

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Hochleistungsabstechdrehen mit mikrostrukturierten Werkzeugen und Hochdruckkühl-
schmierung

microCutOff

in der Fördermaßnahme

KMU-innovativ: Produktionsforschung

Autoren

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin,
Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
uhlmann@iwf.tu-berlin.de

Drehtechnik Jakusch GmbH, Enrico Jakusch,
e.jakusch@drehtechnik-jakusch.de

Franke Tools GmbH, Marcus Franke,
info@franketools.de

Projektlaufzeit: 01.01.2023 – 31.03.2025

Erstellungsdatum: 24.09.2025

Projektpartner

Drehtechnik Jakusch GmbH **–JAK–**

Förderkennzeichen: 02P22K040

Franke Tools GmbH **–FRA–**

Förderkennzeichen: 02P22K041

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin **–IWF–**

Förderkennzeichen: 02P22K043

Ernst-Abbe-Hochschule Jena **–EAH–**

Förderkennzeichen: 02P22K042

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung	3
I.1	Aufgabenstellung.....	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	3
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick	3
II.	Teil II Eingehende Darstellung	6
II.1	Motivation und Aufgabenstellung.....	6
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	7
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
II.4	Erzielte Ergebnisse.....	8
II.4.1	AP 1.1 Definition der Randbedingungen für die Interoperabilität der Teillösungen.....	8
II.4.2	AP 1.3 Entwicklung des Werkzeughalters	8
II.4.3	AP 2.1 Werkzeugfertigung unter Anwendung variierender Herstellverfahren.....	12
II.4.4	AP 2.2 Modifikation des Beschichtungsprozesses.....	13
II.4.5	AP 2.3 Fertigung der Werkzeugsystemkomponenten.....	17
II.4.6	AP 2.4 Multikriterielle Bewertung des Herstellungsprozesses	18
II.4.7	AP 3.1 Versuchsstand zur Simulationsvalidierung.....	21
II.4.8	AP 3.2 Wissenschaftliche Analyse des Prozessverhaltens von Hochdruck-KSS	21
II.4.9	AP 3.3 und AP 3.4 Implementierung der Werkzeuglösung im industriellen Umfeld und Langzeituntersuchungen an industriell relevanten Werkstoffen.....	28
II.5	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	30
II.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	31
II.7	Literaturverzeichnis	31

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines innovativen Werkzeugsystems für das Abstechdrehen. Das System sollte eine modifizierte Schneidplatte, einen speziellen Halter und eine interne Hochdruck-Kühlschmierstoff-(KSS)-Zuführung integrieren, um eine reproduzierbare Kühlschmierung in der Wirkzone zu ermöglichen. Angestrebt wurden eine erhöhte Prozesssicherheit durch gleichmäßigen Werkzeugverschleiß, eine verbesserte Oberflächengüte ohne Nachbearbeitung und eine Standzeitsteigerung von 30 % gegenüber konventionellen Lösungen. Das finale System sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Erweiterung der Abstechdrehwerkzeuge um **Mikrobohrungen**, welche auf der Spanfläche liegen und die Zufuhr des KSS durch das Werkzeug und dessen Werkzeughalter direkt in die Wirkzone ermöglichen
- reibungsmindernde **Beschichtung**
- **schwingungsgedämpfter Werkzeughalter** zur Gewährleistung eines reproduzierbaren Schmierfilms und einer damit assoziierten Standzeiterhöhung
- **kostenorientierte Fertigungsstrategie** zur Herstellung des Werkzeughalters und der Schneidplatten zur Minimierung der Markteintrittsbarrieren

Das entwickelte Werkzeugsystem soll nach der Projektlaufzeit durch die Kooperationspartner JAK und FRA in eine industrielle Nullserienproduktion überführt werden. Damit verbunden ist dessen Validierung im Hinblick auf den Produktionsmaßstab, um eine Serienproduktion zu ermöglichen. Die Aussichten für eine erfolgreiche Vermarktung werden auf Grund der Alleinstellungsmerkmale als außerordentlich hoch eingeschätzt.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Das Quer-Abstechdrehen dient laut DIN 8589-1 dem Abtrennen von Werkstücken durch orthogonales Zustellen zur Werkstückachse. Bei großen Durchmessern und schwer zerspanbaren Werkstoffen entstehen thermomechanische Belastungen und Spankontrollprobleme, die durch Werkzeuggeometrie und KSS-Strategie beeinflusst werden. Schmale Stechwerkzeuge, d. h. $b = 2$ bis 5 mm, minimieren Materialverlust, führen jedoch zu Durchbiegung, Schwingungen und variierender Schnittkraft F_c , mit negativer Auswirkung auf die Bauteilqualität [DAG10]. Verbesserungen bringen positive Spanwinkel, Freischliff und schräge Schneidkanten. Hauptproblem bleibt der Verschleiß durch Reibung auf der Spanfläche. Konventionelle KÜK bis $p = 40$ bar ist oft unzureichend. Hochdruck-KSS, welcher gezielt auf Span- und Freifläche gerichtet, verbessert Spanabfuhr, senkt Temperaturen und reduziert Aufbauschneiden [KUT11]

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Im Rahmen des KMU-innovativ-Forschungsvorhabens kooperierte ein Konsortium, bestehend aus den Firmen **JAK**, **FRA**, dem **IWF** sowie der **EAH**, in der Entwicklung eines Hochleistungsabstechwerkzeugs mit Hochdruckkühlschmierung. Die Mitglieder der Gruppe übernahmen hierbei verschiedene Aufgaben, die sich an ihrer jeweiligen Expertise orientierten.

Simulative Auslegung des Werkzeughalters (IWF)

Im Rahmen der simulationsgestützten Auslegung eines schwingungsoptimierten Werkzeughalters wurde im Konsortium beschlossen, die microCutOff-Werkzeuge durch Modifikation handelsüblicher Werkzeuggeometrien zu realisieren. Daraus ergaben sich konstruktive Einschränkungen an den Dichtflächen der Werkzeugklemmung, da weder die Geometrie noch die Klemmmechanik verändert werden konnte. Aufgrund der geringen Wandstärke des Trägers $s = 2,5$ mm war die Integration zusätzlicher

Befestigungselemente wirtschaftlich nicht vertretbar. Daher wurde das Klemmhaltersystem des Referenzwerkzeugs übernommen. Zur Sicherstellung eines vergleichbaren dynamischen Verhaltens wurde das System durch eine simulative (SMA) und experimentelle Modalanalyse (EMA) am IWF charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Eigenfrequenzen beider Systeme mit einer Differenz von ungefähr $\Delta f_{SMA/EMA} \approx 345$ Hz. Kleinere Abweichungen lassen sich durch vereinfachte Simulationen und externe Einflüsse während der EMA erklären. Insgesamt bestätigen die Analysen die Funktionsfähigkeit und Schwingungsoptimierung der microCutOff-Werkzeughalter.

Herstellung des Werkzeughalters (JAK)

Zur Bewertung und Optimierung der Fertigungsstrategie des microCutOff-Werkzeughalters wurde dessen Herstellung im Hinblick auf Reproduzierbarkeit, Stabilität und Dichtheit untersucht. Aufgrund der nicht konventionell herstellbaren, innenliegenden Kühlkanäle erfolgte die Fertigung additiv durch das IFW Jena, basierend auf einem Konsortiumsbeschluss. Bild 1 zeigt ein CAD-Modell des Werkzeughalters.

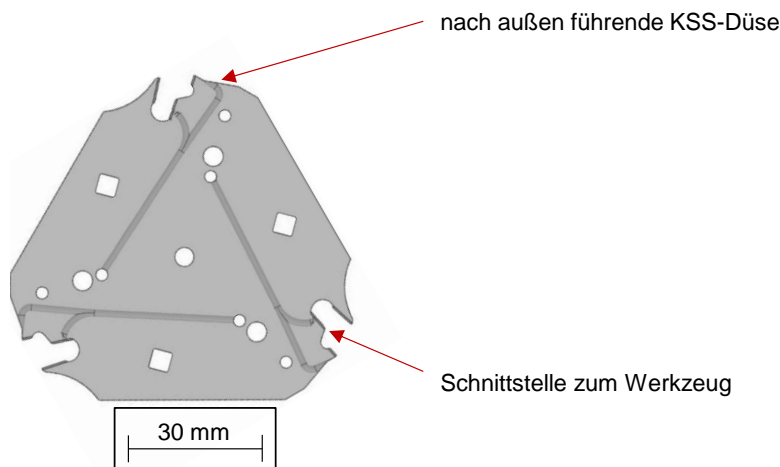


Bild 1: CAD-Modell des microCutOff-Werkzeughalters mit innenliegenden Kühlkanälen

Als Werkstoff wurde der für die additive Fertigung geeignete Werkzeugstahl CrMoV6 verwendet, der auch im Referenzwerkzeughalter eingesetzt wird. Nach dem Druck zeigten die Werkzeughalter unzureichende Oberflächenqualität und mussten manuell nachbearbeitet werden, um Maßhaltigkeit und Dichtheit zu gewährleisten. Die Dichtigkeit der KSS-Schnittstelle wurde experimentell untersucht. Dabei zeigte sich ein durchschnittlicher Verlust von etwa 20 % des Kühlschmierstoffs, der nicht direkt in die Wirkzone gelangt, aber dennoch eine sekundäre Kühlwirkung entfaltet. Während der Zerspanungsversuche traten insbesondere bei schwer zerspanbaren Materialien wie X6CrNiMoTi17-12-2 und Ti6Al4V vermehrt Bauteilversagen auf. Als Ursache wurde ein sprödes Materialverhalten infolge unausgereifter Prozessparameter und unzureichender Wärmebehandlung identifiziert. Zur Anbindung an die Hochdruck-KSS-Anlage wurden zusätzliche Komponenten wie 1/4-Zoll-Adapter und geeignete Druckschläuche gefertigt. Für eine spätere Serienfertigung wurde eine überarbeitete Strategie entwickelt, die optimierte Druckparameter, gezielte geometrische Anpassungen an kritischen Stellen sowie spanende Nachbearbeitung Fräsen und Schleifen zur Verbesserung von Festigkeit, Passgenauigkeit und Oberflächenqualität vorsieht.

Fertigung der microCutOff-Werkzeuge (FRA)

Die Vorteile von Mikrobohrungen mit $d > 0,15$ überwogen, weshalb sie für das weitere zukünftige Vorgehen ausgewählt wurden. Für die Fertigung der Bohrungen wurde eine Bohrerodiermaschine vom Typ SP-26 der Fa. HEUN, Kahl, verwendet, die ursprünglich für Durchmesser von $d = 0,3$ bis 3 mm ausgelegt ist. Um Bohrungen mit $d = 0,2$ mm zu realisieren, bestellte FRA passende Elektroden und Halterungen und entwickelte eine Vorrichtung zur exakten Positionierung der Bohrung an der Schnittstelle zwischen Halter und Werkzeug. Die gewählte Bohrposition auf der hinteren, unteren Plattenseite

fürte zu einem ungünstigen Aspektverhältnis l/d und zusätzlichen Herausforderungen. Da die Maschine nicht auf derart kleine Bohrungen ausgelegt war, mussten umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden. Anfangs traten typische Fehler wie abgeknickte oder verbrannte Elektroden auf, die durch Generator- und Spüloptimierung behoben werden konnten. Der hohe Zeitaufwand resultierte aus der Vielzahl an Parametern und der aufwendigen Elektrodenmontage. Nach erfolgreicher Optimierung konnten erste Werkzeuge mit zwei parallelen Bohrungen mit jeweils $d = 0,2 \text{ mm}$ gefertigt werden, siehe [Bild 2](#).

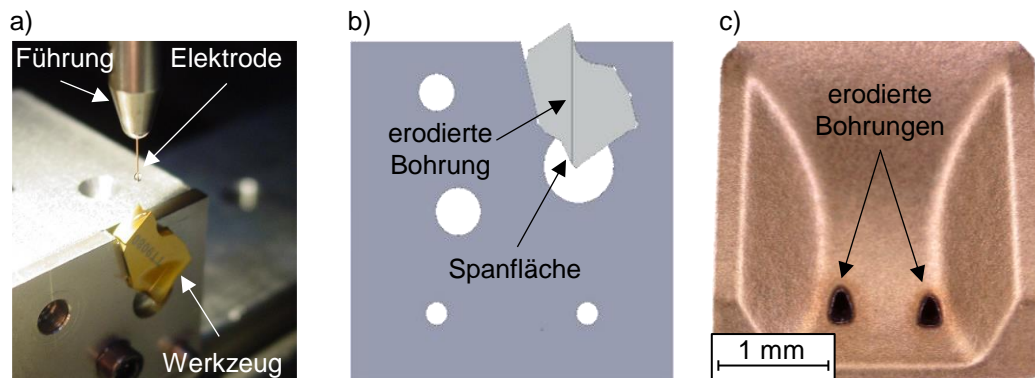


Bild 2: Modifiziertes Werkzeug; a) montiert in der Erodieranlage; b) 2D-Modell der Vorrichtung mit Werkzeug; c) erodiertes Werkzeug

Ziel war es, die KSS-Bohrungen möglichst nahe an der Schneidkante zu positionieren, um den Kühlschmierstoff direkt zwischen Span und Spanfläche austreten zu lassen. Dadurch soll ein reibungsmindernder Gleitfilm entstehen und die Prozesswärme effizient abgeführt werden, was die Standzeit der Werkzeuge erhöht. Beim Erodieren entsteht ein Spalt zwischen Elektrode und Werkstück, wodurch die Bohrung stets größer als der Elektrodenquerschnitt ausfällt. Zudem nutzt sich die Elektrode konisch ab. Diese Effekte mussten bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden, um den angestrebten Austrittsdurchmesser von $d = 0,2 \text{ mm}$ präzise zu realisieren.

Auswahl einer PVD Werkzeugbeschichtung (IWF)

Zur Steigerung der Werkzeugstandzeit wurde eine Auswahl erodierter Schneidstoffproben mit industriell gängigen PVD-Schichtsystemen versehen. Zur Bewertung der Schichtanbindung an den Bohrungsausritten erfolgte eine Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskop. Die Titan-Nitrid + Titan-Aluminium-Nitrid ($\text{TiN}+\text{TiAlN}$) -Beschichtung zeigte nur wenige Fehlstellen am Bohrungsausritt und wurde zusätzlich aufgrund ihrer Verschleißbeständigkeit bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe als bevorzugte Werkzeugbeschichtung gewählt.

Durchführung und Ergebnisse der experimentellen Zerspanungsuntersuchungen (IWF)

Zur Bewertung der microCutOff-Werkzeuge wurden gängige Industriematerialien unter Anwendung erfahrungsbasierter Schnittparameter (JAK) bearbeitet. Referenzaufnahmen bei der Bearbeitung bestimmter Materialien deuten darauf hin, dass der KSS, der aus den Mikrobohrungen austritt, ein Schutzpolster zwischen Span und Schneide bildet und so den Verschleiß reduziert.

Durchführung und Ergebnisse der industriellen Langzeituntersuchungen (JAK)

Zur Verifizierung des Einsatzverhaltens der microCutOff-Werkzeuge wurden Langzeituntersuchungen im industriellen Umfeld durchgeführt, siehe. Für X5CrNi18-10 wurde eine durchschnittliche Standzeitsteigerung von etwa 27 % gegenüber dem Referenzwerkzeug erzielt, bei X6CrNiMoTi17-12-2 rund 27 % und bei Ti6Al4V etwa 20 %. Bei Aluminium konnte keine belastbare Standzeitverbesserung festgestellt werden, jedoch wurde eine Reduktion der Aufbauschneide beobachtet. Die Rauheitsmessungen zeigen, dass das microCutOff-Werkzeug die Oberflächenqualität signifikant verbessert: Im Vergleich zum Referenzwerkzeug sank bei X5CrNi18-10 der arithmetische Mittelwert R_a um ca. 32 %, bei X6CrNiMoTi17-12-2 um rund 49 %, bei Ti6Al4V um ca. 27 % und bei AlMg3 um etwa 17 %. Insgesamt bestätigt dies die Wirksamkeit des microCutOff-Systems mit werkstoffabhängig variierender Wirkung.

Bewertung des microCutOff-Werkzeugsystems und Fazit (JAK und FRA)

Die Firmen JAK und FRA sehen eine Markteinführung des microCutOff-Werkzeugsystems als grundsätzlich möglich an. Voraussetzung ist jedoch eine deutliche Optimierung der Bohrungsfertigung im Werkzeug, insbesondere durch automatisierte Bohrbearbeitung oder gegebenenfalls Fertigsintern der Werkzeuge inklusive Bohrungen. Letzteres bedingt eine technische Prüfung. Eine wirtschaftliche Fertigung mittels Erodierbohren ist nur bei automatischer Bestückung mit Elektrodenwechsel realistisch, um die Kosten zu senken. Die aktuellen Fertigungskosten sind in Tabelle 1 dargestellt. Eigens entwickelte Werkzeug- und Grundhalter vermeiden patentrechtliche Konflikte mit ähnlichen Systemen. Die Fertigung kann sowohl bei FRA als auch bei JAK erfolgen, um Engpässe auszugleichen. Weitere Optimierungen sind nötig, um die Fertigungskosten marktgerecht zur verbesserten Standzeit zu gestalten.

Tabelle 1: Preisgestaltung der additiv gefertigte microCutOff Werkzeughalter

Position	Kosten	Beschreibung
microCutOff-Werkzeughalter	380,00 €	Stückpreis
microCutOff-Werkzeughalter	220,00 €	Mindestabnahme von 5
Referenzwerkzeughalter	114,10 €	Stückpreis
microCutOff-Schneide	74,30 €	Stückpreis
Referenzschneide	14,30 €	Stückpreis

In der Praxis konnte sich das microCutOff-Werkzeugsystem insbesondere durch eine erhöhte Standzeit bei gleichzeitiger Steigerung der Werkstückqualität im Vergleich zum aktuell eingesetzten Referenzsystem bewähren. Allerdings wurde das Einsatzverhalten aktuell noch durch den spontanen Bruch des Werkzeughalters negativ beeinflusst, was weiteren Optimierungsbedarf in diesem Bereich aufzeigt.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Eine Herausforderung für die metallbearbeitende Industrie besteht in der kontinuierlichen Steigerung der Produktivität. Dabei sind die Prozesse so zu gestalten, dass die Kosten bei einer maximalen Effizienz minimal sind. Dies gilt im Besonderen für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), welche im globalen Wettbewerb bestehen müssen. Ein Ansatz ist hierbei die nachhaltige Unternehmensentwicklung durch die Erhöhung der Ressourcen- und Zeiteffizienz [OTA12, FRA14, DOM15, DOM16]. So kann u. a. eine Reduzierung von Betriebsmittelkosten und Fertigungszeiten durch innovative Werkzeuglösungen realisiert werden. In diesem Zusammenhang streben aktuelle Entwicklungen eine Erhöhung der Prozessstabilität an, welche eine Minimierung der Mensch-Maschinen-Interaktionen im Produktionsumfeld ermöglicht. Ein wichtiger Teilaspekt ist hierbei die Vermeidung azyklischen Werkzeugversagens, welches durch prozessbedingte Störgrößen während der Fertigung verursacht wird. Spontan verschlissene Werkzeuge und die damit verbundenen Werkzeugwechsel können in der Konsequenz als Optimierungspotenzial identifiziert werden [KLO10]. Dies gilt im Besonderen für die Drehbearbeitung. So wird die Serienfertigung von gleichartigen Drehteilen mehrheitlich auf Langdrehautomaten, welche durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet sind, realisiert. Speziell beim Abstechedrehen führen Ausbrüche oder Aufbauschnitten an der Werkzeugschneide zu Prozessabweichungen, welche Folge einer negativen Veränderung des Spanflusses sind. Durch den abfließenden Span kann der extern zugeführte Kühlschmierstoff (KSS) nicht mehr effektiv durch konventionelle Überflutungskühlung (KÜK) oder Hochdruckkühlschmierung in den Bereich zwischen Span und Werkzeugschneide, auch Wirkzone genannt, appliziert werden. Eine verminderte Kühlschmierung des Werkzeugs und damit assoziierter Kolkverschleiß sind die Folge [TH15, MIC20]. Daraus resultiert eine Reduzierung der realisierbaren Bauteilstückzahl pro Werkzeug sowie die Notwendigkeit einer Nachbearbeitung

zur Erreichung der geforderten Oberflächengüte. Zur Überwindung dieses Defizits ist daher eine Werkzeuglösung notwendig, welche KSS reproduzierbar in die Wirkzone führen kann. Bislang beschränken sich industrielle Bemühungen zur Verbesserung von Spanablauf und Kühlschmierung während des Abstechdrehens jedoch ausschließlich auf die Anpassung der Schnittparameter, der Werkzeuggeometrie sowie der KSS-Zuführung durch den Werkzeughalter [EUG18, FLO19].

Im Forschungsvorhaben „microCutOff“ bestand das Hauptziel zur Überwindung der dargelegten Herausforderungen in der Bereitstellung eines innovativen Werkzeugsystems für das Abstechdrehen. Dazu umfasst das Werkzeugsystem eine mikrostrukturierte Schneidplatte, einen speziellen Halter sowie eine interne Hochdruck-KSS-Zuführung. Auf diese Weise kann die reproduzierbare Kühlschmierung in der Wirkzone zwischen ablaufendem Span und Werkzeug gewährleistet werden. Neben einer Erhöhung der Prozesssicherheit durch gleichmäßigen Werkzeugverschleiß und einer Umsetzung der geforderten Oberflächengüte ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte war es das Ziel die Werkzeugstandzeit um 30 % gegenüber konventionellen Werkzeuglösungen zu erhöhen. Zu diesem Zweck sollte im Ergebnis des Forschungsvorhabens ein Werkzeugsystem mit folgenden Eigenschaften vorliegen:

- Erweiterung der Abstechdrehwerkzeuge um **Mikrobohrungen**, welche auf der Spanfläche liegen und die Zufuhr des KSS durch das Werkzeug und dessen Werkzeughalter direkt in die Wirkzone ermöglichen
- reibungsmindernde **Beschichtung**
- **schwingungsgedämpfter Werkzeughalter** zur Gewährleistung eines reproduzierbaren Schmierfilms und einer damit assoziierten Standzeiterhöhung
- **kostenorientierte Fertigungsstrategie** zur Herstellung des Werkzeughalters und der Schneidplatten zur Minimierung der Markteintrittsbarrieren

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Quer-Abstechdrehen

Nach DIN 8589-1 wird das Quer-Abstechdrehen, kurz: Abstechdrehen, eingesetzt, um Werkstücke oder Werkstückteile abzutrennen. Dabei verfährt das Werkzeug in Vorschubrichtung orthogonal zur Werkstückachse bis in das Bauteilzentrum. Aufgrund der kontinuierlichen Bedarfssteigerung von Bauteilen aus Leichtbauwerkstoffen und schwer zerspanbaren Werkstoffen steht das Abstechdrehen technologischen Herausforderungen gegenüber. So sind die Anforderungen an tiefe Abstechprozesse infolge großer Werkstückdurchmesser von besonderer Bedeutung. Hierbei sind insbesondere das thermomechanische Lastkollektiv und die Spankontrolle, welche durch Werkzeuggeometrie und KSS-Strategie beeinflusst werden können, von Relevanz. Daraus resultiert eine Vielzahl industriell erhältlicher Werkzeuglösungen. Für das Abstechdrehen werden standardmäßig Werkzeughalter mit Vierkantschaft oder sogenannte Schwerter für sehr geringe Stechbreiten von $b = 2 \text{ mm}$ bis 5 mm eingesetzt. Somit kann ein geringerer Werkstückmaterialabfall realisiert werden. Dies ist jedoch im Hinblick auf den Werkzeughalter mit einer größeren Durchbiegung und auftretenden Schwingungen verbunden. Im Ergebnis wird die resultierende Bauteilqualität negativ beeinflusst [DAG10]. Zusätzlich bedingt dies spontane Schneidkantenausbrüche aufgrund einer variierenden Schnittkraft F_c . Der Einsatz von Werkzeugen mit schrägen Schneidkanten sowie positiven Spanwinkeln γ_0 kann jedoch zu einer Steigerung der Prozessstabilität führen. Ferner wird ein Verklemmen während des Drehprozesses durch einen Freischliff der Abstechdrehwerkzeuge vermieden. Die Produktivität ist aber durch die genannten Lösungen in Bezug auf die geometrische Werkzeugauslegung nur bis zu einem gewissen Grad zu steigern. Der Werkzeugverschleiß wird schwerpunktmäßig durch Reibung und die daraus resultierenden Werkzeugtemperaturen auf der Spanfläche verursacht, welche durch die derzeit angewandten KSS-Strategien nicht ausreichend reduziert werden. Es ist eine zielgerichtete KSS-Zuführung notwendig, um den Spanablauf aus der Nut heraus zu begünstigen. Aktuelle KSS-Strategien umfassen mehrheitlich die KÜK, wobei hohe Volumenströme \dot{V}_{KSS} mit Drücken bis $p = 40 \text{ bar}$ in die Nähe der Wirkzone geführt werden. Effektiver

gestaltet sich der Einsatz von Hochdruck-KSS, welcher durch den Werkzeughalter in Richtung der Span- und Freifläche des Werkzeugs geführt wird. Durch den Einsatz von Drücken von bis zu $p = 150$ bar und Volumenströmen von $\dot{V}_{\text{KSS}} = 24$ l/min können sowohl Spanablauf, Werkzeugtemperatur als auch Aufbauschneidenbildung gegenüber dem Einsatz von KÜK verbessert werden. Somit entscheiden insbesondere die Nähe zur Wirkzone und der applizierte Druck des KSS über die Erhöhung der Prozessstabilität [KUT11].

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektplanung der Firmen JAK, FRA und des IWF orientierte sich am übergeordneten Arbeitsplan und war eng mit den Aktivitäten der Projektpartner abgestimmt. Dabei wurden sowohl technische Abhängigkeiten als auch infrastrukturelle Verfügbarkeiten berücksichtigt. Die modulare Struktur des Vorhabens ermöglichte eine flexible Reaktion auf Veränderungen, was sich im Projektverlauf als entscheidend für den Erfolg erwies. Die Firma JAK übernahm zentrale Aufgaben bei der Entwicklung und Fertigung des Werkzeughalters sowie benötigter Systemkomponenten. Weiterhin erfolgten neben einer kritischen Bewertung des Herstellungsprozesses des Werkzeughalters auch industrielle Langzeituntersuchungen mit dem entwickelten Werkzeugsystem. Die Firma FRA beschäftigte sich im Wesentlichen mit der Fertigung der benötigten Werkzeuge und führte ebenfalls eine kritische Untersuchung ihres des Fertigungsprozesses durch. Das IWF übernahm zentrale Aufgaben in der Auslegung des Werkzeugsystems mittels FEM-Analyse zur Bewertung der dynamischen Eigenschaften, in der Auswahl und Evaluierung geeigneter PVD-Schichten sowie in der experimentellen Validierung des Einsatzverhaltens. Die hier beschriebenen Arbeiten erfolgten im Rahmen des abgestimmten Projektplans und trugen wesentlich zur Zielerreichung bei. Aufgrund fehlender personeller Ressourcen beim IWF bis April 2024 mussten Arbeitspakete zeitlich verschoben und interimistisch durch den Oberingenieur betreut werden, vgl. Sachbericht Zwischennachweis 2023. Inhaltlich ergaben sich daraus keine Einschränkungen. Die Projektmittel wurden primär zur Finanzierung wissenschaftlichen Personals verwendet, welches die Systementwicklung, Versuchsauswertung und Ergebnisdokumentation verantwortete. Zusätzlich wurden geringfügige Mittel für Versuchsmaterialien und projektbezogene Dienstreisen aufgewendet, wobei letztere insbesondere für Konsortialtreffen, die der engen Abstimmung im Verbund dienten, verwendet wurden. Die Verwendung der erhaltenen Projektmittel der Firmen JAK und FRAU sowie des IWF ist den jeweiligen zahlenmäßigen Nachweisen zu entnehmen.

II.4 Erzielte Ergebnisse

II.4.1 AP 1.1 Definition der Randbedingungen für die Interoperabilität der Teillösungen

Die Auswahl der im Projekt untersuchten Werkstoffe basierte auf bei JAK gängigen Materialien, um praxisnahe und übertragbare Ergebnisse zu erzielen. Parallel wurde ein geeigneter Kühlschmierstoff (KSS) mit einer konstanten Konzentration von 8 % festgelegt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Zur Parametrisierung wurden zunächst Referenzversuche mit konventionellen Werkzeugen durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeiten v_c entsprachen üblichen Betriebswerten, der Vorschub f wurde passend zur Schneidkantenverrundung gewählt. Zusätzlich wurde ein höherer Vorschub f getestet, um reale Einsatzbedingungen abzubilden. Hierbei wurde insbesondere die Schnittstelle zwischen Werkzeug und Werkzeughalter betrachtet, einschließlich der Art der Klemmung im Revolver der Drehmaschine. Weitere Aspekte betrafen Orientierung der Schneide zum Werkstück selbst, beispielsweise die Entscheidung zwischen einer Umfangs- oder Planeinstechoperation und der konventionellen Anordnung oder überkopf. Ziel war eine sichere, wirtschaftliche Integration in bestehende Maschinenumgebungen. Für die Referenzversuche kamen Ein- und Abstechwerkzeuge des Typs SFC 3 TT9080 der Firma INGERSOLL, Haiger zum Einsatz, bereitgestellt von FRA und unterstützt durch das IWF. Diese Werkzeuge, bestehend aus WC-6Co und einem TiN+TiAlN-Mehrschichtsystem, gelten als industrieller Standard.

II.4.2 AP 1.3 Entwicklung des Werkzeughalters

Im Konsens des Konsortiums wurde entschieden, die Herstellung der Werkzeuge mit Mikrobohrungen durch die Modifikation kommerziell verfügbarer Werkzeuggeometrien umzusetzen. Grundlage dieser

Entscheidung waren die langjährigen positiven Erfahrungen von JAK mit dem zugrunde liegenden Werkzeugsystem, das sich insbesondere bei Ein- und Abstechoperationen als zuverlässig erwiesen hat. Daraus ergab sich die konstruktive Vorgabe, dass die Dichtflächen im Bereich der Werkzeugklemmung der Geometrie der Referenzwerkzeuge entsprechen müssen. Aus Kompatibilitätsgründen waren zudem keine Anpassungen an der Klemmmechanik möglich. Aufgrund der geringen Wandstärken des Werkzeughalters von teils $s < 2,5$ mm war die Integration zusätzlicher Bohrungen für Klemmschrauben erfahrungsgemäß mit unverhältnismäßigem Aufwand verbunden und wurde aus wirtschaftlicher Sicht verworfen. Infolgedessen wurde das Klemmsystem des Referenzwerkzeugs übernommen.

Zur Sicherstellung eines dem Referenzsystem vergleichbaren dynamischen Verhaltens wurde dieses sowohl mittels simulativer (SMA) als auch experimenteller Modalanalyse (EMA) charakterisiert. Bild 3 zeigt exemplarisch den per Simulation ermittelten Deformationszustand von Mode 1; die Farbskala veranschaulicht die relative Verschiebung bezogen auf das Maximum. Tabelle 2 enthält die simulativ bestimmten Eigenfrequenzen $f_{SMA,ref}$ der höheren Moden sowie die zur Validierung ergänzend experimentell ermittelten Frequenzen $f_{EMA,ref}$. In der letzten Spalte sind die simulativ berechneten Eigenfrequenzen $f_{SMA,mod}$ des durch KSS-Kanäle modifizierten Werkzeugsystems aufgeführt.

Simulationssoftware: ANalysis SYStems
Methode: Modalanalyse
Mode: 1
Eigenfrequenz: $f_{SMA,mod} = 1.627,4$ Hz

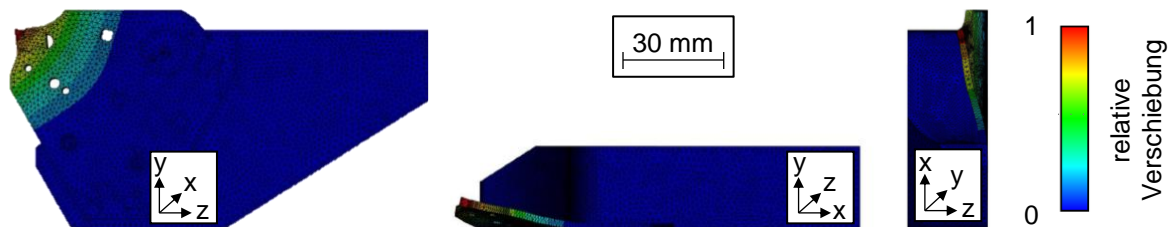


Bild 3: Mode 1 der simulativen Modalanalyse des microCutOff-Werkzeugsystems; a) Sicht auf die y-z-Ebene; b) Sicht auf die x-z-Ebene; c) Sicht auf die y-x-Ebene

Der Vergleich von SMA und EMA für das Referenzsystem zeigt bei der ersten Eigenfrequenz lediglich eine geringe Abweichung von $\Delta f_{1,SMA/EMA,ref} \approx 100$ Hz, was auf eine gute Übereinstimmung der Methoden hinweist. In beiden Analysen zeigt Mode 1 eine Biegeschwingung senkrecht zur Ebene des Werkzeughalters. Für Mode 2 beträgt die Frequenzdifferenz $\Delta f_{2,SMA/EMA,ref} \approx 350$ Hz, wobei die SMA eine höhere Eigenfrequenz liefert. Während die EMA eine reine Torsionsschwingung des Grundhalters identifiziert, zeigt die SMA zusätzliche Deformationen am Werkzeughalter. Diese zusätzlichen Verformungen könnten die höhere Frequenz in der Simulation erklären.

Tabelle 2: Ergebnisse der simulativen und experimentellen Modalanalyse im Rahmen der Validierung

	Mode	Simulierte Eigenfrequenzen des Referenzwerkzeugsystems $f_{SMA,ref}$	Experimentelle Eigenfrequenzen des Referenzwerkzeugsystems $f_{EMA,ref}$	Simulierte Eigenfrequenzen des modifizierten Werkzeugsystems $f_{SMA,mod}$
Einheit		Hz	Hz	Hz
	1	1.613,9	1.500	1.627,4
	2	2.854,0	2.500	2.853,7
	3	4.966,9	4.400	4.968,0

Die Eigenfrequenz der SMA ist bei Mode 3 erneut höher als bei der EMA; die Differenz beträgt $\Delta f_{3,SMA/EMA,ref} \approx 550$ Hz. Beide Analysen zeigen eine S-förmige Biegung des Werkzeughalters. In der SMA wird zusätzlich der Grundhalter angeregt, was die höhere Frequenz erklären könnte. Aufgrund

der schlanken Geometrie weist der Werkzeughalter grundsätzlich geringere Eigenfrequenzen auf als der steifere Grundhalter. Die durchschnittliche Abweichung der Moden liegt bei $\Delta f_{SMA/EMA} \approx 344$ Hz, was eine hohe Übereinstimmung belegt. Zum Vergleich: JAMIL et al. berichten in [JAM14] von einer durchschnittlichen Abweichung von $\Delta f_{Vergleich} \approx 1.300$ Hz. Die geringere Abweichung in dieser Arbeit deutet auf eine höhere Modellgüte hin. Abweichungen können in beiden Methoden auftreten: In der EMA etwa durch externe Einflüsse wie Vibrationen oder Umgebungsgeräusche, in der SMA durch ungenaue Randbedingungen oder geometrische Vereinfachungen. So wurden z. B. Schrauben durch Vorspannkräfte modelliert, was Frequenzabweichungen begünstigen kann. JAMIL et al. weisen zudem auf mögliche Näherungsfehler bei modal ähnlich erscheinenden Schwingungsformen hin. möglicher Fehlerquellen stimmen EMA und SMA gut überein. Die prozesseitige Anregung erfolgt bei $f_{an} = 167$ Hz und liegt deutlich unterhalb der ermittelten Eigenfrequenzen. Dennoch kann eine Resonanz nicht vollständig ausgeschlossen werden. Aufgrund der erfolgreichen industriellen Anwendung des Referenzsystems kann dieses zur Bewertung der Modifikationen herangezogen werden. Zwischen der simulativen Modalanalyse des Referenz- und des microCutOff-Werkzeugsystems konnte eine ausreichende Übereinstimmung festgestellt werden. Da zudem die zuvor durchgeführte experimentelle Modalanalyse eine gute Korrelation mit der Simulation des Referenzsystems aufwies, wurde auf eine experimentelle Modalanalyse des microCutOff-Systems verzichtet. Dies ermöglichte eine Verkürzung der Entwicklungszeit, ohne relevante Erkenntnisse einzubüßen. Die funktionalen und konstruktiven Anforderungen an den Werkzeughalter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Anforderungsliste Konstruktion Werkzeughalter

Nr.	Bezeichnung	Erläuterung
1	Allgemeine Anforderungen	
1.1	Einsatzbereich	Werkzeughalter für vorhandene Maschinenschnittstelle
1.2	Kompatibilität	vollständige Integration in bestehende Maschinen, ohne Anpassungen an Maschine
1.3	Systemgleichheit	Funktion und Handhabung wie langjährig genutzten System

2	Schnittstellen	
2.1	Mechanische Schnittstelle	
2.1.1	Pass- und Fertigungsgenauigkeit	Passgenauigkeit an vorhandenen Maschinenschnittstelle, Einhaltung der Toleranzen nach Hersteller- bzw. Normvorgaben
2.2	KSS Schnittstelle	
2.2.1	Passgenauigkeit	dichte Anbindung an vorhandenes KSS-System
2.2.2	KSS-Führung	Kurze KSS-Wege für hohe Durchflussleistung und minimierte Druckverluste
3	Geometrie und Bauform	
3.1	Einbaukompatibilität	Einfache Montage und Demontage in bestehende Maschinen
3.2	Platzverhältnisse	Keine Einschränkung der Maschinenbewegungen oder Kollisionsrisiken
4	Funktionale Anforderungen	
4.1	KSS-Versorgung	
4.1.1	Dichtheit	Geringe Leckage im Betrieb
4.2	Dynamische Eigenschaften	
4.2.1	Schwingungsverhalten	Optimierung auf höhere Eigenfrequenzen zur Reduzierung von Schwingungen, mindestens gleichwertig zum Referenzsystem
4.3	Schnittparameter	
4.3.1	Einsatzverhalten	Standzeit und Prozesssicherheit besser im Vergleich zum Referenzsystem bei gleichen oder höheren Schnittgeschwindigkeiten v_c und Vorschüben f
5	Besondere Anforderungen	
5.1	Robustheit	Langlebigkeit bei hohen Belastungen (mechanisch und thermisch)
5.2	Wartungsfreundlichkeit	Möglichst einfacher Austausch von Verschleißteilen
5.3	Sicherheit	Kein Risiko durch KSS-Austritt oder mechanisches Versagen

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Dichtungskonzepte für die Schnittstelle zwischen Werkzeug und Halter untersucht, siehe Tabelle 4. Kupferblech erwies sich dabei als ungeeignet, da es sich bei der Montage der Schneidplatte verschiebt und keine zuverlässige Abdichtung gewährleistet. Auch O-Ringe konnten nicht überzeugen: Aufgrund ihrer geringen Größe sind sie schwer zu montieren, und scharfe Kanten an der Schneide verursachen rasch Beschädigungen, was zu Undichtigkeiten führt.

Als geeignet wurde ein Konzept eingestuft, bei dem die Plattensitzgeometrie so angepasst wurde, dass eine formschlüssige Abdichtung an der Kontaktstelle zur Schneide erzielt wird. Dieses Konzept überzeugte durch Dichtigkeit und einfache Umsetzung. Die Werkzeughaltergeometrie wurde grundsätzlich beibehalten, da Simulationen günstige Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit und Schwingungsverhalten bestätigten. Im Zuge der Nachbearbeitung waren jedoch kleinere Anpassungen erforderlich: Die Bohrungsposition wurde geringfügig korrigiert, um Fertigungstoleranzen auszugleichen, und der Plattensitz wurde überarbeitet, um die Dichtheit der Verbindung sicherzustellen.

Tabelle 4: Untersuchte Dichtungskonzepte

Dichtkonzept	Fertigung	Handhabung	Ergebnis
O-Ring	Sitz für Aufnahme des O-Rings muss extra gefertigt werden, Vermeidung von scharfen Kanten	Erschwert durch sehr geringe Bauteilgröße	ungeeignet
Kupferdichtblech	Mittlere Anforderungen an Maßhaltigkeit der abzudichtenden Bereiche, Vermeidung von scharfen Kanten	Erschwert durch geringe Bauteilgröße und -stärke	ungeeignet
Formschluss	Hohe Anforderungen an Maßhaltigkeit der abzudichtenden Bereiche	Ohne Einschränkung	geeignet

II.4.3 AP 2.1 Werkzeugfertigung unter Anwendung variierender Herstellverfahren

Nach eingehender Untersuchung wurde auf die Fertigung von Mikrostrukturen abseits von Mikrobohrungen auf den microCutOff-Werkzeugen verzichtet. Dies wird mit der nur marginalen Reduktion der durch die EAH numerisch ermittelten Schnittkräfte F_c um ca. 3 % und um 9 % verringerten Werkzeugtemperatur bei Anwesenheit von Mikrogeometrien an der Werkzeugeschneide begründet. Dies rechtfertigt laut Meinung des Konsortiums nicht die dadurch stark steigenden Fertigungskosten, wodurch eine wirtschaftliche Fertigung erschwert werden würde. Zur Bestimmung der Bohrungsdurchmesser der für die Hochdruckkühlschmierung benötigten Mikrobohrungen wurde in Zusammenarbeit der Konsortiumsmitglieder eine Liste von Eigenschaften erstellt, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Eigenschaften der Mikrobohrungen

Mikrobohrungen $d < 0,2 \text{ mm}$	Mikrobohrungen $d \geq 0,2 \text{ mm}$
<ul style="list-style-type: none"> Das KSS wird sehr nahe an die Schneidkante transportiert Aufwändigere Fertigung Höhere KSS-Drücke als bei Bohrungen $d \geq 0,2 \text{ mm}$ nötig Erhöhte Anforderung an Abdichtung der Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> KSS-Drücke $p_{KSS} < 300 \text{ bar}$ können verwendet werden. Die Leckage zwischen den Komponenten ist geringer. Keine Zusatzgeräte wie Hochdruckpumpe mit Anbauteilen und aufwendiger Maschinenumbau erforderlich Kosten für Bohrungen sind geringer

Die Vorteile von Mikrobohrungen mit einem Durchmesser $d > 0,2$ mm überwogen, weshalb diese für das weitere Vorgehen ausgewählt wurden. Ein auf einem bestehenden Referenzwerkzeugsystem der Firma INGERSOLL WERKZEUGE GMBH, Haiger, basierendes modifiziertes System mit einem speziell gefertigten Werkzeughalter und mikrogebohrtem Werkzeug erlaubt einen besseren Vergleich. Im Folgenden wurden Größe und Position der Bohrungen definiert. Die eingesetzte Bohrerodiermaschine SP-26 der Firma HEUN FUNKENEROSION GMBH, Kahl, ist grundsätzlich für Elektrodendurchmesser von $d = 0,3$ mm bis 3 mm ausgelegt. Um dennoch Bohrungen mit $d = 0,2$ mm fertigen zu können, erfolgte eine Abstimmung mit dem Maschinenhersteller sowie die Beschaffung geeigneter Aufnahmen und Röhrchen. Zur exakten Positionierung der Bohrungen an der Schnittstelle zwischen Werkzeughalter und Werkzeug wurde eine Vorrichtung konstruiert. Diese Positionierung erfolgte an der hinteren, unteren Seite des Werkzeugs aus Sicht der Werkzeugschneide, was aufgrund des hohen Aspektverhältnisses l/d der Bohrungen zusätzliche Herausforderungen mit sich brachte. Da die Maschine ursprünglich für Bohrungen $d > 0,3$ mm konzipiert war, mussten Versuche zur Optimierung der Erodierparameter durchgeführt werden. Anfangs traten Prozessfehler wie abgeknickte und verbrannte Elektroden auf, die durch Anpassungen der Generatorparameter und der Spülbedingungen behoben wurden. Eine umfassende Maschinenwartung und Neueinstellung bildeten die Voraussetzung für erfolgreiche Versuche. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und der anspruchsvollen Montage der kleinen Elektrodenröhrchen war der zeitliche Aufwand höher als zunächst angenommen. Nach Ermittlung der nötigen Erodierparameter wurde mit der Fertigung der ersten Werkzeuge mit zwei parallelen Bohrung und einem Durchmesser von $d = 0,2$ mm begonnen werden, siehe Bild 2. Hierbei unterstützte JAK bei der Definition der Geometrie.

Die Bohrungen wurden möglichst nahe an der Schneidkante positioniert, um den Kühlschmierstoff direkt zwischen Span und Spanfläche zu führen. Dies soll einen reibungsreduzierenden Fluidfilm erzeugen und die Kontaktzone effektiv kühlen. Die unmittelbare Kühlung der Spanbildungszone ermöglicht eine bessere Wärmeabfuhr, was die Werkzeugstandzeit verlängert. Beim Erodierprozess entsteht zwischen Elektrode und Werkstück ein Spalt, wodurch die Bohrungen stets größer als die Elektrode werden. Zudem nutzt sich die Elektrode nach vorne hin verjüngend ab. Diese Faktoren wurden bei der Prozessauslegung durch FRA berücksichtigt, um den Ziel-Austrittsdurchmesser von $d = 0,2$ mm zu erreichen. Es zeigte sich jedoch, dass trotz identischer Prozessbedingungen die Austrittsbohrungen nicht immer exakt auf gleicher Linie zur Spanfläche lagen. Hauptursachen sind das unterschiedliche Eintrittsverhalten der Elektrode auf der schrägen Oberfläche und ein ungleichmäßiger Elektrodenabbrand aufgrund variierender Spülbedingungen.

II.4.4 AP 2.2 Modifikation des Beschichtungsprozesses

Auswahl und Bewertung verschiedener PVD-Schichtsysteme

Für die Steigerung der Werkzeugstandzeit und ein optimales Einsatzverhalten bei der Zerspanung ist die Auswahl einer geeigneten Werkzeugbeschichtung entscheidend. Es wurden verschiedene industriell gebräuchliche PVD-Schichtsysteme ausgewählt, siehe Tabelle 6. Eine TiN-Beschichtung eignet sich besonders zur Bearbeitung duktiler Werkstoffe wie Messing, Gusseisen und Stählen bis zu einer Zugfestigkeit von $R_m < 900$ N/mm². Sie erhöht die Standzeit gegenüber unbeschichteten Werkzeugen deutlich, solange die Zerspanungstemperatur $T = 600$ °C nicht überschreitet, da sonst erhöhter Verschleiß auftritt. TiN stellt die kostengünstigste Option dar. Eine Titan-Carbon-Nitrid-(TiCN)-Beschichtung bietet eine höhere Mikrohärtigkeit sowie verbesserte Schlagresistenz, etwa bei unterbrochenem Schnitt oder Spanschlag. Sie eignet sich für Stähle und Nickelbasislegierungen wie Inconel, erfordert aber aufgrund der geringeren Anwendungstemperatur von $T = 400$ °C und $T = 450$ °C eine Kühlschmierung bei höheren Schnittgeschwindigkeiten. Aluminium-Titan-Nitrid-(AlTiN)-Beschichtungen zeichnen sich durch eine hohe Warmhärte und Oxidationsbeständigkeit aus, was Anwendungstemperaturen bis etwa $T = 900$ °C ermöglicht. Dies erlaubt höhere Schnittgeschwindigkeiten und eignet sich für Werkstoffe mit geringeren Anforderungen an Schlagzähigkeit. Schließlich wurde ein mehrlagiger Schichtverbund aus einer haftenden TiAlN-Schicht mit einer TiN-Deckschicht gewählt. TiAlN minimiert den Verschleiß vor allem bei der Bearbeitung von Titan, kann aber auch für Stähle, rostfreie Stähle und Knetlegierungen

eingesetzt werden. Die TiN-Deckschicht dient als optischer Verschleißindikator durch ihre goldene Farbe.

Tabelle 6: Anwendungsbeispiele der ausgewählten PVD Schichtsysteme [CER25,HAR25]

	Beschichtung	Werkstoffe	Anwendungstemperatur T
Einheit			°C
	TiN	Stahl, Messing, Gusseisen	600
	TiCN	Stahl, rostfreier Stahl	400 bis 450
	AlTiN	Stahl, rostfreier Stahl	900
	TiN+ TiAlN	Stahl, rostfreier Stahl, Titan, Aluminium	800

Beschichtung von mikro-gebohrten Proben mit variierender PVD-Dünnschicht

Die Beschichtung der WC-Co-Hartmetall-Schneidstoffproben wurden durch eine auf Werkzeugbeschichtungen spezialisierte Firma durchgeführt. Um die Schichtdicken zu ermitteln wurden Kalottenschlifftests nach der Norm DIN EN 1071-6 durchgeführt. Hierbei wurden jeweils drei Schneidstoffproben mit der gleichen Beschichtung versehen und separat geprüft. Als Prüfkörper wurden eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von $d = 30 \text{ mm}$ und eine Diamantsuspension mit einer Korngröße von $d_{\text{korn}} = 3 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Als Antriebsdrehzahl des Prüfkörpers wurde $n = 100 \text{ 1/min}$ gewählt. Die ermittelten Schichtdicken sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Gemessene durchschnittliche Schichtdicke t und Herstellerwerte der Mikrohärtigkeit HV nach Vickers der ausgewählten PVD Schichtsysteme

	Beschichtung	Durchschnittliche Schichtdicke t	Mikrohärte [HAR25]
Einheit		μm	HV 0,05
	TiN	1,94	2.200
	AlTiN	1,97	3.400
	TiCN	2,47	3.000
	TiN+TiAlN	2,02	3.400

Optische Schichtanalyse entlang des Bohrungsaustrittes auf der Spanfläche

Zur optischen Schichtanalyse der Beschichtungen an den Bohrungsaustritten wurde ein Rasterelektronenmikroskop vom Typ LEO 1455 VP, CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH, Oberkochen, verwendet, siehe [Bild 4](#).

Messgerät:

Carl Zeiss LEO 1455 VP
Rasterelektronenmikroskop

Beschleunigungsspannung:

200V – 30 kV

Vergrößerungsbereich:

bis 50.000-fach

Auflösung:

3,5 nm bei 30 kV

5,5 nm bei 3 kV

Probenkammergröße:

340 mm x 300 mm x 279 mm

Kathode:

Wolfram-Haarnadel-Kathode



Bild 4: Rasterelektronenmikroskop LEO 1455 VP

Die aufgenommenen Back-Scattered-Electrons-(BSE)-Bilder differenzieren Elemente anhand ihrer Ordnungszahl Z durch Graustufen: Elemente mit niedriger Ordnungszahl erscheinen dunkel, solche mit hoher Ordnungszahl hell. Aufgrund der hohen Ordnungszahl von Wolfram vgl. [Tabelle 8](#), erscheint dieses in den Aufnahmen deutlich heller als die Hauptbestandteile der Beschichtungen.

Tabelle 8: Hauptelemente des Werkzeugsubstrats und der Werkzeugbeschichtungen:

Element	W	Ti	Al
Ordnungszahl Z	74	22	13

Die Probe mit TiN-Beschichtung in [Bild 5 a\)](#) weist zahlreiche Fehlstellen am Bohrungsrand auf. Diese zeigen sich in Form heller Bereiche, die auf freiliegendes Hartmetallsubstrat hinweisen. Als Ursache gelten hohe Eigenspannungen σ_{res} in Kombination mit thermischer Belastung beim Erodieren, was zu Mikrorissbildung und lokaler Schichtabplatzung führen kann.

Im Vergleich dazu zeigt die TiCN-beschichtete Probe in [Bild 5 b\)](#) deutlich weniger Defekte entlang der Bohrung. Die geringste Anzahl an Schädigungen wurde an der AlTiN-beschichteten Probe festgestellt, siehe [Bild 5 c\)](#). Dies spricht für eine höhere Schichtstabilität und geringere Neigung zur Delamination im Bohrungsbereich, was für die angestrebte Langlebigkeit der Werkzeuge von Vorteil ist.

Messgerät:	Messmethode:	Beschichtung:	Schichtdicke:
Carl Zeiss LEO 1455 VP	BSE	a) TiN c) AlTiN	t ≈ 2 µm
Rasterelektronenmikroskop	Werkzeugmaterial:	b) TiCN d) TiN + TiAlN	
	WC-6Co		

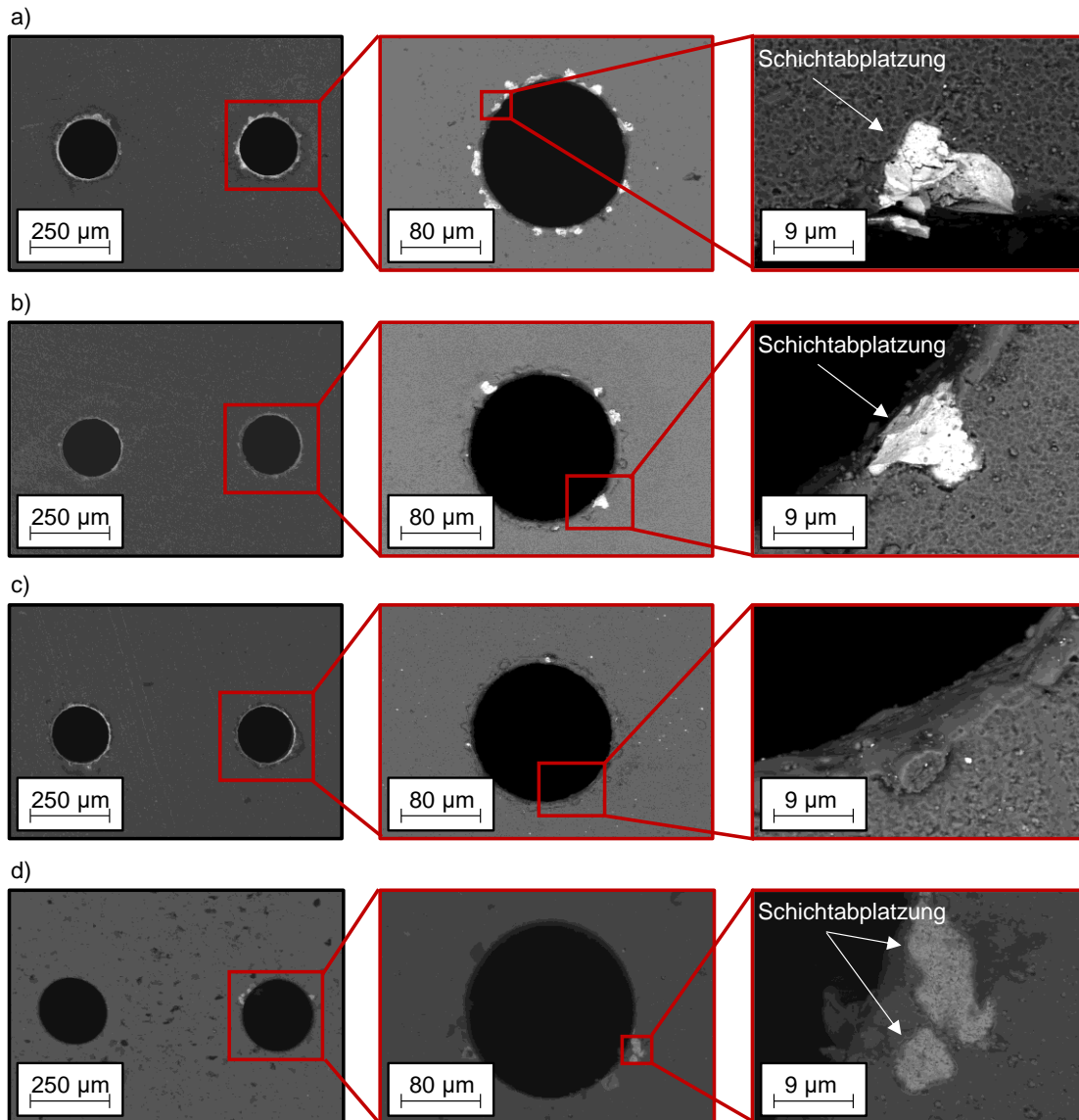


Bild 5: REM Aufnahmen der betrachteten Schichtsysteme; a) TiN; b) TiCN; c) TiCN; d) TiN + TiAlN

Die in [Bild 5 d\)](#) gezeigte Probe weist erneut eine erhöhte Anzahl an Schichtdefekten am Bohrungsrand auf. Der Vergleich aller Aufnahmen bestätigt die AlTiN-Beschichtung als jene mit der geringsten Defektdichte in Bohrungsnähe, was auf eine besonders gute Schichthaftung schließen lässt. Das TiN+TiAlN-Schichtsystem zeigte zwar etwas mehr Fehlstellen, bietet jedoch vorteilhafte Eigenschaften hinsichtlich Verschleißbeständigkeit bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe.

Daher wurde dieses System im Projekt als bevorzugte Beschichtung ausgewählt.

Für künftige Anwendungen, insbesondere bei mikrostrukturierten Werkzeugen mit hoher Oberflächenkrümmung, sollte jedoch auch AlTiN als Beschichtungsoption berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere aufgrund ihrer offenbar besseren Adhäsion an kleinsten Geometrien

II.4.5 AP 2.3 Fertigung der Werkzeugsystemkomponenten

Im Verlauf des Projekts wurden umfassende Untersuchungen zur Fertigung des Werkzeughalters und der zugehörigen Systemkomponenten durch JAK durchgeführt. Ziel war es, die bestehende Fertigungsstrategie hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Stabilität und Dichtheit zu bewerten und für eine mögliche Serienfertigung zu optimieren. In [Bild 1](#) ist das CAD-Modell des microCutOff-Werkzeughalters abgebildet. Dieser besitzt drei Plattensitze, was bei Beschädigung nicht den Verlust des ganzen Werkzeughalters bedeutet. Zudem sind die innenliegenden Kühlkanäle des microCutOff-Werkzeughalters dargestellt. Diese waren mittels konventioneller spanender Fertigungsverfahren, wie etwa dem Bohren, nicht realisierbar. Dadurch wurde eine additive Fertigung des Werkzeughalters erforderlich. Diese Entscheidung wurde im gesamten Konsortium abgestimmt.

Als Werkstoff wurde der industriell verbreitete Werkzeugstahl CrMoV6 ausgewählt. Dieser Werkzeugstahl ist für die additive Fertigung geeignet und findet beim Referenzwerkzeughalter ebenfalls Anwendung. Nach der additiven Fertigung wiesen die Werkzeughalter eine mangelhafte Oberflächenqualität auf, sodass die Anlageflächen nachgearbeitet werden mussten, siehe [Bild 6a](#)). Hierfür wurden größere Flächen an einer Flachsleifmaschine plangeschliffen und die Bereiche der Übergangsschnittstelle zwischen Halter und Platte mittel Handschleifgeräten nachgearbeitet, siehe [Bild 6 b](#)).

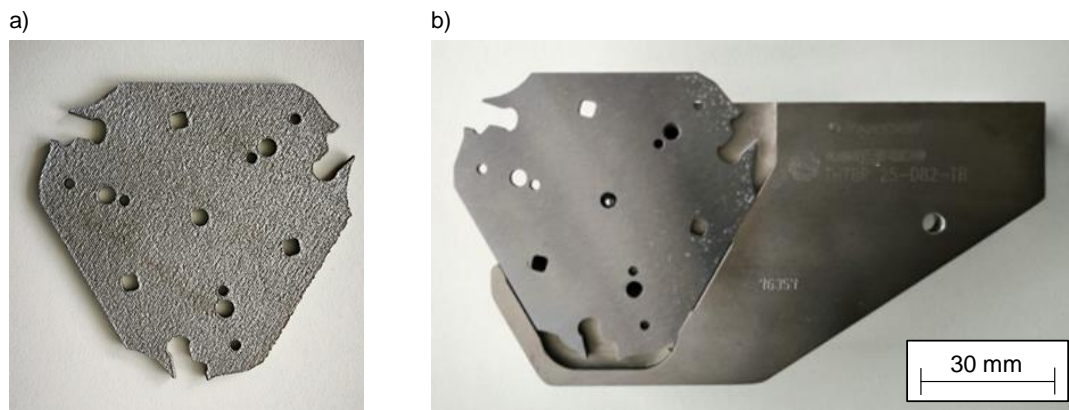


Bild 6: Additiv gefertigter Werkzeughalter; a) ohne Nachbearbeitung; b) mit Nachbearbeitung

Die manuelle Nachbearbeitung der Werkzeugsitze im Werkzeughalter ermöglichte reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich Maßhaltigkeit und Dichtheit. Zur Bewertung der Dichtigkeit der KSS-Schnittstelle wurden spezielle Werkzeughalter ohne KSS-Auslassdüsen gefertigt, sodass die Verbindung zwischen Werkzeug und Halter isoliert untersucht werden konnte. Mittels Referenzwerkzeugen ohne KSS-Bohrungen wurde ein durchschnittlicher KSS-Verlust von ca. 20 % ermittelt. Diese KSS-Mengen tragen dennoch zur sekundären Kühlwirkung bei, indem sie die Schneide umspülen und Reibung an den Flanken reduzieren. Während der Zerspanungsversuche kam es bei schwer zerspanbaren Werkstoffen wie X6CrNiMoTi17-12-2 und Ti6Al4V zu Bauteilversagen. Als Ursache wurde ein sprödes Werkstoffverhalten infolge suboptimaler additiver Prozessparameter und unzureichender Wärmebehandlung identifiziert. Zur Anbindung an die Hochdruck-KSS-Anlage wurden ergänzend Adapter mit 1/4-Zoll-Gewinde sowie geeignete Druckschläuche beschafft.

Für eine zukünftige Serienfertigung des Werkzeughalters wurde eine überarbeitete Fertigungsstrategie erarbeitet. Diese sieht eine Optimierung der additiven Prozessparameter zur Verbesserung der Bauteilfestigkeit, geometrische Anpassungen an kritischen Stellen sowie eine subtraktive Nachbearbeitung der Dicht- und Anlageflächen vor. Planflächen sollen weiterhin geschliffen werden, um eine hohe Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität zu gewährleisten.

II.4.6 AP 2.4 Multikriterielle Bewertung des Herstellungsprozesses

Zur Identifikation von qualitativen sowie quantitativen Einflüssen auf die Einsatzfähigkeit des microCutOff-Werkzeughalters wird die Methode der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) verwendet, siehe Tabelle 9. Dabei werden mögliche Fehler sowie deren Auswirkungen auf das Produkt, also das Werkzeugsystem, betrachtet. Zu diesem Zweck sind potenziell auftretende Fehler sowie deren Ursachen und Folgen mit Hilfe eines Bewertungssystems zu klassifizieren. Es kommen drei Bewertungskriterien mit Zahlenwerten von 1 bis 10 zum Einsatz. Die Kriterien umfassen den Schweregrad, die Auftretens- und die Entdeckungswahrscheinlichkeit. Die Multiplikation der drei Zahlenwerte ergibt die Risiko-Prioritäts-Zahl (RPZ). Diese kann Werte zwischen $RPZ = 1$ bis 1000 einnehmen. Ab einem Wert von $RPZ = 125$ besteht Handlungsbedarf bezüglich der Fehlervermeidung

Tabelle 9: FMEA-Analyse des additiv gefertigten Werkzeughalters

Prozess	Nachbearbeitung	Nachbearbeitung	Nachbearbeitung	Additive Fertigung	Additive Fertigung	Additive Fertigung
Ausfallart	Verstopfte Kühlnähe	Undichtigkeit Kon-taktstellen	Geometrieabweichung	sprödes Gefüge	Raue Oberfläche (Dichtungsstellen)	
Ausfallauswirkung	Verminderte KSS-Wirkung	Undichtigkeit	Werkzeugträger unbrauchbar	Werkzeugträger unbrauchbar	Undichtigkeit	
Ausfallmechanismus	zu geringer Durchmesser	Fehlende Genauigkeit	Falsche Druckparameter	Falsche Druckparameter	Falsche Druckparameter	
Grund des Ausfalles	Druckfehler		Wissensdefizit	Wissensdefizit	Wissensdefizit	
Schweregrad	10	7	10	10	7	
Wahrscheinlichkeit	1	3	1	10	10	
Entdeckung	1	1	3	10	5	
RPZ	10	21	31	1000	350	
Gegenmaßnahmen	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Parameterstudie	Parameterstudie	Parameterstudie

Zusätzlich wurde eine FMEA-Analyse für die Fertigung der Kühlkanäle in den Werkzeugschneiden angewendet, um das Auftreten der beobachteten Fehler in Zukunft verhindern zu können, siehe Tabelle 10.

Tabelle 10: FMEA-Analyse des Bohrprozesses zur Fertigung der Kühlkanäle in den Werkzeugschneiden

Prozess	Positioniergenauigkeit der Elektrode
Ausfallart	Ablenkung der Elektrode
Ausfallauswirkung	Abweichung Bohrungsaustrittsposition auf Spanfläche
Ausfallmechanismus	Auftreffen auf schräger Werkzeugoberfläche
Grund des Ausfalls	Position der Bohrungen
Schweregrad	3
Wahrscheinlichkeit	6
Entdeckung	5
RPZ	150
Gegenmaßnahmen	Komplettes Sintern, Bohrungen umpositionieren

Die Firmen JAK und FRA sind überzeugt, dass eine Markteinführung des microCutOff-Werkzeugsystems grundsätzlich möglich ist. Voraussetzung dafür ist jedoch eine wesentliche Optimierung der Bohrungsfertigung im Werkzeug. Hierzu zählen insbesondere die automatisierte Bohrbearbeitung sowie gegebenenfalls das Fertigsintern der Werkzeuge inklusive Bohrungen. Letztere Variante ist hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit noch zu prüfen. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann das weitere Vorgehen definiert werden. Eine wirtschaftliche Fertigung mittels Erodierbohren ist nur dann realisierbar, wenn die Maschine automatisiert bestückt wird. Dazu zählt auch ein automatischer Elektrodenwechsel, um die Kosten signifikant zu senken. Die derzeitigen Fertigungskosten eines microCutOff-Werkzeugs sind Tabelle 1 zu entnehmen. Ein eigens entwickelter Werkzeughalter mit Grundhalter umgeht darüber hinaus mögliche patentrechtliche Konflikte mit vergleichbaren Systemen. Die Fertigung der Werkzeughalter und Grundhalter kann sowohl bei FRA als auch bei JAK erfolgen, um potenzielle Engpässe auszugleichen. Insgesamt sind weitere Optimierungen notwendig, um die Fertigungskosten in ein marktgerechtes Verhältnis zur verbesserten Standzeit zu bringen.

II.4.7 AP 3.1 Versuchsstand zur Simulationsvalidierung

Im Rahmen des Projekts erfolgte eine umfassende Unterstützung bei der Konzipierung und Konstruktion zur Anpassung des bestehenden Versuchsstandes durch JAK, siehe Bild 7, um diesen auf die spezifischen Anforderungen der geplanten Versuchsreihen auszurichten. In diesem Zusammenhang wurden alle erforderlichen Komponenten für den Aufbau des Versuchsstandes gefertigt. Dazu zählte unter anderem die Herstellung der Werkzeughalterung nach vorliegenden technischen Zeichnungen.

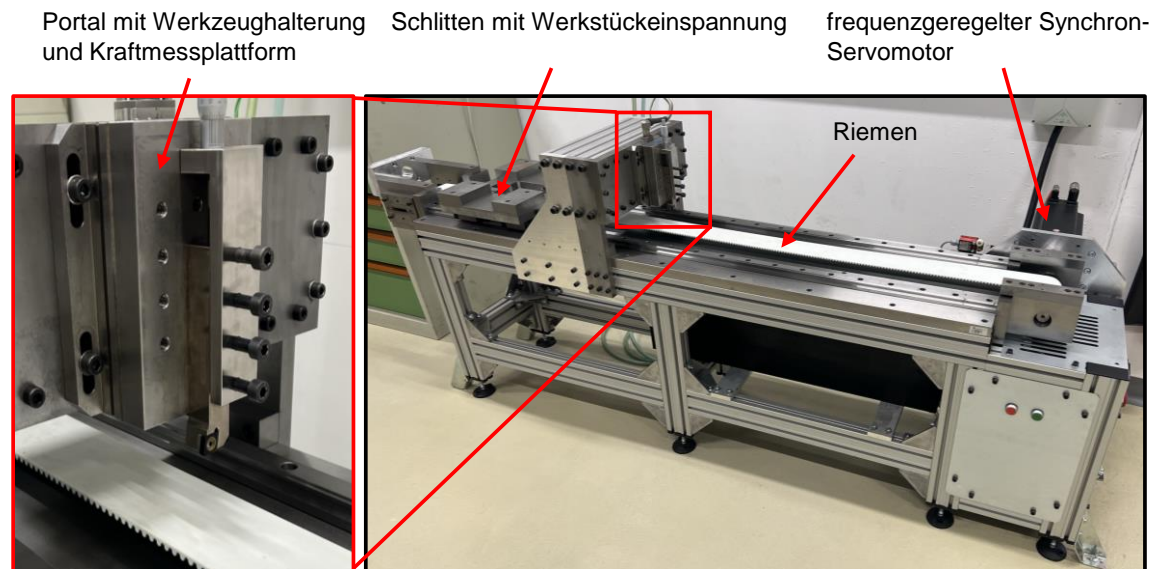


Bild 7: Versuchsstand zur Simulationsvalidierung

Außerdem wurde die Geometrie der Werkstückproben vorbereitet. Die relevanten Versuchsparameter wurden definiert und bereitgestellt, um eine strukturierte und vergleichbare Auswertung zu ermöglichen. Zusätzlich erfolgte eine Unterstützung bei der Durchführung der Validierungsversuche, wodurch ein reibungsloser Ablauf und eine gezielte Überprüfung der Versuchsergebnisse sichergestellt werden konnten.

II.4.8 AP 3.2 Wissenschaftliche Analyse des Prozessverhaltens von Hochdruck-KSS

Technologische Untersuchungen zum Verhalten unterschiedlicher fluidtechnischer Parameter des Hochdruck-KSS

Entgegen der ursprünglich geplanten Inhalte des AP wurde auf Untersuchungen des Einflusses von Additiven auf KSS durch das IWF verzichtet, da der Einsatz von KSS-Additiven nach Angaben der Firma JAK nicht weit verbreitet ist. Dies liegt unter anderem daran, dass Zusatzstoffe nicht für alle KSS-Systeme geeignet sind und deren Konzentration im Betrieb nicht zuverlässig messbar ist. Darüber hinaus unterliegt der mit Additiven angereicherte KSS besonderen Anforderungen hinsichtlich der gefahrenstoffrechtlichen Behandlung. Bei Untersuchungen mit dem microCutOff-Werkzeugsystem konnte ein maximal erreichbarer Volumenstrom von $\dot{V}_{KSS} = 2,7 \text{ l/min}$ identifiziert werden. Hierbei konnte kein signifikanter Einfluss von industriell gebräuchlichen KSS-Konzentration c auf den Volumenstrom \dot{V}_{KSS} bzw. auf etwaige Volumenstromverluste $\dot{V}_{KSS,v}$ nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wurde die Konzentration c der verwendeten KSS-Emulsion Adrana AY 401, QUAKER, HOUGHTON, Dortmund, gemäß Herstellerempfehlung konstant bei $c = 8 \%$ gehalten.

Analyse der resultierenden Kraft- und Reibungsmechanismen für definierte Werkstoffe unter Variation der Schnittgeschwindigkeit

Im Rahmen der Zerspanungsuntersuchungen wurde das jeweilige Einsatzverhalten des Referenz- und des microCutOff-Werkzeugsystems bei der Zerspanung verschiedener Werkstoffe mit unterschiedlichen Prozessparametern durch das IWF analysiert.

Entgegen der Planung des AP wurde auf Anraten von JAK basierend auf jahrelangen Erfahrungswerten wurden für jeden Versuchswerkstoff eine feste Schnittgeschwindigkeit v_c und jeweils zwei verschiedenen Vorschüben f angewendet, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Versuchswerkstoffe mit den dazugehörigen Prozessparametern

Parameter	Einheit	X5CrNi18-10	X6CrNiMoTi17-12-2	Ti6Al4V	AlMg3
Schnittgeschwindigkeit v_c	m/min	100	90	80	180
Vorschub f	mm	0,08	0,08	0,07	0,15
		0,1	0,1	0,08	0,2

Hierbei wurden die Zerspanungskräfte bestehend aus Schnitt- F_c , Vorschub- F_f und Passivkräften F_p aufgenommen. Die Zerspanungsuntersuchungen wurden unter Einsatz der in Tabelle 12 definierten KSS-Strategien durchgeführt. Um den Einfluss des KSS-Volumenstroms \dot{V}_{kss} auf das Einsatzverhalten der untersuchten Werkzeugsysteme zu untersuchen, wurde dieser variiert. Da der maximale Volumenstrom beim microCutOff-Werkzeugsystem auf $\dot{V}_{kss} = 2,7$ l/min begrenzt war, wurde der Volumenstrom \dot{V}_{kss} durch eine zusätzliche externe Düse, welche den KSS auf die Spanfläche der Werkzeugschneide beförderte, ergänzt. Diese besaß einen zusätzlichen Volumenstrom von $\dot{V}_{kss} = 14,5$ l/min, wodurch sich der Gesamtvolumenstrom auf $\dot{V}_{kss,ges} = 17,2$ l/min erhöhte. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde beim Referenzwerkzeugsystem die Zerspanung mit den gleichen KSS Volumenströmen \dot{V}_{kss} untersucht.

Tabelle 12: Untersuchte KSS-Strategien

Parameter	Einheit	Referenz Werkzeugsystem	microCutOff- Werkzeugsystem
KSS-Volumenstrom \dot{V}_{kss}	l/min	2,7 17,2	2,7 17,2
KSS-Konzentration c	%	8	8

Zur Minimierung des Versuchsaufwands wurde das erforderliche Zerspanungsvolumen V bestimmt, um Werkzeugverschleiß eindeutig sichtbar zu machen. Dabei ergab sich ein Zerspanungsvolumen von $V = 90 \text{ cm}^3$ als zielführend. Dieses Volumen wurde als Abbruchkriterium für die Zerspanungsuntersuchungen festgelegt. Pro Werkzeug und Schnittparameterkombination wurden sechs Einstiche mit jeweils $V = 15 \text{ cm}^3$ gefertigt. Bild 8 zeigt den Versuchsstand mit Werkzeugsystem, Versuchswelle und den beschriebenen Einstichen.

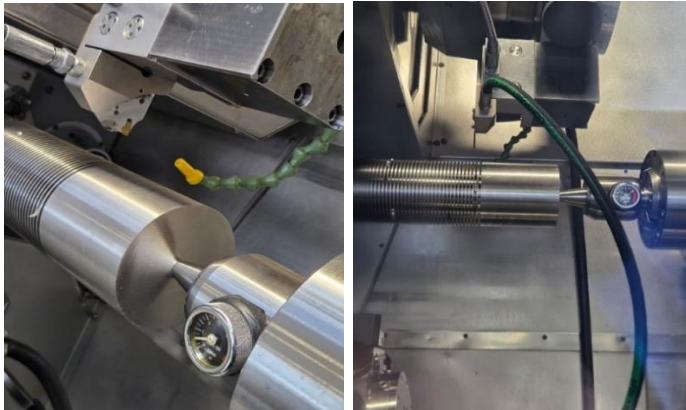


Bild 8: Versuchsaufbau Zerspanungsuntersuchungen am IWF

In Bild 9 bis Bild 12 sind die durchschnittlichen Zerspanungskräfte beim letzten Einstich dargestellt. Aufgrund ihrer geringen Werte wurden die Passivkräfte F_p nicht berücksichtigt. Die Messung erfolgte mit einem Dynamometer Typ 9121 und Ladungsverstärker LABAMP 5167A der Firma KISTLER INSTRUMENTE AG, Winterthur. Für den Werkstoff X5CrNi18-10 zeigte das microCutOff-Werkzeugsystem bei einem KSS-Volumenstrom von $\dot{V}_{\text{kss}} = 2,7 \text{ l/min}$ eine Erhöhung der Vorschubkraft F_f um ca. 6 % bei $f = 0,08 \text{ mm}$ sowie um ca. 8 % bei einem Vorschub von $f = 0,1 \text{ mm}$ gegenüber dem Referenzsystem mit identischem KSS-Volumenstrom, siehe, Bild 9. Der Einsatz einer zusätzlichen externen KSS-Düse führte bei $f = 0,08 \text{ mm}$ zu keiner signifikanten Veränderung der Vorschubkraft F_f im Vergleich zum microCutOff-System ohne Düse. Allerdings lag F_f in dieser Konfiguration etwa 10 % über dem Wert des Referenzsystems mit Düse. Bei einem Vorschub von $f = 0,1 \text{ mm}$ betrug die Differenz rund 17 %. Die Schnittkräfte F_c beider Systeme mit externer KSS-Zufuhr unterschieden sich bei beiden Vorschüben f nur geringfügig um ca. 4 %. Insgesamt ist der Einfluss der zusätzlichen Düse auf die Zerspanungskräfte als moderat einzustufen.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Volumenstrom: ■ $\dot{V}_{\text{kss}} = 2,7 \text{ l/min}$ □ $\dot{V}_{\text{kss}} = 17,2 \text{ l/min}$ ■ $\dot{V}_{\text{kss}} = 2,7 \text{ l/min}$ ■ $\dot{V}_{\text{kss}} = 17,2 \text{ l/min}$	Werkzeug: ■ Referenz □ Referenz ■ microCutOff ■ microCutOff
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: X5CrNi18-10		
Prozessparameter: $v_c = 100 \text{ m/min}$	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$		

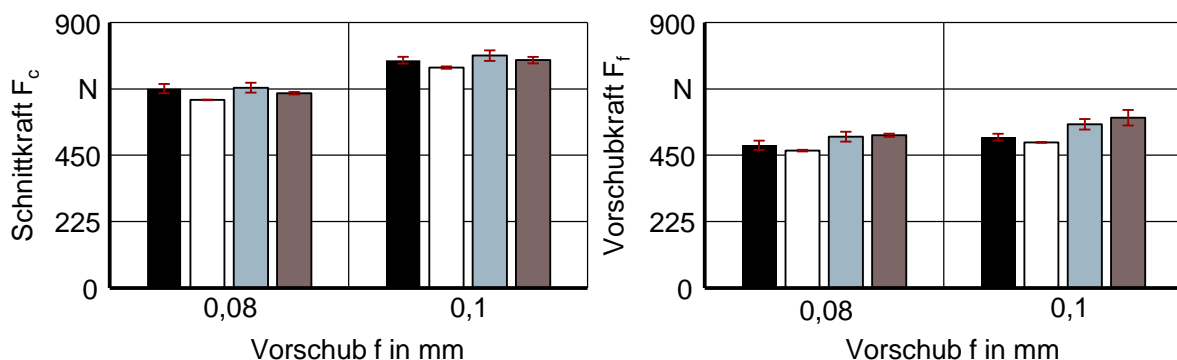


Bild 9: Gemessene Zerspanungskräfte bei der Bearbeitung von X5CrNi18-10

Beim Werkstoff X6CrNiMoTi17-12-2 stiegen die durchschnittlichen Vorschubkräfte F_f mit dem microCutOff-Werkzeugsystem um etwa 9 % gegenüber dem Referenz-Werkzeugsystem bei einem Vorschub von $f = 0,08$ mm bzw. 16 % bei einem Vorschub von $f = 0,1$ mm, siehe Bild 10. Hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bei den durchschnittlichen Schnittkräften F_c .

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Volumenstrom: $\dot{V}_{kss} = 2,7$ l/min
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: X6CrNiMoTi17-12-2	Werkzeug: ■ Referenz □ microCutOff
Prozessparameter: $v_c = 90$ m/min	Verschleißkriterium: $V = 90$ cm ³	

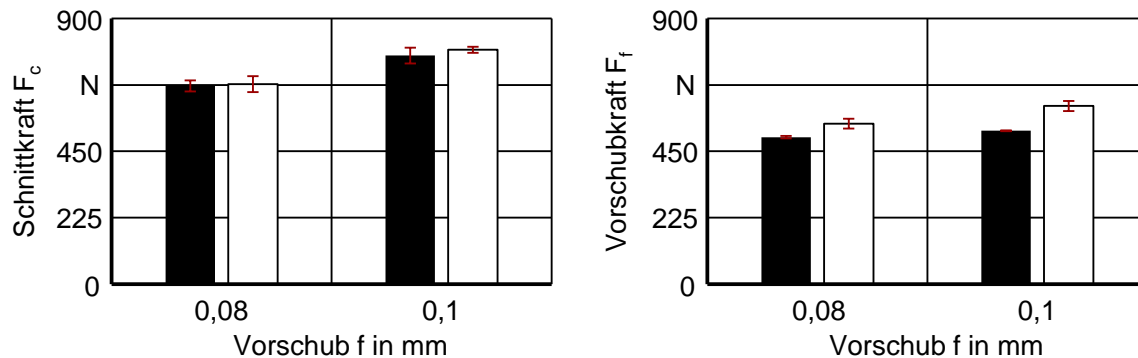


Bild 10: Gemessene Zerspanungskräfte bei der Bearbeitung von X6CrNiMoTi17-12-2

Bei der Zerspanung des Werkstoffes Ti6Al4V lagen die Vorschubkräfte F_f bei $f = 0,07$ mm bei beiden Werkzeugsystemen einem auf vergleichbarem Niveau. Eine Erhöhung auf $f = 0,08$ mm führte mit dem microCutOff-Werkzeugsystem zu einer Reduktion der Vorschubkräfte F_f um ca. 10 %, siehe Bild 11. Gleichzeitig sanken die Schnittkräfte F_c um ca. 6 %. Dies deutet auf ein verbessertes Spanbildungs- und Reibungsverhalten hin und stellt einen Vorteil gegenüber dem Referenzsystem dar.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Volumenstrom: $\dot{V}_{kss} = 2,7$ l/min
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: Ti6Al4V	Werkzeug: ■ Referenz □ microCutOff
Prozessparameter: $v_c = 80$ m/min	Verschleißkriterium: $V = 90$ cm ³	

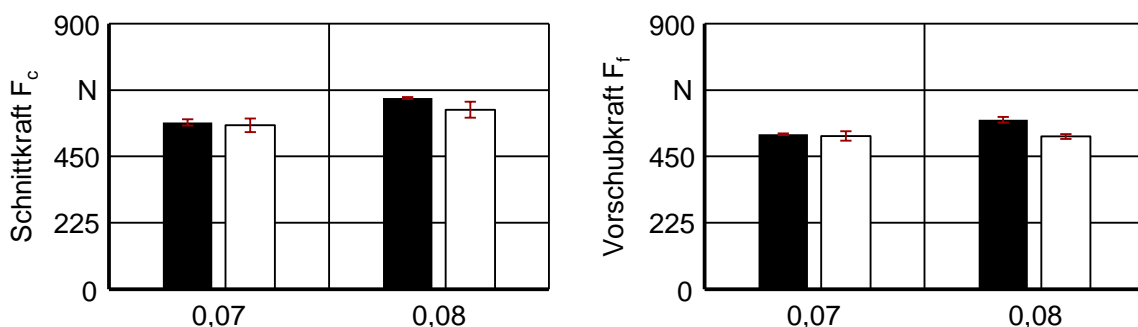


Bild 11: Gemessene Zerspanungskräfte bei der Bearbeitung von Ti6Al4V

Bei der Bearbeitung von AlMg3 zeigten beide Werkzeugsysteme hinsichtlich Vorschub- und Schnittkräften über alle untersuchten Vorschübe f hinweg nahezu identische Werte, siehe Bild 12.

Es konnte also für diesen Anwendungsfall bei den verwendeten Prozessparametern kein signifikanter Einfluss der zusätzlichen KSS-Applikation durch Mikrobohrungen detektiert werden. Dies verdeutlicht, dass das Prozessverbesserungspotenzial des microCutOff-Werkzeugsystems bezogen auf die Kräfte vordergründig für schwer zerspanbare Werkstoffe vorliegt.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Volumenstrom: $\dot{V}_{kss} = 2,7 \text{ l/min}$
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: AlMg3	Werkzeug: ■ Referenz □ microCutOff
Prozessparameter: $v_c = 180 \text{ m/min}$	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	

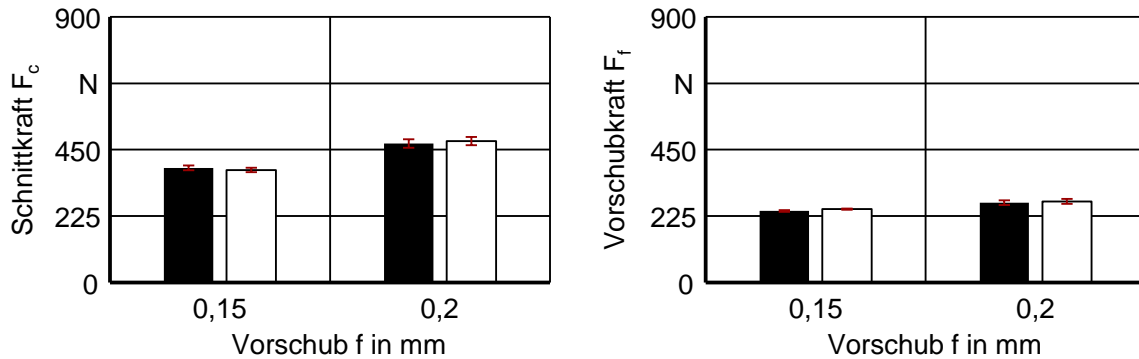


Bild 12: Gemessene Zerspanungskräfte bei der Bearbeitung von AlMg3

Auf **Bild 13** bis **Bild 17** sind repräsentative Aufnahmen von Werkzeugen nach den Zerspanungsuntersuchungen. Die Aufnahmen wurden, wie bereits die Bilder zur Bohrungsrandcharakterisierung, mit einem Rasterelektronenmikroskop vom Typ LEO 1455 VP, CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH, Oberkochen erstellt. Für eine Bestimmung der Verschleißerscheinungen wurden die Werkzeugschneiden angeätzt. Dadurch konnten Werkstoffaufschmierungen entfernt und die darunterliegenden Schäden der Werkzeugbeschichtung sichtbar gemacht werden. Im Rahmen der Zerspanung des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 mittels microCutOff-Werkzeug wurden in der Nähe der Schneidkantenregion Zonen identifiziert, in denen ein vollständiges Versagen der Beschichtung vorliegt, sodass das Grundsubstrat exponiert ist, siehe **Bild 13**. Im Freiflächenbereich ist bei beiden Werkzeugen kein Verschleiß erkennbar. Dunkelgrau verfärbte Zonen im Bereich der Bohrungen und der Freiflächen sind als Rückstände des eingesetzten Kühlschmierstoffs zu interpretieren

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	Präparation: geätzt
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: X5CrNi18-10	Volumenstrom: $\dot{V}_{kss} = 2,7 \text{ l/min}$	
Prozessparameter: $v_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm}$			

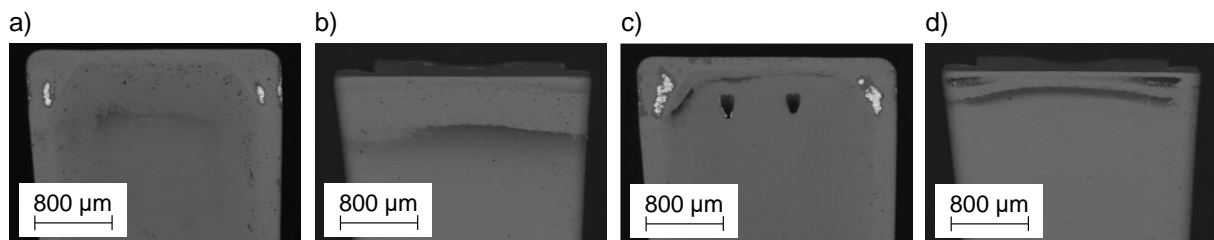


Bild 13: Werkzeugschneiden nach Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Bearbeitung von X5CrNi18-10; a) Spanfläche des Referenzwerkzeuges, b) Freifläche des Referenzwerkzeuges; c) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges, d) Freifläche des Referenzwerkzeuges

Durch den Einsatz einer zusätzlichen äußeren KSS-Zufuhr, welche die Spanfläche des microCutOff-Werkzeugs vollständig benetzt, können die Verschleißerscheinungen auf dieser Fläche bei der Zerspaltung von X5CrNi18-10 weiter reduziert werden, siehe Bild 14. Dies führt unmittelbar zu einer kleineren Ausdehnung der Bereiche an den Werkzeugkanten, in denen die Beschichtung bis auf das Grundsubstrat abgetragen ist. Darüber hinaus treten weniger Werkstoffanhaftungen auf der Spanfläche auf. Der Freiflächenverschleiß bleibt im Vergleich zu einem microCutOff-Werkzeug ohne zusätzliche KSS-Zufuhr nahezu unverändert. Er zeigt keine signifikanten Abweichungen und äußert sich lediglich in geringfügigem adhäsivem Verschleiß in Form von Werkstoffanhaftungen.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Volumenstrom: a) $\dot{V}_{kss} = 2,7 \text{ l/min}$	Präparation: ungeätzt
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: X5CrNi18-10	b) $\dot{V}_{kss} = 2,7 \text{ l/min}$	
Prozessparameter: $v_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm}$	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	c) $\dot{V}_{kss} = 17,2 \text{ l/min}$	
		d) $\dot{V}_{kss} = 17,2 \text{ l/min}$	

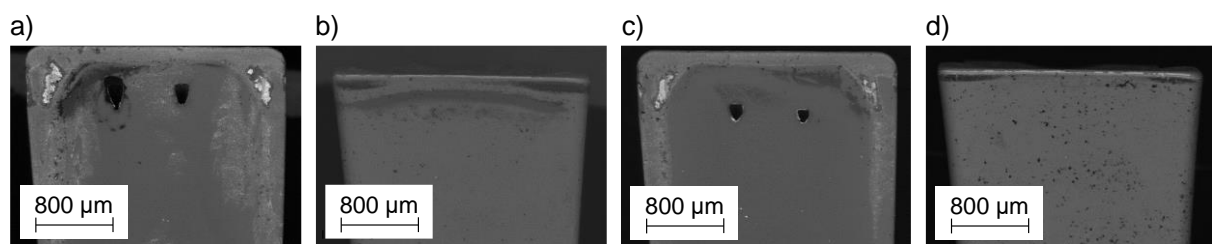


Bild 14: Ungeätzte Werkzeugschneiden nach Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Bearbeitung von X5CrNi18-10; a) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges mit Zusatz KSS, b) Freifläche des microCutOff-Werkzeuges mit Zusatz KSS, c) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges, d) Freifläche des Referenzwerkzeuges

Bei der Zerspaltung von X6CrNiMoTi17-12-2 zeigen beide untersuchten Werkzeuge im Bereich der Schneidenecken ausgeprägte Bereiche vergleichbarer Ausprägung, in denen die Beschichtung abgetragen wurde, siehe Bild 15. Im mittleren Teil der Schneidkante besitzt das Referenz-Werkzeug eine höhere Konzentration an Schichtschäden als das microCutOff-Werkzeug. Die Ansichten der Freiflächen beider Werkzeuge zeigt wiederum ein vergleichbares Verschleißbild.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	Präparation: geätzt
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: X6CrNiMoTi17-12-2	Volumenstrom: $\dot{V}_{kss} = 2,7 \text{ l/min}$	
Prozessparameter: $v_c = 90 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm}$			

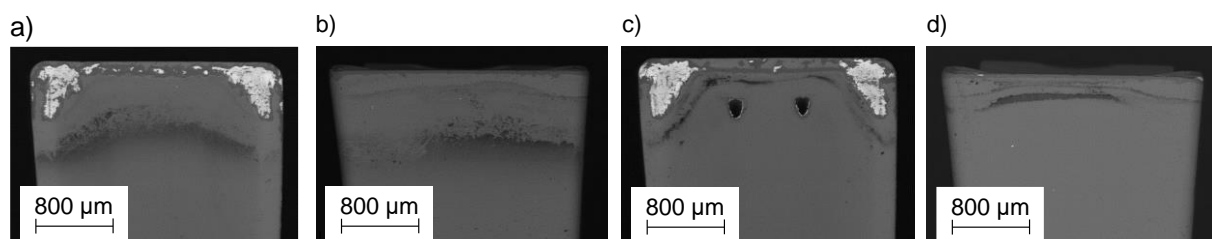


Bild 15: Werkzeugschneiden nach Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Bearbeitung von X6CrNiMoTi17-12-2; a) Spanfläche des Referenzwerkzeuges, b) Freifläche des Referenzwerkzeuges; c) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges, d) Freifläche des Referenzwerkzeuges

Beide Werkzeugsysteme zeigen bei der Zerspaltung der Titanlegierung Ti6Al4V vergleichbar ausgeprägten Verschleiß an den Freiflächen, siehe Bild 16. Bereiche mit deutlich verschlissener Beschichtung treten bei beiden Werkzeugen entlang der gesamten Breite der Schneidkante in Erscheinung, während beim Referenzwerkzeug verstärkt Beschichtungsverleiß in Bereichen festgestellt wurde, welche weiter von der Schneidkante entfernt sind. Als mögliche Ursache wird angenommen, dass der fehlende Kühlschmierstoffstrahl an der Spanfläche beim Referenzwerkzeug nicht in ausreichendem Maße zur Ablenkung des Spans beitragen konnte. Im Gegensatz dazu führte beim microCutOff-Werkzeug eine gezielte KSS-Zufuhr zu einer wirksameren Spanlenkung.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	Präparation: geätzt
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: Ti6Al4V	Volumenstrom: $\dot{V}_{\text{kss}} = 2,7 \text{ l/min}$	
Prozessparameter:			
$v_c = 80 \text{ m/min}$			
$f = 0,08 \text{ mm}$			

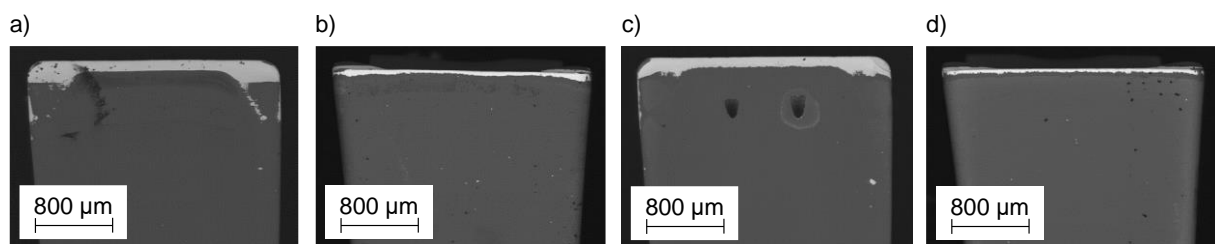


Bild 16: Werkzeugschneiden nach Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Bearbeitung von Ti6Al4V; a) Spanfläche des Referenzwerkzeuges, b) Freifläche des Referenzwerkzeuges; c) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges, d) Freifläche des Referenzwerkzeuges

Die bei der Zerspaltung von AlMg3 eingesetzten Werkzeuge weisen kaum Verschleißerscheinungen vor, siehe Bild 17. Im ungeätzten Zustand zeigte das microCutOff-Werkzeug ein lokal verzögertes Wachstum der Aufbauschneiden im mittleren Bereich der Schneidkante. Dieses verzögerte Wachstum wird mit einem ebenfalls verzögert einsetzenden Verschleißverhalten assoziiert, da sich die Aufbauschneiden beim microCutOff-Werkzeug zwar ebenfalls bilden, sich jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt ablösen als beim Referenzwerkzeug. Die spätere Ablösung der Aufbauschneiden wirkt sich potenziell positiv auf die Standzeit des Werkzeugs aus, da die dadurch induzierten Schädigungen der Werkzeugoberfläche verzögert auftreten.

Prozess: Orthogonaldrehen	Werkzeugmaschine: Traub TNX 65	Verschleißkriterium: $V = 90 \text{ cm}^3$	Präparation: geätzt
Kühlschmierstoff: Adrana AY 401	Werkstück: AlMg3	Volumenstrom: $\dot{V}_{\text{kss}} = 2,7 \text{ l/min}$	
Prozessparameter:			
$v_c = 180 \text{ m/min}$			
$f = 0,2 \text{ mm}$			

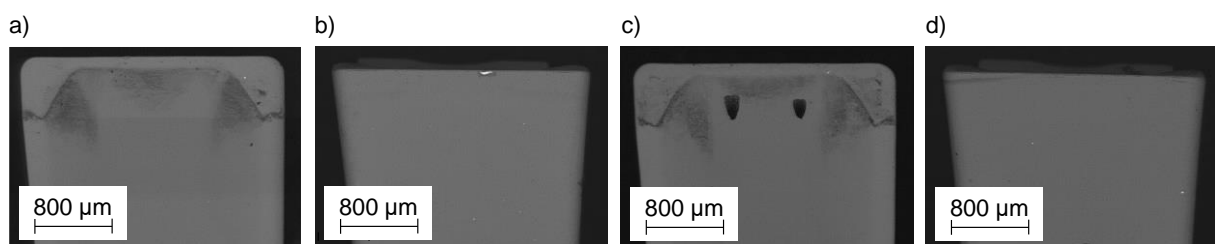


Bild 17: Werkzeugschneiden nach Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Bearbeitung von AlMg3; a) Spanfläche des Referenzwerkzeuges, b) Freifläche des Referenzwerkzeuges; c) Spanfläche des microCutOff-Werkzeuges, d) Freifläche des Referenzwerkzeuges

Ableitung stabiler Prozessfenster für die Hochdruckkühlschmierung

Die bereits vorher festgelegten Prozessparameter bei der Zerspaltung haben sich in hoher Wiederholgenauigkeit bei den gemessenen Zerspaltungskräften. Daher wird in Bezug auf die festgelegten Prozessparameter der einzelnen Versuchswerkstoffe stets diejenige mit dem größeren Zeitspannungsvolumen Q_w empfohlen, da diese laut der gesammelten Erkenntnisse im Allgemeinen nicht zu einem deutlich erhöhten Verschleiß führten, siehe Tabelle 13. Die Ergebnisse der Zerspaltunguntersuchungen legen nahe, dass das vorliegende Werkzeugsystem mit einem Volumenstrom von mindestens $\dot{V}_{kss} = 2,7$ l/min betrieben werden sollte, um den Verschleiß zu minimieren. Um den Spanflächenverschleiß zusätzlich zu reduzieren, kann die separaten KSS-Zuführung über externe Düsen in Betracht gezogen werden. Hervorgerufen durch die bereits erwähnten zeitlichen Verzögerungen wurde die Zusammensetzung des KSS nicht variiert und es kann neben der industriell gebräuchlichen 8 % Öl-in-Wasser-Emulsion keine weitere Empfehlung ausgesprochen werden.

Tabelle 13: Empfohlene Schnittparameter

Parameter	Einheit	X5CrNi18-10	X6CrNiMoTi17-12-2	Ti6Al4V	AlMg3
Schnittgeschwindigkeit v_c	m/min	100	90	80	180
Vorschub f	mm	0,1	0,1	0,08	0,2

II.4.9 AP 3.3 und AP 3.4 Implementierung der Werkzeuglösung im industriellen Umfeld und Langzeituntersuchungen an industriell relevanten Werkstoffen

Im weiteren Projektverlauf integrierte JAK das entwickelte microCutOff-Werkzeugsystem in eine Drehmaschine des Typs IG 300 der Firma MAZAK, YAMAZAKI MAZAK CORP., Oguchi, Japan und bewertete dieses im Hinblick auf Handhabung und Betriebssicherheit. Die Handhabung des Systems erwies sich dabei als vergleichbar mit der des bisher verwendeten Referenz-Werkzeugsystems. Bezüglich der Betriebssicherheit konnten keine potenziellen Gefahrenquellen identifiziert werden, sodass das System bedenkenlos im regulären Betrieb eingesetzt werden kann. Parallel dazu erfolgte eine Analyse möglicher Anpassungen an unterschiedliche Spezifikationen der Werkzeugaufnahme sowie der Verlegung der Hochdruck-KSS-Zuleitung. Weitere konstruktive Anpassungen im Bereich der Kontaktstellen zur Werkzeugschneide oder der KSS-Führung wurden nicht als erforderlich eingestuft. Die zuvor identifizierten Schwachstellen können durch gezielte Optimierungen des additiven Fertigungsprozesses sowie durch die bereits beschriebene Nachbearbeitung der Werkzeugaufnahme adressiert werden. Um das Einsatzverhalten der microCutOff-Werkzeuge im industriellen Umfeld zu untersuchen, wurden Langzeituntersuchungen durch die Firma JAK an industriell relevanten Werkstoffen mit den durch das IWF empfohlenen Schnittparametern vorgenommen, siehe Tabelle 13.

Um den Werkzeugverschleiß zu untersuchen wurden die Werkzeuge je nach Werkstoff nach spätestens 100 Einstichen inspiziert. Die Verbesserung der Standmenge beim Einstechen ist bei den Werkstoffen X5CrNi18-10 und X6CrNiMoTi17-12-2 durch den Einsatz des microCutOff-Werkzeugs im Vergleich zum Referenzwerkzeug erkennbar, siehe Bild 18. Für den Werkstoff X5CrNi18-10 konnte eine durchschnittliche Standmengensteigerung von etwa 27% durch den Einsatz des microCutOff-Werkzeugs im Vergleich zum Referenzwerkzeug erzielt werden. Bei X6CrNiMoTi17-12-2 liegt die durchschnittliche Steigerung der Standmenge ebenfalls bei rund 27 %.

Bei der Bearbeitung von AlMg3 kann dieser Effekt hingegen nicht festgestellt werden. Zudem ist eine belastbare Aussage zur Standmenge in diesem Fall nicht möglich, da hierfür umfangreichere Dauertests erforderlich wären. Es lässt sich jedoch beobachten, dass bei der Zerspanung von AlMg3 mit dem microCutoff-Werkzeug die Ausprägung der Aufbauschneide reduziert ist. Beim Werkstoff Ti6Al4V wurde ebenfalls eine Verbesserung festgestellt, mit einer durchschnittlichen Standmengensteigerung von 20 %.

Prozess:
Orthogonaldrehen
Kühlschmierstoff:
Genethor Hydra 5770
Druck:
50 bar + 5 bar ÜK
Prozessparameter:
a) $v_c = 100$ m/min
b) $v_c = 90$ m/min
c) $v_c = 80$ m/min
Werkzeugmaschine:
Mazak IG 300

Werkstück:
a) X5CrNi18-10
b) X6CrNiMoTi17-12-2
c) Ti6Al4V
Verschleißkriterium:
 $VB_{Bmax} = 0,2$ mm
Werkzeug:
■ Referenz
□ microCutOff

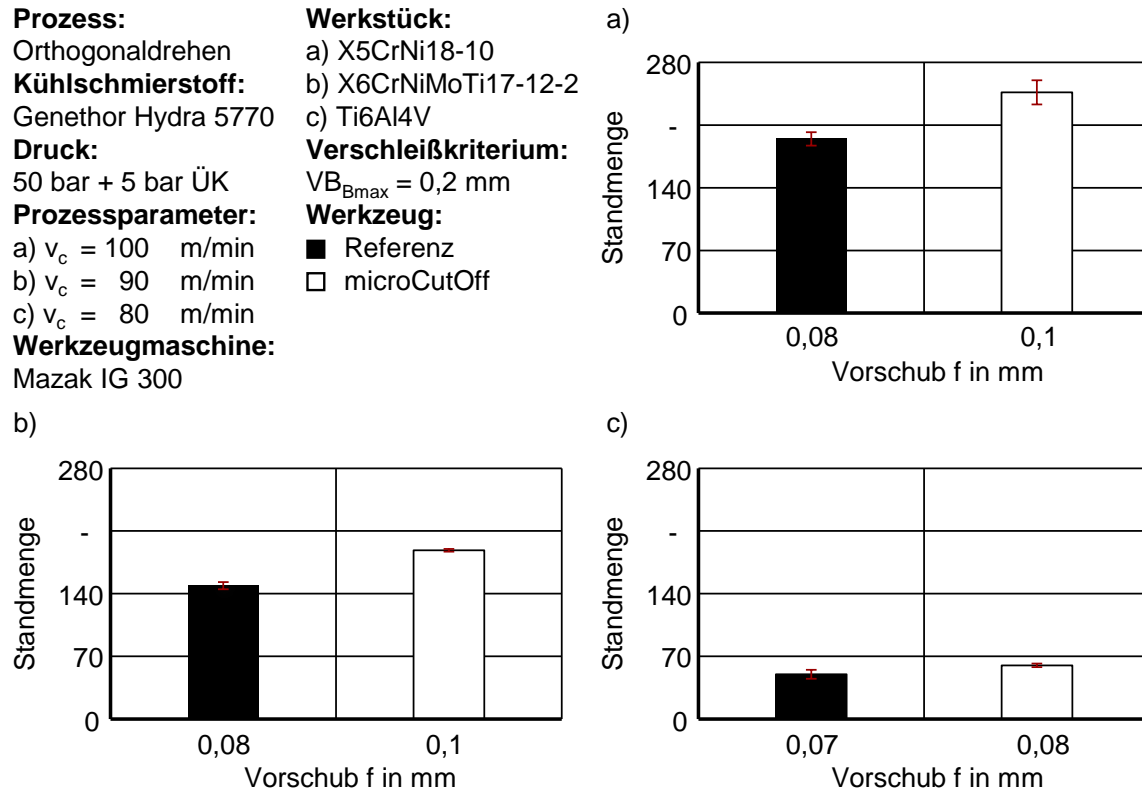


Bild 18: Ergebnisse der Langzeituntersuchungen durch die Firma JAK für die Zerspanung verschiedener Werkstoffe a) X5CrNi18-10; b) X6CrNiMoTi17-12-2; c) Ti6Al4V

Neben dem Werkzeugverschleiß wurden ebenfalls die Oberflächengüten der bearbeiteten Werkstückoberflächen gemessen. Dazu wurden die Werkstücke aufgetrennt. Anschließend wurde der arithmetische Mittelwert der Höhe Ra mit einem Oberflächenrauheitsmessgerät des Typs SJ-410 der Marke MITUTOYO CORPORATION, Kawasaki, Japan bestimmt.

Die gemessenen arithmetischen Mittelwerte der Höhe Ra sind in [Bild 19](#) dargestellt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Einsatz des microCutOff-Werkzeugs im Vergleich zum Referenzwerkzeug zu einer signifikanten Reduktion des arithmetischen Mittelwerts der Höhe Ra führt. Besonders ausgeprägt zeigte sich dieser Effekt bei dem Werkstoff X5CrNi18-10, bei dem eine Verringerung der gemessenen Rauheitswerte um etwa 32 % erreicht wurde. Auch bei dem Werkstoff X6CrNiMoTi17-12-2 konnte mit dem microCutOff-Werkzeug eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität erzielt werden. Hier lag die Reduktion der Rauheit bei ungefähr 49 %. Für Ti6Al4V ergab sich eine Rauheitsminderung von circa 27 % im Vergleich zum Referenzwerkzeug. Am geringsten fiel der Effekt beim Werkstoff AlMg3 aus, bei dem eine Reduktion der Oberflächenrauheit um etwa 17 % festgestellt wurde. Insgesamt belegt dies die Wirksamkeit des microCutOff-Werkzeugs zur Verbesserung der Oberflächenqualität, wobei der Effekt werkstoffabhängig unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Eine Integration des microCutOff-Werkzeugsystems in die Serienfertigung wurde zur Bewertung des Langzeiteinsatzverhaltens geprüft. Aufgrund spontaner Brüche des Werkzeughalters wurde jedoch von einem Serieneinsatz abgesehen, da solche Ausfälle zu unvorhergesehenen Produktionsverzögerungen und Ausschuss führen würden, was wirtschaftlich nicht akzeptabel ist. Trotzdem erfolgte eine umfassende Analyse der Werkzeugstandzeiten und der Bauteilqualität, aus der konzeptionelle Modifikationen

abgeleitet wurden. Besonders vielversprechend ist die Integration eines zusätzlichen internen KSS-Kanals im Werkzeughalter, um die Kühlung der Spanfläche zu verbessern und somit die Standzeit zu erhöhen. Der Nachhaltigkeitsaspekt wurde kritisch betrachtet: Die derzeitigen Fertigungskosten, vor allem durch die Drahterosion der KSS-Kanäle in handelsübliche Hartmetallwerkzeuge, übersteigen die Kosten herkömmlicher Werkzeuge deutlich. Eine Kostenreduktion könnte durch die Integration der KSS-Kanäle bereits im Sinterprozess erreicht werden, was das microCutOff-System wirtschaftlich und ökologisch effizienter gestalten würde. Insgesamt zeigte sich das System in der Praxis durch eine höhere Standmenge bezüglich der Anzahl fertiger Einstiche gegenüber dem Referenzwerkzeug als leistungsfähig. Der spontane Bruch des Werkzeughalters bleibt jedoch eine zentrale Herausforderung, die weiterer konstruktiver Verbesserungen bedarf.

Prozess: Orthogonalrehren	Werkstück: a) X5CrNi18-10 b) X6CrNiMoTi17-12-2 c) Ti6Al4V
Kühlschmierstoff: Genethor Hydra 5770	Verschleißkriterium: $VB_{Bmax} = 0,2 \text{ mm}$
Druck: 50 bar + 5 bar ÜK	Werkzeug: ■ Referenz □ microCutOff
Prozessparameter: a) $v_c = 100 \text{ m/min}$ b) $v_c = 90 \text{ m/min}$ c) $v_c = 80 \text{ m/min}$	
Werkzeugmaschine: Mazak IG 300	

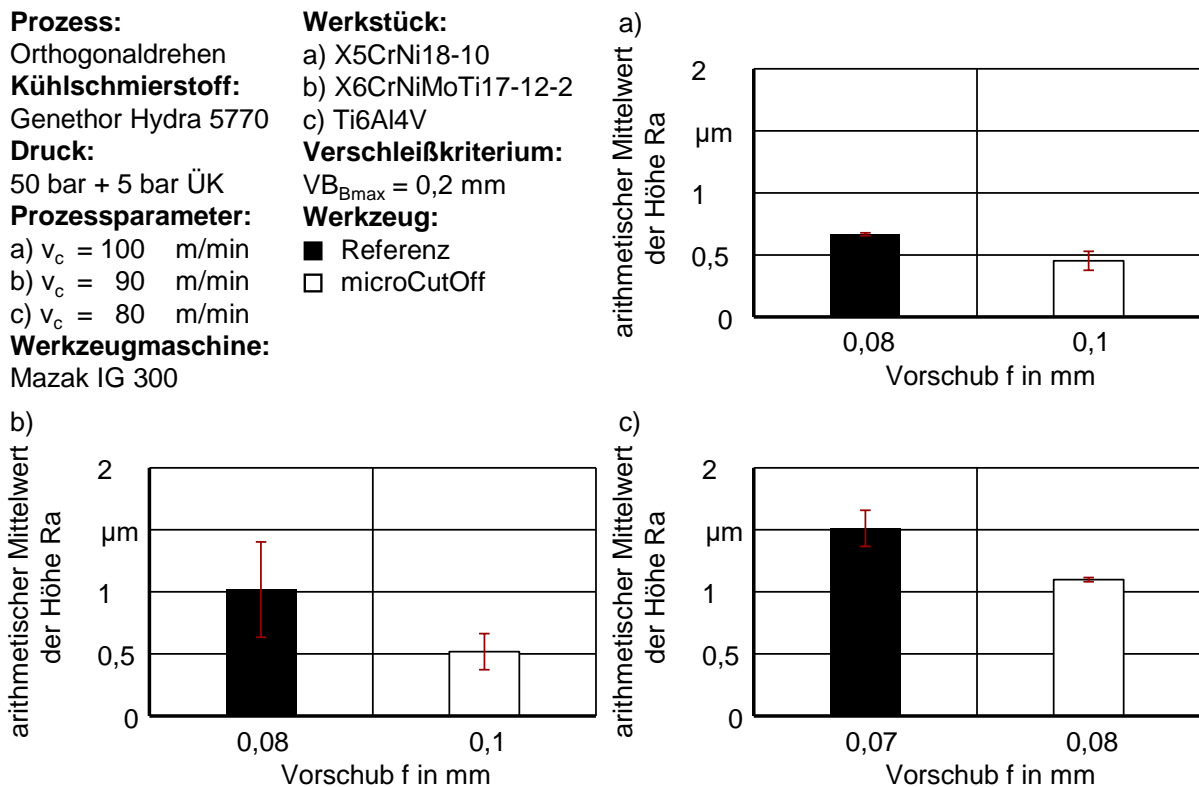


Bild 19: Erreichte arithmetische Mittelwerte der Höhe Ra bei der Zerspänung verschiedener Werkstoffe durch die Firma JAK; a) X5CrNi18-10; b) X6CrNiMoTi17-12-2; c) Ti6Al4V

II.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Teilprojekt des IWF wurde ein Werkzeugsystem mit innenliegenden Kühlkanälen zum Abstechdrehen entwickelt. Weiterhin wurde ein PVD-Schichtsystem ermittelt, welches über ein optimales Beschichtungsverhalten vor allem im Bereich der Mikrobohrungen verfügt. Durch umfangreiche Zerspänungsuntersuchungen konnte dieses Werkzeugsystem ein verbessertes Einsatzverhalten bei der Bearbeitung von ausgewählten Werkstoffen aufzeigen. Hierdurch ist ein ressourcensparender Einsatz von Werkzeugen und KSS möglich, was primär wirtschaftliche Vorteile für die metallverarbeitende Branche bei Marktreife des Produktes bedeutet. Die während der Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse bzgl. gemessener Zerspänungskräfte und Aufnahmen des Werkzeugverschleißes dokumentieren die Wirksamkeit der durch die Mitglieder des Konsortiums geleistete Entwicklung. Darüber hinaus dienen die bei der Werkzeugentwicklung gewonnen Erkenntnisse den weiterführenden Forschungsaktivitäten am IWF, etwa zur Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter bei der additiven Fertigung von Werkssystemen auf deren Einsatzverhalten oder das Einbringen von innenliegenden Kühlkanälen an Werkzeugen im Allgemeinen.

II.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Mit der Fertigung der additiv gefertigten Werkzeugträger wurde das IFW Jena beauftragt. In diesem Rahmen kam es zum Erfahrungsaustausch bezgl. geeigneter Prozessparameter bei der additiven Fertigung, sowie der thermischen Nachbehandlung additiv gefertigter Bauteile.

II.7 Literaturverzeichnis

- CER25 <https://cuttingtools.ceratzit.com/ch/de/zerspanungswissen/drehbearbeitung/ratgeber/schneidwerkzeug-beschichtung.html>
- DAG10 Daghini, L.; Archenti, A.; Nicolescu, C.M.: Design and dynamic characterization of composite material dampers for parting-off tools. *Journal of Machine Engineering* 10 (2010) 2, S. 57-70.
- DOM15 Dombrowski, U.; Mielke, T.: *Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. 2015.
- DOM16 Dombrowski, U.; Richter, T.: *Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie4.0*. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 12, S.771-774.
- EUG18 Albisser, E. (Hrsg.): *Neue Klinsen stechen besser. Abstechsystem Corocut QD: kritische Spannungen sind eliminiert*. Bern, Schweiz: Technik und Wissen, 2018.
- FLO19 Flohr, M.: Für tiefes Einstechen. *maschine+werkzeug*, 05.09.2019.
URL:<https://www.maschinewerkzeug.de/werkzeuge/uebersicht/artikel/9320479>
(Zugriff:2024-09-20).
- FRA14 Frank, H.: Lean Produktion versus Industrie 4.0: Gegner oder Verbündete? *Industrie Management* 30 (2014) 6, S.17-20.
- HAR25 https://www.hartner.de/wp-content/uploads/2017/08/HARTNER_Beschichtungen_DE.pdf
- JAM14 Jamil, N.; Yusoff, A. R.; Mansor, M. H.: Experimental Study of the Static Modal Analysis on Milling Machine Tool. *AMR* 903 (2014) S. 123-128. URL:
<https://www.scientific.net/amr.903.123>.
- KLO10 Klocke, F.; Lung, D.; Essig, C. A.; Sangermann, H.: *Automatisierte Produktion – ohne Spanbruch undenkbar: Rechnerunterstützte Spanbruchvorhersage und die*

Hochdruck-Kühlschmierstoff-Zufuhr steigern Prozesssicherheit spanender Fertigungsverfahren signifikant. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105(2010) 1/2, S.21-25.

- KUT11 Kuttkat, B.: Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr senkt die Werkzeugtemperatur. Maschinenmarkt, 02.09.2011. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/hochdruck-kuehlschmierstoffzufuhr-senkt-die-werkzeugtemperatur-a-329279/> (Zugriff: 2025-05-20).
- MIC20 Michal, T.: Schwerzerspanung muss nicht immer schwer sein. Maschinenmarkt, 24.02.2020. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/schwerzerspanung-muss-nicht-immer-schwer-sein-a-907642/> (Zugriff:2025-05-20).
- OTA12 Otano, I. C.: Ganzheitliche Produktionssysteme für kleine und mittlere Unternehmen. Schriftenreihe des IFU. Hrsg.: Dombrowski, U., Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Düren: Shaker, 2012.
- THI15 Thiele, C.; Kroh, R.: Doppelte Werkzeugstandzeit beim Abstechen. Maschinenmarkt, 22.07.2015. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/doppelte-werkzeugstandzeit-beim-abstechen-a-498589/> (Zugriff:2025-05-20).
- DIN8589-1 DIN8589-1, Teil 1, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen. Teil 1: Drehen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin, Deutschland: Beuth.
- DIN EN 1071-6 DIN EN 1071-6:2007 Hochleistungskeramik - Verfahren zur Prüfung keramischer Schichten - Teil 6: Bestimmung der Beständigkeit gegen Abriebverschleiß von Schichten mittels Mikroabriebprüfung.