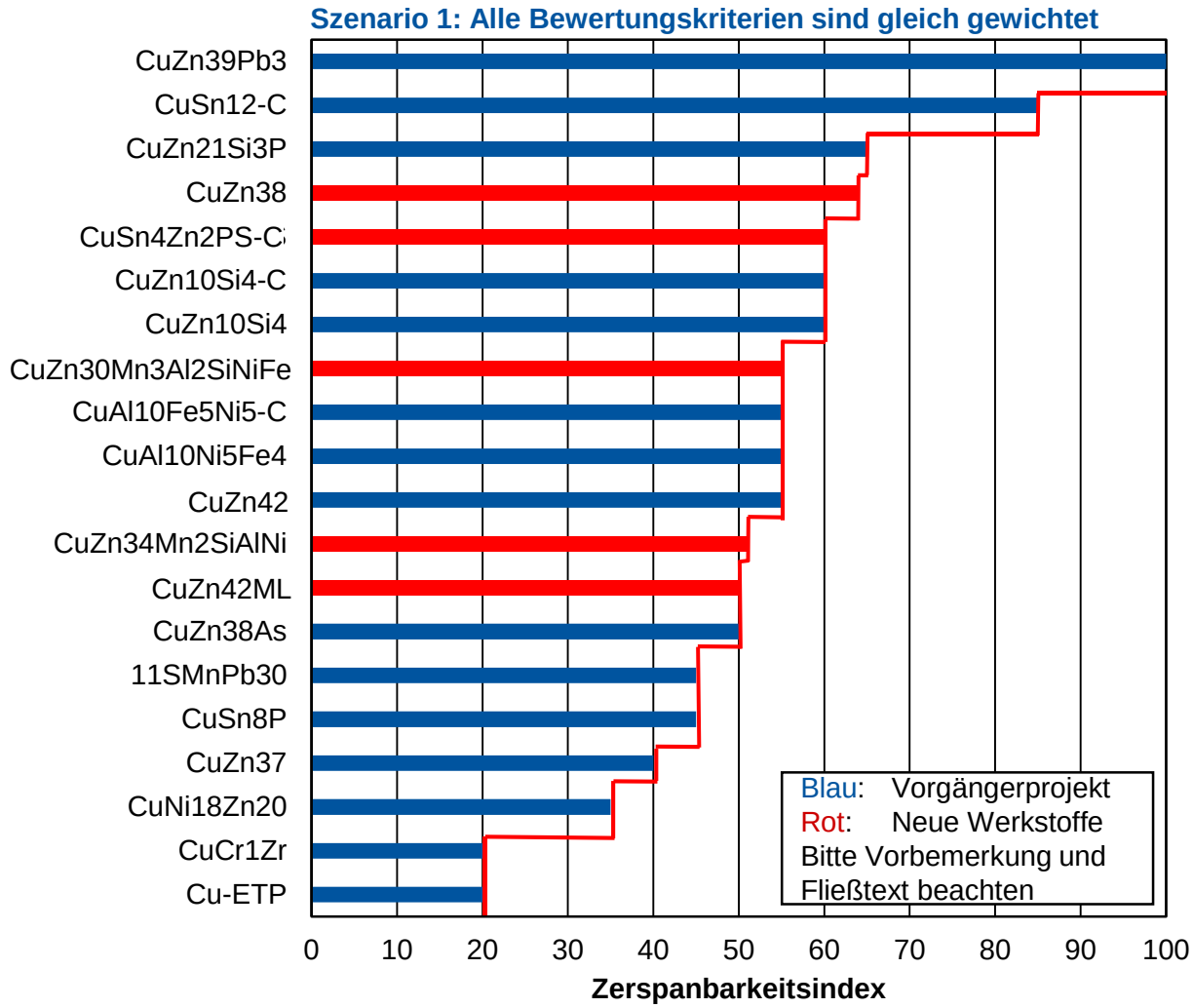


Abbildung 7.10: Zerspanbarkeitsindizes bei gleicher Gewichtung aller Zerspanbarkeitskriterien

In der industriellen Bauteilfertigung kommen zumeist mehrere Bearbeitungsprozesse und eine Kombination von Schrupp- und Schlichtprozessen zum Einsatz. Dafür ist eine differenzierte Betrachtung der Zerspanbarkeit erforderlich. Für die industrielle Nutzung dieser Untersuchungen empfehlen die Autoren den Anwendern daher die individuelle Bewertung der Einzelergebnisse aus Tabelle 7.4.

Neben den in diesem Abschnitt untersuchten Kupferbasiswerkstoffen weisen auch die in Kapitel 5 für das Nutenfräsen eingesetzten Zinkknetlegierungen beim Drehen und Bohren unter geeigneten Randbedingungen eine gute Zerspanbarkeit auf. Im Abschlussbericht von AiF-IGF-Projekt 18190 N wurden bei der Nasszerspanung dieser Werkstoffe günstige Spanformen, geringer Werkzeugverschleiß und sehr niedrige Zerspankraftkomponenten beschrieben [BERG19]. Zerspanbarkeitsindizes, die unter leicht unterschiedlichen Bedingungen ermittelt wurden wie in diesem Vorhaben, ergaben je nach Szenario und Werkstoff Werte im Bereich von 56 bis 75.

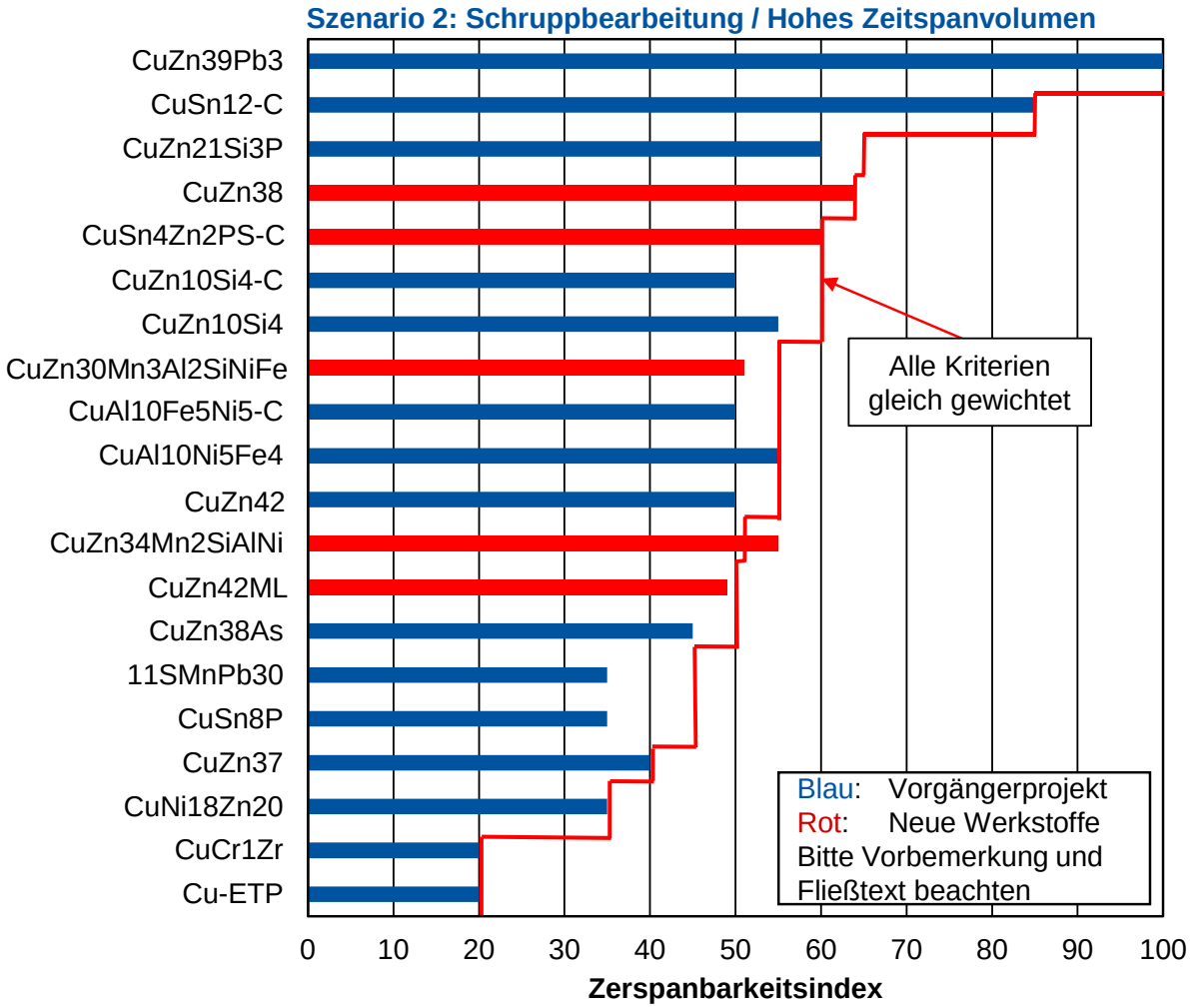


Abbildung 7.11: Zerspanbarkeitsindizes im Szenario „Schruppbearbeitung“ (vgl. Tabelle 7.1)

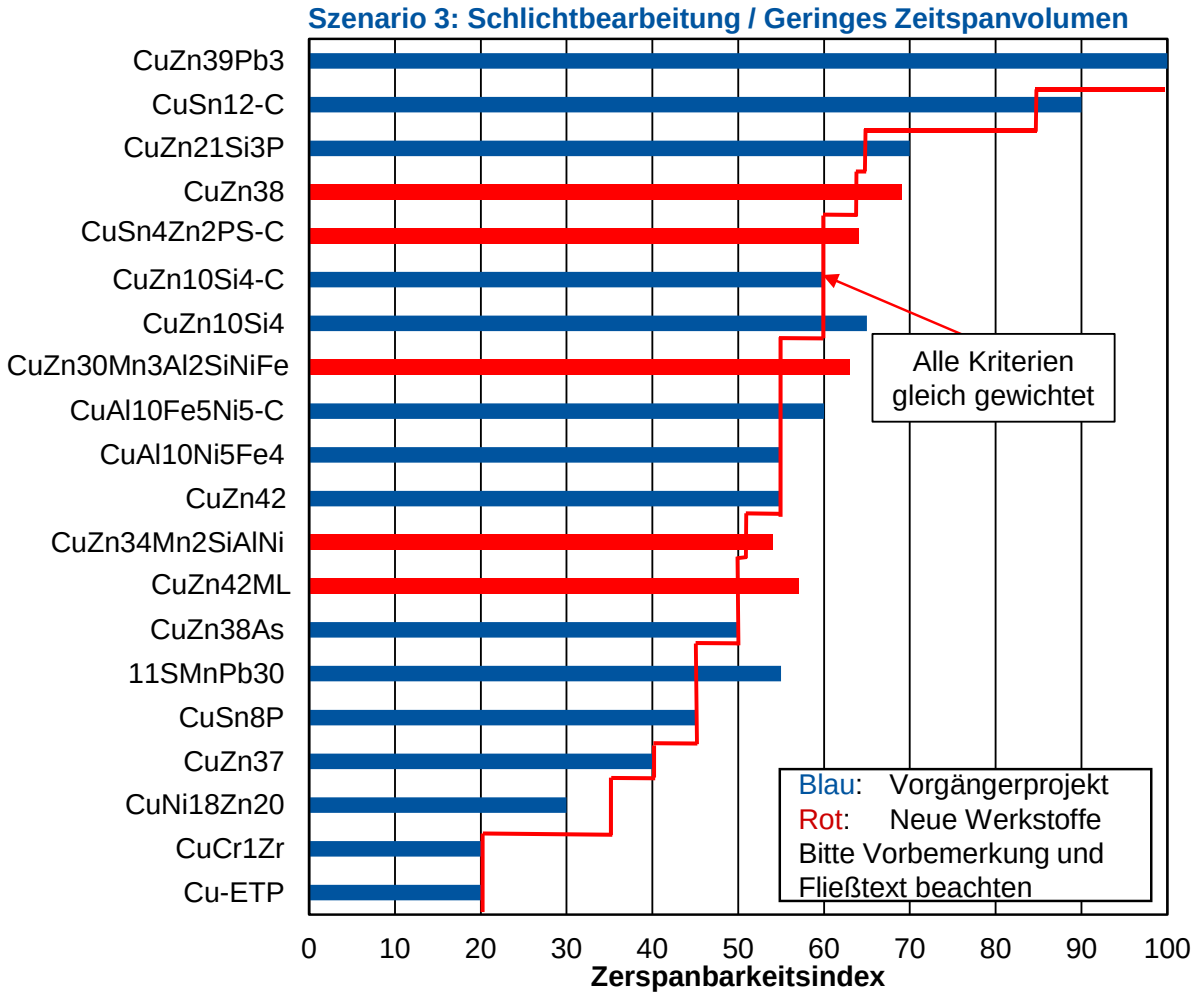


Abbildung 7.12: Zerspanbarkeitsindizes im Szenario „Schlichtbearbeitung“ (vgl. Tabelle 7.1)

8 Validierung der Projektergebnisse

Die erarbeiteten Projektergebnisse wurden anhand der Fertigung eines Musterbauteils validiert. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen galten Kontaktbeschränkungen aufgrund der Covid-19-Pandemie. Deshalb wurden die Untersuchungen nicht in der Fertigung eines PA-Mitglieds, sondern am Werkzeugmaschinenlabor durchgeführt. Ein fiktives Musterbauteil mit einem Sechskant mit der Schlüsselweite 22 mm und einem ringförmigen Einstich wurde mittels Stirn- und Tauchfräsen aus den Werkstoffen CuZn42 und CuZn37 gefertigt. Die Untersuchungen wurden auf dem Stangendrehzentrum NZX 1500 von DMG MORI durchgeführt (Abbildung 8.1).

Abbildung 8.1: Prozessablauf für die Validierungsversuche auf dem Drehzentrum DMG Mori NZX 1500

Ausgehend von Rundstangen mit dem Durchmesser d = 40 mm wurde im ersten Bearbeitungsschritt ein Sechskant mit einer Schlüsselweite von SW = 22 mm und einer Breite von 14 mm gefertigt (Abbildung 8.2). Die werkstoff- und prozessspezifisch eingestellten Schnittparameter sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Schnittbedingungen bei den Validierungsversuchen

Prozessparameter	**Nutenfräsen**	**Tauchfräsen**
Schnittgeschwindigkeit v_c / m/min	300	62,8
Zahnvorschub f_z / mm	0,06	0,015
Eingriffsbreite a_e bzw. Pitch p / mm	7	0,5
Eingriffstiefe a_p / mm	3	-
Vorschubweg je Bauteil l_f / mm	40	1358
Werkzeug (vgl. Tabelle 4.1, Tabelle 4.2 und Tabelle 5.1)	KENNAMETAL ABDE10000A3ARG	CuZn42: GÜHRING 30357619 F0,02 CuZn37: GÜHRING 3865 HB8
KSS-Strategie	Überflutungskühlung	CuZn42: direkte Zufuhr, p = 10 bar CuZn37: Überflutung

Abbildung 8.3 zeigt den Werkzeugverschleiß nach dem Sechskantfräsen von 100 Werkstücken in CuZn42 bzw. 50 Werkstücken in CuZn37. Bei der Stirnfräsbearbeitung von CuZn42 entstand ein Ausbruch an einer Schneidenecke des Schaftfräsers. Dies wurde auf die hohe Zähigkeit des Werkstoffs und den Vorschub von f_z = 0,06 mm zurückgeführt. Darüber hinaus entstand bei der Bearbeitung beider Werkstoffe kein messbarer Verschleiß.

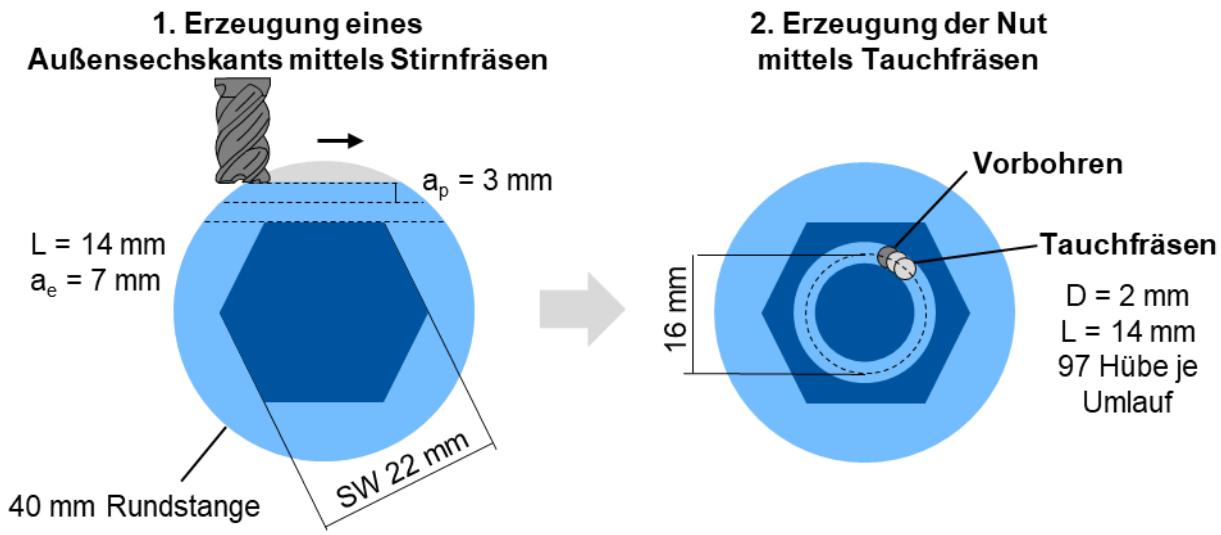


Abbildung 8.2: Bauteilgeometrie und Bearbeitungsstrategie bei den Validierungsuntersuchungen

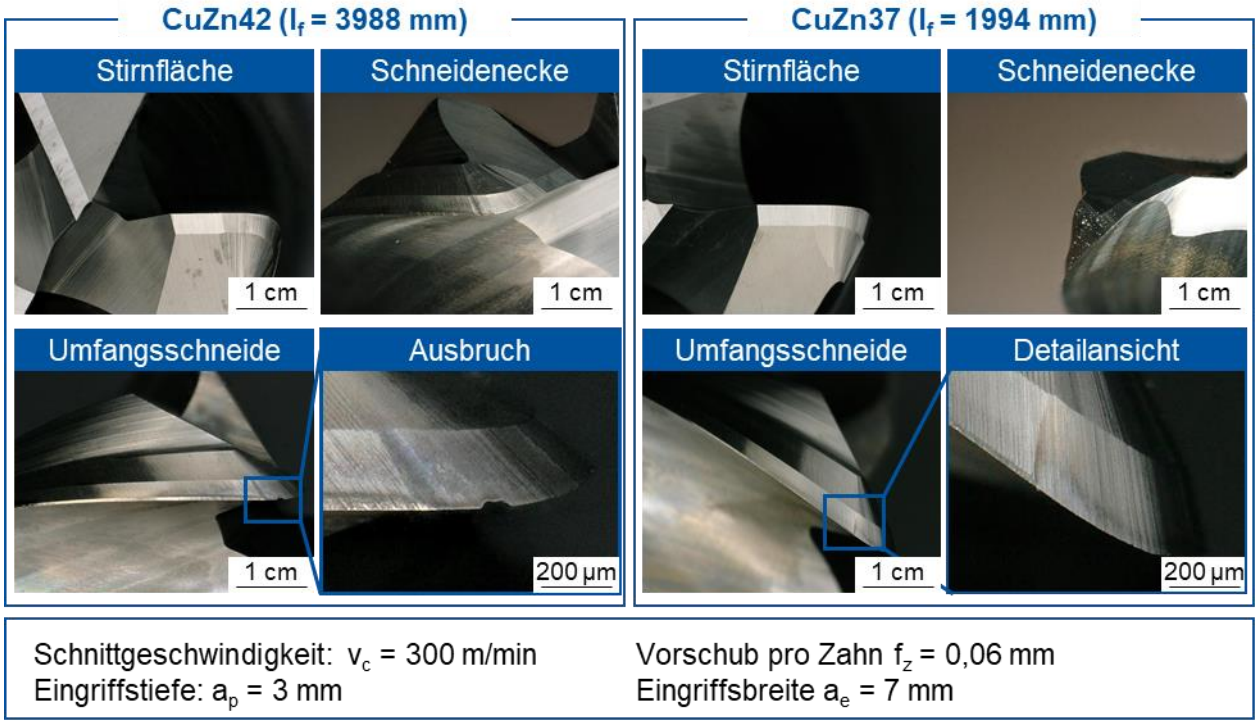


Abbildung 8.3: Werkzeugverschleiß beim Sechskantfräsen in CuZn42 und CuZn37

Bei der Fertigung des ringförmigen Einstichs durch Tauchfräsen wurden 9850 (CuZn42) bzw. 4850 (CuZn37) Tauchfräshübe durchgeführt. Dabei entstand bei beiden Werkstoffen nur geringer Einlaufverschleiß (Abbildung 8.4). Ausbrüche an den Schneidenecken oder Umfangsschneiden traten nicht auf.

Diese Validierungsuntersuchungen zeigten, dass durch die erarbeiteten Projektergebnisse eine erhebliche Verbesserung der Prozesssicherheit und Produktivität im Vergleich zum Ausgangszustand möglich war. Insbesondere die Beherrschung des Tauchfräsens mit Werkzeugdurchmesser d = 2 mm war nur durch die gezielte Werkzeug- und Prozessauslegung möglich.

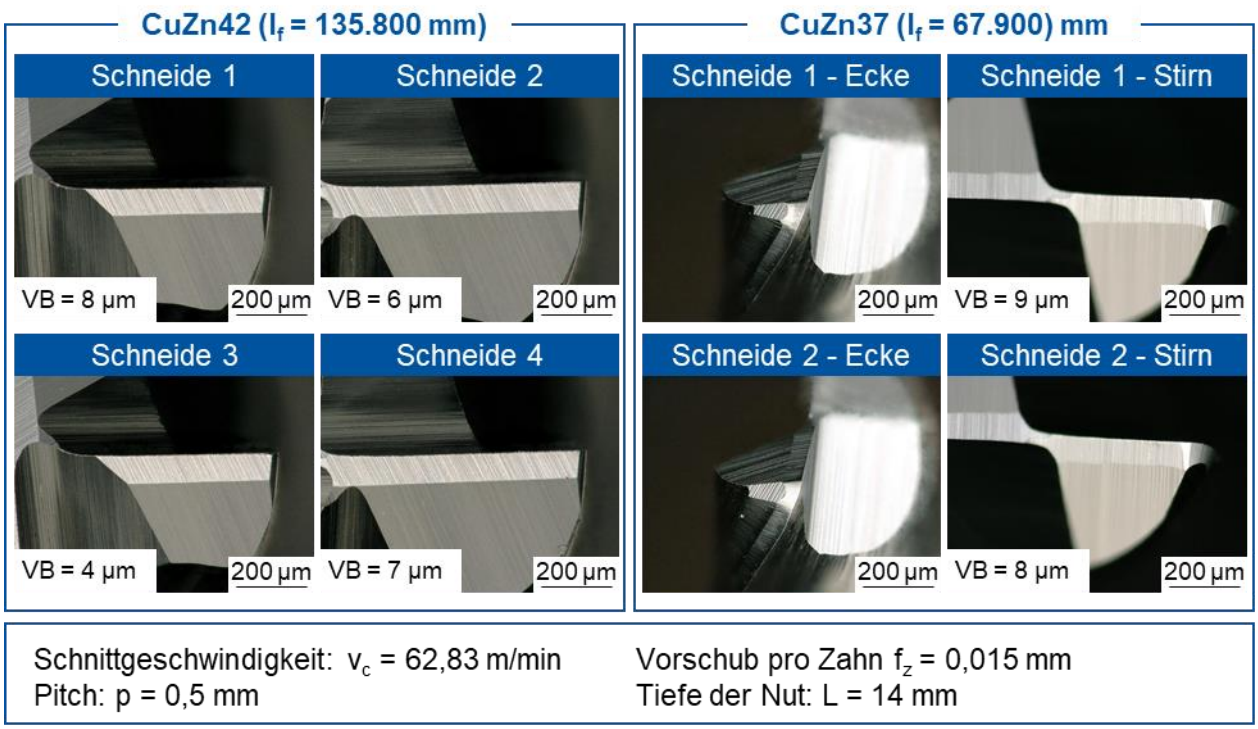


Abbildung 8.4: Werkzeugverschleiß beim Tauchfräsen in CuZn42 und CuZn37

9 Literaturverzeichnis

[AEG00] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 269/34, DE, 21.10.2000

[AEG02] Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union, 13.2.2003, DE, L 37/19

[BERG19] Bergs, T., Klocke, F., Baier, S.: Analyse der Zerspanbarkeit von stranggepressten Zinkknetlegierungen und Entwicklung angepasster Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien für das Drehen und Bohren. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18190N. 2019

[BGB01] Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21 Mai 2001. Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2001, Teil I Nr. 24, ausgegeben zu Bonn am 28. Mai 2001

[BUND17] Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Neuauflage 2016, Hrsg.: Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, 2017

[DENK11] Denkena, B., Tönshoff, H. K.: Spanen. Grundlagen. 3. Aufl. Springer 2011

[FALB95] J. Falbe und M. Regitz (Hrsg.): CD Römpp. 9. erweiterte und überarbeitete Auflage des Römpp Chemie Lexikons auf CD-ROM, Version 1.0, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1995

[FUSS08] Fuß, H.-G., Ballhaus, P.: Konstruktion von Hochleistungsbeschichtungen. In: Spanende Fertigung, Hrsg.: Weinert, K., Biermann, D., Vulkan Verlag Essen, 5. Auflage, 2008

[KLOC08] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren. Drehen, Fräsen, Bohren. Springer, Heidelberg, 9. Aufl., 2018

[NOBE13] Nobel, C., Klocke, F..: Entwicklung einer Hochleistungszerspanung für schwerzerspanbare bleifreie Kupferknet- und –gusslegierungen. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 16867N. 2013

10 Anhang

10.1 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn37

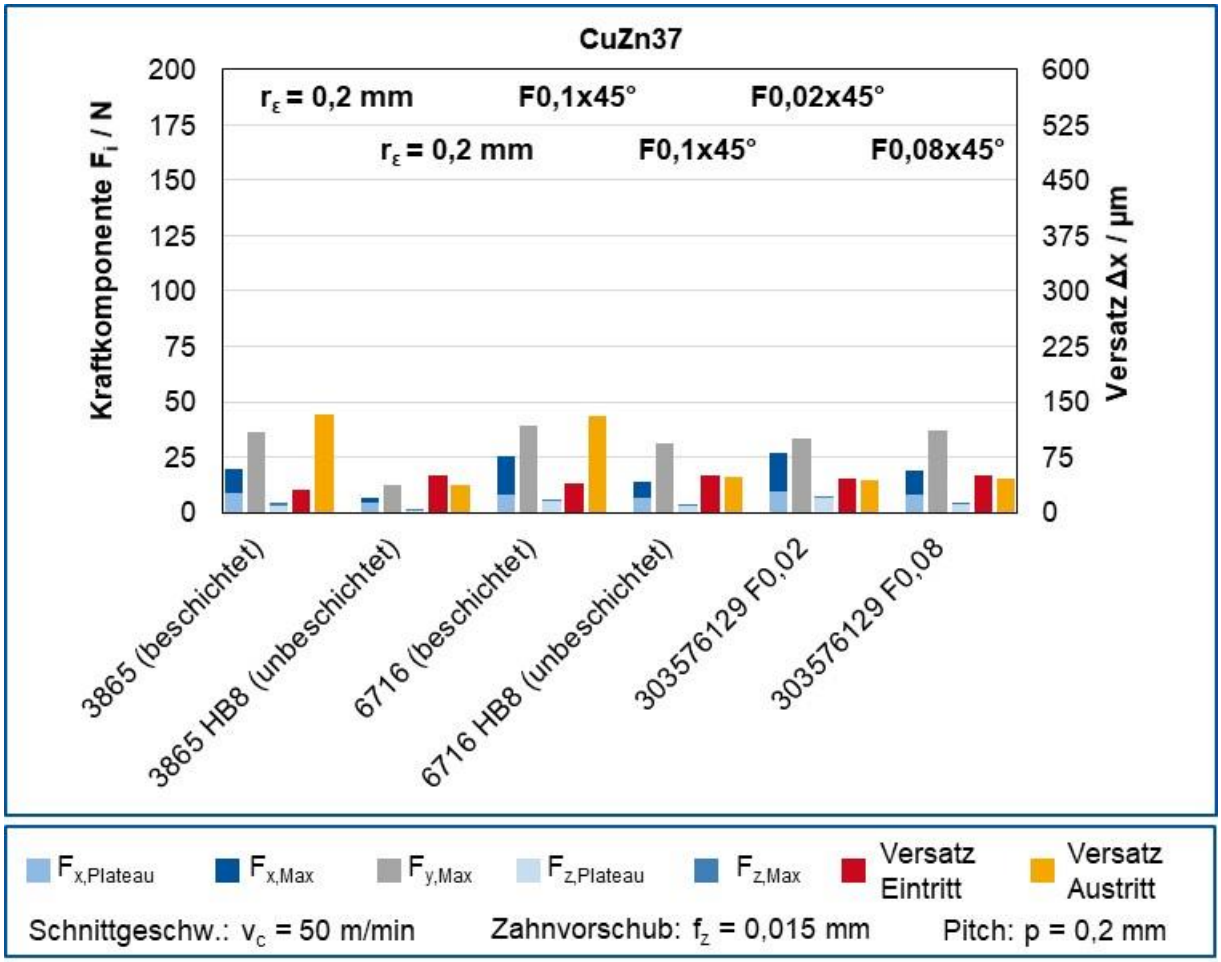


Abbildung 10.1: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn37 mit f_z = 0,015 mm und p = 0,2 mm

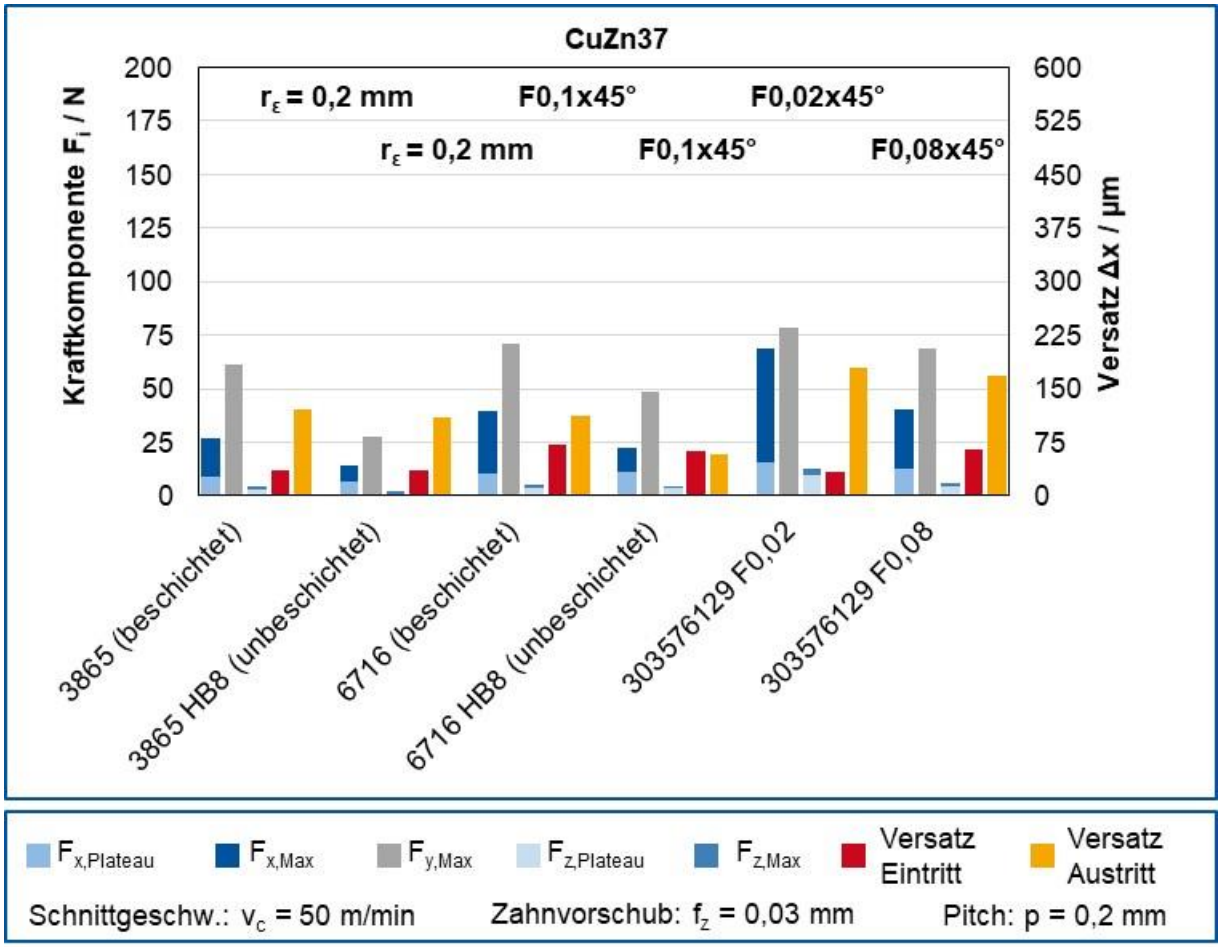


Abbildung 10.2: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn37 mit f_z = 0,02 mm und p = 0,2 mm

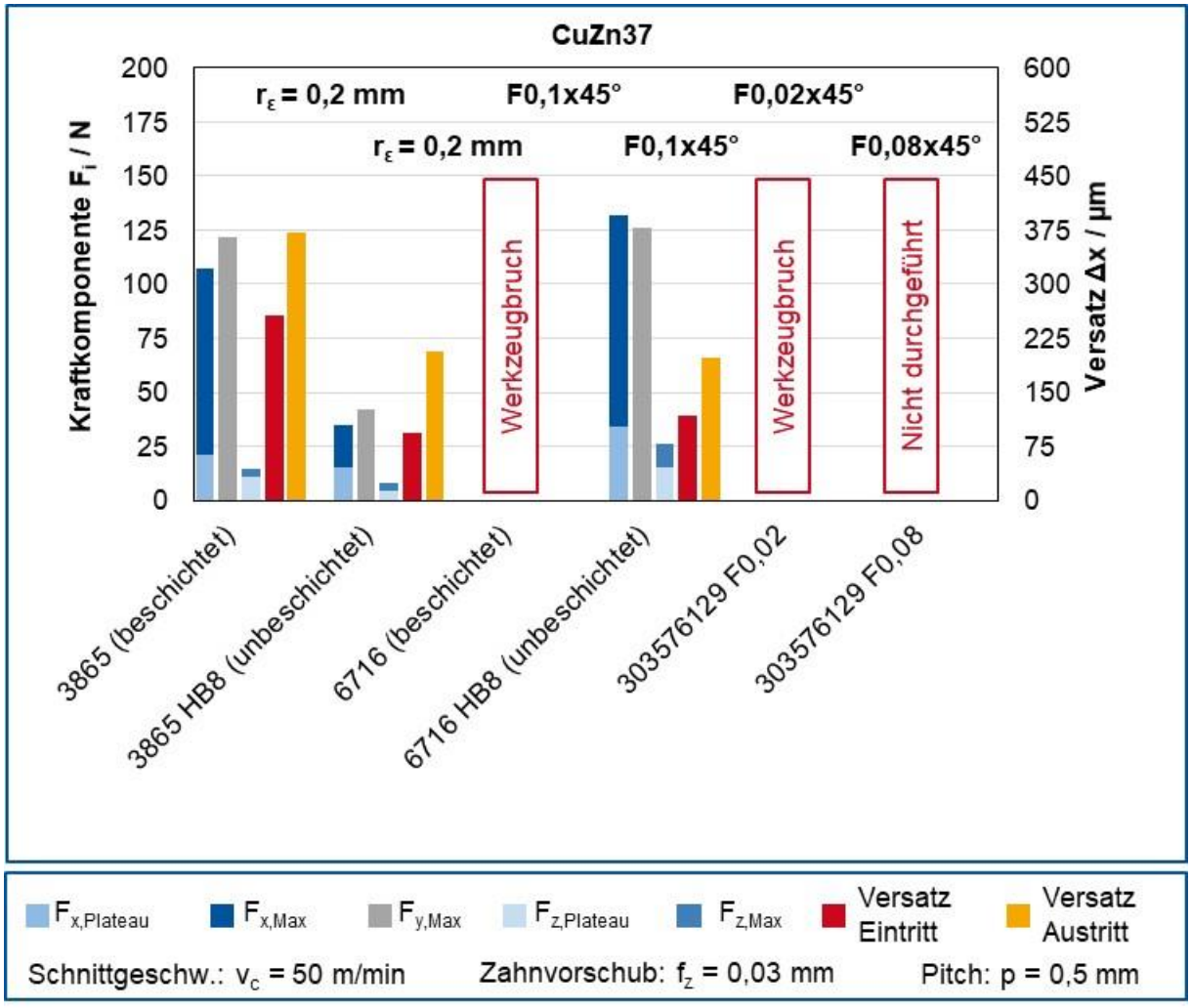


Abbildung 10.3: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn37 mit f_z = 0,03 mm und p = 0,5 mm

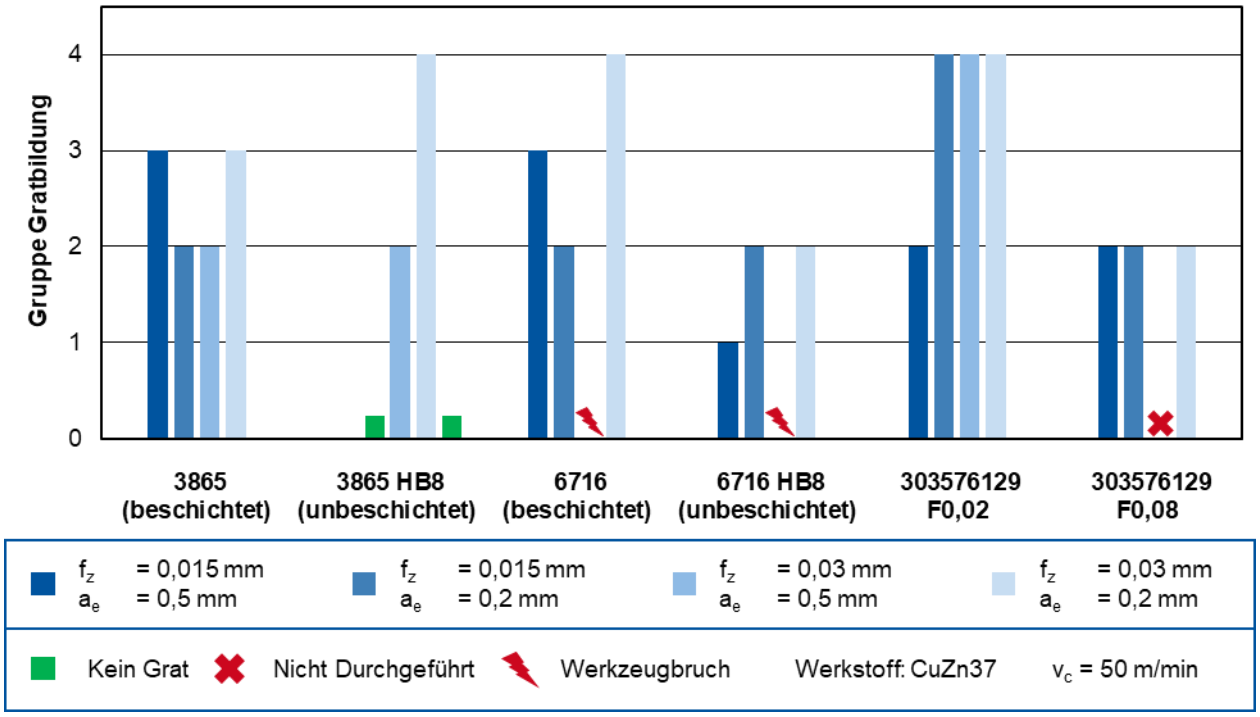


Abbildung 10.4: Gratbildung beim Tauchfräsen von CuZn37

10.2 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn42

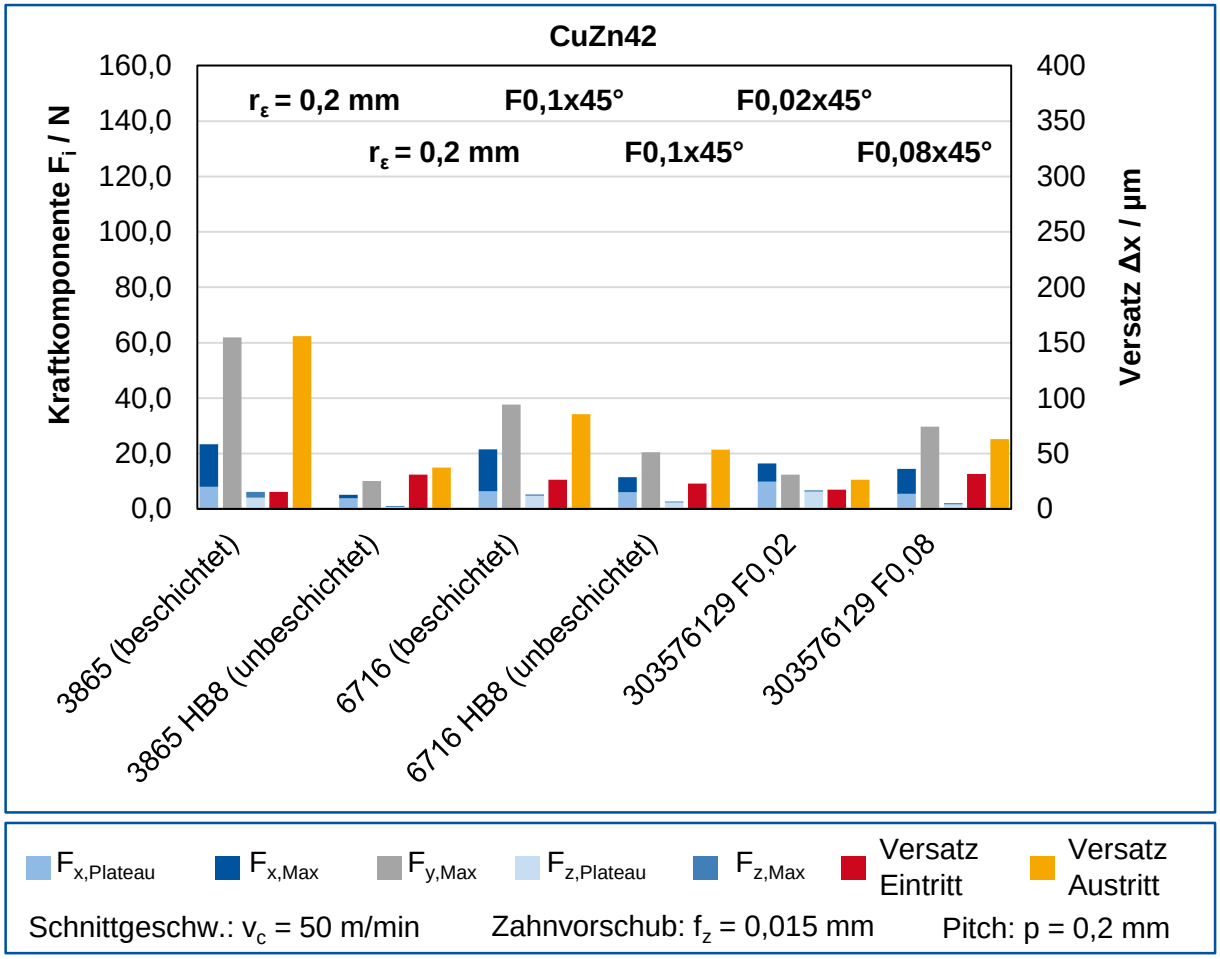


Abbildung 10.5: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn42 mit Vorschub f_z = 0,015y mm und Pitch p = 0,2 mm

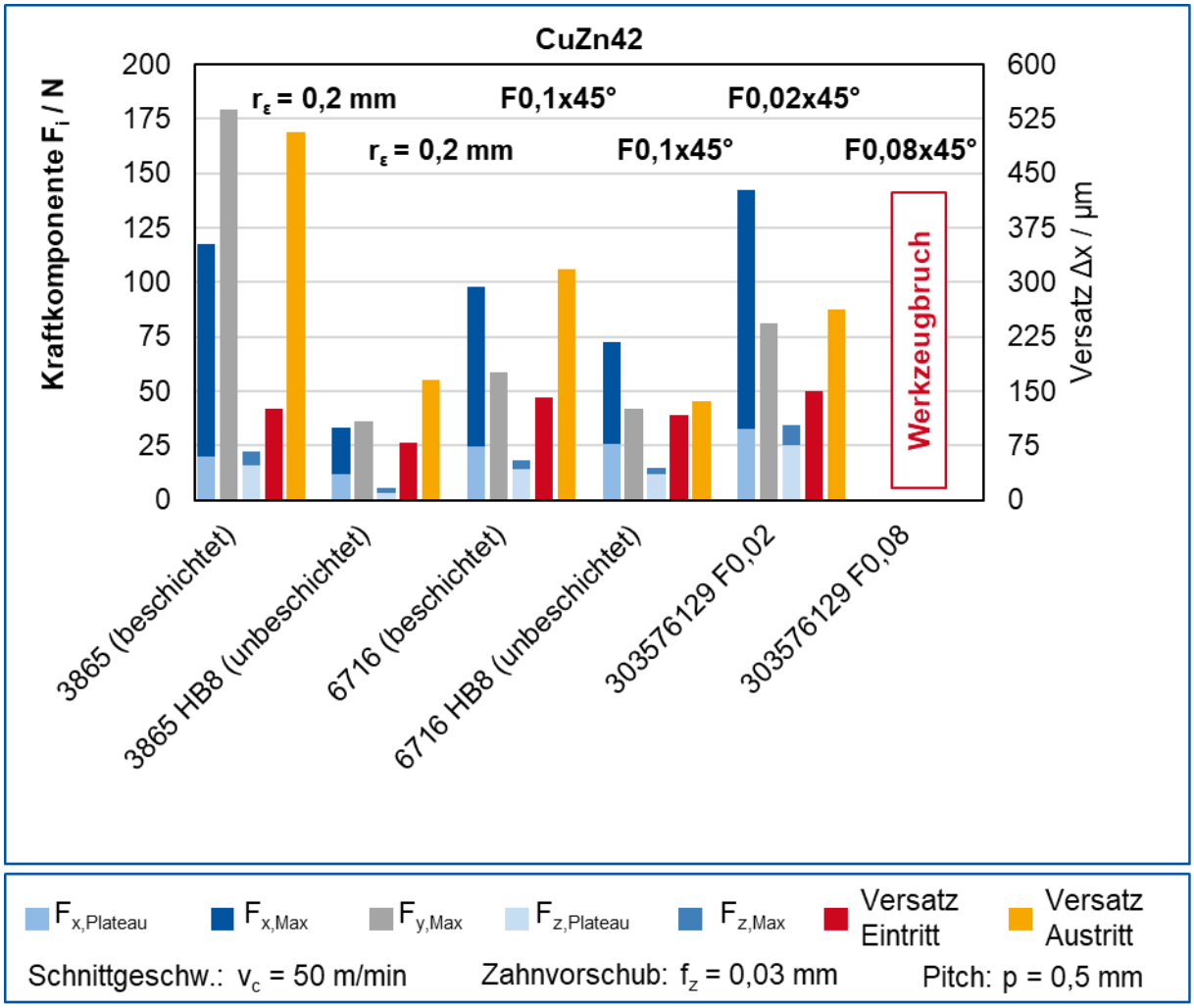


Abbildung 10.6: : Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn42 mit Vorschub f_z = 0,03 mm und Pitch p = 0,5 mm

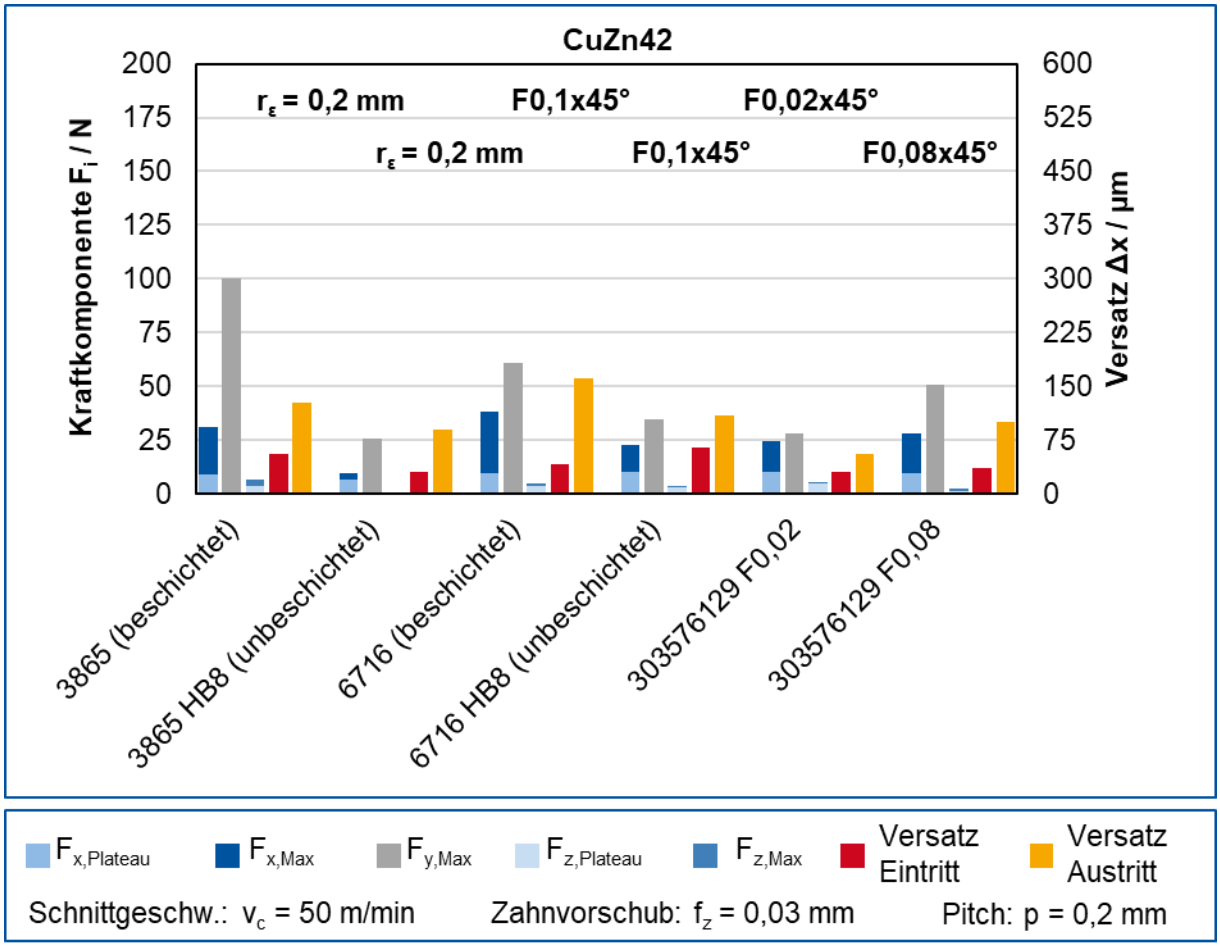


Abbildung 10.7: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn42 mit Vorschub f_z = 0,03 mm und Pitch p = 0,2 mm

10.3 Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P

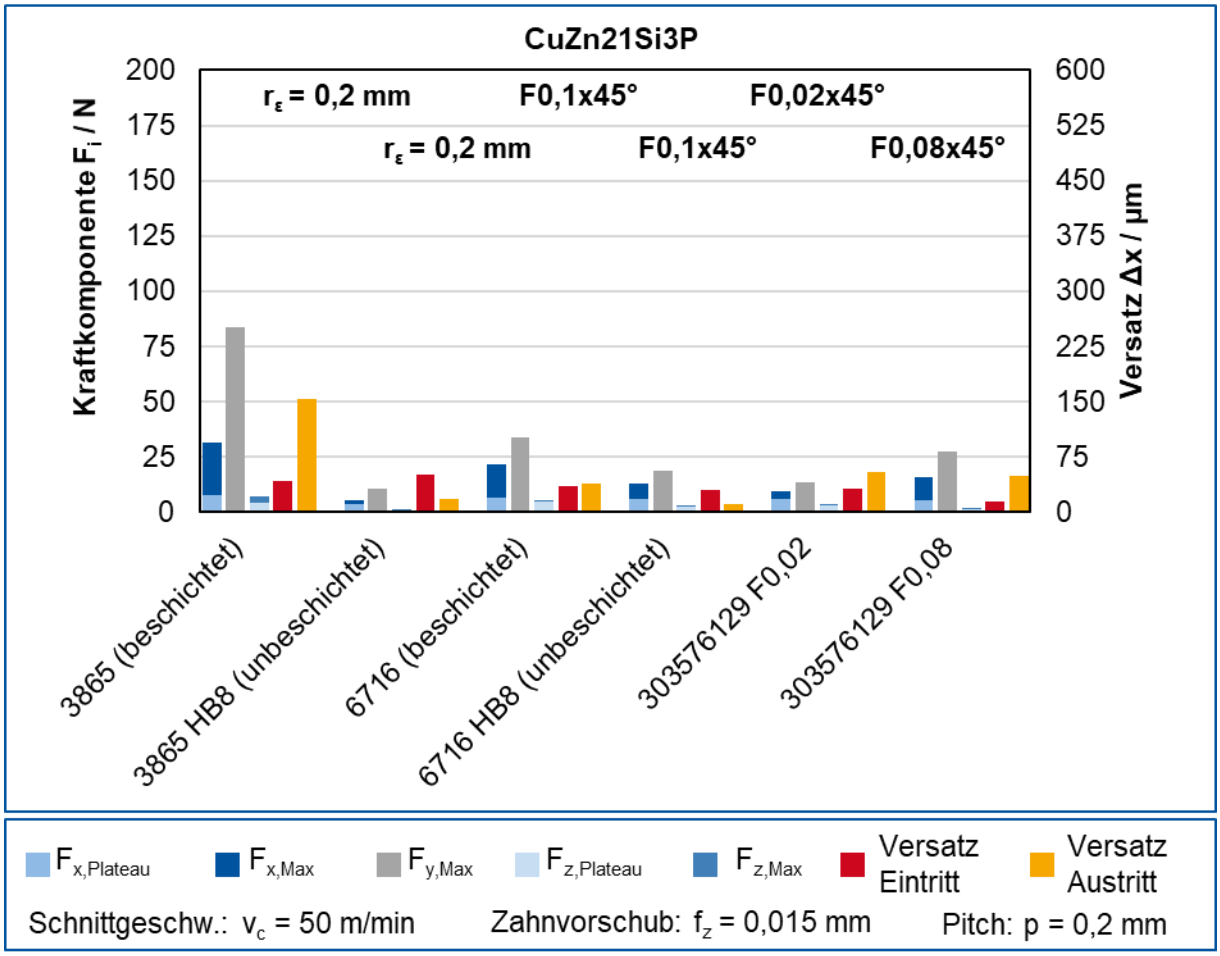


Abbildung 10.8: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P mit Vorschub f_z = 0,015 mm und Pitch p = 0,2 mm

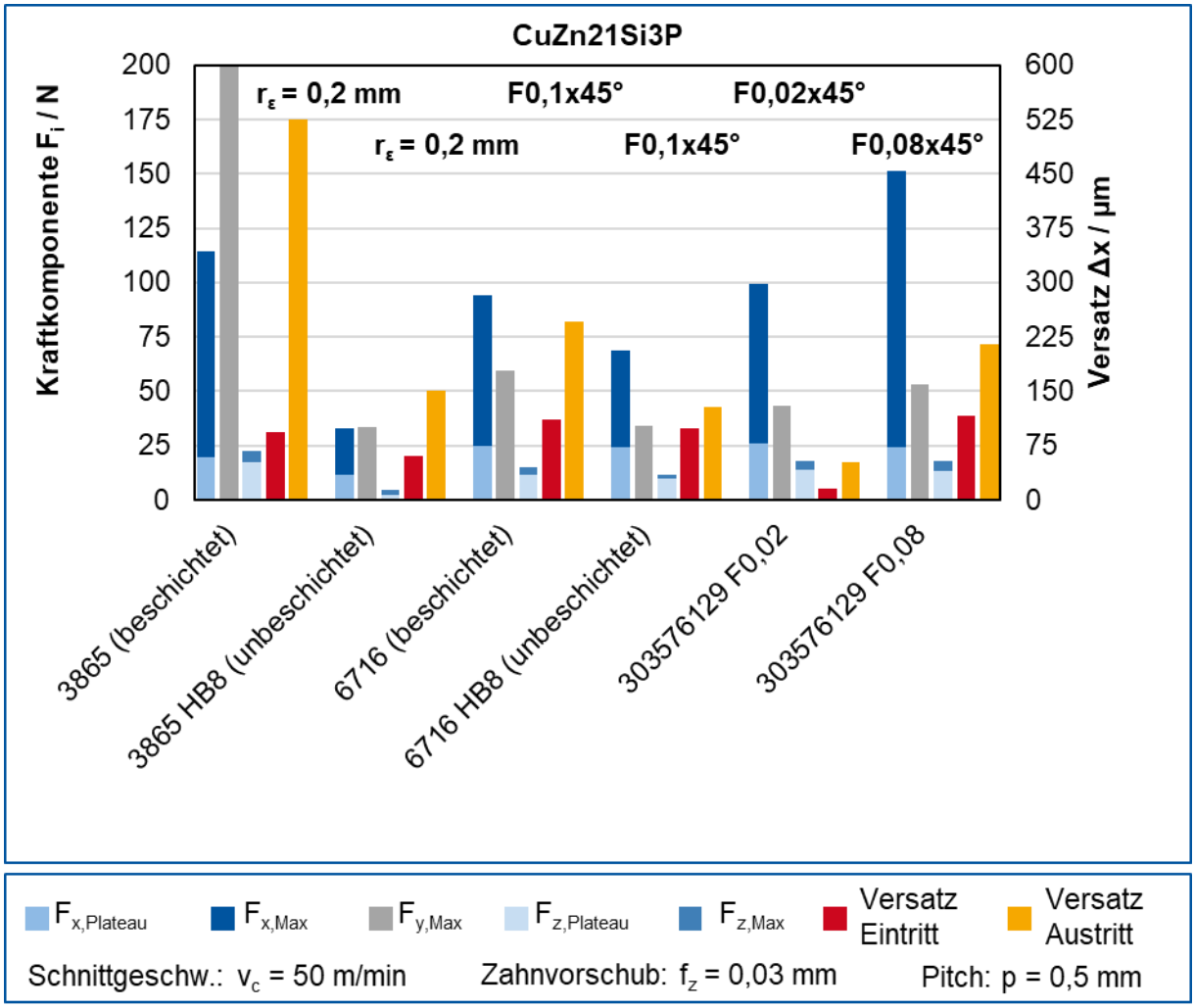


Abbildung 10.9: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P mit Vorschub f_z = 0,03 mm und Pitch p = 0,5 mm

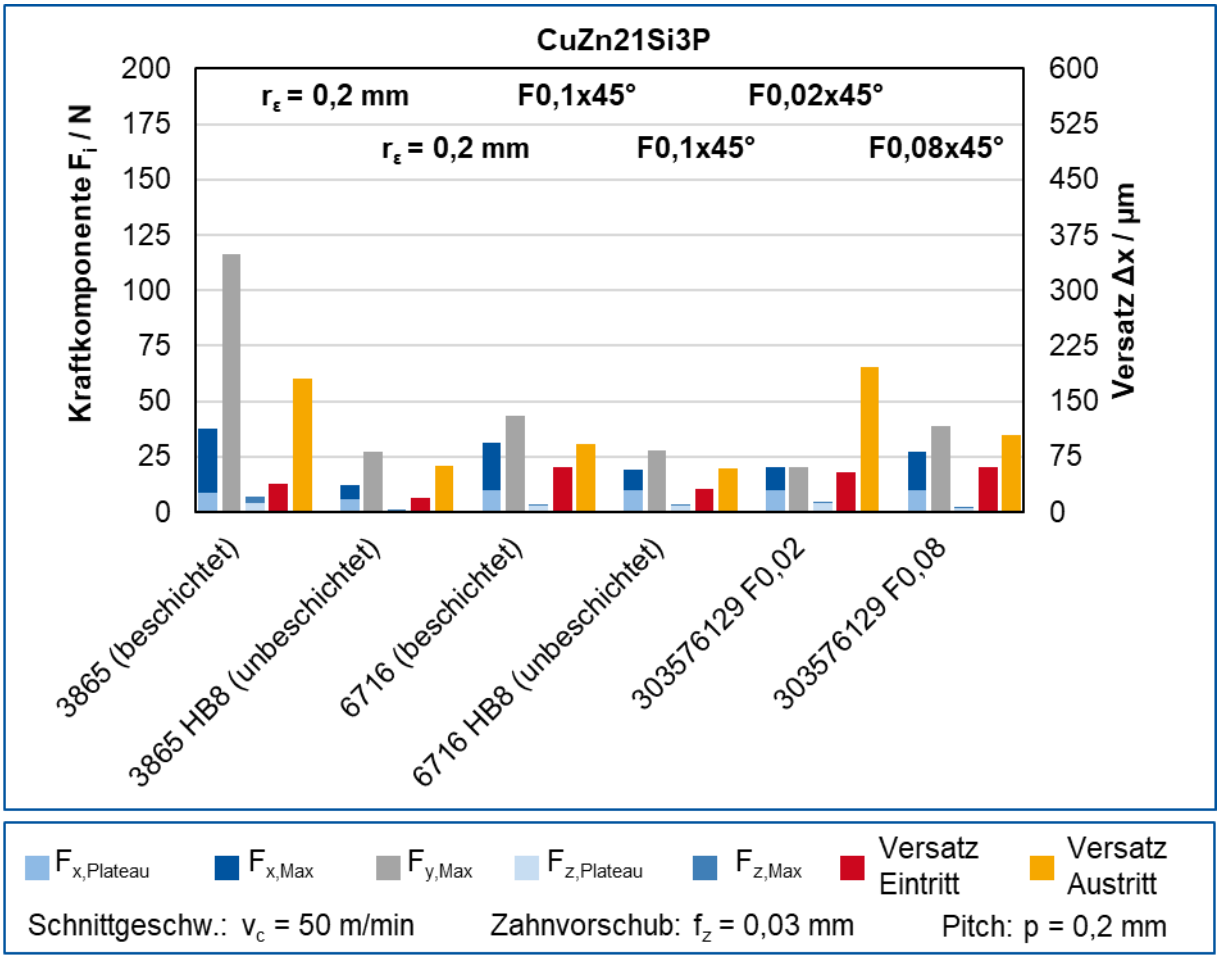


Abbildung 10.10: Zerspankraftkomponenten und Bearbeitungsgenauigkeit beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P mit Vorschub f_z = 0,03 mm und Pitch p = 0,2 mm

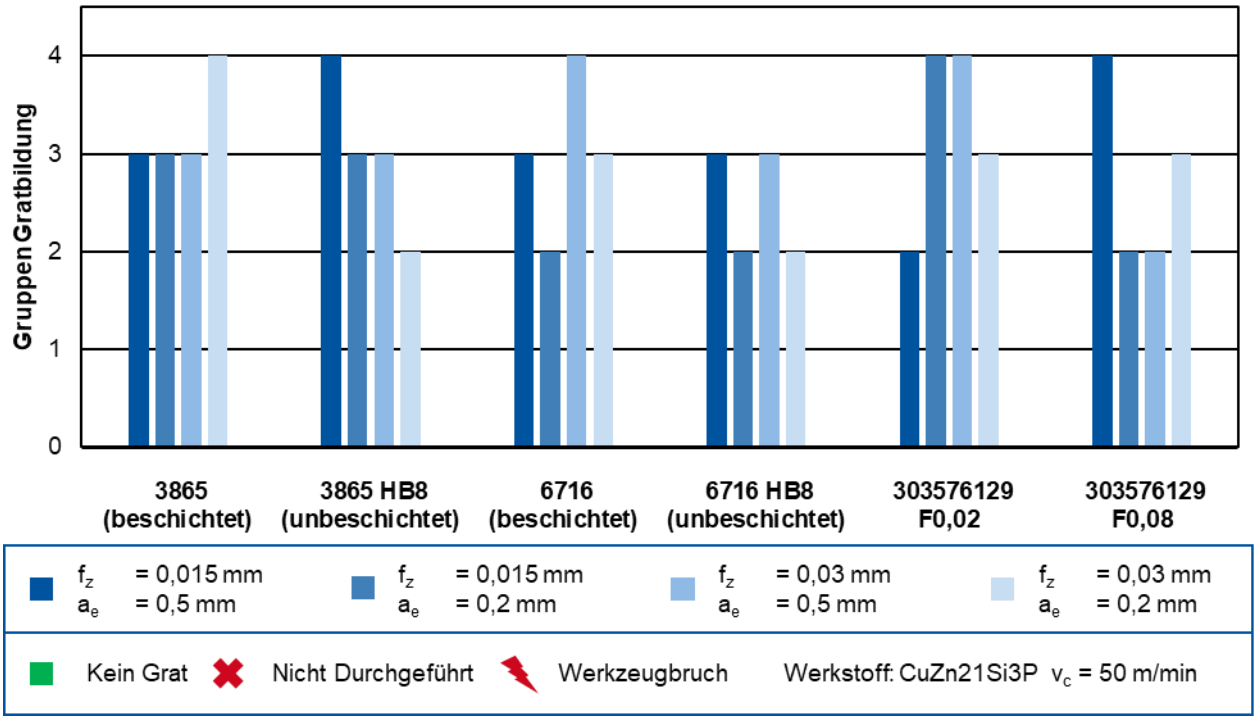


Abbildung 10.11: Gratbildung beim Tauchfräsen von CuZn21Si3P

11 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Bearbeitung des Projekts wurden folgende Personalaufwände (in Personenmonaten, PM) eingesetzt:

- Wissenschaftliches Personal mit abgeschlossener Hochschulausbildung: 23,98 PM (A1)
- Angestellte mit staatlichem Abschluss: 13,92 PM (A2)
- Studentische Hilfskräfte: 17,70 PM (A3)

Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag und den Beschlüssen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Sämtliche durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung der Projektziele notwendig und in Art und Umfang angemessen.

Es wurden keine Geräte beschafft und keine Leistungen Dritter herangezogen.

12 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU, ihr innovativer Beitrag und ihre industriellen Anwendungsmöglichkeiten

In diesem Forschungsvorhaben wurden maßgebliche Fortschritte bei der Fräsbearbeitung von bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen erzielt. Durch die gezielte Anpassung von Werkzeuggeometrie, Schnittparametern, KSS-Strategie und Schneidstoffauswahl konnte die Prozesssicherheit und Produktivität gegenüber dem Stand der Technik gesteigert werden. Geeignete Werkzeuge für das Tauch- und Nutenfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen und Zinkknetlegierungen sind beispielsweise von den im pA vertretenen Firmen Gühring und Kennametal serienmäßig verfügbar und können mit geringem Umstellungsaufwand in die industrielle Fertigung bei KMU eingebracht werden. Hochdruckaggregate für die direkte Zufuhr von KSS sind in der Praxis in den meisten modernen Werkzeugmaschinen verfügbar oder mit moderaten Investitionskosten (ca. 15.000 €) in bestehende Anlagen nachrüstbar. In den meisten Fällen können so Neuanschaffungen von Werkzeugmaschinen vermieden werden. Durch die Erkenntnisse zur Prozesssubstitution kann zudem unter Umständen eine bestehende Werkzeugmaschine ohne Hochdruckaggregat besser zur Bearbeitung von bleifreien Werkstoffen eingesetzt werden. Mit den aus den Ergebnissen abgeleiteten Handlungsempfehlungen wurde Anwendern, vornehmlich KMU, Handlungsempfehlungen für die Werkzeug- und Prozessauslegung an die Hand gegeben. So können bleifreien Kupferwerkstoffe und Zinkknetlegierungen in der industriellen Praxis fräsend bearbeitet und als Werkstoff für die

Produkte von KMU verwendet werden. Die Substitution von Dreh- und Bohrprozessen bietet eine weitere Möglichkeit, bestehende Prozess mit geringer Prozesssicherheit zu ersetzen und so nach einer kurzen Umstellungszeit die Prozesssicherheit in der Serienfertigung zu verbessern.

13 Transfermaßnahmen und Veröffentlichungen

Um einen schnellen und effektiven Transfer der Ergebnisse zu einem breiten Anwenderkreis zu gewährleisten, wurden und werden die Ergebnisse auf vielfältigen Kanälen in die industrielle und wissenschaftliche Praxis verteilt. Durch die Darstellung der Ergebnisse auf wissenschaftlichen Fachtagungen wie dem Kupfersymposium des deutschen Kupferinstituts (DKI) und der Esaform Konferenz 2021 wurden bereits eine Vielzahl an Interessenten aus Industrie und Wissenschaft erreicht. Für ein weltweites Publikum werden die Ergebnisse durch die Veröffentlichung dieses Schlussberichts auf Publikationsserver der RWTH Aachen (publications.rwth-aachen.de) sowie durch die Online-Verfügbarkeit der Veröffentlichungen verfügbar gemacht.

Durch den direkten Kontakt des Werkzeugmaschinenlabors WZL zum deutschen Kupferinstitut, welches im projektbegleitenden Ausschuss vertreten war, erfolgt eine enge Beratung von Anwendern aus der Industrie. Die Ergebnisse des Projekts fließen in die Ausbildung junger Ingenieure im Fach Fertigungstechnik ein und werden im Rahmen des Basisseminar Zerspantechnik einem vornehmlich industriellen Publikum vorgestellt. Durch diese vielfältigen Maßnahmen und den direkten Austausch zwischen der Forschungsstelle und den industriellen Anwendern wird eine kurzfristige industrielle Anwendung der erzielten Ergebnisse ermöglicht.

Durch die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse zur Werkzeug- und Prozessauslegung wurde für eine Vielzahl von vornehmlich kleinen und mittelständischen Unternehmen eine Basis geschaffen, bleifreie Kupferwerkstoffe und Zinkknetlegierungen produktiv, prozesssicher und somit auch wirtschaftlich fräsen zu können und so Ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Wesentliche Voraussetzung hierfür war ein direkter und effektiver Transfer der Ergebnisse zu den entsprechenden KMU. Um dies zu erreichen, wurden und werden die Projektergebnisse auf vielfältige Weise durch die in Tabelle 13.1 zusammengefassten Maßnahmen verbreitet und einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung gestellt.

Neben den in Tabelle 13.1 genannten Transfermaßnahmen flossen die Ergebnisse des Projekts in Lehrveranstaltungen der RWTH Aachen in dem Fach „Fertigungstechnik“ ein. Die Erkenntnisse wurden darüber hinaus in zahlreichen Fachgesprächen sowie bilateralen Beratungs- und Entwicklungsprojekten weitergegeben. Die im Projekt vertretenen Halbzeug- und Werkzeughersteller tragen die Projektergebnisse im Rahmen der Beratung Ihrer Kunden fortlaufend in die industrielle Praxis weiter.

Tabelle 13.1: Durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen des WZL der RWTH Aachen

Jahr	Transfermaßnahme	Zeitpunkt
2018	Vortrag im Rahmen des GMS (Gesamtverband Messing-Sanitär) Forums	26.06.2018
2018	Präsentation im Rahmen des Basisseminar Zerspantechnik am WZL der RWTH Aachen	12. - 13.09.2018
2018	Kick-Off Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	02.08.2018
2018	Diskussion im Rahmen des Kupfersymposiums des deutschen Kupferinstituts	20.-21.11.2018
2019	Präsentation im Rahmen des Basisseminar Zerspantechnik am WZL der RWTH Aachen	20.-21.03.2019
2019	Erstes Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss	15.05.2019
2020	Zweites Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss	22.01.2020
2020	Drittes Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (Webmeeting)	30.06.2020
2020	Zwischentreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (Webmeeting)	08.09.2020
2020	Abschlusstreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (Webmeeting)	10.12.2020
2021	Veröffentlichung von Ergebnissen zum Tauchfräsen auf der ESAFORM-Konferenz mit dem Paper „Tool Geometry Analysis for Plunge Milling of Lead-Free CuZn-Alloys“	14.-16.04.2021
2021	Vorstellung von Ergebnissen auf dem Web-Seminar „Zerspanen von bleifreien Kupferwerkstoffen“ des Deutschen Kupferinstituts	19.05.2021
2021	Veröffentlichung dieses Abschlussberichts	06/2021
2021	Vortrag von Ergebnissen auf dem Kupfersymposium des deutschen Kupferinstituts und Veröffentlichung in Zeitschrift „Metall“. Arbeitstitel: „Werkstoffspezifische Entwicklung der Werkzeuggeometrie für das Tauchfräsen von bleifreien Cu-Zn-Werkstoffen“ (geplant)	24.-25.11.2021
2022	Dissertation zum Tauchfräsen von bleifreien Kupferwerkstoffen (geplant)	03/2022