

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Drehbearbeitung von Stählen durch den energieeffizienten Einsatz der Hochdruck-Kühlschmierstoff-Zufuhr

„ProHoKühl“

Durchführende Forschungsstelle

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
Steinbachstraße 19
52074 Aachen

Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Fritz Klocke
E-Mail: f.klocke@wzl.rwth-aachen.de

Projektleiter

Dipl.-Ing. Dieter Lung
Oberingenieur
E-Mail: d.lung@wzl.rwth-aachen.de

Projektbearbeiter

Dr.-Ing. Hubertus Sangermann
Dipl.-Wirt.-Ing. Tolga Cayli
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
E-Mail: t.cayli@wzl.rwth-aachen.de
Tel.: 0241 - 80 20524

Bewilligungszeitraum: 01.08.2011 - 31.07.2013



Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17178 N wurde über das VDW-Forschungsinstitut e.V., Corneliusstraße 4, 60325 Frankfurt am Main

durch die AiF



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom

Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie (BMWi)



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ausschlaggebend für den Projekterfolg war die sehr intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren der RWTH Aachen und den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses. Daher gilt ein besonderer Dank den im Projektbegleitenden Ausschuss tätigen Unternehmen, die durch unentgeltliche Bereitstellung von Werkstücken und Anlagen als auch durch eine intensive Beratungstätigkeit zum Gelingen des Projektes beigetragen haben. Der Projektbegleitende Ausschuss (PA) setzte sich aus folgenden Unternehmen zusammen:

- H. Schütte Vertriebsgesellschaft mbH
- A. Monforts WZM GmbH & Co. KG
- Aerotech Peissenberg GmbH & Co. KG
- GEA Air Treatment GmbH
- ISCAR Germany GmbH
- Kabelschlepp GmbH
- Otto Dieterle Spezialwerkzeuge GmbH
- Presswerk Krefeld GmbH & Co. KG
- Sandvik Tooling Deutschland GmbH
- Schumag AG
- SECO TOOLS GmbH
- SEGE Sicherheitsfenster GmbH & Co. KG
- Walter AG
- WZL der RWTH Aachen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Forschungsthema	4
1.2	Kurze Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	4
2	Forschungsgebiet	5
2.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
2.2	Funktionsprinzip und Wirkmechanismen der HD-KSS-Zufuhr	9
3	Ablauf des Forschungsprojekts	12
3.1	Forschungsziel	12
3.2	Lösungsweg	13
3.3	Konzept zum Projektmanagement	16
4	Forschungsergebnisse	17
4.1	Leistungspotenzial der HD-KSS-Zufuhr bei der Stahlbearbeitung	18
4.2	Einfluss der Spanformgeometrie	24
4.3	Einfluss der KSS-Zuführungsvariante	33
4.4	Einfluss von KSS-Zuführdruck und -Volumenstrom	39
4.5	Einfluss des KSS-Mediums (Öl vs. Emulsion)	51
4.6	Auswirkung der HD-KSS-Zufuhr auf die WZ-Maschine und die Peripherie ...	53
5	Nutzen der erzielten Ergebnisse und innovativer Beitrag für KMU	54
5.1	Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse für KMU	55
5.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU	56
5.3	Industrielle Umsetzung der Ergebnisse nach Projektende	58
6	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	60
7	Zusammenfassung und Ausblick	62

1 Einleitung

1.1 Forschungsthema

Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Drehbearbeitung von Stählen durch den energieeffizienten Einsatz der Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr.

1.2 Kurze Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Bei der Drehbearbeitung von Stahlwerkstoffen führte die zielgerichtete KSS-Zufuhr mit hohen Drücken zu außerordentlich positiven Effekten. Während sich beim Außenlängsdrehen des rostfreien Stahls X5CrNi18-10 mit einem KSS-Druck von $p = 150$ bar Standzeiterhöhungen um mehr als 60 Prozent einstellten, konnte die Standzeit bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) sogar um einen Faktor von 2,6 bzw. 4,4 im direkten Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung (KÜK) gesteigert werden. Die in diesem ersten Arbeitspaket nachgewiesenen Standzeitsteigerungen stellen beste Voraussetzungen zur Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und somit zur Steigerung der Produktivität und zur Kostensenkung in der Fertigung dar.

Im zweiten Arbeitspaket wurden unterschiedliche Spanform- respektive „Strahlleitgeometrien“ entwickelt. Der Einsatz dieser Strahlleitgeometrien im Zusammenhang mit der spanflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr anstelle konventioneller Spanformgeometrien war ein weiterer Schritt zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz der HD-KSS-Zufuhr.

In den Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Zuführungsvarianten im dritten Arbeitspaket führte die kombiniert span- und freiflächenseitige KSS-Zufuhr zu einer weiteren Erhöhung der Leistungsfähigkeit der HD-KSS-Zufuhr. Erst eine vollständige Optimierung aller Teilkomponenten der Prozessgestaltung kann daher zu einem Maximum an Produktivitäts- und Prozesssicherheitsgewinn führen.

Bei der unabhängigen Variation des KSS-Druck und -Volumenstroms im vierten Arbeitspaket wurde erkannt, dass eine Volumenstromsteigerung nur solange einen positiven Einfluss auf den Zerspanprozess hat, bis die Strahlbreite gleich der Spanbreite ist. Daher sollte die Einstellung des Volumenstroms durch die Wahl der Größe der Düsenaustrittsfläche in enger Anlehnung an die Schnitttiefe erfolgen. Sobald der KSS-Strahl die gesamte Spanbreite erfasst, kann nur noch eine weitere Steigerung des KSS-Drucks zusätzliche Effekte hervorrufen.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

2 Forschungsgebiet

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der spanenden Bearbeitungsverfahren steigen aufgrund des weltweit zunehmenden Kostendrucks. Gefordert wird, neben der Steigerung der Produktivität von Einzelprozessen, eine weitgehende Entkopplung von Mensch und Maschine. Damit soll die Entwicklung einer ressourceneffizienten, mannarmen, integrierten und automatisierten Hochleistungsfertigung unterstützt werden. Aus diesem Blickwinkel sind etwaige Eingriffe während der Fertigung durch den Mitarbeiter sowie Störungen, die durch Langspäne beim Drehen erzeugt werden, sehr kontraproduktiv.

Aus diesem Grund kommt der Steigerung der Prozesssicherheit eine zentrale Bedeutung zu. Eine prozesssichere spanende Fertigung ist ohne kontrollierten Spanbruch und Spanabtransport aus dem Maschinenarbeitsraum kaum vorstellbar. Unterbrechungen des Prozesses und Maschinenstillstandszeiten zum manuellen Entfernen von Spänen durch den Maschinenbediener, Beschädigungen am Bauteil, dem Werkzeug und an der Maschine sowie Verletzungen des Maschinenbedieners müssen im Hinblick auf eine automatisierte Fertigung vermieden werden. [KLOC10a, TÖNS03, KAMI00, CRAFT99].

Vor allem bei der Drehbearbeitung kann es aufgrund des kontinuierlichen Schnitts je nach Werkstoff und Bearbeitungsbedingungen zur Bildung von unerwünschten Band- und Wirrspänen kommen, die häufig Spanner bilden und zu oben genannten Problemen führen. Insgesamt wurden seit dem Einsatz spanender Fertigungsverfahren bis heute umfangreiche Forschungsarbeiten zur Thematik der kontrollierten Spanbildung durchgeführt [AURI06, DENK05, UHLM05, HINT90, JAWA88, WARN74, SPAA71].

Dennoch kommt es vor allem beim Drehen mit geringen Spanungsquerschnitten, bei der Bearbeitung duktiler oder weicher Werkstoffe, beim Übergang von Außenlängs- zu Plandrehoperationen (Schultern) häufig zur Entstehung von unerwünschten Band- oder Wirrspänen, trotz des Einsatzes von Maßnahmen zur Erschöpfung des Umformvermögens des Werkstoffs oder zur Steigerung des Spanumformgrades [BIER10, KLOC09, HOCK08, TÖNS03, KURI82].

Durch die Wahrnehmung ihrer Hauptaufgaben, dem Kühlen und Schmieren der Bearbeitungsstelle sowie dem Abtransport der Späne, tragen moderne Kühlschmierstoffsysteme maßgeblich zu dem hohen Leistungsniveau zahlreicher Fertigungspro-

zesse bei. Erreicht wird dies durch die Abfuhr der Prozesswärme aus der Kontaktstelle Werkzeug-Werkstück, die Kühlung und die Reduktion der Reibwärmeentstehung durch Schmierung. [KLOC08, WERT92, KURI82].

Beim Einsatz der konventionellen Überflutungskühlung umspült bzw. überflutet der Kühlschmierstoff (KSS) die Zerspanstelle lediglich. Eine direkte Kühlung der Schneidkante und Spanflächenkontaktzone ist unter diesen Bedingungen nicht gegeben, da der KSS bei der konventionellen Kühlung in erster Linie auf die Spanoberseite trifft und aufgrund des hohen Kontaktdrucks zwischen Werkzeugspanfläche und Spanunterseite diese Grenzfläche unbenetzt bleibt [KLOC08, EZUG05, CHAN03, ZHAO02].

In vielen spanenden Fertigungsbereichen ist eine Entwicklung hin zur Minimalmengenschmierung (MMS) und Trockenbearbeitung zu erkennen, um die durch den KSS-Einsatz entstehenden Kosten und Aufwände zu reduzieren [BRIN99]. Einen weiteren Ansatz zur Vermeidung von KSS stellt die Trockenbearbeitung mit CO₂-Kühlung dar [ABEL09, WEIN05]. Trotz der Weiterentwicklung von Kühlschmierstrategien, Werkzeugen, Schneidstoffen und Beschichtungen ist ein Verzicht auf Kühlschmierstoffe jedoch bei vielen Bearbeitungsaufgaben bis heute undenkbar [DENK10, COUR09, WEIN04, KAMI00]. Wenn aber nass bearbeitet werden muss, gilt es, den KSS-Einsatz so effizient wie möglich zu gestalten [GROß03].

Zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit stellt in diesem Zusammenhang vor allem bei der Drehbearbeitung die zielgerichtete Zuführung des Kühlschmierstoffs zur Zerspanstelle mit hohem Druck (Hochdruck-KSS-Zufuhr) eine potentialträchtige Technologie dar, die eine Basis für eine automatisierte und wirtschaftliche Fertigung schaffen kann [SORB06, EZUG04, MAZU89]. Bei der Hochdruck-KSS-Zufuhr wird der KSS je nach Zuführungsvariante durch die im Werkzeughalter exakt positionierten Düsen oder durch die Schneidplatte der Zerspanstelle gezielt und fokussiert zugeführt.

Die am meisten verbreitete KSS-Zuführungsvariante stellt die spanflächenseitige Hochdruck-KSS-Zufuhr dar, bei der ein durch Düsen fokussierter KSS-Strahl mit hoher Geschwindigkeit in den im Prozess zwischen Spanunterseite und Spanfläche entstehenden Keil geleitet wird [KOVA95]. Erste Untersuchungen zum Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr wurden bereits in den 50er Jahren von PIGOTT UND COLWELL [PIGO52] durchgeführt.

Seitdem haben mehrere Wissenschaftler das große Potential der Hochdrucktechnologie in der spannenden Fertigung untersucht und dokumentiert [BRAH09, COUR09, SHAR08, EZUG04, EZUG06 KAMI00, MAZU89]. Die positiven Effekte der gezielten Zufuhr des KSS mit hohem Druck können wie folgt zusammengefasst werden:

- Senkung der Zerspantemperatur nahe der Schneidkante und Verringerung der Kontaktzonenreibung im Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung.
- Erzeugung von Spanbruch sowie Gewährleistung sicheren Spanabtransports und reproduzierbarer Werkzeugstandzeiten (Steigerung der Prozesssicherheit).
- Reduzierter Werkzeugverschleiß, längere Werkzeugstandzeiten und somit Möglichkeit zur Steigerung der Schnittgeschwindigkeit und des Zeitspanvolumens (Steigerung der Produktivität).

Trotz der beschriebenen positiven Effekte wird die Hochdruck-KSS-Zufuhr bis heute nur vereinzelt eingesetzt. Derzeit findet die Hochdruck-KSS-Zufuhr zunehmend Anwendung vor allem bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe wie z.B. Titan- und Nickelbasislegierungen in der Luftfahrtindustrie [EZUG06, DAHL04]. Niedrige anwendbare Schnittgeschwindigkeiten, lange Bearbeitungszeiten, hohe Fertigungskosten und die Entstehung von Band- und Wirrspänen stellen die Hauptprobleme bei der Bearbeitung dieser Werkstoffe dar, die sich aus ihrer hohen Warmfestigkeit und Duktilität ergeben [KLOC10b].

Im Bereich der Stahlbearbeitung wird die Hochdrucktechnologie bisher nur wenig genutzt. Wie aus der Literatur und zahlreichen Forschungsprojekten am WZL der RWTH Aachen hervorgeht, zeigt die Hochdruck-KSS-Zufuhr jedoch auch bei der Zerspanung von Stählen bei verschiedenen Werkstoff / Verfahrenskombinationen ein enormes Potential zur signifikanten Leistungssteigerung durch die Verbesserung der Spanbildung und die Reduzierung des Werkzeugverschleißes. Die Hochdruck-KSS-Zufuhr mit den oben genannten Effekten ist vor allem für die Drehbearbeitung folgender Stahlwerkstoffe prädestiniert.

Ferritische Stähle mit einem C-Gehalt $< 0,25\%$. Sie besitzen eine niedrige Festigkeit und Härte bei gleichzeitig hoher Verformungsfähigkeit. Bei der Zerspanung bereiten ferritische Stähle Schwierigkeiten durch ihre Neigung zur Bildung von unerwünschten Band- und Wirrspänen, ihre große Adhäsionsneigung, was Werkstoffaufschmierungen auf dem Werkzeug und die Ausbildung von Aufbauschneiden und Scheinspänen

begünstigt, sowie durch die Entstehung schlechter Oberflächen und verstärkte Gratbildung an den Werkstückkanten. [KLOC08, MB137].

Hochlegierte, austenitische Stahlwerkstoffe. Gegenüber ferritisch-perlitischen oder vergüteten Stählen sind sie deutlich schlechter zerspanbar. Ursache hierfür sind ihre hohe Verformungsfähigkeit und Zähigkeit, ihre Neigung zur Kaltverfestigung und zur Adhäsion mit dem Schneidstoff sowie ihre gegenüber unlegierten Stählen um ca. 1/3 niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Diese verschlechtert die Wärmeabfuhr über den Span und erhöht die Temperaturbelastung der Schneide. Folgen dieser spezifischen Werkstoffeigenschaften sind trotz der vergleichsweise geringen Zugfestigkeit der austenitischen CrNi-Stähle eine hohe thermische Belastung der Werkzeugschneide, ausgeprägter Frei- und/oder Spanflächenverschleiß, Materialverklebungen, Kerbverschleiß, Schneidstoffausbröckelungen, Schneidkantenausbrüche und ungünstige Spanformen, die bei vielen Bearbeitungsaufgaben eine spanende Bearbeitung nur bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten erlauben, zu kurzen Standzeiten und zu ungenügenden Oberflächenqualitäten führen. [GERS04].

Duplex Stähle. Die als Duplex Stähle bezeichneten Stahlwerkstoffe weisen ein zweiphasiges Mischgefüge aus austenitischen und ferritischen Bereichen auf. Bezüglich der mechanischen Kennwerte werden im Vergleich zu austenitischen Stählen deutlich höhere Festigkeiten bei gleichzeitig guter Zähigkeit der Werkstoffe erreicht. Aufgrund der extrem hohen Gehalte an festigkeitssteigernden Legierungselementen gelten austenitisch-ferritische Stähle als äußerst schwer zerspanbar. Die mechanischen Eigenschaften dieser Stähle resultieren im Bearbeitungsprozess in einer hohen Kraft- und Temperaturbelastung der Werkzeuge. Bei der spanenden Bearbeitung ist daher mit der Bildung langer und stabiler Spanformen und mit schnell fortschreitendem Werkzeugverschleiß zu rechnen. [HEST06].

Trotz des Einsatzes von Wendeschneidplatten mit Spanformgeometrien bilden sich beim Drehen ferritischer, austenitischer und austenitisch-ferritischer Stähle aufgrund des kontinuierlichen Schnitts und der hohen Duktilität häufig Band- oder Wirrspäne. Dies gilt vor allem bei kritischen Operationen wie dem Einstechdrehen, beim Drehen von Schultern (Übergang Außenlängsdrehen – Plandrehen) oder beim Schlichtdrehen mit kleinen Spanungsquerschnitten.

Zur Erzeugung brauchbarer Spanformen können die Schnittparameter häufig nicht hinsichtlich maximaler Wirtschaftlichkeit gewählt werden, sondern müssen innerhalb enger Grenzen (Spanbruchdiagramme) eingestellt werden. Bei der Zerspanung

hochlegierter, hochfester Stähle tritt starker Werkzeugverschleiß auf. Bei den genannten Bearbeitungsfällen erscheint der Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr erfolgversprechend, um Spanbruch sicherzustellen und den Werkzeugverschleiß zu verringern bzw. die Schnittparameter bei gleichem oder verringertem WZ-Verschleiß steigern zu können [DAHL04].

2.2 Funktionsprinzip und Wirkmechanismen der HD-KSS-Zufuhr

Die spanflächenseitige Hochdruck-KSS-Zufuhr stellt die am meisten verbreitete Zuführungsvariante dar, bei der der durch Düsen fokussierte KSS-Strahl wie in Abbildung 1 dargestellt mit hoher Geschwindigkeit in den im Drehprozess zwischen Spanunterseite und Spanfläche entstehenden Keil zugeführt wird.

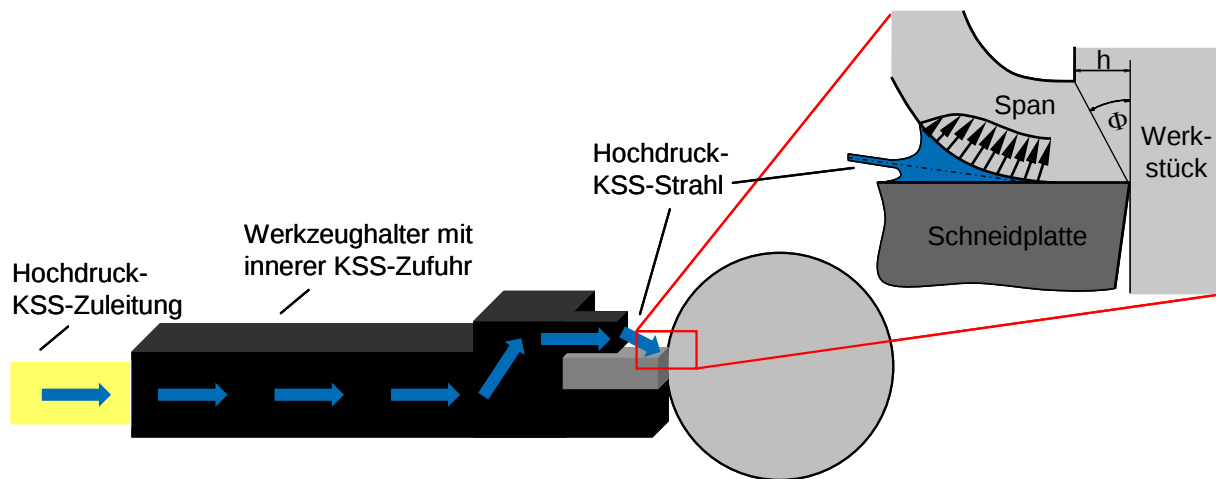


Abbildung 1: Prinzipskizze zur spanflächenseitigen Hochdruck-KSS-Zuführung [SANG13]

Neben der spanflächenseitigen KSS-Zufuhr stellen die freiflächenseitige KSS-Zuführung, die kombinierte span- und freiflächenseitige KSS-Zuführung sowie die KSS-Zuführung durch die Schneidplatte mit KSS-Austritt aus der Spanfläche alternative Zuführvarianten dar, die bislang nur ansatzweise untersucht wurden [SHAR08, SORB06, WERT92, PIGO52]. Die beschriebenen Zuführungsvarianten sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise, die die zugrunde liegenden Wirkmechanismen der Hochdruck-KSS-Zufuhr beschreiben und mit Theorien und Hypothesen zu erklären versuchen. Diese Wirkmechanismen sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt [EZUG06, EZUG04, MACH94, MAZU89, SHAR71, PIGO52]:

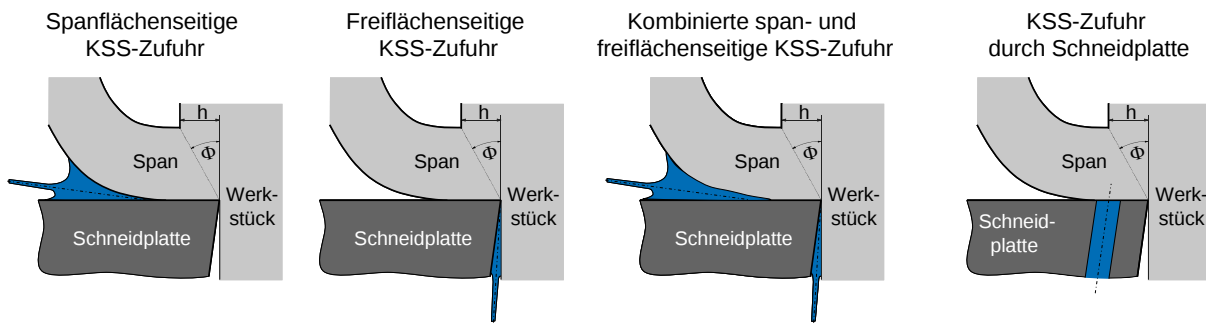


Abbildung 2: KSS-Zuführungsvarianten beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr
[SANG13]

Die gezielte Zuführung des Kühlschmierstoffs in Form eines oder mehrerer fokussierter hochenergetischer Freistrahlen (hoher dynamischer Druck = hohe Geschwindigkeit) und deren Ausrichtung auf die Kontaktfläche zwischen Spanunterseite und Spanfläche bewirkt zunächst ein weites Vordringen des KSS zur Schneidkante. Es bildet sich ein Flüssigkeitskeil aus, der die Zerspanstelle effektiv kühlt und schmiert (thermische und tribologische Strahlwirkung). Des Weiteren übt der fokussierte KSS-Strahl eine hydrodynamische Kraft auf die Spanunterseite aus, die wie ein Spanformer wirkt (mechanische Strahlwirkung). Dadurch wird der Spanaufwärtskrümmungsradius des Spans reduziert und die Kontaktzone zwischen Span und Werkzeugspanfläche je nach Anwendungsfall deutlich reduziert.

Aus den beschriebenen Effekten resultiert eine im Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung deutlich effektivere Kühlung der Spanunterseite und der Spanfläche nahe der Schneidkante im Bereich der Spankontaktzone (sekundäre Scherzone). Darüber hinaus bewirkt die gleichzeitig verbesserte Schmierung im Bereich der Kontaktzone sowie die Verkleinerung der Kontaktzone durch Verringerung des Spankrümmungsradius eine Reduzierung der durch Reibung entstehenden Wärme. Insgesamt kann somit die thermische Schneidstoffbelastung mittels Hochdruck-KSS-Zufuhr gesenkt und der thermomechanisch bedingte Werkzeugverschleiß in vielen Anwendungsfällen reduziert werden, wodurch beste Voraussetzungen zur Steigerung der Produktivität durch die Steigerung der Schnittparameter geschaffen werden. Die beschriebenen Wirkzusammenhänge sind in Abbildung 3 dargestellt.

Viele Forscher berichten von einer Verbesserung der Spanbildung und der Entstehung kurzer Späne durch den Einsatz der spanflächenseitigen Hochdruck-KSS-Zufuhr beim Drehen von duktilen Werkstoffen. Die stärkere Spanumformung (kleiner Spanaufwärtskrümmungsradius) durch die auf den Span durch den Flüssigkeitsstrahl wirkende Kraft sowie die verbesserte Kühlung der Spanunterseite und die veränder-

ten Reibverhältnisse im Bereich der Kontaktzone sind die ausschlaggebenden Faktoren, die zu einer Veränderung des Scherwinkels und der Spanstauchung führen. Damit kommt es zu einer Veränderung der Spanbildung und zur Erzeugung von kontrolliertem Spanbruch durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr [HABA06, CRAF99, MAZU89, RASC81].

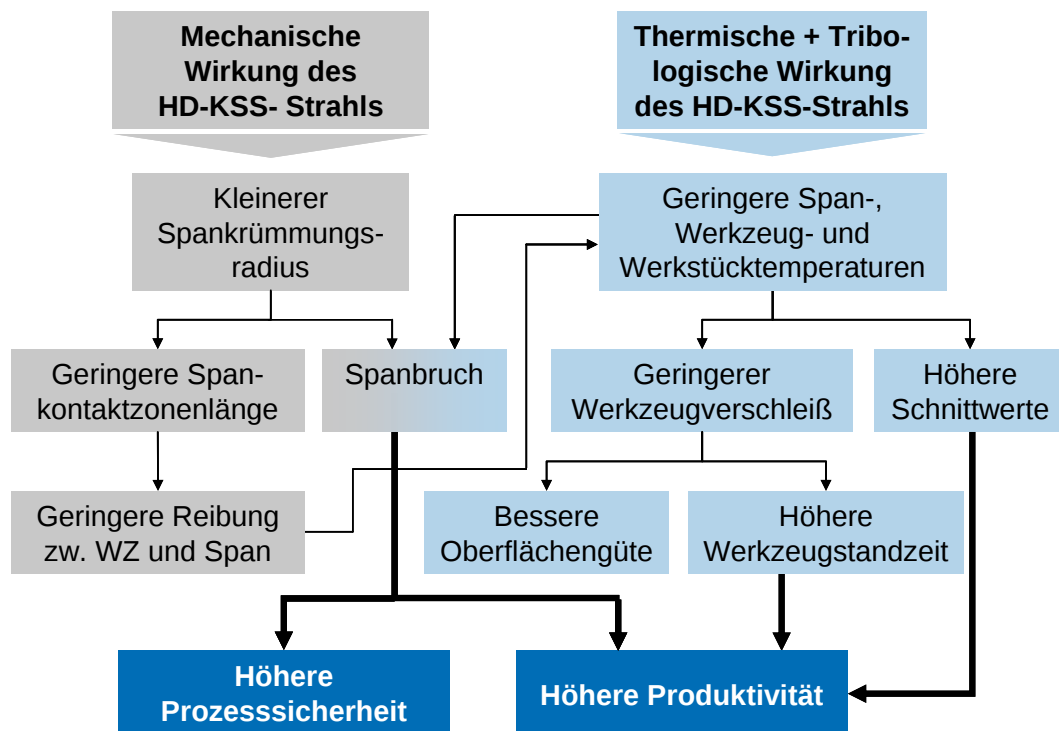


Abbildung 3: Wirkmechanismen der spanflächenseitigen Hochdruck- KSS-Zuführung [SANG13]

Die durch den Hochdruck-KSS-Strahl verbesserte Kühlung nahe der Schneidkante erklären einige Forscher mit der Theorie, dass die hohen Temperaturen an der Zerspanstelle den Kühlschmierstoff verdampfen und eine Dampfbarriere erzeugen, die bei konventioneller KSS-Zufuhr eine effektive Kühlung des Werkzeugs im Bereich der Schneidkante verhindert. Durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr bzw. die Zuführung des KSS in Form von hochenergetischen Freistrahlen kann ihrer Meinung nach die Dampfbarriere durchbrochen oder eingedrückt werden, wodurch der KSS näher an die Schneidkante vordringen kann und so zur verbesserten Werkzeugkühlung beiträgt [SHAR08, KAMI00, EZUG04, DAHL02]. Neben dem KSS-Druck, dem KSS-Volumenstrom (abhängig vom Zufuhrdruck und Düsenauslassdurchmesser) und der KSS-Zuführungsvariante stellen die Strahlausrichtung (Strahlwinkel und Auftreffposition), die Anzahl der KSS-Strahlen, die Düsengeometrie sowie der Abstand

zwischen Strahlaustritt und Strahlauftreffposition die wichtigsten Einstellgrößen bei der Hochdruck-KSS-Zufuhr dar.

3 Ablauf des Forschungsprojekts

Im folgenden Kapitel wird die Zielsetzung, der Lösungsweg und das Konzept zum Projektmanagement sowie die Verwendung der Zuwendungen im Projekt „ProHoKühl“ dargestellt.

3.1 Forschungsziel

Die übergeordnete Zielsetzung des Forschungsprojekts war es, die Produktivität und Prozesssicherheit bei der Drehbearbeitung von Stählen durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik signifikant zu steigern. Darüber hinaus bestand eine weitere Zielsetzung darin, die Effizienz der Hochdruck-KSS-Zufuhr beim Drehen von Stählen vor dem Hintergrund der Energie- und Ressourcenschonung gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik zu verbessern. Ferner wurden die Wechselwirkungen der Hochdrucktechnologie mit der Werkzeugmaschine und deren Peripherie beobachtet und dokumentiert und ein Lastenheft für eine hochdrucktaugliche Werkzeugmaschine erstellt, um damit Maschinenherstellern und Komponentenzulieferern eine Grundlage zur Optimierung und Konstruktion von Maschinen zu geben, die mit einer Hochdruck-KSS-Zufuhr ausgerüstet werden.

Ein wesentliches Ergebnis des durchgeführten Forschungsprojekts sollte ein verbessertes Verständnis der Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr bei der Drehbearbeitung von langspanenden und / oder hochlegierten Stählen, sowie des Einflusses der Einstellgrößen KSS-Druck, KSS-Volumenstrom und KSS-Zuführungsvariante in Abhängigkeit der Schnittparameter und der Verfahrensvariante sein. Hierbei bestand die zentrale Zielsetzung darin, mit möglichst geringem KSS-Druck und -Volumenstrom (= geringe erforderliche Pumpenleistung) bzw. der optimalen Abstimmung von KSS-Druck, KSS-Volumenstrom, KSS-Zuführungsvariante, Schnittparameter und Werkzeugauslegung mit minimaler Pumpenleistung signifikante Produktivitäts- und Prozesssicherheitsgewinne beim Drehen schwer zerspanbarer Stähle zu erzielen.

Dabei sollte auch geklärt werden, wie sich vor allem bei der spanflächenseitigen Hochdruck-KSS-Zuführung unterschiedliche Spanformgeometrien auf die Strahlausbildung und somit die Prozessleistungsfähigkeit auswirken und Gestaltungshinweise für eine Hochdruck-geeignete Spanformgeometrie abgeleitet und aufgezeigt werden. Unterstützt wurden diese Forschungsarbeiten von den Werkzeugherstellern im pro-

jektbegleitenden Ausschuss (PA), die für die Zerspanversuche Schneidplatten mit modifizierten Spanformgeometrien bzw. „Strahlleitgeometrien“ zur Verfügung stellten.

Darüber hinaus wurde angestrebt, die leistungsfähigste KSS-Zuführungsvariante (span- oder freiflächenseitige KSS-Zuführung, kombinierte span- und freiflächenseitige KSS-Zuführung) für die Drehbearbeitung von Stahl herauszuarbeiten. Insgesamt wurde anvisiert, durch die verbesserte Auslegung des Gesamtsystems zur Hochdruck-KSS-Zufuhr die Fertigungskosten bei der Drehbearbeitung von Stählen zu senken, zum Einen durch die Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik, zum Anderen durch die Steigerung der Effizienz der Hochdruck-KSS-Zufuhr, wodurch geringere Energiekosten zum Betrieb der Hochdruckpumpe entstehen.

Ferner sollte ein besseres Verständnis bezüglich der Wechselwirkungen der Hochdruck-KSS-Zufuhr mit der Werkzeugmaschine und deren Peripherie geschaffen werden. Die Auswirkungen der Hochdruck-KSS-Zufuhr auf die Werkzeugmaschine wurden versuchsbegleitend beobachtet. Basierend auf diesen Beobachtungen wurden Maßnahmen zur Optimierung bestehender Maschinen- und Werkzeugkonzepte abgeleitet und eine Liste mit Anforderungen an eine hochdrucktaugliche Werkzeugmaschine erstellt.

Die Maschinenhersteller und Komponentenzulieferer im PA stellten im Rahmen des Forschungsprojektes Alternativen zu bisherigen Lösungen z.B. zur Maschinenabdichtung zur Verfügung, die vom WZL im Rahmen der Zerspanversuche auf der am WZL vorhandenen Maschine grundlegend getestet wurden.

3.2 Lösungsweg

Das Forschungsprojekt „ProHoKühl“ basierte auf zwei Säulen. Die Projektstruktur ist in Abbildung 4 dargestellt.

Zum Einen wurden im Rahmen zerspantechnischer F&E-Schwerpunkte Untersuchungen durchgeführt, um das Potential der Hochdruck-KSS-Zufuhr bei der Drehbearbeitung von Stählen zu ermitteln und zu quantifizieren. Zur wirtschaftlichen Nutzung der Hochdrucktechnologie wurde deshalb der Einfluss des KSS-Drucks (max. 350 bar) und KSS-Volumenstroms (max. 65 l/min) grundlegend erforscht und unabhängig voneinander untersucht. Die Zielsetzung hierbei war es, ein optimales Verhältnis von KSS-Druck und KSS-Volumenstrom in Abhängigkeit der Schnittparameter und der Verfahrensvariante vor dem Hintergrund der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit zu ermitteln. Ebenso wurde der Einfluss des KSS-Mediums (Emulsion versus

Öl) auf die WZ-Leistungsfähigkeit, den Zerspanprozess im Allgemeinen sowie die Werkzeugmaschine bei der Zuführung des Mediums mit hohem Druck untersucht.



Abbildung 4: Struktur des Projekts „ProHoKühl“

Zum Anderen wurden im Rahmen werkzeugseitiger F&E-Schwerpunkte verschiedene Hochdruck-Werkzeugkonzepte hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Effizienz analysiert. Neben der Variation der KSS-Zuführungsvariante wurde bei spanflächen-seitiger KSS-Zuführung der Einfluss der Spanformgeometrie auf die Strahlausbildung und die Effizienz der Hochdruck-KSS-Zufuhr erforscht. In diesem Zusammenhang wurden in Zusammenarbeit mit den im PA mitwirkenden Werkzeugherstellern Schneidplatten mit angepassten Spanformgeometrien bzw. „Strahlleitgeometrien“ hergestellt und in den Zerspanversuchen im Projekt eingesetzt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit analysiert.

Neben den zerspantechnischen und werkzeugseitigen F&E-Schwerpunkten wurden die Wechselwirkungen der Hochdruck-KSS-Zufuhr mit der Drehmaschine und deren Peripherie versuchsbegleitend beobachtet und dokumentiert. Die im Projekt mitwirkenden Maschinen- und Komponentenzulieferer konnten, basierend auf diesen Beobachtungen Lösungsansätze z.B. zur Maschinenabdichtung oder Aerosolabsaugung zur Verfügung zu stellen, die im Rahmen grundlegender Zerspanversuche auf der am WZL vorhandenen Drehmaschine getestet wurden. In Abstimmung mit den Firmen im Projekt wurde der Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr beim Außenlängsdrehen mit C-Wendeschneidplattegeometrien (z.B. CNMG120408) beim Schrappen und Schlichten sowie beim radialen Einstechdrehen (Stechen von Nuten, Nutbreite 6

mm, Nuttiefe 10 mm) untersucht. Während das Außenlängsdrehen ein klassisches Drehverfahren zur Erzeugung von Außenkonturen an rotationssymmetrischen Bauteilen ist und deshalb vielfach eingesetzt wird, dient das radiale Einstechdrehen zur Erzeugung tiefer Nuten an rotationssymmetrischen Bauteilen. Das radiale Einstechdrehen stellt vor allem bei der Bearbeitung langspanender Werkstoffe einen kritischen Prozess dar. Beim Einstechdrehen besteht das Problem, dass der aus der Nut abfließende Span das Werkzeug nach oben quasi „abdichtet“. Wird ähnlich wie beim Außenlängsdrehen der Kühlschmierstoff von oben zugeführt, wird in erster Linie die Spanoberseite gekühlt. Eine ausreichende Benetzung des Werkzeuges mit Kühlschmierstoff ist unter diesen Bedingungen nicht mehr gegeben. Darüber hinaus verklemmen lange Bandspäne häufig zwischen den Nutflanken und führen zu starkem Werkzeugverschleiß bis hin zum Werkzeugbruch.

Die Zerspanuntersuchungen wurden in Abstimmung mit dem PA exemplarisch an zwei verschiedenen Stahlsorten durchgeführt. Zum Einen wurde der Vergütungsstahl 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) zerspant. Des Weiteren wurde ein hochlegierter, austenitischer Stahlwerkstoff (X5CrNi18-10) eingesetzt, der neben der schlechten Spanbildung aufgrund seiner physikalisch-mechanischen Eigenschaften ebenfalls starken Werkzeugverschleiß verursacht. Austenitische Stahlwerkstoffe sind zudem die in der Industrie am meisten verwendeten rostfreien Stähle und deren wirtschaftliche Zerspanung ist daher von großer Bedeutung [KLOC08]. Nach Meinung der Firmen im PA bestand für diese Werkstoffe der größte Bedarf und die größte Dringlichkeit zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit. Als Versuchsbauteile wurden Wellen verwendet.

Die eingesetzten Hochdruck-Werkzeughalter wurden vor dem Beginn der Zerspanversuche hinsichtlich des durchgesetzten KSS-Volumenstroms in Abhängigkeit des Zuführdrucks vermessen. Der Werkzeugverschleiß wurde während der Versuche unter dem Digitalmikroskop gemessen und dokumentiert und ausgewählte Schneidplatten anschließend anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen analysiert, um die Verschleißursachen zu untersuchen. Neben dem Werkzeugverschleiß diente die Werkzeugtemperatur, die entstehenden Spanformen, die Oberflächenausbildung sowie die Zerspankraft und die spezifische Schneidkantenbelastung (Verhältnis von Schnittkraft und Spankontaktzonenfläche) als weitere Bewertungsgrößen. Sofern nicht anders erwähnt, wurde bei den Zerspanversuchen die in einem Vorgängerprojekt zusammen mit der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH entwickelte hochdruckstabile Emulsion als Kühlschmierstoff eingesetzt (Einsatzkonzentration ca. 6%), die auf dem Markt mittlerweile unter dem Namen Fuchs Ecocool TN 2525 HP erhältlich ist.

3.3 Konzept zum Projektmanagement

Um das Projektziel zu erreichen, wurde das Projekt in 6 Arbeitspakete gegliedert, die chronologisch von 1 bis 6 nacheinander bearbeitet wurden. Die Dauer der einzelnen Arbeitspakete und der Personaleinsatz kann dem Zeitplan mit Angaben zum Personaleinsatz in Abbildung 5 entnommen werden.

Der Personaleinsatz (wissenschaftlicher Mitarbeiter, Techniker, Metallograph und studentische Hilfskraft) entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war zur Erlangung der Projektziele notwendig und angemessen.

		Zeitraum (24 Monate, 01.08.2011 - 31.7.2013)																							
Arbeitsschritte		2011					2012												2013						
AP	Bezeichnung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	Erstellung Pflichtenheft, Kick-Off																								
1	Erforschung und Analyse des Leistungspotentials der Hochdruck-KSS-Zufuhr (spanflächenseitige Zuführung) beim Drehen von Stählen im Vergleich zur konv. Überflutungskühlung																								
2	Erforschung und Analyse des Einflusses der Spanformgeometrie																								
3	Erforschung und Analyse des Einflusses der KSS-Zuführungsvariante																								
4	Erforschung und Analyse des Einflusses von KSS-Druck versus KSS-Volumenstrom auf die Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr																								
5	Untersuchung des Einflusses des KSS Mediums: Emulsion versus Öl																								
6	Beobachtung und Erfassung der Auswirkungen der Hochdruck-KSS-Zufuhr auf die Werkzeugmaschine und Peripherie																								
7	Dokumentation und Abschlussbericht																								
	Treffen des projektbegleitenden Ausschusses																								
Personaleinsatz																									
	wissenschaftlicher Mitarbeiter	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Techniker	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,0	0,0
	Metallograph				0,5			0,5				0,5				1,0				0,5		1,0			
	studentische Hilfskräfte 19h/Woche	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Abbildung 5: Konzept zum Projektmanagement und Personaleinsatz

Die Temperaturmessungen im Arbeitspaket 4 „Erforschung und Analyse des Einflusses von KSS-Druck vs. -Volumenstrom auf die Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr“ konnten nur mit den aus Projektmitteln in Anspruch genommene Leistungen der Firma C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH durchgeführt werden, die mehrere Erodierbohrungen in Hartmetall-Wendeschneidplatten einbrachte. Dieses war somit für die erfolgreiche Bearbeitung des Projekts unerlässlich.

4 Forschungsergebnisse

Das Forschungsprojekt begann im August 2011 und endete Ende Juli 2013. Zur Erreichung der beschriebenen Ziele erfolgte eine Aufteilung in 6 Arbeitspakete. Die Forschungsergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen (AP) werden in den folgenden Unterkapiteln im Detail erläutert.

Zunächst wurde ein Kick-Off Meeting vorbereitet und durchgeführt. Dieses fand am 14. September 2011 am WZL der RWTH Aachen unter Beteiligung von 11 von 12 im Projekt beteiligten Industriepartnern statt. In diesem Arbeitspaket (AP) 0 wurden die Vorgehensweise zur Projektdurchführung zunächst detailliert und relevante Schritte mit den Industriepartnern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) abgestimmt. Dabei stand die Definition von Werkzeugen, Schneidstoffen, Werkstoffen sowie Startparametern für die in den folgenden AP durchzuführenden Zerspanversuche im Vordergrund.

Wegen des Einsatzes der Hochdruck-KSS-Zufuhr wurden speziell angepasste Werkzeughalter mit innerer KSS-Zufuhr definiert und von den Werkzeugherstellern angefertigt. Werkstoffe für die folgenden Zerspanversuche wurden vom WZL und vom Projektpartner Schumag AG kostenfrei zur Verfügung gestellt.



Monforts RNC 400 plus:

- Spindelantriebsleistung 30 kW
- Max. Spindeldrehzahl 4000 min⁻¹
- Max. Drehdurchmesser mit Hochdruckhaltern: 300 mm
- Max. Drehdurchmesser mit Hochdruckhaltern und Schnittkraftmesser: 260 mm



ChipBLASTER CV16-5000 (WZL)

- Maximaler Druck: $p_{\max} = 345$ bar (regelbar)
- Maximaler Volumenstrom: $Q_{\max} = 60$ l/min
- Integrierte Druck- und Volumenstrommessung
- KSS-Tankvolumen: ca. 800 l
- Fuchs Ecocool TN 2525 HP, ca. 6%

Abbildung 6: Werkzeugmaschine und externes Hochdruck-Aggregat

Alle Versuche wurden auf einer Schrägbettdrehmaschine vom Typ Monforts RNC 400plus in Kombination mit einem Hochdruckaggregat ChipBLASTER CV16-5000 (maximaler KSS-Druck $p_{\max} = 345$ bar, maximaler Volumenstrom $Q_{\max} = 60$ l/min)

durchgeführt. Bei allen Zerspanversuchen wurde der Kühlschmierstoff Fuchs Ecocool TN2525HP (Emulsion) in 6%-iger Konzentration eingesetzt. Die Abbildung 6 zeigt die Werkzeugmaschine und das externe Hochdruckaggregat.

4.1 Leistungspotenzial der HD-KSS-Zufuhr bei der Stahlbearbeitung

Der erste Projektabschnitt hatte die Zielsetzung das Leistungspotenzial der Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr (HD-KSS-Zufuhr) bei der Stahlbearbeitung zu quantifizieren. Hierzu wurde die hydraulische Strahlleistung bis zu einem Druck von $p = 300$ bar und einem Volumenstrom von $Q = 42$ l/min variiert. Die Bewertungskriterien waren die Werkzeugstandzeit, Spanformen, Oberflächengüte und Zerspankräfte im direkten Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung (KÜK). Als Werkstoffe kamen ein rostfreier Stahl (X5CrNi18-10) und ein schwefelarmer Vergütungsstahl im vergüteten Zustand (42CrMo4+QT, $S < 0,01$ %) zum Einsatz. In Abbildung 7 sind die Gefügeschliffe mit Angaben zu den mechanischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe dargestellt. Die Folgen eines niedrigen Schwefelgehalts sind vor allem Probleme hinsichtlich des Spanbruchs bei der mechanischen Bearbeitung und zudem ein deutlich stärkerer Werkzeugverschleiß.

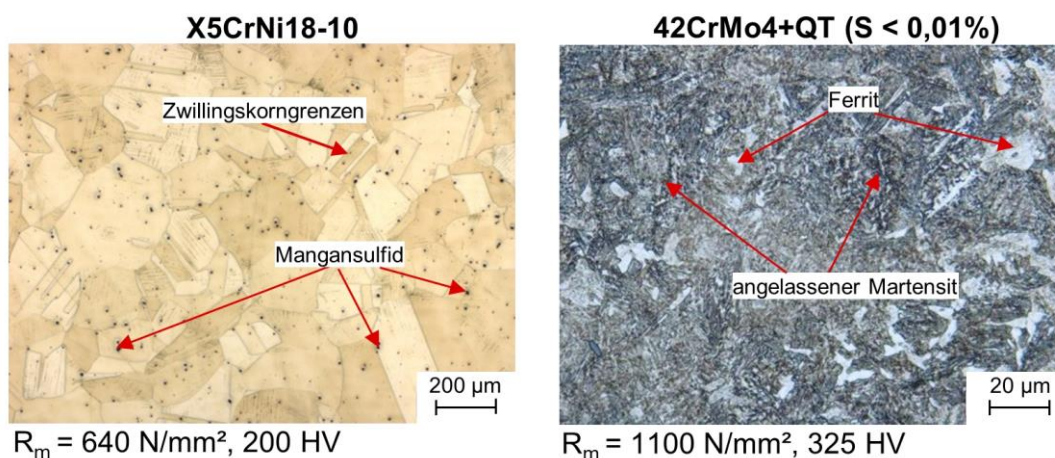


Abbildung 7: Materialeigenschaften von X5CrNi18-10 und 42CrMo4+QT

Der Werkzeughalter mit innerer HD-KSS-Zufuhr wurde vom Projektpartner Iscar Germany GmbH zur Verfügung gestellt, der je nach Werkstoff mit verschiedenen CVD-beschichteten Hartmetallschneiden bestückt wurde. Der KSS wurde gezielt in Form eines fokussierten Freistrahls in den Keil zwischen Spanfläche und Spanunterseite zugeführt (spanflächenseitige HD-KSS-Zuführung). Eine am Werkzeug-Halter vorhanden zweite KSS-Auslassdüse zur freiflächenseitigen KSS-Zufuhr wurde in diesem Arbeitspaket zunächst verschlossen. Als Verfahren kam das Außenlängsdrehen (Schruppen und Schlichten) sowie das radiale Einstechdrehen mit beschichteten

Hartmetallschneidplatten zum Einsatz, um das Potenzial der HD-KSS-Zufuhr für die verschiedenen Verfahrens- und Werkstoffvarianten zu analysieren. Die Schnittgeschwindigkeit wurde in zwei Stufen variiert (Empfehlung vom PA und ein erhöhter Wert).

Beim Außenlängsdrehen wurde in Abstimmung mit dem PA die Schnitttiefe beim Schrappen auf $a_p = 2 \text{ mm}$ und beim Schlichten auf $a_p = 0,4 \text{ mm}$ festgelegt. Zum Einsatz kamen Schneidplatten mit der Geometrie CNMG120408. Zum radialen Einstechdrehen wurden Stechplatten mit $b = 6 \text{ mm}$ Stechbreite verwendet; die Stechtiefe betrug $t = 10 \text{ mm}$. Parallel zu den Zerspanversuchen sind die Wechselwirkungen der HD-KSS-Zufuhr mit der Werkzeugmaschine beobachtet und dokumentiert worden. Hierzu wurden von den Firmen Monforts und Kabelschlepp kritische Bereiche (sogenannte Kontrollpunkte) innerhalb der Maschine definiert.

Erzielte Ergebnisse im Arbeitspaket 1

Bei den experimentellen Untersuchungen an den ausgewählten Stahlwerkstoffen konnte ein positiver Effekt der HD-KSS-Zufuhr nachgewiesen werden. In der Abbildung 8 ist die beim Außenlängsdrehen erreichte Werkzeugstandzeit in Abhängigkeit der hydraulischen Strahlleistung (Druck und Volumenstrom) und in Referenz zur konventionellen Überflutungskühlung (KÜK) beim Außenlängsschruppdrehen der beiden Stahllegierungen (rostfreier Stahl X5CrNi18-10 und Vergütungsstahl 42CrMo4) für verschiedene Schnittgeschwindigkeiten aufgetragen.

Während beim Außenlängs-Schruppdrehen des Werkstoffs X5CrNi18-10 Standzeitsteigerungen in der Größenordnung um 60 % durch den Einsatz der HD-KSS-Zufuhr zu verzeichnen waren und hierdurch vor allem die Verschleißkerbenbildung deutlich reduziert wurde, konnte die Standzeit bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls je nach Schnittgeschwindigkeit sogar um den Faktor 2,6–4,4 gesteigert werden. Bei der Betrachtung der Standzeitdiagramme fällt auf, dass unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit ein kontinuierlicher Anstieg der Standzeit mit zunehmender hydraulischer Strahlleistung beim Drehen von 42CrMo4+QT zu beobachten war, während sich beim rostfreien Stahl ab etwa 150 bar Zufuhrdruck keine weiteren Verbesserungen eingestellt haben. Letzteres Ergebnis steht im Einklang mit früheren Ergebnissen aus den Projekten zur Titanbearbeitung am WZL der RWTH Aachen.

Bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls trat schwerpunktmäßig Abrasion als Verschleißmechanismus in den Vordergrund. Es entstand ein sehr gleichmäßig ausgebildeter Freiflächenverschleiß mit partiell anhaftendem Werkstoff. Auf den Spanflächen waren vor allem am hinteren Rand der Kontaktzonen ebenfalls Materialauf-

schmierungen zu beobachten, die häufig vorgelagert waren von kleinen Bereichen, in denen die Al_2O_3 -Deckschicht bis auf die darunterliegende TiCN-Schicht abgetragen war.

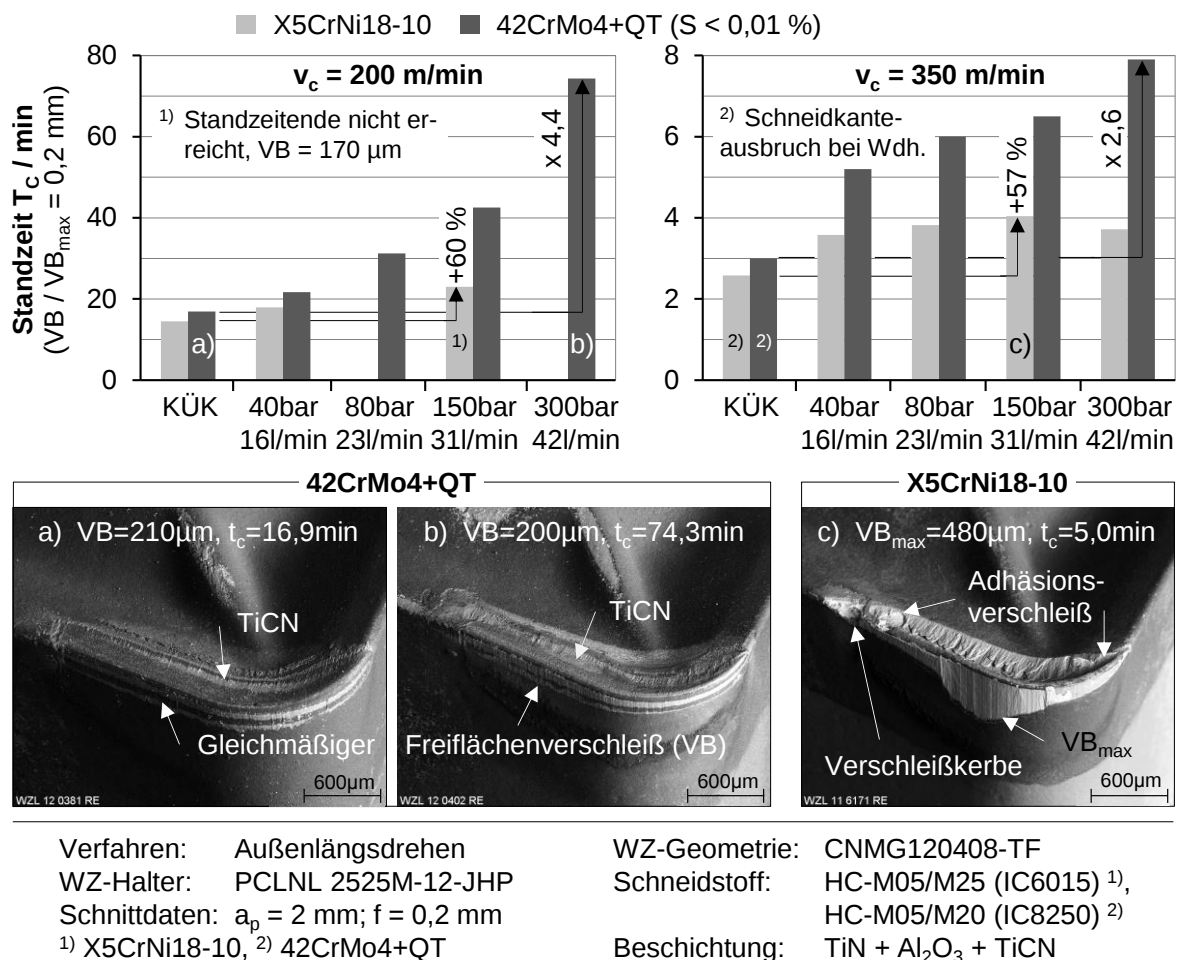


Abbildung 8: Leistungspotenzial der HD-KSS-Zufuhr bei der Stahlbearbeitung [SANG13]

Im Gegensatz dazu entstanden beim Drehen des rostfreien Stahls zusätzlich zum abrasiven vor allem ausgeprägter adhäsiver Verschleiß an den Span- und Freiflächen, zahlreiche Materialverklebungen sowie Mikrorisse und es kam zur Bildung einer Verschleißkerbe. Die Verschleißursachen liegen vor allem in der gegenüber unlegierten Stählen um ca. 1/3 geringeren Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Temperaturbelastung des Schneidkeils ansteigt [KLOC08a]. Die Verschleißmechanismen und Formen waren bei beiden Werkstoffen unabhängig von der Art der KSS-Zuführstrategie, deren Ausprägung und Größe unterlagen jedoch einer Veränderung durch den Wechsel von KÜK zur HD-KSS-Zufuhr sowie durch die Variation des KSS-Zuführdrucks. An dieser Stelle sei eine mangelnde Prozesssicherheit bei der Bearbeitung beider Stahlwerkstoffe mit der erhöhten Schnittgeschwindigkeit von

$v_c = 350$ m/min unter KÜK erwähnt, da häufig starke Schneidkantenausbrüche beobachtet wurden, die auf eine thermische und mechanische Überlastung der Werkzeuge hingedeutet haben.

In allen Versuchen mit HD-KSS-Zufuhr entstanden kurz gebrochene Späne. Der negative Einfluss des geringen Schwefelanteils im Vergütungsstahl auf den Spanbruch konnte somit durch den Einsatz der HD-KSS-Zufuhr kompensiert werden. Durch die gerichtete KSS-Zufuhr wurde bei etwa 40 bar Zufuhrdruck ($Q = 16$ l/min) ein Übergang von der Bildung ungebrochener Schrägwendelspäne hin zu kurz gebrochenen Kommaspänen beobachtet.

Hinsichtlich der Zerspankräfte konnte keine signifikante und systematische Beeinflussung durch die Hochdrucktechnologie bzw. durch die Höhe des KSS-Drucks festgestellt werden kann. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit Beobachtungen, die bereits bei der Bearbeitung von Superlegierungen mit HD-KSS-Zufuhr am WZL der RWTH Aachen gemacht wurden [SANG13]. Es wird vermutet, dass KSS-Zufuhrdrücke bis 300 bar nicht ausreichen, um in die Spankontaktzone einzudringen und dort die Reib- und Zerspanmechanismen grundlegend zu ändern. Dennoch wurde festgestellt, dass sich die Spankontaktzonenlänge bei beiden bearbeiteten Werkstoffen unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit mit steigendem Druck um bis zu 30 Prozent verkürzt. Dies wurde auf die stärkere Spankrümmung infolge der auf die Spanunterseite einwirkenden Strahlkraft zurückgeführt. Bei gleichbleibender Schnittkraft folgt hieraus eine Erhöhung der gemittelten spezifischen Schneidkantenbelastung (gemittelter Schnittdruck) um bis zu 30 Prozent, Abbildung 9. Dieses Erkenntnis muss bei der Auslegung der Werkzeugmikrogeometrie berücksichtigt werden.

Bei der Schlichtbearbeitung mit geringen Spanungsquerschnitten kommen häufig Probleme hinsichtlich der Spankontrolle auf. Die entstehenden Wirrspäne wickeln sich um Bauteil und Werkzeug und können zu Beschädigungen an der Werkstückoberfläche, dem Werkzeug und der Maschine führen. Daraus resultieren häufig lange Maschinenstillstandzeiten zum manuellen Entfernen von Spannestern und umwickelten Spänen. Die Erzeugung von kurz gebrochenen Spänen und der sichere Spanabtransport stellen eine wichtige Voraussetzung zur Steigerung der Prozesssicherheit und somit zur Automatisierung von Bearbeitungsprozessen dar.

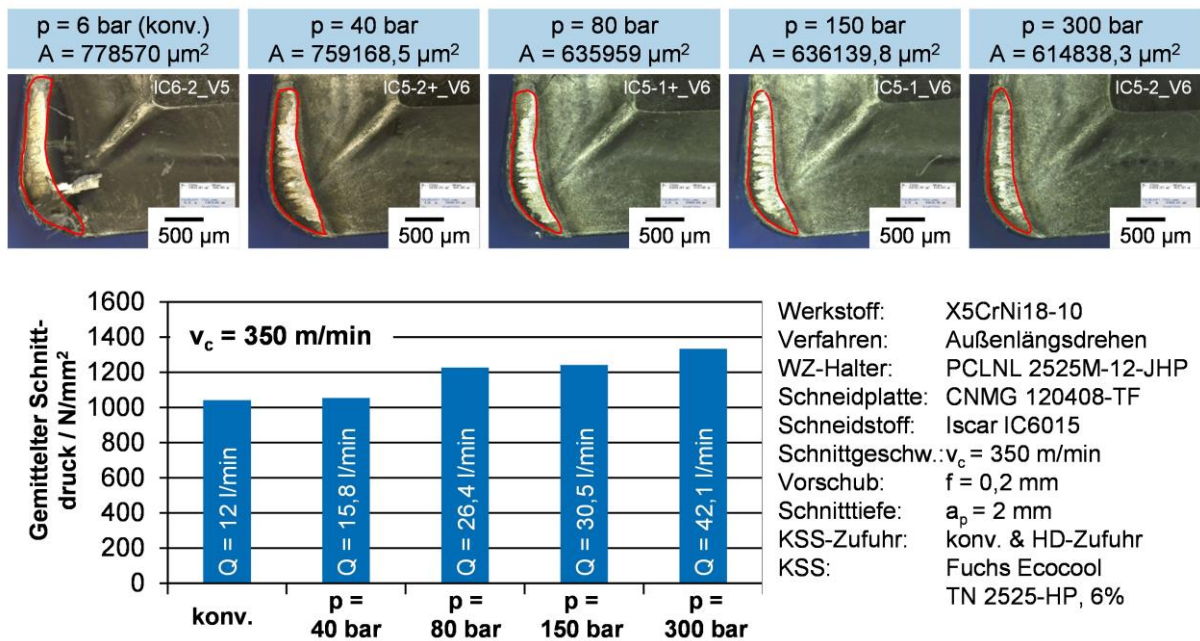


Abbildung 9: Gemittelter Schnittdruck beim Schruppen von X5CrNi18-10

In den Untersuchungen beim Schlichtdrehen des Stahlwerkstoffs 42CrMo4+QT hat sich die HD-KSS-Zufuhr bereits mit geringen Zuführdrücken als eine sichere Alternative zur Gewährleistung von definiertem Spanbruch und Spanabtransport dargestellt (vgl. Abbildung 10).

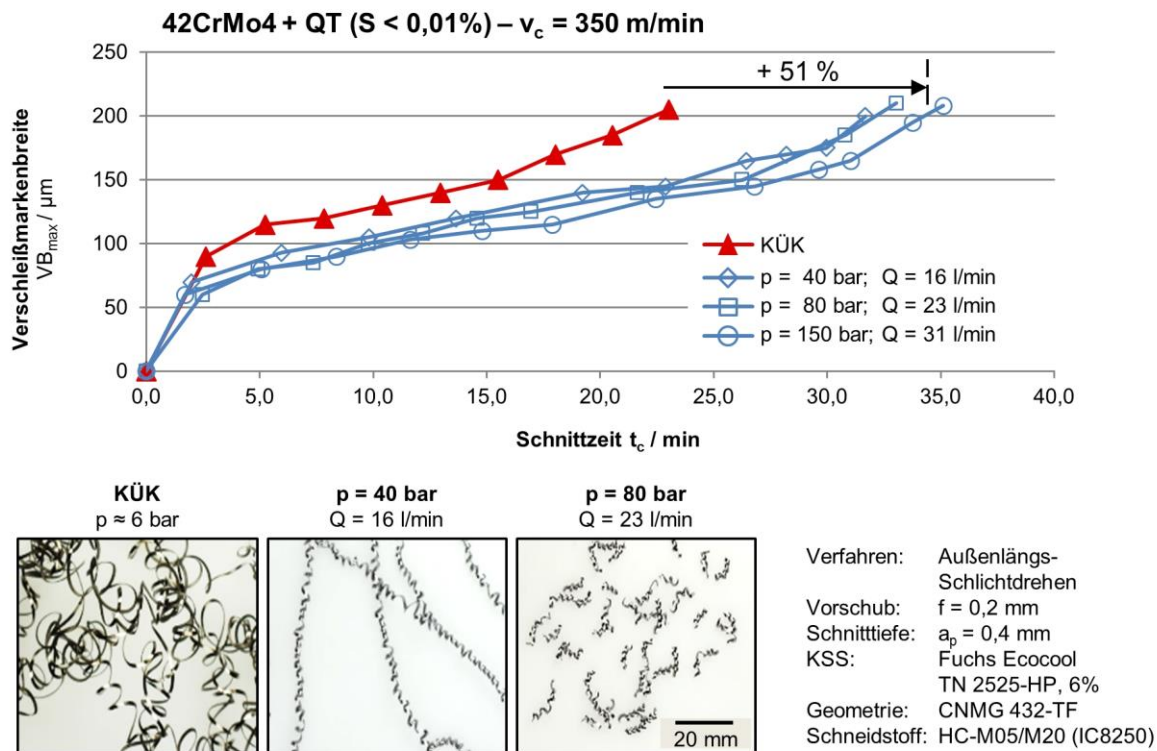


Abbildung 10: Verschleißkurven und Spanformen beim Schlichten von 42CrMo4

Während die zuvor genannten Probleme hinsichtlich der Spanbildung beim Schlichtdrehen unabhängig vom zerspanten Werkstoff (X5CrNi18-10 oder 42CrMo4), der Schnittgeschwindigkeit und der Werkzeuggeometrie beim Einsatz der KÜK auftraten, konnten die Späne bei Zuführdrücken im Bereich von $p = 40$ bis 80 bar stets sicher gebrochen werden. Neben der Verbesserung des Spanbruchs konnte bei der Schlichtbearbeitung des Vergütungsstahls auch eine Standzeitsteigerung von mehr als 50 Prozent durch den Hochdruckeinsatz erzielt werden. Hierbei fällt auf, dass bereits ein Zuführdruck von $p = 40$ bar zu signifikanten Verbesserungen führte. Aus der Steigerung des Druckes auf 80 und 150 bar resultieren nur noch marginale Standzeitverbesserungen.

Grundsätzlich sollte ein energieeffizienter Einsatz der HD-KSS-Zufuhr angestrebt werden, um die erforderliche Pumpenleistung und damit den Energieverbrauch zu minimieren. Bei der Einstellung von KSS-Druck und -Volumenstrom wird daher aufbauend auf diesen Erkenntnissen empfohlen, nur die zur Standzeitsteigerung und Erzeugung von definiertem Spanbruch erforderliche hydraulische Strahlleistung einzusetzen. Allerdings lässt sich die minimal erforderliche Strahlleistung nur schwer vorhersagen. Allgemeingültige Angaben hierzu existieren nicht. Die optimalen Parameter hängen sehr stark vom zerspanten Werkstoff, dem Spanungsquerschnitt, der Werkzeuggeometrie und Strahlausrichtung sowie vom Schneidstoff ab. Auf Basis von Literaturangaben und bereits zuvor durchgeführten Untersuchungen kann jedoch gefolgert werden, dass mit Zuführdrücken in der Größenordnung um 100 bar und Volumenströmen von 10 bis 25 l/min bereits beträchtliche Leistungsfortschritte erzielt werden können.

Beim Außenlängsdrehen konnte anhand der ermittelten Oberflächenkennwerte R_a und R_z keine signifikante Beeinflussung der Oberflächenqualitäten durch die HD-KSS-Zufuhr festgestellt werden. Die Zuführung des KSS mit hohem Druck führt dazu, dass die kurz gebrochenen Späne mit einer hohen kinetischen Energie aus der Zerspanstelle abgeführt werden. Bei den durchgeführten Außenlängsdrehbearbeitungen sind in erster Linie die Maschinenkomponenten im Arbeitsraum einem massiven „Spänebeschuss“ ausgesetzt.

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass die HD-KSS-Zufuhr bei der Außenlängsdrehbearbeitung von Stahllegierungen ein großes Potenzial aufweist zur Steigerung der Werkzeugstandzeit bzw. der Produktivität durch die mögliche Erhöhung der Schnittparameter. Darüber hinaus leistet sie einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Prozesssicherheit durch die Erzeugung von definiertem Spanbruch und sicherem Spanabtransport.

4.2 Einfluss der Spanformgeometrie

Bei der Drehbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe mit Hartmetallwerkzeugen kann trotz des Einsatzes von Wendeschneidplatten mit Spanformgeometrien aufgrund der großen Duktilität der Werkstoffe häufig kein definierter Spanbruch erzielt werden. Dieses Problem tritt vor allem beim Schlichten mit geringen Spanungsquerschnitten oder beim Übergang von Außenlängs- zu Plandrehoperationen in den Vordergrund. Der Einsatz einer spanflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr als Ergänzung zur Spanformgeometrie begünstigt in der Regel den Spanbruch, jedoch wurde im Rahmen der eigenen Vorarbeiten zu diesem Projekt festgestellt, dass konventionelle Spanformgeometrien den HD-KSS-Strahl in seiner Ausbildung oft negativ beeinflussen.

Wie in Abbildung 11 dargestellt, setzt der fokussierte KSS-Strahl bei der spanflächenseitigen Zuführung je nach Düsenanordnung und Strahlausrichtung (durch HD-Werkzeughalter vorgegeben) häufig an einer Erhebung des Spanformelements auf der Spanfläche auf, weit entfernt vom gewählten Strahlaufftreffpunkt nahe der Schneidkante. Dadurch wird der fokussierte KSS-Freistrahler in seiner Ausbildung gestört. Er erfährt eine Ablenkung und wird zudem stark aufgefächert, wodurch er nicht mehr gebündelt und mit maximaler Energiedichte unter dem Span bis nah an die Schneidkante vordringen kann. Diesem negativen Effekt wird im industriellen Einsatz durch die Erhöhung des KSS-Zuführdrucks und -Volumenstroms entgegengewirkt, wobei diese Maßnahme im Kontext der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit kontraproduktiv ist.

Der beschriebene Effekt tritt wegen mangelnder Kompatibilität umso stärker auf, wenn Wendeschneidplatten mit Spanformgeometrien und HD-Werkzeughalter unterschiedlicher Hersteller miteinander kombiniert werden. Die Verwendung glatter Schneidplatten beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr hat sich bei vielen Bearbeitungsaufgaben, bei denen unter konventioneller Überflutungskühlung immer mit Spanformgeometrien gearbeitet wird, als Schritt in die richtige Richtung erwiesen. Die Visualisierung der Strahlaufftreffpunkte wurde unter Abwesenheit der Spanabnahme durchgeführt. Dazu wurden die Scheidenecken mit einem speziellen Goldlack beschichtet, der nach ausreichender Trocknungszeit dem HD-KSS-Strahl für 30 Sekunden bei einem KSS-Zuführdruck von 150 bar ausgesetzt wurde. Der dadurch erzielte Lackabtrag zeigt die Auftreffpunkte des Strahlkerns.

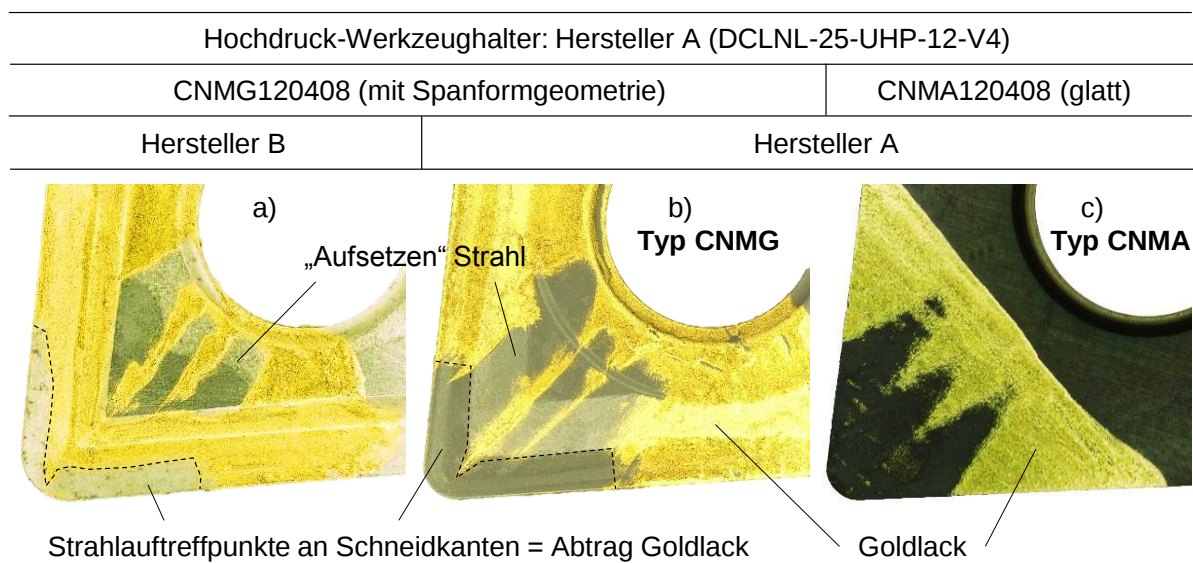


Abbildung 11: Strahlauffreffpunkte beim Einsatz einer Schneidplatte mit Spanformgeometrie (a und b) im Vergleich zur Schneidplatte mit glatter Spanfläche (c) [SANG13]

In Zusammenhang mit dem effizienten Einsatz der HD-KSS-Zufuhr kommt der Abstimmung zwischen HD-Werkzeughalter (Strahlausrichtung) und der eingesetzten Schneidplatte mit besonderem Augenmerk auf die Spanformgeometrie eine zentrale Bedeutung zu, um das Gesamtsystem der HD-KSS-Zufuhr weiter zu optimieren. Da die Untersuchungen darauf hindeuten, dass die Spanformung bis hin zum Spanbruch beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr in erster Linie von dem KSS-Freistrahls (hydraulischer Spanformer) und nur zu einem geringen Anteil von der Spanformgeometrie hervorgerufen werden, wurde das Ziel verfolgt, die klassische Spanformgeometrie in eine muldenförmige „Strahlleitgeometrie“ umzuwandeln. Unter Berücksichtigung der vom Werkzeughalter vorgegebenen Strahlausrichtung soll diese eine frühe Kollision des HD-KSS-Strahls mit der Spanfläche verhindern und stattdessen eine optimale Leitung des gebündelten KSS-Freistrahls in Richtung der Spankontaktzone gewährleisten.

Aus diesem Grund galt es im zweiten Arbeitspaket zu analysieren, ob durch eine solche Anpassung der Spanflächengeometrie weitere Leistungssteigerungen beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr erzielt werden können. Im positiven Fall wäre dies ein weiterer Schritt zur Steigerung der Produktivität und Minimierung der erforderlichen hydraulischen Strahlleistung. Dazu wurden im Rahmen dieses Projekts in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ISCAR Germany GmbH vier verschiedene Strahlleitgeometrien entwickelt und anschließend in Zerspantests hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Die entwickelten Geometrieelemente wurden auf einen zuvor

entwickelten Werkzeughalter mit einer nierenförmigen KSS-Austrittsöffnung abgestimmt und vor der PVD-Beschichtung mit TiAlN und TiN mittels Laserabtragen auf der Spanfläche glatter CNMA-Schneidplatten eingebracht. Abbildung 12 zeigt die verschiedenen Typen (Strahlleitgeometrien Slg A bis Slg D) und Schneidteilgeometrien sowie die in Kombination mit dem genannten Werkzeughalter ermittelten Strahlauftreffpunkte.

Die Typen Slg B und Slg C stellen unterschiedlich ausgebildete Kavitäten dar, die den KSS-Freistrahls unter den abfließenden Span in Richtung Schneidkante bzw. Spankontaktzone leiten sollen. Während Slg B symmetrisch entlang der Haupt- und Nebenschneide angeordnet ist und nur eine geringe Ausdehnung in Strahlausbreitungsrichtung aufweist, ist Slg C asymmetrisch, tiefer und deutlich länger ausgebildet, wodurch wesentlich massivere Flanken an den Rändern entstehen, die ein Querabfließen des KSS verhindern sollen. Slg A besteht aus einer entlang Haupt- und Nebenschneide symmetrisch angeordneten Konkavität, die im Unterschied zu Slg B und Slg C jedoch drei in Strömungsrichtung angeordnete schmale Stege besitzt. Diese Stege sollen in Anlehnung an die Funktionsweise von Grenzschichtzäunen in der aerodynamischen Auslegung von Flugzeugflügeln ein Querfließen der Strömung innerhalb der Strahlleitmulde unterbinden.

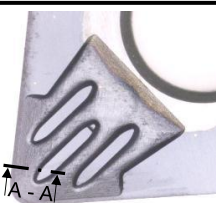
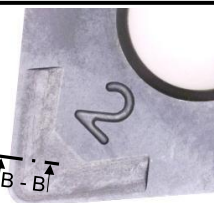
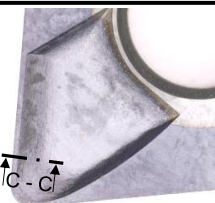
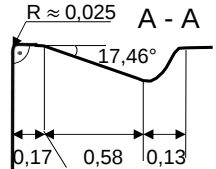
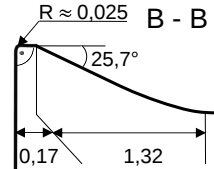
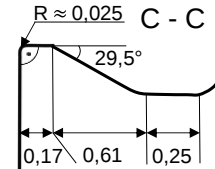
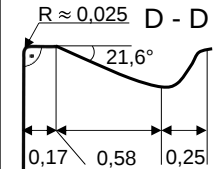
Typ Slg A	Typ Slg B	Typ Slg C	Typ Slg D	
				Geometrie: CNMA120408 + gelaserte Strahlleit- geometrie
				Strahlauftreffpunkte mit WZ-Halter PCLNL 2525M-12- JHP + NZ-CW-JHP (p = 150 bar, Q = 30 l/min, Strahldauer = 20 s)
				Schneidkantenprofil

Abbildung 12: Anforderungsgerecht entwickelte „Strahlleitgeometrien“ [SANG13]

Das Design von Slg D ähnelt sehr stark dem von Slg A, jedoch sollen hierbei drei nebeneinander und unabhängig voneinander angeordnete Konkavitäten die Strahllei-

tung unter den Span in Richtung der Schneidkanten gewährleisten. Die Stege zwischen den einzelnen Mulden erfüllen hierbei dieselbe Funktion wie bei Slg A. Unabhängig von der unterschiedlichen Ausbildung der Konkavitäten weisen die Schneidkanten eine Verrundung von ca. 25 μm sowie eine Schutzfase ($0^\circ \times 0,17 \text{ mm}$) zur Stabilisierung der Schneidkanten auf. Alle Strahlleitgeometrien wurden für eine maximale Schnitttiefe von $a_p = 3,5 \text{ mm}$ ausgelegt. Da durch den Einsatz der HD-KSS-Zufuhr bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT sowohl beim Schrappen als auch beim Schlichten ein großer Leistungsgewinn erzielt werden konnte (vgl. Kapitel 4.1), wurden die Strahlleitgeometrien bei der Außenlängsdrehbearbeitung an diesem Werkstoff eingesetzt. Als Beurteilungskriterien dienten der Werkzeugverschleiß sowie die entstehenden Spanformen bei konstantem KSS-Druck und -Volumenstrom. Als Referenz wurde eine konventionelle CNMG-Schneidplatte mit der Spanbrechergeometrie -TF sowie eine glatte CNMA-Schneidplatte aus demselben Schneidstoff, mit identischer Beschichtung und Schneidkantenmikrogeometrie und unter identischen Einsatzparametern eingesetzt wie die Plattentypen Slg A bis Slg D.

Erzielte Ergebnisse im Arbeitspaket 2

Die in experimentellen Untersuchungen im Arbeitspaket 2 zum Außenlängs-Schrappen und -Schlichten von 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) verwendeten Schnitt- und KSS-Strahlparameter sind in Abbildung 13 dargestellt.

	Außenlängs-Schrappdrehen	Außenlängs-Schlichtdrehen
WZ-Halter Außenlängsdrehen	ISCAR PCLNL 2525M-12-JHP	
Werkstoff	42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$)	
Schnittgeschw. v_c / (m/min)	200	350
Schnitttiefe a_p / mm	2,0	0,4
Vorschub f / mm	0,2	0,2
KSS-Zuführdruck p / bar	80	40
Schneidplattengeometrie	1 x Referenzplatte CNMG 120408-TF (Ref 1)	2 x Referenzplatten CNMG 120408-TF (Ref 1) CNMA 120408-TF (Ref 2)
	4 x Schneidplatten mit eingelasserten Strahlleitgeometrien (Slg) CNMA 12-5105384 (Slg 1), CNMA 12-5105385 (Slg 2), CNMA 12-5105386 (Slg 3), CNMA 12-5105387 (Slg 4)	
Schneidstoff	ISCAR IC907 (HC M05-M20)	
Bewertungskriterien	Verschleiß / Standzeit, Spanformen, Zerspankräfte, Strahlauffreipunkte	

Abbildung 13: Versuchsübersicht im Arbeitspaket 2

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander wurde ein und derselbe Schneidstoff in den Versuchsreihen eingesetzt.

In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde beim Schruppen eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 200$ m/min bei einer Schnitttiefe von $a_p = 2$ mm und beim Schlichten eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 350$ m/min bei einer Schnitttiefe von $a_p = 0,4$ mm gewählt. Der Vorschub betrug für beide Bearbeitungsoperationen $f = 0,2$ mm.

Die Abbildung 14 zeigt den eingesetzten Werkzeughalter, die kommerziell erhältlichen Referenz-Werkzeuge CNMG 120408-TF und CNMA 120408-F sowie die vom Projektpartner ISCAR Germany GmbH sonderangefertigten Hochdruck-Werkzeuge mit den Strahlleitgeometrien (Slg) A bis D.

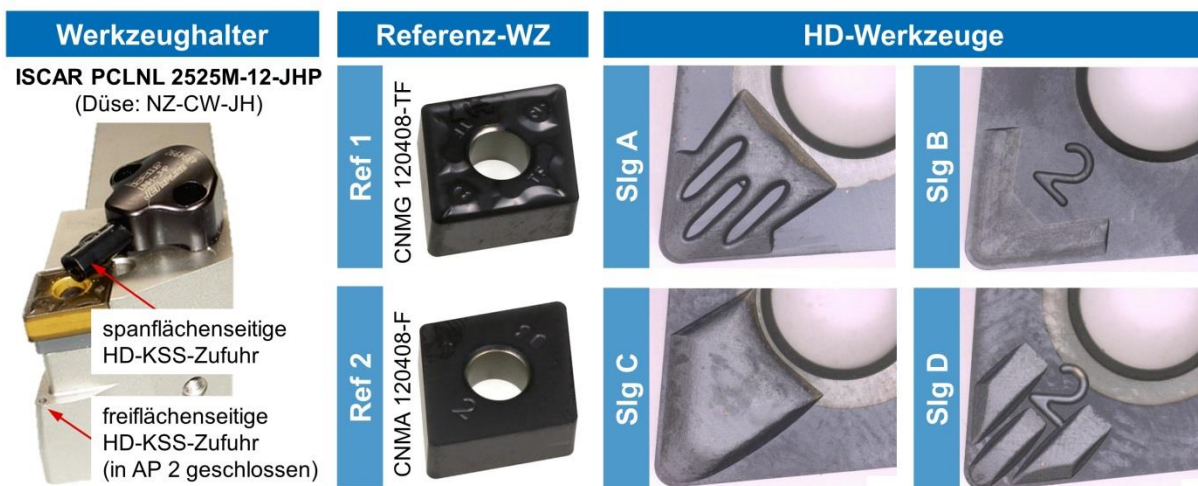


Abbildung 14: Werkzeughalter und eingesetzte Werkzeuge im Arbeitspaket 2

Die Verschleißkurven für die Schrupp-Drehbearbeitung in Abbildung 15 zeigen ein großes Potenzial der angepassten Spanflächengeometrien beim Einsatz der spanflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr. Die Untersuchungen der Verschleißzustände beim Einsatz der modifizierten Schneiden zeigen einen gleichmäßigen abrasiven Freiflächenverschleiß, der im direkten Vergleich zu den eingesetzten Referenzplatten meist deutlich verringert werden konnte. Bei der Schruppbearbeitung wurden die besten Ergebnisse mit Slg D erzielt. Hinsichtlich der Spankontrolle beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr ist festzuhalten, dass bei den Werkzeugen Slg A, B und C im fortgeschrittenen Zustand des Werkzeugverschleißes kein Spanbruch erzielt werden konnte (Abbildung 16). Definierter Spanbruch konnte lediglich mit dem Werkzeug Slg D durchgehend erzielt werden, welches in den Verschleiß-Standzeit-Drehversuchen die höchsten Standzeiten hatte. Eine signifikante und systematische Beeinflussung der

Zerspankkräfte durch die unterschiedlichen Strahlleitgeometrien im direkten Vergleich zum Referenzwerkzeug konnte nicht festgestellt werden.

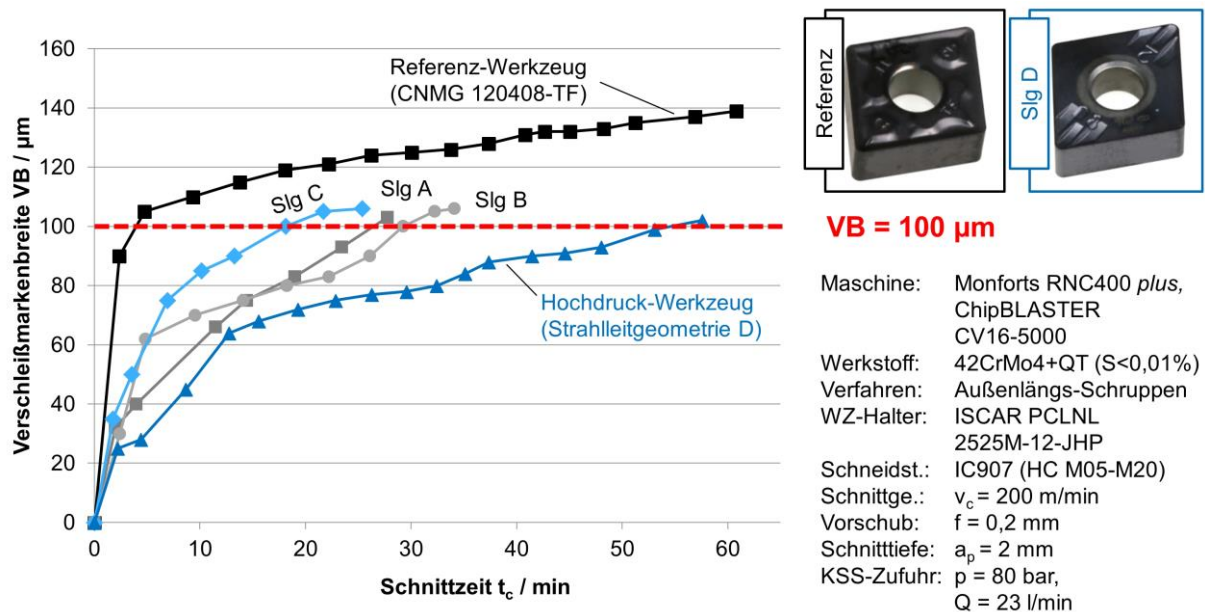


Abbildung 15: Einfluss der Strahlleitgeometrie auf den Werkzeugverschleiß beim Schruppen von 42CrMo4+QT (S<0,01%) mit $p = 80 \text{ bar}$

Die Ergebnisse zum Außenlängs-Schlichten sind in Abbildung 17 zusammengefasst. Die Strahlleitgeometrien C und D schneiden im Vergleich zu einer glatten CNMA-Platte deutlich schlechter ab.

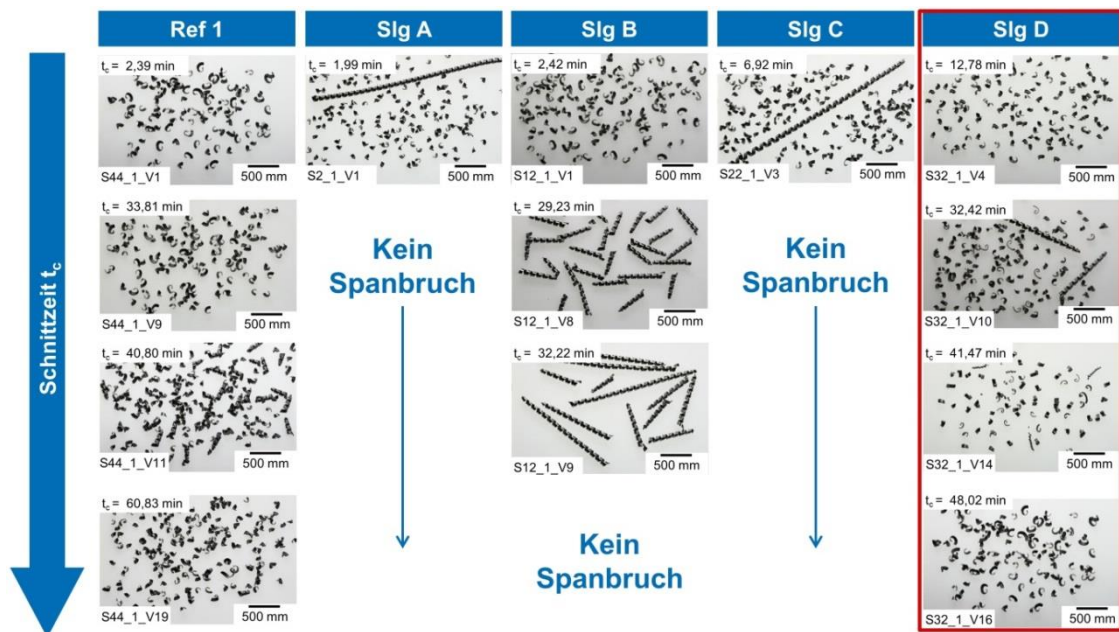


Abbildung 16: Einfluss der Strahlleitgeometrie auf die Spanform beim Schruppen von 42CrMo4+QT (S<0,01%) mit $p = 80 \text{ bar}$

Dennoch konnte mit den sonderangefertigten Werkzeugen die Werkzeugstandzeit auch bei der Schlichtbearbeitung gegenüber der Referenz gesteigert werden. Mit Hilfe der Strahlleitgeometrie B konnte die Werkzeugstandzeit bei einer maximal zulässigen Verschleißmarkenbreite von $VB_{\max} = 200 \mu\text{m}$ im Vergleich zum Referenzwerkzeug mit der Spanbrecher-Geometrie TF (Ref 1) um den Faktor 1,8 erhöht werden (Abbildung 18).

An dieser Stelle muss analysiert werden, warum in Abhängigkeit von der Schnitttiefe unterschiedliche Strahlleitgeometrien (Beim Schrappen: Slg D, Beim Schlichten: Slg B) ein optimales Ergebnis geliefert haben.

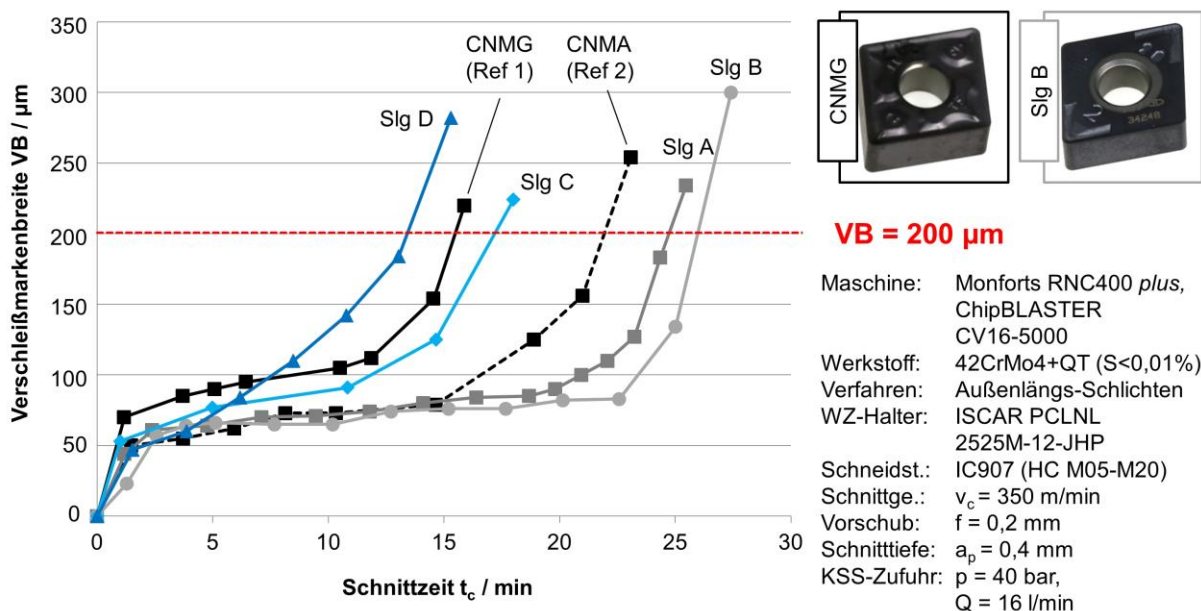


Abbildung 17: Einfluss der Strahlleitgeometrie auf den Werkzeugverschleiß beim Schlichten von 42CrMo4+QT (S<0,01%) mit $p = 40 \text{ bar}$

Die mikroskopische Analyse der eingesetzten Schneidplatten zeigte, dass beim Schlichtdrehen mit den Geometrien Slg A, Slg C und Slg D genau dort ein lokales Verschleißmaximum an den Freiflächen entstand, wo der KSS-Zugang entlang der Eingriffsbreite durch die eingebrachte Strahlleitgeometrie behindert wurde. In Abbildung 19 sind diese kritischen Punkte exemplarisch anhand der Geometrien Slg A und Slg D dargestellt. Es wird vermutet, dass bei Slg A der auf die Schneidenecke zulaufende Steg ein Totwassergebiet erzeugt hat, durch das die Schneidenecke, die in direkter Verlängerung des Stegs liegt, gar nicht oder nur wenig mit KSS versorgt wurde. Folglich entstanden in diesem Bereich der Schneidkante hohe Temperaturen und aufgrund dessen ein Verschleißmaximum an der Freifläche im Bereich der Schneidenecke.

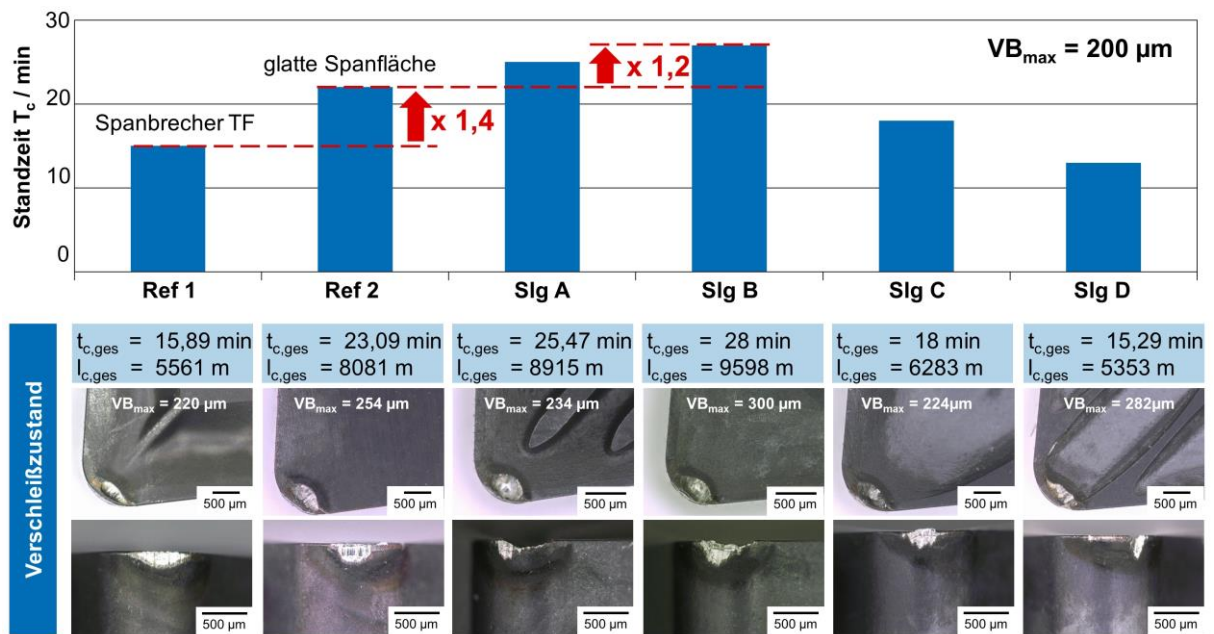
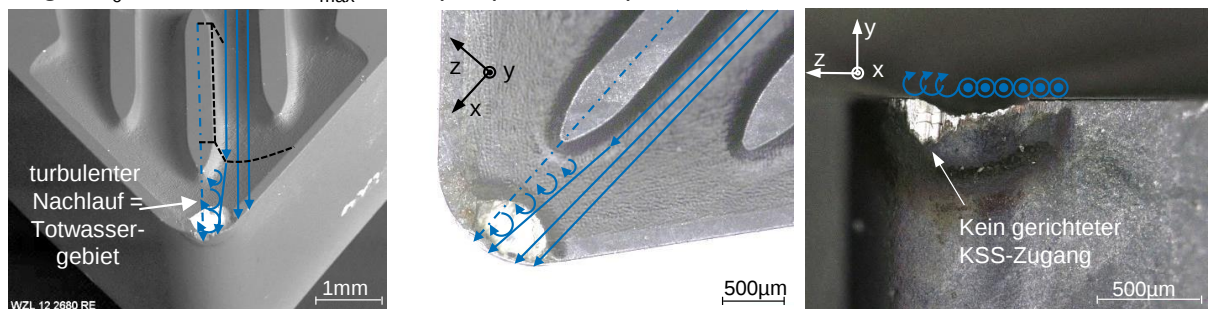


Abbildung 18: Werkzeug-Standzeit und Verschleißzustand beim Schlichten von 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$)

Das Verschleißmaximum an Slg D findet sich im Übergang vom Eckenradius zur Nebenschneide und liegt damit an einem Punkt, wo der rechte erhobene Rand der mittleren Konkavität die Strömungslinien ablenkt und den KSS-Zugang an dieser Stelle einschränkt.

Slg A: $t_c = 25,47$ min $VB_{max} = 234$ µm (Schlichten)



Slg D: $t_c = 15,29$ min $VB_{max} = 282$ µm (Schlichten)

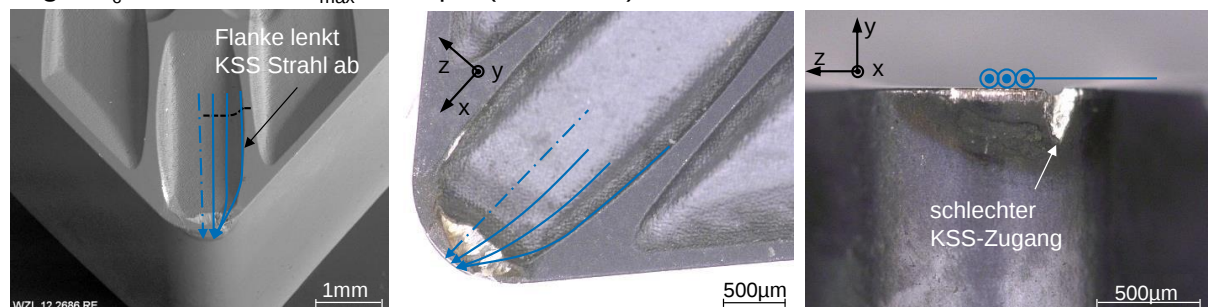


Abbildung 19: Verschleißmaxima beim Einsatz von Strahlleitgeometrien [SANG13]

Im Gegensatz dazu wurde beim Schlichten mit Slg B ein optimales Ergebnis erzielt, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Strahlleitgeometrie wegen ihrer Ausführung in Form einer einzigen Konkavität entlang der Haupt- und Nebenschneide den Eingriffsbereich an keiner Stelle von der gerichteten KSS-Zufuhr „abschattet“. Es kann gefolgert werden, dass vor allem bei der Schlichtdrehbearbeitung der optimalen Anströmung der Schneidkanten im Eingriffsbereich eine wichtige Bedeutung zukommt. Hinsichtlich der Zerspankkräfte konnte analog zur Schruppbearbeitung keine Beeinflussung durch die Strahlleitgeometrien bei der Schlichtbearbeitung festgestellt werden. Auch beim Schlichten war trotz der Einstellung eines geringen Zuführdrucks von $p = 40$ bar keine Verschlechterung der Spanbruchcharakteristik durch die Umwandlung der Spanformgeometrie in verschiedene Strahlleitgeometrien zu erkennen (Abbildung 20). Dennoch muss erwähnt werden, dass die Schneidplatten mit der geringsten Verschleißentwicklung (Slg D und Slg B) gleichzeitig auch den besten Spanbruch erzeugt haben.

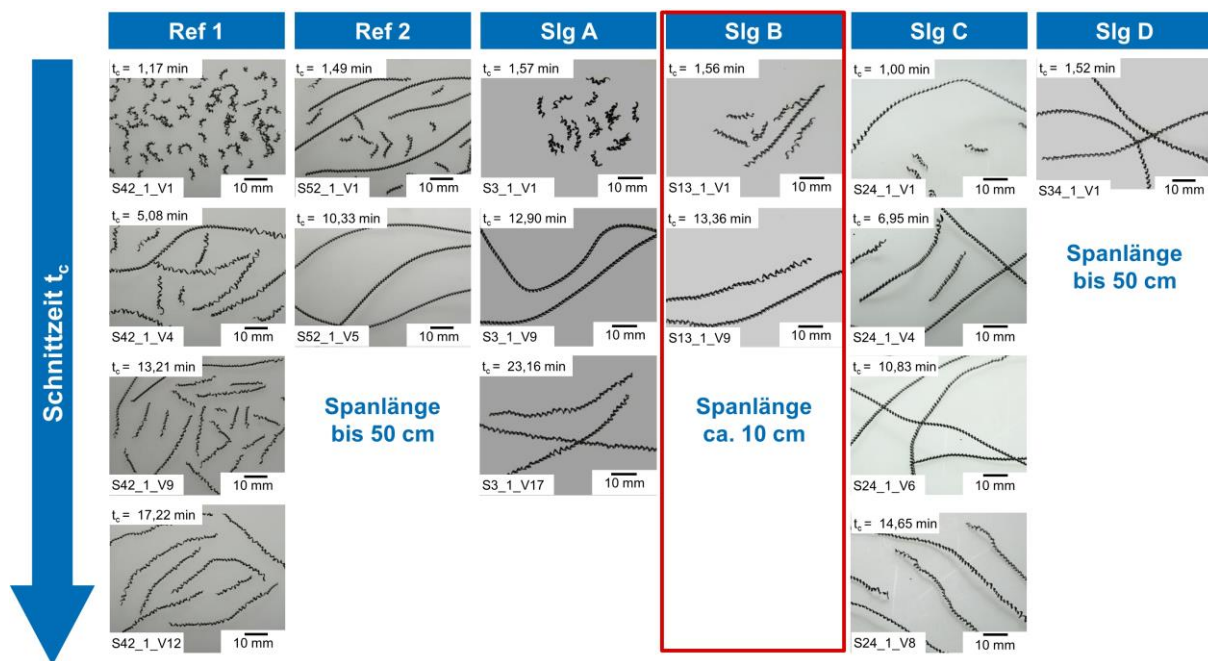


Abbildung 20: Einfluss der Strahlleitgeometrie auf die Spanform beim Schlichten von 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) mit $p = 40$ bar

Der Einsatz von Strahlleitgeometrien im Zusammenhang mit der spanflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr anstelle konventioneller Spanformgeometrien kann folglich als ein weiterer Schritt zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz der HD-KSS-Zufuhr angesehen werden.

4.3 Einfluss der KSS-Zuführungsvariante

In dem dritten Projektabschnitt wurden neben der bisher eingesetzten Ausrichtung der Hochdruck-KSS-Strahlen in den Keil zwischen Spanunterseite und Werkzeug-spanfläche (spanflächenseitige Zufuhr) alternative Zuführungsvarianten (freiflächenseitige und kombinierte span- und freiflächenseitige KSS-Zufuhr) untersucht und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet.

Als Verfahren wurden das Außenlängsdrehen (Schruppen und Schlichten) und das radiale Einstechdrehen untersucht. Basierend auf den Ergebnissen aus dem zweiten Arbeitspaket wurde beim Außenlängs-Schruppen die Strahlleitgeometrie D und beim Außenlängs-Schlichten die Strahlleitgeometrie B eingesetzt. Als Referenzwerkzeug diente die Schneidplatte der Geometrie CNMG120408 (Ref 1). Bewertungsgrößen waren der Werkzeugverschleiß, Spanbildung und Oberflächenqualität.

Erzielte Ergebnisse im Arbeitspaket 3

Der Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen im Arbeitspaket 3 ist in Abbildung 21 dargestellt. Um eine rein freiflächenseitige Zuführung zu gewährleisten, wurde der spanflächenseitige KSS-Strahl mit Hilfe eines konstruierten Bypass-Aufsatzes umgelenkt.

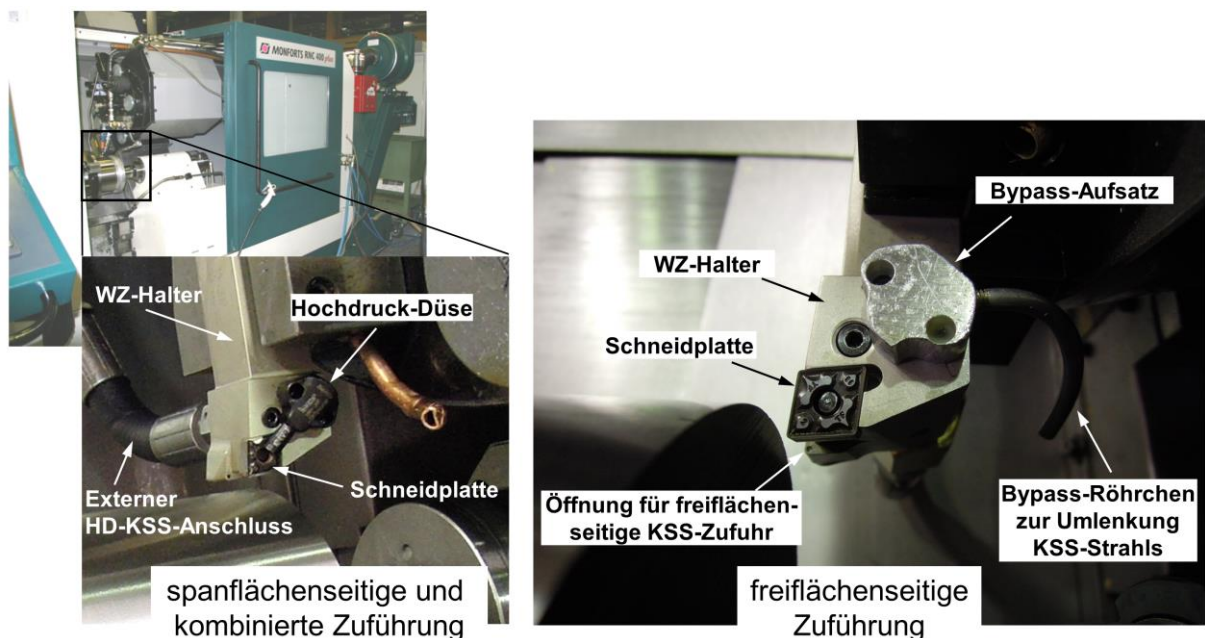


Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Variation der Zuführungsvariante

Der Einfluss der KSS-Zuführungsvariante (spanflächenseitig, freiflächenseitig, kombiniert span- und freiflächenseitig) wurde sowohl beim Außenlängsdrehen als auch beim radialen Einstechdrehen erforscht.

Wie sich in den experimentellen Untersuchungen gezeigt hat, profitiert die Stahlzer-spannung aufgrund der sehr hohen Zerspanntemperaturen stark von der HD-KSS-Zufuhr und der dabei entstehende Werkzeugverschleiß reagiert sehr schnell auf die Veränderung der Kühlschmierbedingungen. Des Weiteren bestehen vor allem bei Einstechprozessen erhebliche Probleme bei der Spanabfuhr aus der Nut, die ebenso maßgeblich von der KSS-Zuführstrategie beeinflusst werden.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse zum Außenlängsdrehen mit unterschiedlichen KSS-Zuführungsvarianten zusammengestellt. In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss war beschlossen worden, zusätzlich zu den beiden Kriterien (maximale Verschleißmarkenbreite $VB_{\max} = 200 \mu\text{m}$ und Ausbröckelungen an der Schneidkante) das Auftreten von Wirrspänen ebenfalls als Abbruchkriterium anzusehen.

Bei einer ausschließlich freiflächenseitigen KSS-Zufuhr ist sowohl beim Einsatz des Referenzwerkzeugs als auch beim Einsatz der optimalen Strahlleitgeometrie „Slg B“ bei der die Schlichtbearbeitung eine sichere Prozessführung aufgrund der sich um das Bauteil und Werkzeug wickelnden Wirrspäne nicht möglich. Aus Gründen des mangelnden Spanbruchs ist eine rein freiflächenseitige KSS-Zufuhr nicht sinnvoll.

Allerdings ist die Kühlwirkung des freiflächenseitigen KSS-Volumenstroms und sein positiver Effekt auf den Werkzeugverschleiß in Kombination mit der spanflächenseitigen KSS-Zufuhr unbestritten. Die Ergebnisse in Abbildung 22 demonstrieren diesen positiven Effekt der freiflächenseitigen KSS-Zufuhr auf den Werkzeugverschleiß. Treten bei einer ausschließlich spanflächenseitigen KSS-Zufuhr Ausbröckelungen an der Schneidkante auf, können diese bei einem Zuschalten der freiflächenseitigen Kühlung vermieden werden.

In einem nächsten Schritt wurden der Einfluss der freiflächenseitigen, spanflächenseitigen und kombiniert span- und freiflächenseitigen KSS-Zuführung auf die Werkzeugtemperaturen erfasst. Die Messung von Zerspanntemperaturen erfolgte mit einem 2-Farben-Pyrometer vom Typ Fire I und Fire II, das am Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung (WSA) der RWTH Aachen entwickelt wurde. Dabei wird die Temperatur einer Oberfläche anhand der emittierenden Infrarotstrahlung gemessen, die berührungslos von einer flexiblen Quarzfaser aufgenommen und zu Fotodioden geleitet wird. Durch die Messung der Strahlungsintensität in zwei diskreten, dicht benachbar-

ten Wellenlängenbändern λ_1 und λ_2 , die ins Verhältnis gesetzt werden, wird die Messung unabhängig vom Emissionsgrad der emittierenden Oberfläche.

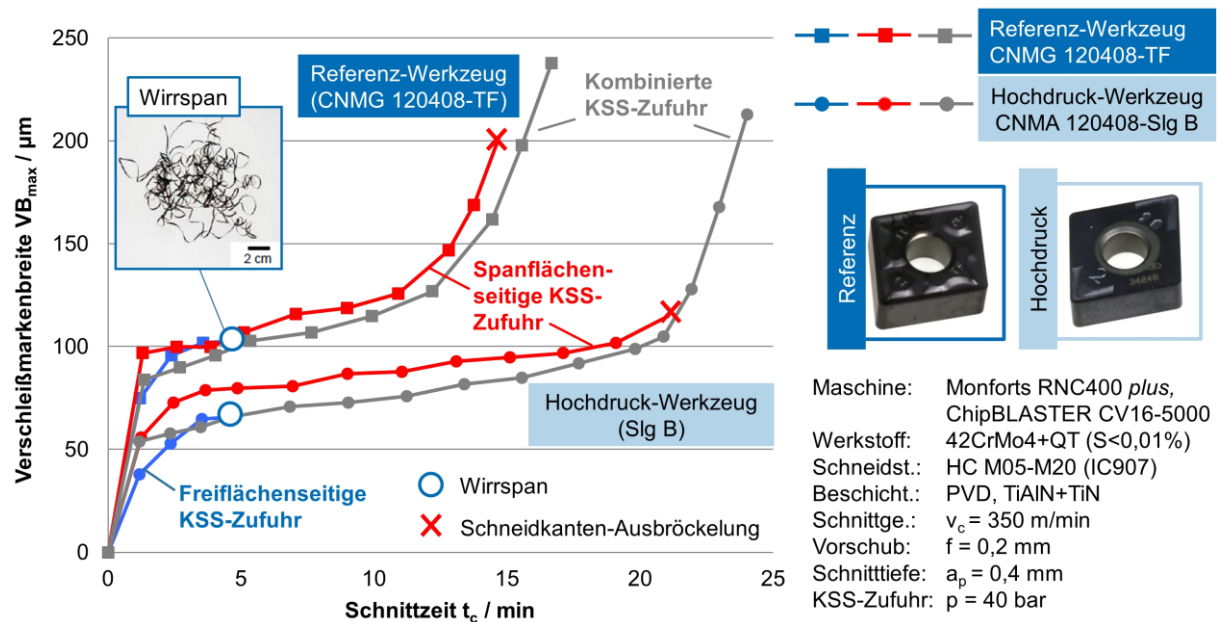


Abbildung 22: Einfluss der KSS-Zuführungsvariante auf den Werkzeug-Verschleiß

Im Vergleich zu anderen Messmethoden zeichnet sich das genutzte 2-Farben-Pyrometer zudem durch sein sehr hohes zeitliches Auflösungsvermögen von ca. 2 μ s, seinen großen Temperaturmessbereich von 250–1200 °C und seine Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen aus [MÜLL04].

Wegen der flexiblen Einsatzmöglichkeiten und der hohen thermischen Stabilität der nur ca. 0,2–0,5 mm starken Quarzfaser wurde dieses Verfahren in der Zerspanung bereits erfolgreich zur Messung von Temperaturen in der Kontaktstelle zwischen Span und Werkzeug eingesetzt [HOPP04].

Da das Vorhandensein von Kühlschmierstoff die Übertragung der Infrarotstrahlung von der strahlenden Oberfläche in die Quarzfaser behindert, wurde in den Versuchen stets die Temperatur im Schneidkeil in einem definierten Abstand zur Spanfläche und den Schneidkanten (Freiflächen) gemessen, Abbildung 23.

Die Abstände d_{HS} und d_{NS} wurden dem Spanungsquerschnitt angepasst und sind in der Tabelle vermerkt. Die so gemessenen Temperaturen liegen zwar unterhalb der real existenten Temperaturen in der Kontaktzone zwischen Span und Spanfläche, sie liefern aber dennoch wertvolle Hinweise zur Quantifizierung des Einflusses der HD-KSS-Zufuhr auf die Werkzeugtemperatur.

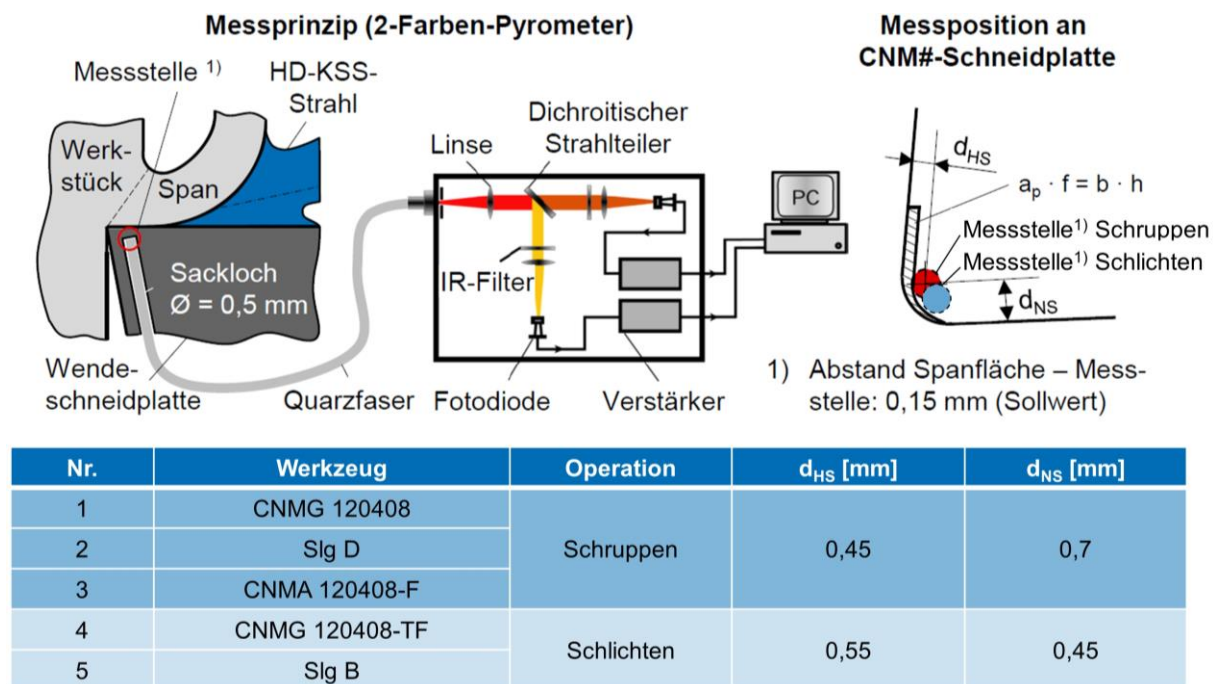


Abbildung 23: Messprinzip und Messposition zur Werkzeug-Temperaturmessung

Zur Applikation der Quarzfaser wurde eine Sacklochbohrung in den Schneidkeil mittels Funkenerosion eingebracht. Auf diese Art und Weise wird letztendlich die Temperatur der Sacklochbodenfläche gemessen, die in einem (Soll)-Abstand von 0,15 mm unterhalb der Spanfläche liegt.

Der reale Abstand kann aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten beim Senkerodieren vom Sollabstand abweichen. Aus diesem Grund dürfen nur die absoluten Temperaturwerte miteinander verglichen werden, die aus der Messung mit derselben Schneidplatte und somit dem identischen Abstand zwischen Sacklochbodenfläche und Spanfläche resultieren. In allen Fällen wurden die WZ-Temperaturen mit ein und derselben Schneidkante im neuen, unverschlissenen Zustand gemessen.

Die Messungen der WZ-Temperaturen für die KSS-Zuführungsvarianten bestätigen und quantifizieren den vermuteten zusätzlichen Kühleffekt der freiflächenseitigen KSS-Zufuhr, Abbildung 24. Während bei der konventionellen Überflutung der Zerspanstelle beim Einsatz des Referenzwerkzeugs die Temperatur nahe der Schneidkante ungefähr 650 °C beträgt, wird sie bei einer spanflächenseitigen KSS-Zufuhr mit $p = 80$ bar und $Q = 11$ l/min um nahezu 200°C reduziert. Das Zuschalten des freiflächenseitigen KSS-Volumenstroms von 4 l/min führt zu einer weiteren Reduzierung der WZ-Temperatur um 100 °C.

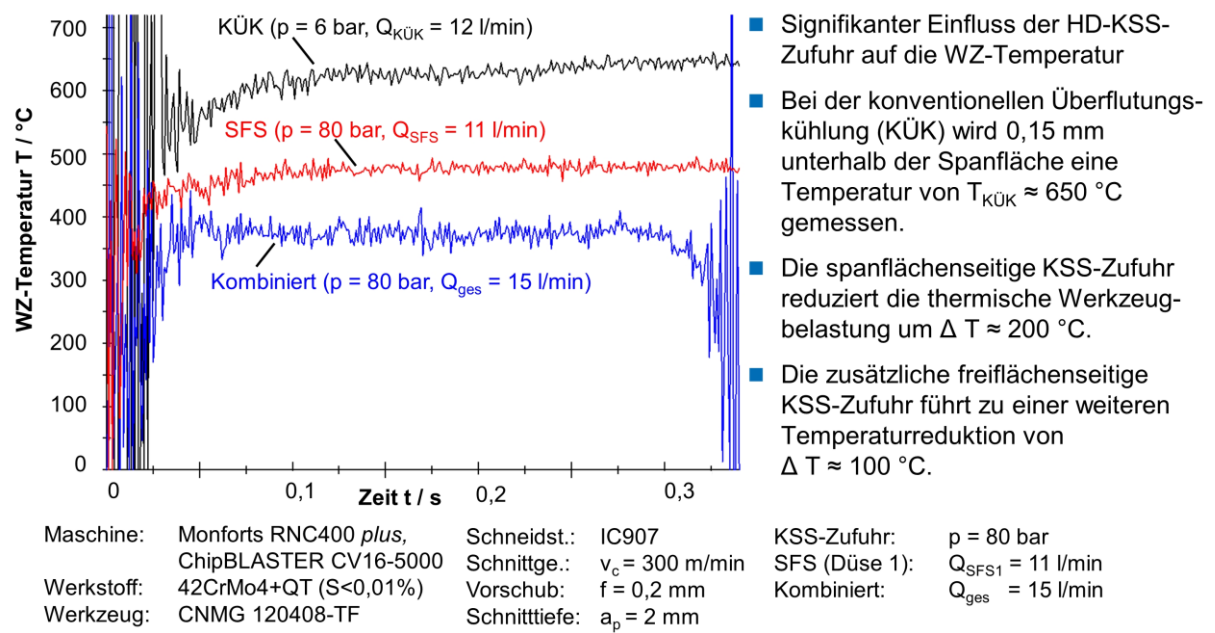


Abbildung 24: Einfluss der KSS-Zuführungsvariante auf die WZ-Temperatur

Im Vergleich zum Referenzwerkzeug sind die Temperaturen beim Einsatz des sonderangefertigten Hochdruckwerkzeugs mit der besten Strahlleitgeometrie D beim Schruppen deutlich geringer. Die zielgerichtete spanflächenseitige KSS-Zufuhr reduziert hierbei die WZ-Temperaturen ebenfalls um 200 °C . Sobald die freiflächenseitige KSS-Zufuhr hinzugeschaltet wird, wird der untere Messbereich des 2-Farben-Pyrometers von 250 °C erreicht, sodass das Temperatursignal stark verrauscht.

Die gemessenen Temperaturwerte korrelieren mit den entsprechenden Verschleißkurven. Bei einer genauen Betrachtung der Verschleißentwicklung kann daher die Aussage gefolgert werden, dass die zusätzliche Kühlwirkung des freiflächenseitigen KSS-Volumenstroms von 4 l/min einen signifikanten Einfluss auf den Werkzeugverschleiß hat. Somit führt die kombinierte KSS-Zufuhr neben einer Erhöhung der Werkzeug-Standzeiten durch Verhinderung eines frühzeitigen Ausfalls des Werkzeugs in Form von Schneidkanten-Ausbröckelungen zusätzlich zum prozesssicheren Erreichen der maximal zulässigen Verschleißmarkenbreite von $VB_{\max} = 200 \text{ }\mu\text{m}$.

Ergänzend zum Außenlängs-Drehen wurden auch das radiale Einstechdrehen mit unterschiedlichen KSS-Zuführungsvarianten untersucht. In die Stahllegierung 42CrMo4+QT wurden 10 mm tiefe und 6 mm breite Nuten eingebracht. Nach dem Vollnuthschnitt (beidseitig gebundener Schnitt) wurde die Nut fünfmal mit einer Schnittbreite von 4 mm seitlich erweitert (einseitig gebundener Schnitt). Die eingesetzten Hartmetallschneidplatten waren hierbei einer einseitigen Belastung ausgesetzt. Der Werkzeughalter mit span- und freiflächenseitiger HD-KSS-Zufuhr wurde so

präpariert, dass die Versorgungskanäle der span- und freiflächenseitigen KSS-Austrittsbohrungen unabhängig voneinander verschlossen werden konnten, um auch die reine span- und freiflächenseitige KSS-Zufuhr mit demselben WZ-Halter untersuchen zu können. Bei den eingesetzten Schneidplatten handelte es sich um eine ausgewählte Standardgeometrie GIMF 608 der Anwendungsklasse P10-P35 und M05-M20 mit der Bezeichnung IC8250, die mit TiCN beschichtet waren. In Vorversuchen zeichneten sich diese Platten aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit aus.

Bei einer ausschließlich freiflächenseitigen KSS-Zufuhr kam es im Vollnutscheit stets zur Bildung von Band- und Wirrspänen mit akustisch detektierbaren Spanklemmern, Abbildung 25. Es war nicht möglich, eine 10 mm tiefe Vollnut mit der rein freiflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr herzustellen. Aus diesem Grund wurde die ausschließlich freiflächenseitige KSS-Zufuhr nicht weiter untersucht worden.

Sowohl bei der spanflächenseitigen als auch bei der kombinierten HD-KSS-Zufuhr kam es bei einem KSS-Zufuhrdruck von 80 bar im Vollnutscheit nicht zu massiven Spanklemmern, die bei einer ausschließlich freiflächenseitigen KSS-Zufuhr beobachtet wurden. Bei vollem Nutscheit entstehen überwiegend eng aufgerollte Spiralspäne. Das enge Aufrollen der Späne wird durch die mechanische Wirkung des spanflächenseitig zugeführten HD-KSS-Strahls unterstützt. Der Spankrümmungsradius wird reduziert.

Dieser Effekt tritt umso stärker in den Vordergrund, je tiefer die Nut ist, da der KSS mit zunehmender Nuttiefe durch die seitliche Begrenzung der Nutflanken noch konzentrierter auf den Span wirkt, da die Nutflanken als seitliche Begrenzung ein Querabströmen des KSS verhindern. Bei KSS-Zufuhrdrücken höher als 80 bar kann die kinetische Energie der KSS-Strahlen ausreichend groß sein, um die meist sehr kleinen Spanrollen oder Kommaspäne sicher aus der Nut heraus zu befördern. Bei der kombinierten span- und freiflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr war bei der Spanbildung kein Unterschied zur rein spanflächenseitigen KSS-Zufuhr erkennbar, was darauf zurückzuführen ist, dass der zusätzliche freiflächenseitige KSS-Strahl nicht mit dem Span in Kontakt kommt und somit an der Spanbildung nicht beteiligt ist.

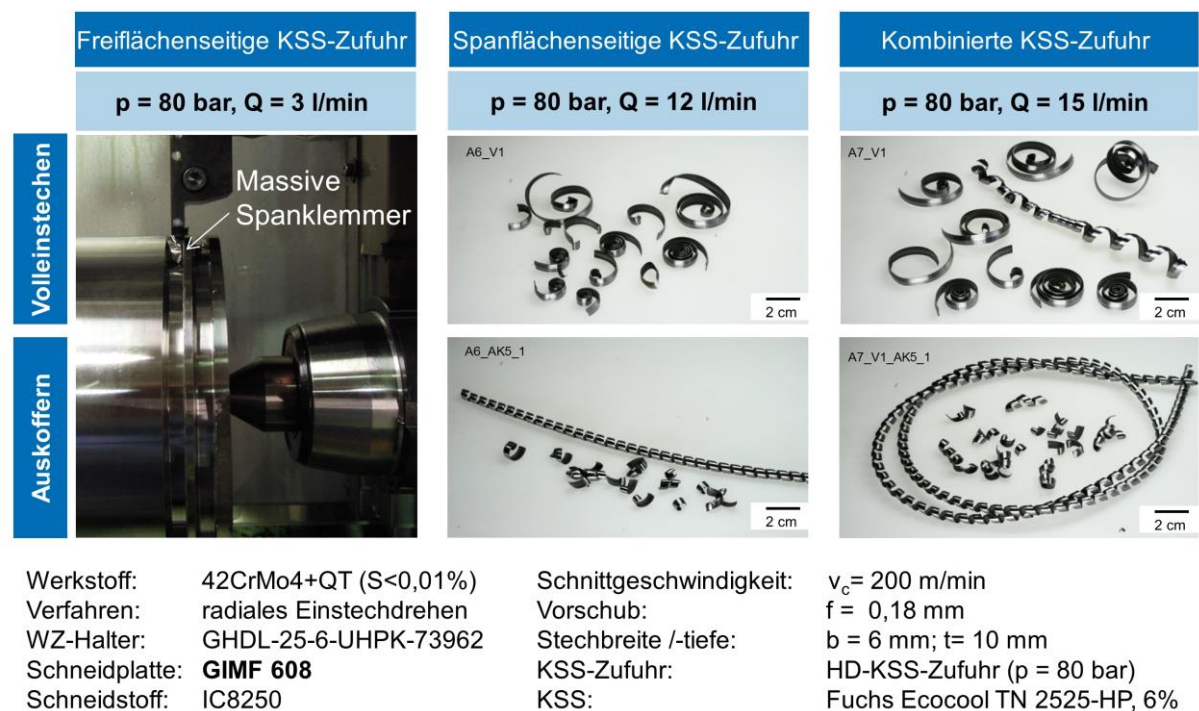


Abbildung 25: Einfluss der KSS-Zuführungsvariante auf die Spanformen beim radialen Einstechdrehen

Bei der Nutenweiterung hingegen konnte bei einem KSS-Zuführdruck von 80 bar brauchbare Späne erzeugt und ein sicherer Spanabtransport erzielt werden. Lediglich die freiflächenseitige KSS-Zufuhr führte aufgrund der oben beschriebenen Problematik auch hierbei nicht zum Spanbruch.

4.4 Einfluss von KSS-Zuführdruck und -Volumenstrom

Bei den bisher beschriebenen Forschungsarbeiten zum Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr wurde der Auslassdurchmesser an der KSS-Düse konstant gehalten und damit bei einer Variation des KSS-Drucks auch der KSS-Volumenstrom verändert worden. Gegenstand dieses Arbeitspakets war die Fragestellung, wie sich die Größen KSS-Zuführdruck und KSS-Volumenstrom unabhängig voneinander auf den Prozess und die Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr bei der Stahlbearbeitung auswirken. Es galt daher zu klären, ob die beim Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr beobachteten Effekte ausschließlich auf die Erhöhung des KSS-Zuführdrucks zurückgeführt werden können (wie in der Literatur häufig schlussgefolgert, da die Veränderung des Volumenstroms nur unzureichend betrachtet wurde) bzw. welchen Einfluss der KSS-Volumenstrom bei der Zuführung des KSS mit hohem Druck hat. Ziel dieses Arbeitspaketes war es daher, den Einfluss des KSS-Zuführdrucks versus KSS-Volumenstroms auf die Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr zu analysieren und ein optimales Verhältnis von KSS-Druck und KSS-Volumenstrom in Abhängigkeit

von Bearbeitungsaufgabe und Schnittparameter vor dem Hintergrund der Energieeffizienz (minimale Pumpenleistung) zu identifizieren.

In den Zerspanversuchen wurde zunächst der Einfluss des KSS-Volumenstroms bei konstantem KSS-Druck analysiert. Der Volumenstrom wurde durch eine Veränderung des Auslassdurchmessers der KSS-Düsen bei konstant gehaltenem KSS-Druck variiert. Der Projektpartner ISCAR Germany GmbH stellte dafür Düsen mit verschiedenen KSS-Düsenquerschnitten zur Verfügung. Für einen konstanten KSS-Druck konnte also durch Auswechseln der KSS-Düsen unterschiedliche KSS-Volumenströme realisiert werden. Die Zerspanversuche wurden in Abstimmung mit dem PA beim Außenlängsdrehen am Stahlwerkstoff 42CrMo4+QT durchgeführt. Die kombinierte Zuführungsvariante wurde auf Basis der Ergebnisse aus AP 3 ausgewählt. Zur Bewertung der Effekte wurde der Werkzeugverschleiß gemessen sowie die Verschleißformen und -ursachen untersucht.

Erzielte Ergebnisse im Arbeitspaket 4

Bei der unabhängigen Variation des KSS-Drucks und KSS-Volumenstroms wurden sowohl der freiflächenseitige als auch der spanflächenseitige KSS-Volumenstrom variiert. Zur Variation des freiflächenseitigen KSS-Volumenstroms wurde ein sonderangefertigter Werkzeughalter mit einer größeren freiflächenseitigen KSS-Bohrung vom Projektpartner ISCAR Germany GmbH hergestellt. Somit konnten zwei freiflächenseitige KSS-Volumenströme von 4 und 6 l/min bei $p = 80$ bar realisiert werden. Zur Variation des spanflächenseitigen KSS-Volumenstroms wurden ebenfalls vom Projektpartner ISCAR Germany GmbH vier KSS-Düsen mit unterschiedlichen Auslassquerschnitten gefertigt. Die eingesetzten Werkzeughalter und Werkzeuge sind in Abbildung 26 dargestellt.

Vor dem Einsatz der Düsen wurden bei einer ausschließlich spanflächenseitiger KSS-Zufuhr die KSS-Volumenströme in Abhängigkeit des eingestellten KSS-Drucks gemessen, Abbildung 27. Das Zuschalten der freiflächenseitigen KSS-Zufuhr führte beim Einsatz des ersten Werkzeughalters mit der kleineren freiflächenseitigen Bohrung zu einem freiflächenseitigen KSS-Volumenstrom von 4 l/min bei $p = 80$ bar. Mit Hilfe des Werkzeughalters mit der größeren freiflächenseitigen KSS-Bohrung konnte der freiflächenseitige KSS-Volumenstrom auf 6 l/min erhöht werden. Bei einem konstanten KSS-Druck von $p = 80$ bar wurde der KSS-Volumenstrom durch die Veränderung des KSS-Austrittsquerschnitts in vier Stufen (11, 15, 20 und 25 l/min) variiert und der Einfluss auf Werkzeugverschleiß und Spanbildung untersucht.

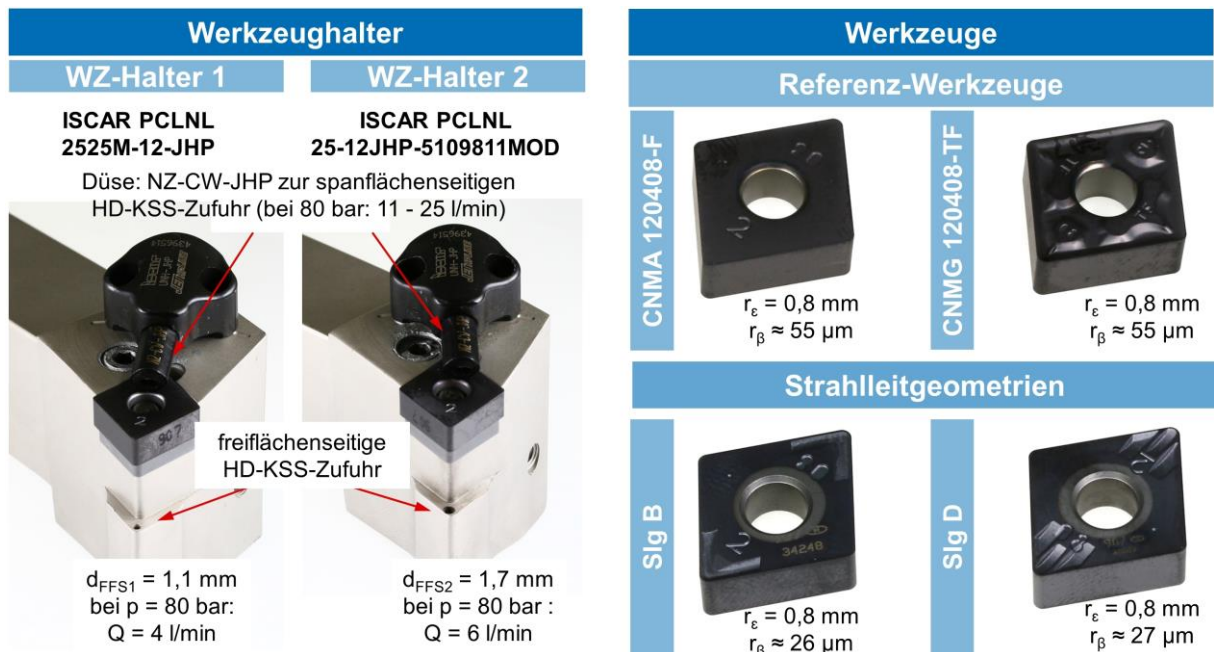


Abbildung 26: Eingesetzte sonderangefertigte Werkzeughalter und Werkzeuge

Die unabhängige Variation von KSS-Druck und -Volumenstrom zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses dieser beiden Haupteinstellparameter erfolgte vor dem Hintergrund der energieeffizienten Prozessauslegung und Ressourcenschonung durchgeführt.

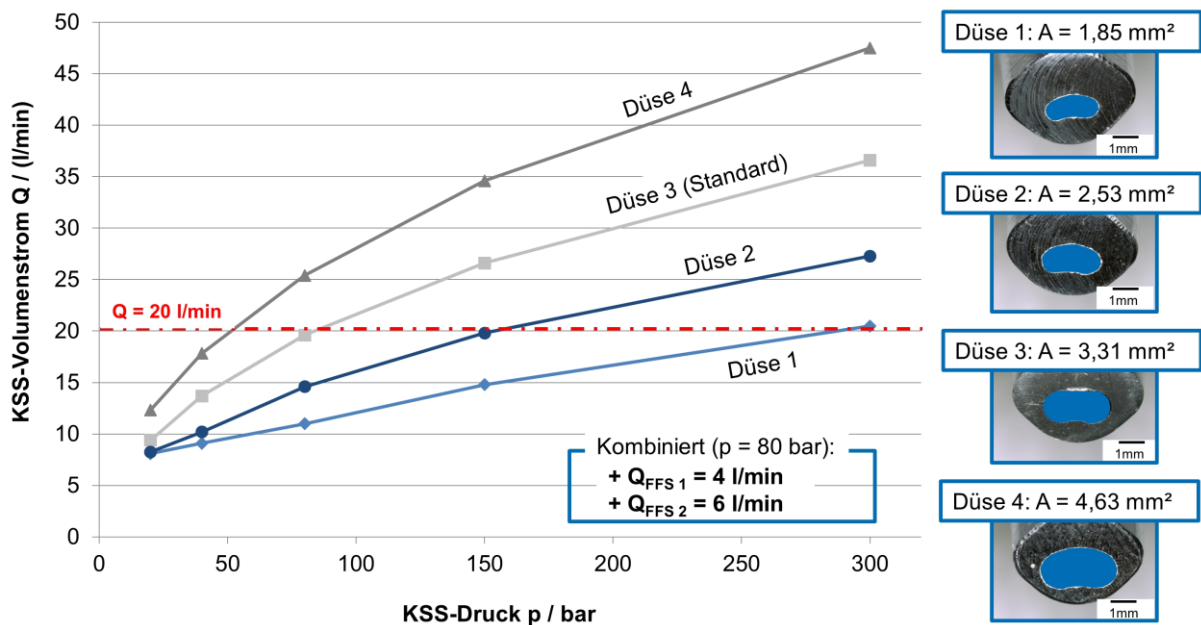


Abbildung 27: Druck-Volumenstrom-Kennlinien der eingesetzten Düsen bei ausschließlich spanflächenseitiger KSS-Zufuhr

In Abbildung 28 sind die theoretischen und gemessenen Volumenströme und die elektrische Leistungsaufnahme des externen Hochdruckaggregats dargestellt. Mit steigendem KSS-Druck steigt der KSS-Volumenstrom degressiv an. Zum anderen steigen allerdings die strömungstechnischen Verluste in der Leitung an, sodass die Differenz zwischen dem theoretischen und gemessenen Kurvenverlauf größer wird, welche durch den Düsenfaktor α beschrieben wird.

Bei der Vermessung der elektrischen Leistungsaufnahme wird deutlich, dass mit zunehmendem KSS-Druck diese überproportional ansteigt. Aus diesem Grund ist die Bestimmung der optimalen KSS-Strahlparameter vor dem Hintergrund der Energieeffizienz von enormer Bedeutung.

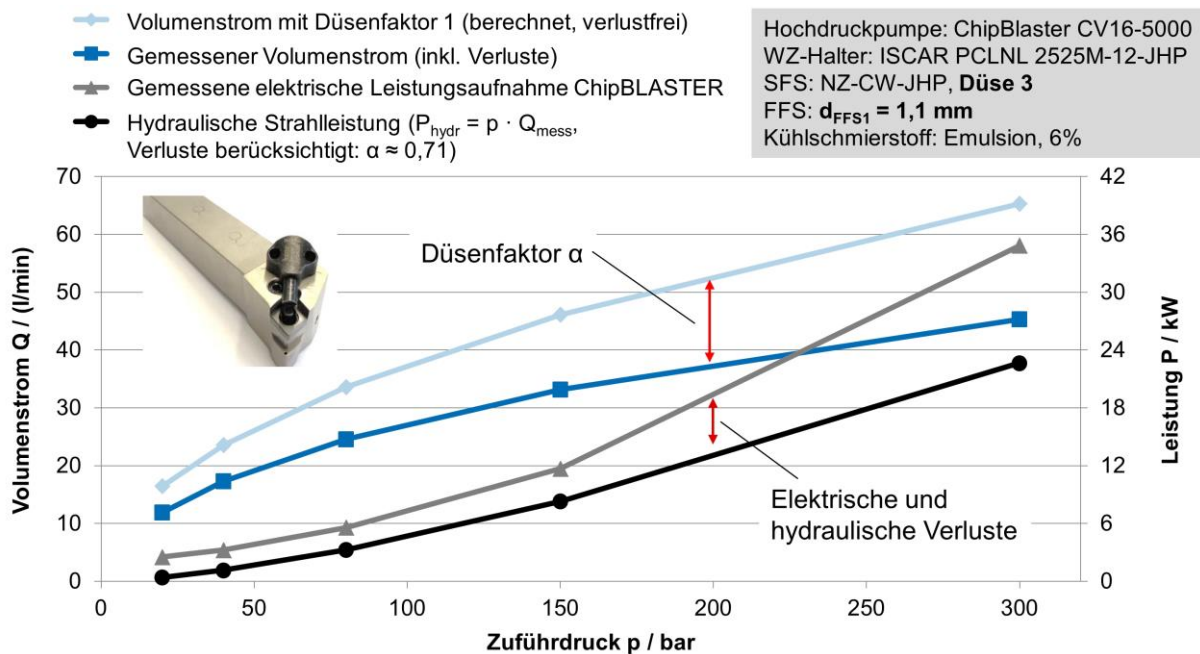


Abbildung 28: Energetische Betrachtungen zur HD-KSS-Zufuhr

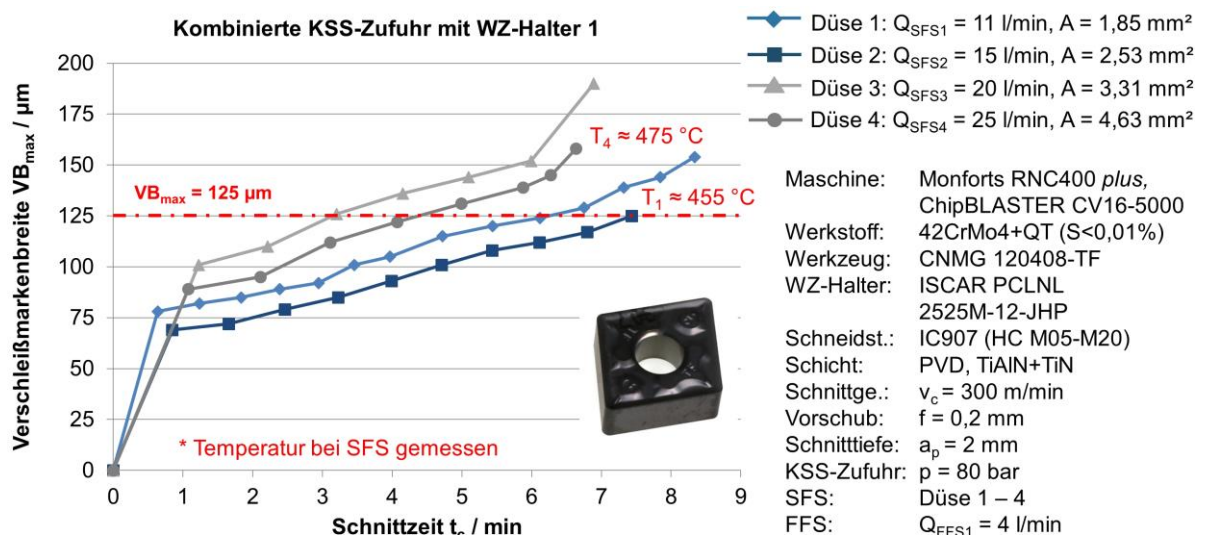
Die in diesem Arbeitspaket eingestellten Schnitt- und KSS-Strahlparameter sind in Abbildung 29 zusammengefasst.

Wie in Abbildung 30 dargestellt ist, zeigt sich nur ein marginaler Einfluss des KSS-Volumenstroms auf den Freiflächenverschleiß, wobei die tendenziell besten Ergebnisse – entgegen den Erwartungen – mit geringen KSS-Volumenströmen erzielt wurden. Der leichte Verschleißrückgang und die gemessenen Temperaturwerte liegen jedoch im Bereich der Streuung der Messwerte bzw. Messsignale und sollten daher nicht überinterpretiert werden.

	Außenlängs-Schruppen	Außenlängs-Schlichten
WZ-Halter Außenlängsdrehen	ISCAR PCLNL 2525M-12-JHP ISCAR PCLNL 25-12JHP-5109811MOD	(WZ-Halter 1 mit $d_{FFS1} = 1,1$ mm) (WZ-Halter 2 mit $d_{FFS2} = 1,7$ mm)
Werkstoff	42CrMo4+QT (S < 0,01%)	
Schnittgeschwindigkeit v_c / (m/min)	300	350
Schnitttiefe a_p / mm	2,0	0,4
Vorschub f / mm	0,2	0,2
KSS-Zuführdruck p / bar	80	40
KSS-Zuführungsvariante	Kombinierte (span- und freiflächenseitige) KSS-Zufuhr	
Schneidplattengeometrie	CNMG 120408-TF (Referenz) CNMA 12-5105387 (Slg D)	CNMG 120408-TF (Referenz) CNMA 12-5105387 (Slg B)
Schneidstoff	ISCAR IC907 (HC M05-M20)	
Beschichtung	PVD, TiAlN+TiN	
Bewertungskriterien	Verschleiß / Standzeit, Spanformen, Oberfläche, Temperaturen, elektrische Leistungsaufnahme, Strahlauftreffpunkte	

Abbildung 29: Versuchsübersicht in Arbeitspaket 4

An dieser Stelle soll nun weiter analysiert werden, welchen Einfluss der KSS-Volumenstrom auf die Leistungsfähigkeit der HD-KSS-Zufuhr ausübt. Wird eine Steigerung der Strahlkraft zur Erzeugung von definiertem Spanbruch durch die Zunahme des KSS-Volumenstroms bewirkt, so erfordert dies eine Vergrößerung der Strahlquerschnittsfläche, da der Volumenstrom bei konstantem Druck nur durch eine Vergrößerung der Düsen gesteigert werden kann.



Tendenziell höherer Verschleiß bei größeren KSS-Volumenströmen. Mögliche Ursache ist die Abschwächung des freiflächenseitigen KSS-Strahls durch spanflächenseitigen KSS-Strahl

Abbildung 30: Verschleißkurven beim Schrappen mit dem Referenzwerkzeug bei konstantem KSS-Druck und variablen KSS-Volumenströmen

Aufgrund der durch die Volumenstromzunahme bewirkten Vergrößerung der Strahlkraft und Strahlfläche trifft jedoch nicht zwangsläufig mehr KSS bzw. wirkt eine größere Kraft auf den Span als bei Verwendung einer kleineren Düse mit geringerem Volumenstrom und somit geringerer Strahlkraft, da ein Großteil des KSS-Strahls am Span vorbeiströmt. Der Anteil des Strahls, der nicht auf den Span trifft, verursacht folglich auch keine Kraft. Um die Strömungsverhältnisse an den einzelnen Werkzeugen für unterschiedliche Düsenquerschnitte zu bestimmen, wurden diese mit einem goldfarbigen Lack beschichtet und eine Minute lang einem KSS-Druck von $p = 150$ bar ausgesetzt (Abbildung 31). Wie erwartet, zeigte sich, dass der Anteil der abgetragenen Farbe im Bereich der Haupt und Nebenschneide mit zunehmendem Düsenquerschnitt zunimmt. Für den Fall, dass die Breite des KSS-Strahls größer als die Schnitttiefe ist, strömt ein Teil des KSS-Strahl am Span vorbei.

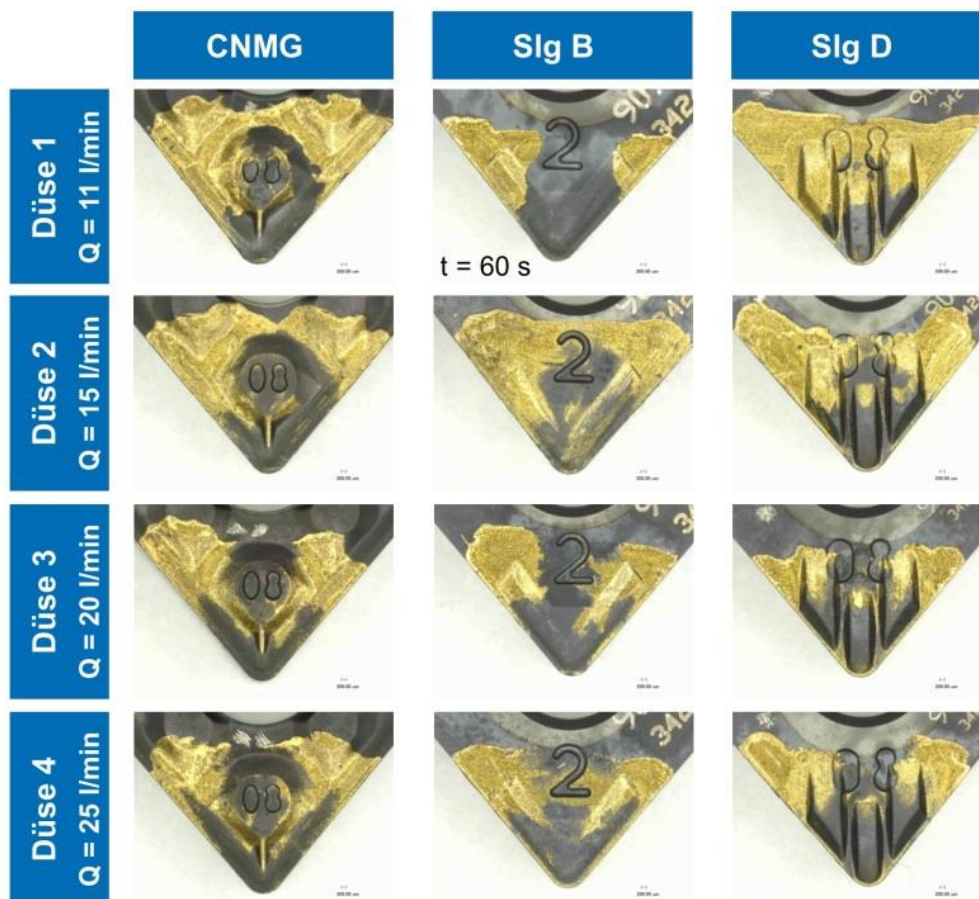
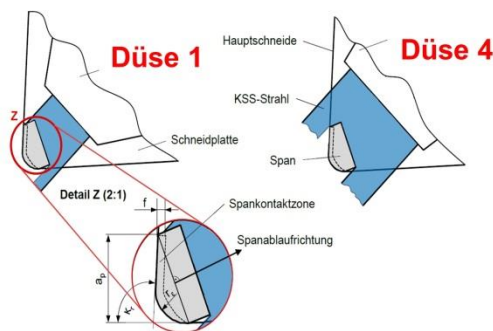
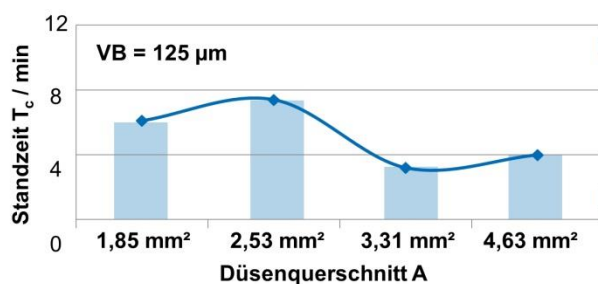


Abbildung 31: Strahlauffreffpunkte für unterschiedliche Düsenquerschnitte

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 32 für die dargestellten Prozessbedingungen anhand eines zweidimensionalen Modells maßstabsgetreu dargestellt. Für eine Schnitttiefe von $a_p = 2$ mm wurde vereinfacht unter Vernachlässigung der Strahlaufweitung die auf den Span treffende Strahlbreite skizziert, wobei die dritte Dimension (Strahl-

höhe in vertikaler Richtung) aufgrund zu vieler unbekannter Einflussgrößen (vor allem Spankrümmungsradius und Anteil des Strahls, der auf die Spanfläche trifft) außer Acht gelassen wurde. Aus dieser Betrachtung wird ersichtlich, dass im Fall der Düse mit dem größten Auslassquerschnitt (Düse 4) ein Großteil des KSS-Volumenstroms am Span vorbeigeströmt ist und somit keine mechanische Wirkung auf den Span ausgeübt hat. Diese Theorie wird gestützt von der Beobachtung nahezu unveränderter Spankontaktzonenflächen bei Variation des Volumenstroms. Dies ist ein Indiz dafür, dass bei allen eingestellten Volumenströmen in etwa gleich große Strahlkräfte auf den Span gewirkt haben müssen.



- Bei größerem Düsendurchmesser strömt ein Großteil des KSS-Strahls am Span vorbei und beeinflusst die Wirkung des freiflächenseitig zugeführten KSS-Strahls.
- Aus diesem Grund geht mit großen Düsenquerschnitten aufgrund der „Verwirbelungen“ mit dem freiflächenseitigen KSS-Volumenstrom eine Verschleißzunahme einher
- Der Düsenquerschnitt sollte im Optimalfall für eine konkrete Bearbeitungsaufgabe so gewählt werden, dass die Strahlbreite die Spanbreite (abhängig von a_p) nicht übersteigt

Abbildung 32: Werkzeug-Standzeit beim Referenzwerkzeug und Effektiver Strahlanteil in Abhängigkeit vom KSS-Volumenstrom

Der am Span vorbeifließende KSS-Volumenstrom beeinflusst möglicherweise den freiflächenseitigen KSS-Strahl in seiner Ausbreitung und verhindert möglicherweise eine effektive freiflächenseitige Kühlung. Der leichte Verschleißzuwachs bei großen KSS-Volumenströmen resultiert möglicherweise aus dieser negativen Beeinflussung der Strömungsverhältnisse beim Referenzwerkzeug.

Unabhängig vom Volumenstrom waren stets ein gleichmäßig ausgebildeter Freiflächenverschleiß die dominierende Verschleißform, Abbildung 33. Besonders zu erwähnen ist ebenso, dass die unter KÜK entstandenen Wendelspäne beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr mit $p = 80$ bar bereits ab dem geringsten Volumenstrom von 11 l/min sicher gebrochen wurden. Unter der Annahme, dass der Spanbruch beim Einsatz der HD-KSS-Zufuhr in erster Linie durch das Einwirken der Kraft (vor allem

abhängig von p und Q) des hochenergetischen KSS-Strahls verursacht wird, lässt sich zunächst schlussfolgern, dass unter den oben genannten Bedingungen der minimalste Volumenstrom eine ausreichend große Strahlkraft erzeugt haben muss, um den Span zu brechen und die Steigerung der Strahlkraft keine weiteren Spanbruchvorteile bewirkt.

Beim Einsatz des sonderangefertigten Werkzeugs mit der optimalen Strahlleitgeometrie D für die Schruppbearbeitung ist aufgrund der zielgerichteten KSS-Zufuhr die Beeinflussung des freiflächenseitigen KSS-Volumenstroms im Vergleich zum Referenzwerkzeug deutlich geringer. Tendenziell führt auch bei diesem Werkzeug der geringste Volumenstrom zu geringsten Verschleißwerten (Abbildung 34).

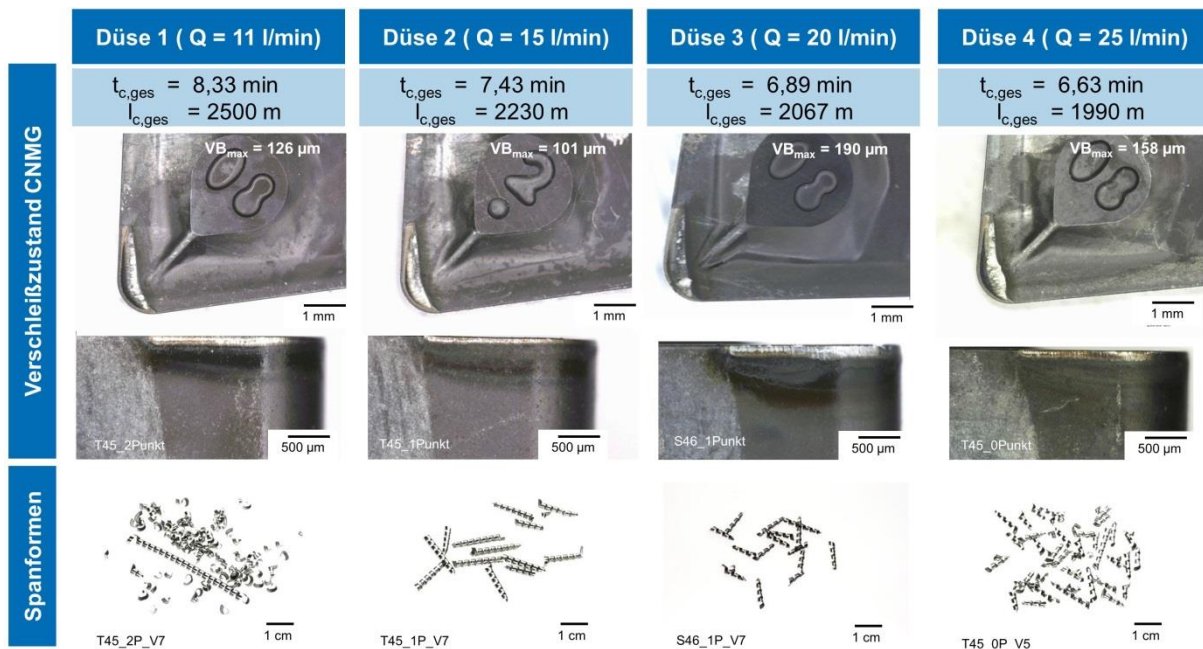


Abbildung 33: Verschleißzustände und entstehende Spanformen mit Referenzwerkzeug bei konstantem Druck und variablen KSS-Volumenströmen

Zusammenfassend kann aus den Untersuchungen gefolgert werden, dass tendenziell längere Standzeiten bei kleinen Düsenquerschnitten bzw. KSS-Volumenströmen erreicht werden. Beim Einsatz des Referenzwerkzeugs CNMG 120408-TF wird eine Steigerung der Werkzeugstandzeit um den Faktor 1,68 bei einer gleichzeitigen Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme um bis zu 15% durch Reduzierung des Düsenquerschnitts von $A = 4,63$ mm² (Düse 4) auf $A = 2,53$ mm² (Düse 2) bei der Schruppbearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT erzielt, Abbildung 35. Beim Einsatz des Hochdruck-Werkzeugs mit der Strahlleitgeometrie D konnte eine Erhöhung der Werkzeug-Standzeit um 63% beim Einsatz einer Düse mit einem KSS-

Auslassdurchmesser von $A = 1,85 \text{ mm}^2$ (Düse 1) im Vergleich zu einem Düsenquerschnitt von $A = 4,63 \text{ mm}^2$ (Düse 4) erzielt werden.

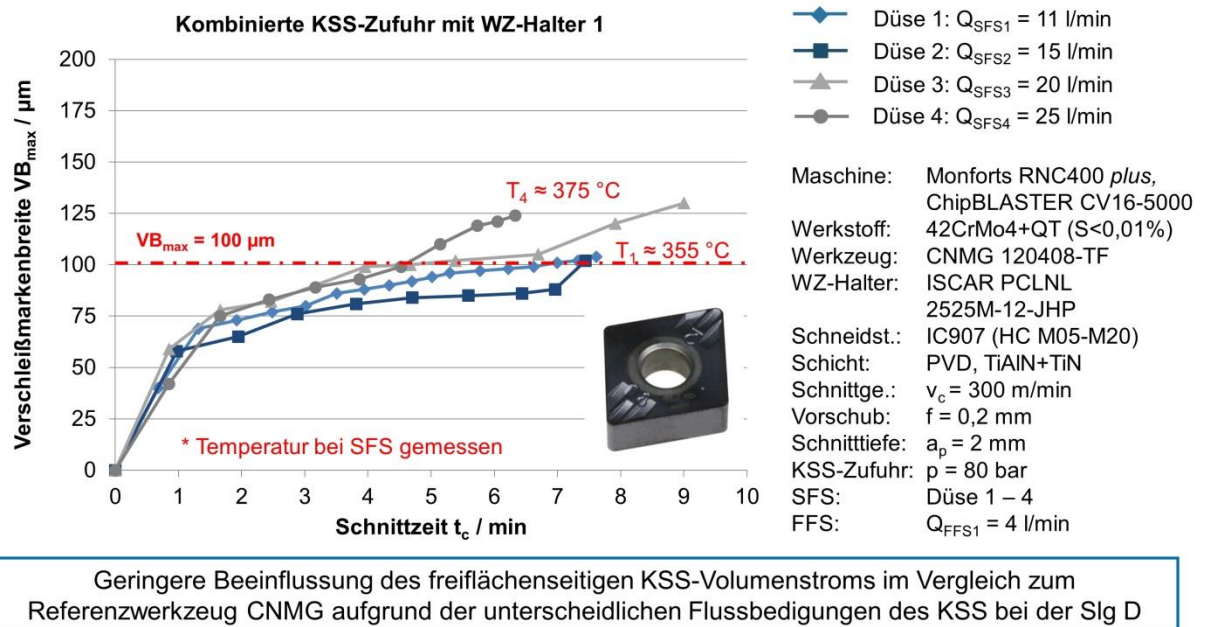


Abbildung 34: Verschleißkurven beim Schruppen mit Hochdruckwerkzeug „Slg D“

Mit der Reduzierung des Düsenquerschnitts bzw. des KSS-Volumenstroms geht eine Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme des Hochdruckaggregates um 25% einher. Der maximale Standzeitgewinn bei einem KSS-Druck von $p = 80 \text{ bar}$ wurde bei einem KSS-Volumenstrom von 11 l/min beim Einsatz des Hochdruck-Werkzeugs und bei 15 l/min beim Einsatz des Referenzwerkzeugs CNMG 120408-TF erreicht. Aus der Analyse der Ergebnisse geht deutlich hervor, dass der in der Praxis üblicherweise verfolgte Ansatz „viel KSS hilft viel“ als grundlegend falsch angesehen werden kann. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass der Düsenquerschnitt auf die Schnitttiefe abgestimmt werden muss und im Optimalfall so gewählt werden sollte, dass die Strahlbreite die Spanbreite (abhängig von a_p) nicht übersteigt.

Um der Fragestellung nachzugehen, welcher KSS-Einstellparameter (KSS-Druck oder KSS-Volumenstrom) einen größeren Effekt auf die Werkzeugtemperatur hat, wurde für unterschiedliche Druckstufen der Volumenstrom durch Auswechseln der Düsen variiert. In den durchgeführten Untersuchungen beim Außenlängsschruppen des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass der KSS-Druck einen signifikanten Einfluss auf die Werkzeugtemperatur hat, wohingegen eine Erhöhung des KSS-Volumenstroms innerhalb einer Druckstufe zu keiner nennenswerten Reduktion der Temperaturen an der Messstelle führt, Abbildung 36.

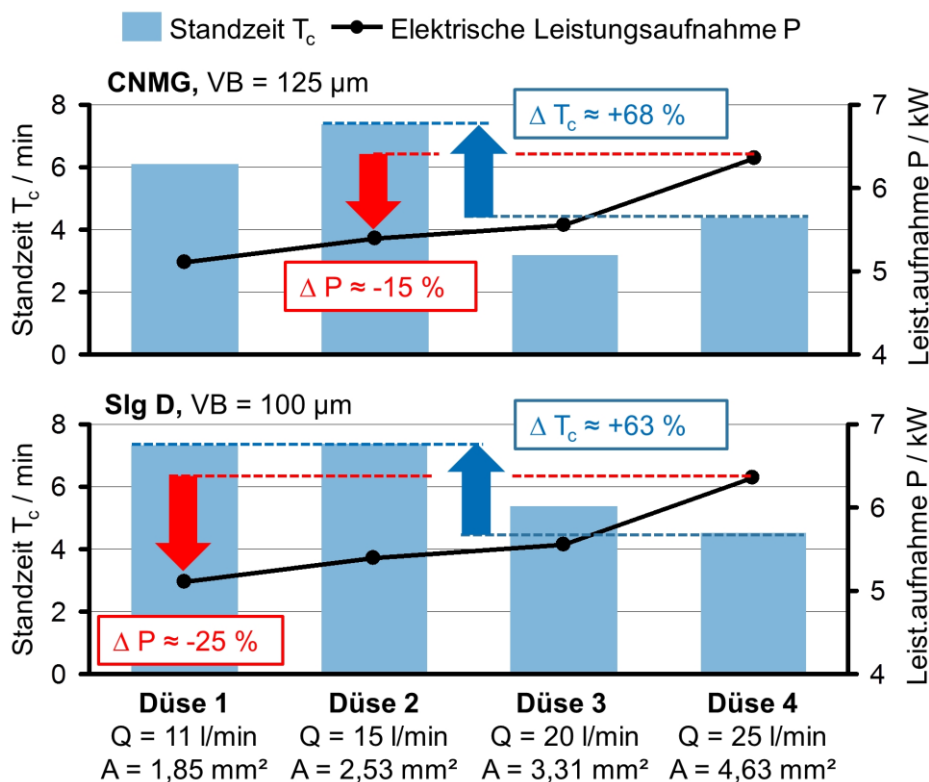


Abbildung 35: Werkzeug-Standzeit und elektrische Leistungsaufnahme für unterschiedliche KSS-Volumenströme bei $p = 80$ bar

Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits ein KSS-Druck von $p = 40$ bar zu einer deutlichen Reduktion der Werkzeugtemperatur im Vergleich zur konventionellen Überflutung führt. Während beim Einsatz des Referenzwerkzeugs CNMG 120408-TF bei einem KSS-Druck von $p = 40$ bar die Werkzeugtemperatur um nahezu 100°C gesenkt werden kann, führt eine zielgerichtete Zufuhr des KSS beim Einsatz des Hochdruck-Werkzeugs mit der Strahlleitgeometrie D zu einer Temperaturreduktion um 200°C . Eine weitere Erhöhung des KSS-Drucks führt zur weiteren Reduktion der Werkzeugtemperaturen.

Die mit zunehmendem KSS-Druck verbesserte Kühlwirkung nahe der Schneidkante wird von vielen Wissenschaftlern mit Hilfe der sogenannten Dampfblasentheorie erklärt [SORB06, KAMI00a, SANG13]. Demnach ist der HD-KSS-Strahl, der mit zunehmendem KSS-Druck eine höhere Austrittsgeschwindigkeit und somit eine höhere kinetische Energie hat, in der Lage, die entstehende Dampfblase einzudrücken oder gar zu durchbrechen, wodurch er näher an die Schneidkante vordringen kann. Die Ergebnisse bestätigen eindeutig, dass die Werkzeugtemperatur bei der Zerspanung durch steigenden KSS-Zufuhrdruck wesentlich gesenkt werden kann, während der KSS-Volumenstrom keinen signifikanten Einfluss ausübt.

Wird bei einem konstanten KSS-Volumenstrom von 20 l/min der KSS-Druck zwischen $p = 40, 80, 150$ und 300 bar variiert und zusätzlich zur Werkzeug-Temperatur die elektrische Leistungsaufnahme gemessen, kann anhand der Ergebnisse in Abbildung 37 die Aussage gefolgert werden, dass beim Außenlängsschruppen eine Steigerung des KSS-Drucks von 80 auf 150 bar lediglich zu einer marginalen Temperaturreduktion führt, wohingegen sich die elektrische Leistungsaufnahme nahezu verdoppelt.

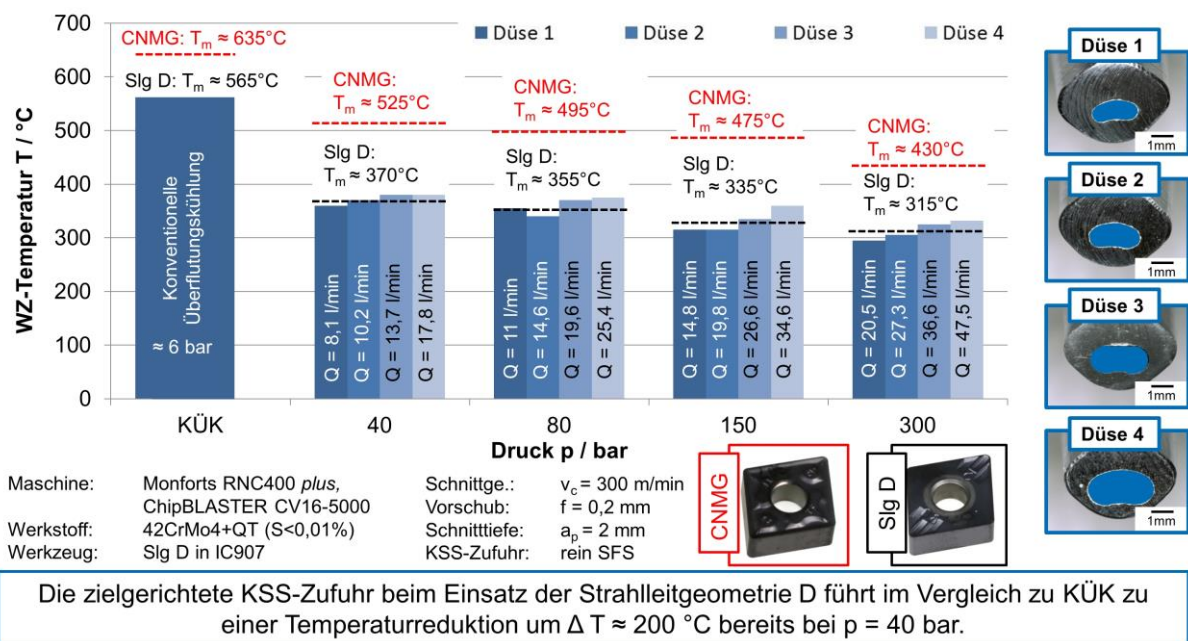


Abbildung 36: Einfluss des KSS-Druck und -Volumenstroms auf die Werkzeug-Temperatur

Analog hierzu wurde für einen konstanten KSS-Volumenstrom der optimale KSS-Druck für die Semi-Schlichtbearbeitung mit einer Schnitttiefe von $a_p = 1$ mm ermittelt. Bei dieser Bearbeitung führt eine Erhöhung des KSS-Drucks von 40 bar auf 80 bar zu einer Temperaturreduktion um lediglich 3% . Demgegenüber steht allerdings eine nahezu 50% -ige Erhöhung der elektrischen Leistungsaufnahme.

Aus dieser Betrachtung folgt, dass unter den gewählten Einsatzbedingungen bei der Schlichtbearbeitung der optimale KSS-Druck aus Gründen der Energie-Effizienz bei $p = 40$ bar liegt, Abbildung 38.

Trotz allem ist ein minimaler Volumenstrom zum erfolgreichen Einsatz der HD-KSS-Zufuhr erforderlich. Neben der Notwendigkeit einer Mindestmenge an KSS zur Wärmeabfuhr trägt eine Volumenstromsteigerung bei konstantem Zufuhrdruck solange zur Verbesserung des Spanbruchs durch die Steigerung der einwirkenden mechani-

schen Strahlkraft bei, bis die Strahlbreite durch Vergrößerung der Austrittsfläche der Düse(n) die Spanbreite (abhängig von der Schnitttiefe a_p) übersteigt.

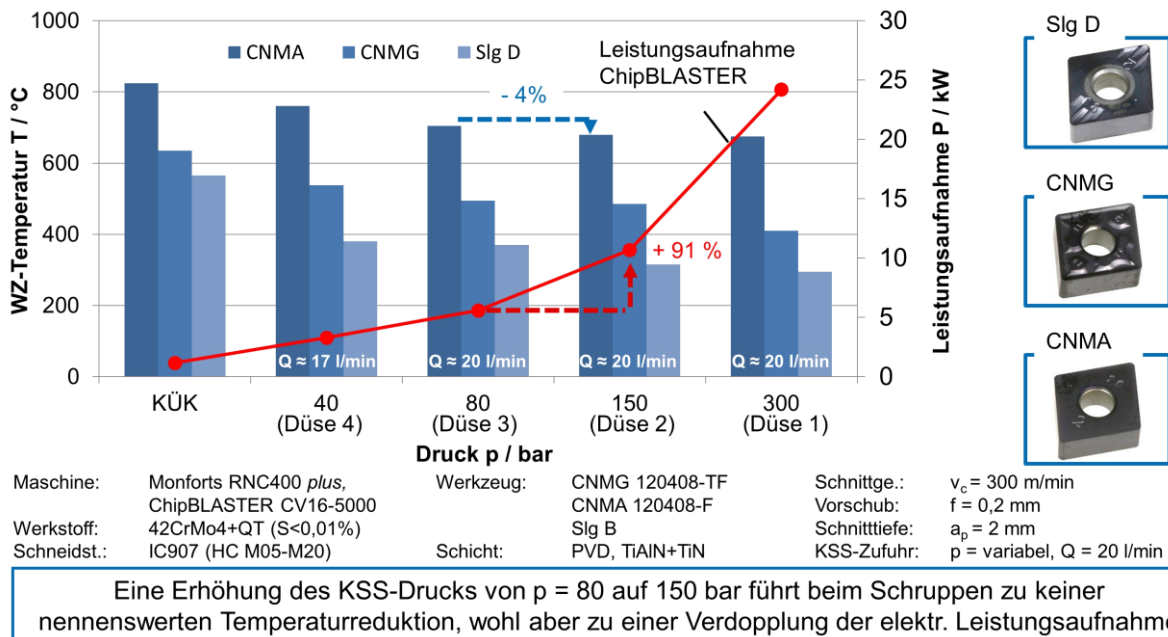


Abbildung 37: Ermittlung des optimalen KSS-Drucks bei konstantem Volumenstrom für das Außenlängs-Schruppdrehen

Somit ist der optimale und maximal wirksame KSS-Volumenstrom abhängig von der Spanungsbreite, der Ausrichtung und Anzahl der Düsen sowie der geometrischen Eingriffsverhältnisse.

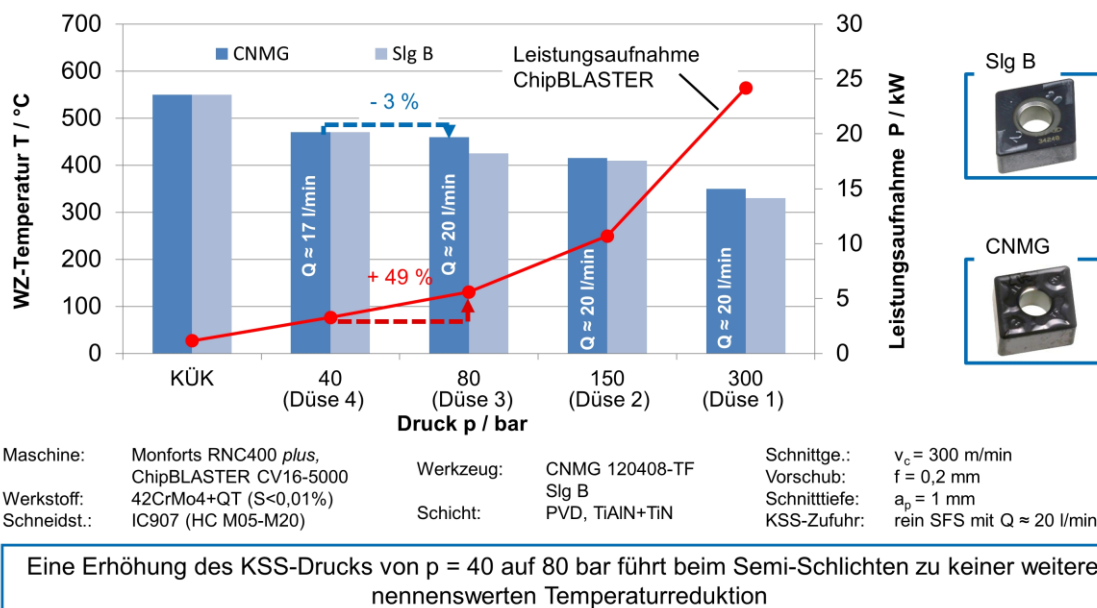


Abbildung 38: Ermittlung des optimalen KSS-Drucks bei konstantem Volumenstrom für Außenlängs-Schruppdrehen

Nach Erreichen des maximal wirksamen Volumenstroms kann nur noch die Steigerung des KSS-Zufuhrdrucks zusätzliche Effekte durch die weitere Erhöhung der Strahlkraft bewirken.

4.5 Einfluss des KSS-Mediums (Öl vs. Emulsion)

Eine weitere offene Fragestellung war der Einfluss des KSS-Mediums auf die Werkzeugleistungsfähigkeit, den Zerspanprozess im Allgemeinen sowie die Werkzeugmaschine bei Zuführung mit hohem Druck. Während bei der Mehrheit der Zerspanprozesse vorwiegend Emulsionen eingesetzt werden, die sich durch ihre hervorragende Kühl- und Spülwirkung auszeichnen, werden vor allem auf Mehrspindel-Drehautomaten auch nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe (Öle) eingesetzt.

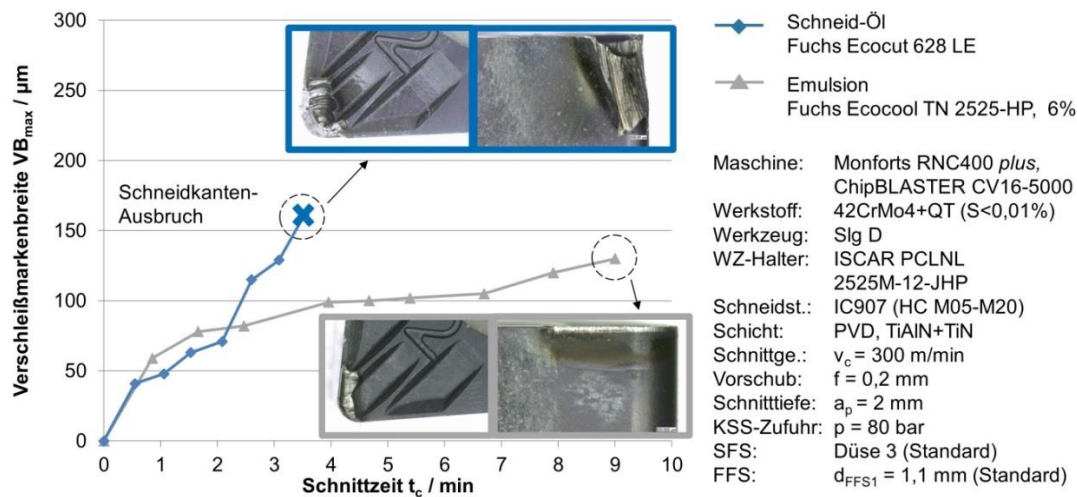
Gegenüber den Emulsionen liegen die Vorteile von Öl in der guten Schmierwirkung und dem gegenüber Emulsionen geringeren Pflegeaufwand. Jedoch neigen Öle stark zur Nebel- und Dampfbildung und weisen eine gute Haftung an den Werkstücken auf, was zu großen Ausschleppverlusten führt [KLOC08].

In diesem Arbeitspaket wurde daher in einem Referenzversuch Öl anstelle von Emulsion als KSS eingesetzt, um so den Einfluss des KSS-Mediums auf das WZ-Verschleißverhalten, die entstehenden Spanformen, den Zerspanprozess im Allgemeinen sowie das Einsatzverhalten von Öl bei der Zuführung des KSS mit hohem Druck zu untersuchen. Basierend auf den Ergebnissen aus AP 1 bis AP 4 wurde ein Referenzversuch definiert.

Erzielte Ergebnisse im Arbeitspaket 5

Da die am WZL vorhandenen Hochdruckaggregate ausschließlich mit Emulsion betrieben werden können, wurde eine Hochdruckpumpe von der Firma Wanner Engineering Inc. für die Außenlängsdrehversuche auf der Drehmaschine Index des Typs GU-800 am WZL der RWTH Aachen eingesetzt. Im Rahmen des Referenzversuchs wurde beim Außenlängsschruppdrehen die Strahlleitgeometrie D eingesetzt. Die thermische Werkzeugbelastung ist aufgrund der deutlich geringen Wärmeleitfähigkeit des Öls rapide angestiegen.

Die Folge ist ein frühzeitiger Ausfall des Werkzeugs beim Einsatz des Öls (Abbildung 39). Zudem waren die Verschleißversuche an der Drehmaschine unter Schrubbbedingungen durch starke Dampfbildung gekennzeichnet.

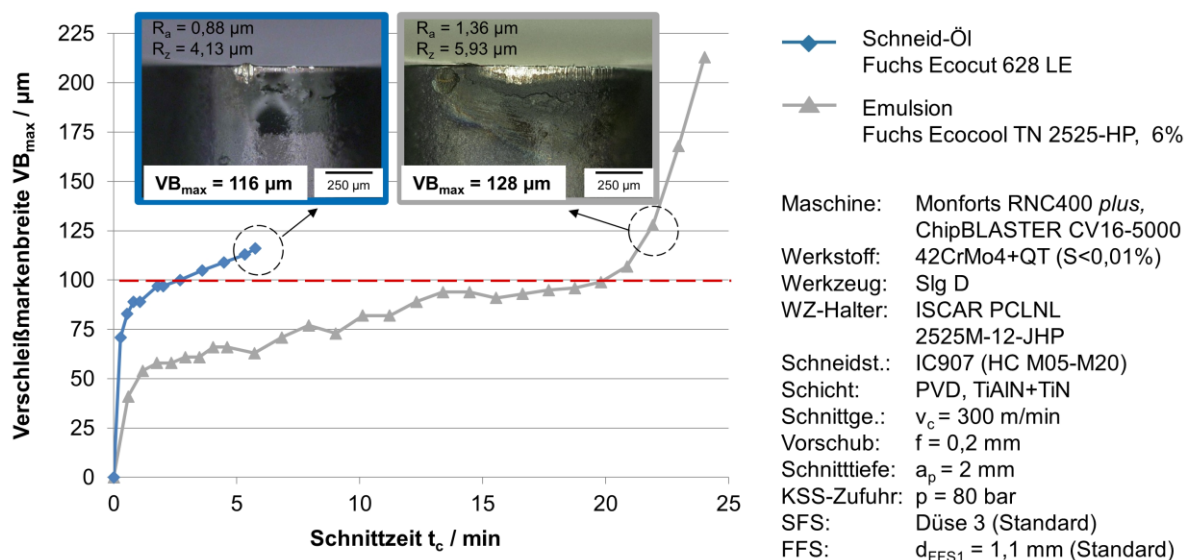


Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Schneidöls führt zu einer hohen thermischen Werkzeugbelastung

Abbildung 39: Verschleißkurven beim Schruppen mit Variation des KSS-Mediums

Bei der Schlichtbearbeitung war die Dampf- und Nebelbildung deutlich geringer. Die maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{max} = 100 \mu m$ wurde unter Schlichtbedingungen beim Einsatz des Schneidöls im direkten Verschleiß zur Emulsion deutlich schneller erreicht (Abbildung 40).

Die Dampfbildung beim Einsatz des Öls als Kühlschmierstoff wurde durch die hohen Schnittgeschwindigkeiten und folglich durch hohe Zerspanntemperaturen verstärkt.



Trotz besserer Oberflächenkennzahlen ist im Vergleich zur Emulsion ein deutlich schlechtes Verschleißverhalten zu erkennen

Abbildung 40: Verschleißkurven beim Schlichten mit Variation des KSS-Mediums

4.6 Auswirkung der HD-KSS-Zufuhr auf die WZ-Maschine und die Peripherie

Im Rahmen der durchgeführten Zerspanversuche in diesem Projekt wurden die Wechselwirkungen der HD-KSS-Zufuhr mit der Werkzeugmaschine und den Maschinenkomponenten versuchsbegleitend dokumentiert. Obwohl hierzu keine vertiefenden wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt wurden, sollen die beobachteten Effekte an dieser Stelle zusammengefasst dargestellt werden, da sich daraus Maßnahmen zur Optimierung bestehender Maschinen- und Werkzeugkonzepte ableiten lassen.

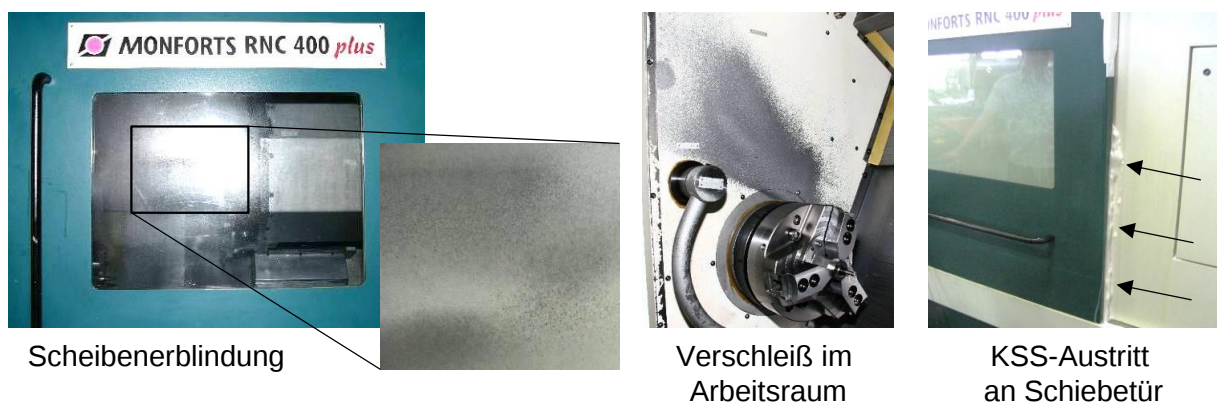


Abbildung 41: Wechselwirkung der HD-KSS-Zufuhr mit der Versuchsmaschine

Hinsichtlich der Werkzeugmaschine wurden folgende Wechselwirkungen bzw. Einschränkungen durch den Betrieb mit HD-KSS-Zufuhr beobachtet [SANG11, SANG12b]:

- KSS-Austritt in die Umgebung und in den Antriebsraum der Maschine aufgrund mangelnder Dichtheit von Arbeitsraum, Spindel und Schieberabdeckungen (umso intensiver, je kleiner der Arbeitsraum der Maschine ist), Abbildung 41
- Abrasiver Verschleiß im Maschineninnenraum und Erblindung der Sicherheits-scheibe durch den Beschuss mit Feinstspänen, Abbildung 41
- Verklemmen von Mikrospänen in konventionellen Späneförderern, Teleskopabdeckungen und Bürstendichtungen. Aus diesem Grund sollte die Entstehung von Nadelspänen durch Druckabsenkung vermieden werden.
- Verhinderte Sicht in den Arbeitsraum der Maschine beim Hochdruckeinsatz durch starke KSS-Vernebelung (Entstehung von Aerosolen). Aus diesem Grund ist eine ausreichend große Absauganlage erforderlich, wobei ein verstärkter KSS-Austrag durch die stärkere (Wasser-)Verdunstung beobachtet wurde.

- Während bei der Zuführung des KSS in Form der Bypass-Lösung im Versuchsbetrieb keine signifikanten Druckverluste in der Zuleitung feststellbar waren, wurden Druckverluste zwischen der HD-Pumpe und dem Werkzeughalter in der Größenordnung um 10 % bei der internen Zuführung des KSS auf einem Drehfräszentrum der Firma Monforts vom Typ UniCen 1000 gemessen [SANG13].

5 Nutzen der erzielten Ergebnisse und innovativer Beitrag für KMU

Mit zunehmendem Stahleinsatz und weltweit steigenden Produktionskosten in der Stahlverarbeitung nehmen auch die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der spannenden Stahlbearbeitungsverfahren zu. Neben der Steigerung der Produktivität der Prozesse spielt die Prozesssicherheit mit zunehmendem Automatisierungsgrad in der Fertigung ebenfalls eine Schlüsselrolle.

Die produzierende Industrie ist nach wie vor ein Kernbereich der deutschen Wirtschaft. Eine der wichtigsten Aufgaben der Zukunft ist es, die Energieeffizienz in der Produktion und im Produkt zu steigern. Die Erhöhung des Wirkungsgrads in der Produktion ist unter anderem ein zentrales Thema, das im Rahmen einer energieeffizienten Produktion bearbeitet werden muss [BULL08].

An dieser Stelle setzt die im Projekt angestrebte Optimierung der Technologie der Hochdruck-KSS-Zufuhr an. Durch die vorgesehene Steigerung der Effizienz der Hochdrucktechnologie durch angepasste Werkzeuge und die richtige Abstimmung von KSS-Druck und KSS-Volumenstrom vor dem Hintergrund der Energiekostenminimierung wird der Wirkungsgrad der Hochdruck-KSS-Zufuhr signifikant gesteigert.

Zwar entstehen durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr im Gegensatz zur konventionellen Kühlung zunächst zusätzliche Energiekosten, dieser zunächst angenommene Nachteil wird bei richtiger Anwendung und der optimalen Auslegung des Gesamtsystems Technologie – Werkzeug – Maschine jedoch kompensiert durch eine deutliche Steigerung der Produktivität in der spannenden Bearbeitung, wodurch kürzere Bearbeitungszeiten, niedrigere Kosten und Maschineneinsparungen erzielt werden.

Die Steigerung der Effizienz der Hochdruck-KSS-Zufuhr und die Erweiterung des Wissens bezüglich der Effekte und Wechselwirkungen der Hochdruck-KSS-Zufuhr mit der Maschine tragen ferner dazu bei, dass diese potentialträchtige Technologie eine breitere Anwendung findet und sowohl den Anwendern als auch den Werkzeug- und Maschinenherstellern neue Märkte erschließen kann.

Das durchgeführte Projekt leistet durch die erarbeiteten Forschungsergebnisse und die Weiterentwicklung der Technologie der Hochdruck-KSS-Zufuhr hinsichtlich der Prozessgestaltung, sowie der angepassten Werkzeug- und Maschinenauslegung einen hohen innovativen Beitrag. Dabei steht nicht die Problemlösung eines speziellen Anwendungsfalls im Vordergrund. Vielmehr sind durch grundlegende Untersuchungen allgemeingültige Empfehlungen und Erkenntnisse zum wirtschaftlichen und energieeffizienten Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr und der optimalen Werkzeuggestaltung erarbeitet worden.

Neben der Quantifizierung des Potentials der Hochdruck-KSS-Zufuhr bei der Bearbeitung langspanender und / oder hochlegierter Stahllegierungen stand vor allem das verbesserte Verständnis hinsichtlich des Einflusses der Einstellgrößen KSS-Druck, KSS-Volumenstrom und Werkzeugkonzept auf die Leistungsfähigkeit der Hochdruck-KSS-Zufuhr vor dem Hintergrund der Energiekostenminimierung im Fokus der Untersuchungen.

Der innovative Beitrag des Projekts besteht außerdem darin, dass durch die genannten Ansatzpunkte die Produktivität bei der spanenden Bearbeitung verschiedener schwer zerspanbarer Stahllegierungen durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik um bis zu 100% bei gleichzeitiger Steigerung der Prozesssicherheit erhöht wurde, und so die Fertigungskosten signifikant gesenkt werden konnten.

Die Steigerung der Produktivität wird dabei durch eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erzielt, da der Hauptbenefit der Hochdruck-KSS-Zufuhr darin besteht, dass der Anstieg der Zerspantemperatur mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit durch den Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr ausgeglichen werden kann. Der Schlüssel zur Realisierung der sehr anspruchsvollen Zielsetzung war der Systemansatz durch die Weiterentwicklung des Gesamtsystems Prozess, Werkzeug und Maschine, um die Grenzen der Bearbeitung deutlich zu verschieben.

5.1 Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse für KMU

Die Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse wird hauptsächlich in den Fachgebieten Produktion, Konstruktion sowie Werkstoffe / Materialien stattfinden. Die Forschungsergebnisse werden in den Wirtschaftszweigen Metallerzeugung und -bearbeitung und Maschinenbau Anwendung finden.

5.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Mehr als 95% aller deutschen Unternehmen im Wirtschaftszweig „Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen“ sind KMU's [JUNG10]. Darüber hinaus ist Stahl der am meisten verwendete Konstruktionswerkstoff. Die in dem durchgeführten Projekt erarbeiteten Ergebnisse leisten deshalb durch die Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit in der Stahldrehbearbeitung einen signifikanten Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von deutschen KMU's. Der voraussichtliche Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit in kleinen und mittleren Unternehmen wird im Folgenden branchenbezogen dargestellt.

Anwender

Die derzeit schwierige Situation der produzierenden Industrie in Westeuropa wird meist durch den globalen Wettbewerbsdruck erklärt. Die neuen Wettbewerber kommen aus Niedriglohnländern, die Wettbewerbsvorteile im Wesentlichen aus geringeren Arbeitskosten generieren und gleichzeitig ihre technologischen Fähigkeiten stets verbessern. Vor allem kleinere und mittlere produzierende Unternehmen stehen ständig unter hohem Wettbewerbs- und damit Kostendruck. Durch die Steigerung der Produktivität leistet die Hochdruck-KSS-Zufuhr einen bedeutenden Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, insbesondere KMU's, die im Bereich der Zerspanung tätig sind.

Die Steigerung der Prozesssicherheit ermöglicht Anwendern, vor allem kritische spannende Fertigungsprozesse zu automatisieren und somit Kosten sowie Rüst- und Bearbeitungszeiten zu reduzieren. Steht weniger die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit im Vordergrund, können Werkzeugkosten durch die Verringerung des Werkzeugverschleißes im Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung gespart werden.

Durch die genannten Vorteile können höhere Werkzeuganschaffungskosten und Kosten zur Beschaffung und zum Betrieb von Hochdruckpumpen kompensiert werden. Trotz des zusätzlichen Energieaufwands zum Betrieb der Hochdruckpumpen kann durch die Steigerung der Produktivität um bis zu 100% und der ermöglichten Automatisierung von Prozessen durch die Hochdrucktechnologie der auf die gesamte Fertigung bezogene Energiebedarf reduziert werden, da durch stark verringerte Haupt- und Nebenzeiten Maschinen eingespart werden können und zudem die für die Prozesse benötigte Kühlschmierstoffmenge reduziert werden kann.

Darüber hinaus sind die generierten Ergebnisse für produzierende Unternehmen von fundamentaler Bedeutung zur Auswahl geeigneter Einstellparameter (KSS-Druck und Schnittparameter) hinsichtlich eines wirtschaftlichen und energieeffizienten Einsatzes der HD-KSS-Zufuhr. Unternehmen, die diese Technologie bislang nicht einsetzen, benötigen die Erkenntnisse aus diesem Projekt, um die Wirtschaftlichkeit der HD-KSS-Zufuhr bei der Zerspanung von Stählen im Vergleich zu ihrer derzeitig verwendeten Technologie einzuschätzen und um Wirtschaftlichkeitsrechnungen zur Einführung dieser neuen Technologie durchzuführen zu können.

Werkzeughersteller

Die Nutzung der erzielten Grundlagenenergebnisse ermöglicht vor allem kleinen und mittleren deutschen Herstellern von Drehwerkzeugen und Wendeschneidplatten die Entwicklung und den Vertrieb adaptierter Hochdruck-Werkzeughalter und Hartmetall-Wendeschneidplatten. Angepasste Werkzeugsysteme zum Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr zeichnen sich gegenüber den derzeitigen Produkten durch eine gesteigerte Effizienz und Leistungsfähigkeit durch längere Standzeiten und größere anwendbare Schnittgeschwindigkeiten aus.

Vor allem zum jetzigen Zeitpunkt, an dem nur vereinzelt Werkzeuge mit innerer Hochdruck-KSS-Zufuhr auf dem Markt erhältlich sind, und die meisten bei den Anwendern eingesetzten Werkzeuge Sonderanfertigungen sind, können deutsche Werkzeughersteller durch die Umsetzung der erzielten Ergebnisse neue Produkte in ihr Portfolio aufnehmen, Wettbewerbsvorteile erzielen und neue Absatzmärkte erschließen. Deutsche Werkzeughersteller besitzen nur einen Weltmarktanteil von ca. 6 % und können sich deshalb nur durch ihre Innovationskraft behaupten.

Werkzeugmaschinenhersteller und Komponenten-Zulieferer

Die Werkzeugmaschinenbranche und ihre Zulieferer sind sehr stark mittelständisch orientiert. Insbesondere nehmen die deutschen Maschinenhersteller eine Spitzenposition auf dem Weltmarkt ein, stehen jedoch ständig unter starkem Wettbewerbsdruck, insbesondere durch zunehmende Konkurrenz aus China. Durch die in dem Projekt erarbeiteten Ergebnisse haben deutsche Maschinenhersteller und deren Zulieferer die Möglichkeit, die grundlegenden Erkenntnisse über das Einsatzverhalten von Werkzeugmaschinen beim Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr und über die Wechselwirkungen der Hochdrucktechnologie mit der Werkzeugmaschine in neue Produkte einfließen zu lassen.

Dadurch können neue Lösungen, z.B. zur Maschinenabdichtung, Aerosolabsaugung, Gestaltung der Sicherheitsscheibe und Förderung der entstehenden Feinstspäne entwickelt werden.

Das gewonnene Know-How ermöglicht deutschen Maschinenhersteller und Komponentenzulieferer speziell an die Hochdrucktechnologie angepasste und entsprechend ausgerüstete Werkzeugmaschinen (Pumpe, Filterung, KSS-Zuführung) auf dem Weltmarkt anzubieten und so globale Wettbewerbsvorteile gegenüber der ausländischen Konkurrenz zu erzielen. Bisher wird die Hochdrucktechnologie meist auf konventionellen Drehmaschinen mit externer Pumpe zur Hochdruckerzeugung und externer Hochdruck-KSS-Zuführung (Bypass) eingesetzt. Anwender fordern bereits seit längerem die Entwicklung angepasster Werkzeugmaschinen mit integrierten Hochdruckpumpen.

Durch eine genaue Kenntnis des für bestimmte Bearbeitungsaufgaben erforderlichen KSS-Drucks und KSS-Volumenstroms kann die in die Maschine und Steuerung zu integrierende Hochdruck-Pumpe gezielt dimensioniert und angesteuert werden und die Werkzeugmaschinen so hinsichtlich ihres Energieverbrauchs bzw. ihrer Energieeffizienz optimiert werden, wodurch ebenfalls Wettbewerbsvorteile entstehen.

5.3 Industrielle Umsetzung der Ergebnisse nach Projektende

Ein wesentliches Ziel des Forschungsprojektes war es, den Anwendern und Werkzeugherstellern grundlegende Erkenntnisse und Richtlinien zur Auslegung von Hochdruck-Werkzeugen und geeignete Einstellparameter zum energieeffizienten Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr für eine wirtschaftlichere Bearbeitung von Stahlwerkstoffen zur Verfügung zu stellen.

Zu diesem Zweck wurden die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse und Informationen systematisch aufbereitet und veröffentlicht. Unter der Voraussetzung, dass die Werkzeugmaschinen von potentiellen Anwendern mit geeigneten Hochdruckpumpen ausgestattet sind, lassen sich die Ergebnisse ohne bedeutenden finanziellen Aufwand in produzierenden Industrieunternehmen umsetzen. Es ist aus den Projektergebnissen ersichtlich, dass schon mit KSS-Zuführdrücken von 80 bar und Volumenströmen in der Größenordnung von 11 l/min signifikante Vorteile erzielt werden können.

Die eventuell erforderliche Neuanschaffung eines Hochdruck-Aggregats und die Umrüstung vorhandener Werkzeugmaschinen wird im Hinblick auf den mit der Hoch-

druck-KSS-Zufuhr erzielbaren Benefit auch für kleine und mittelständische Unternehmen wirtschaftlich und realisierbar sein.

Deutsche Werkzeughersteller können die erzielten Ergebnisse in ihren Produkten umsetzen. So können hinsichtlich der Zuführungsvariante optimierte Hochdruck-Werkzeughalter und an die Technologie angepasste Schneidplattengeometrien entwickelt und anschließend vermarktet werden.

Mit der zunehmenden Erschließung von Anwendungsfeldern und dem zu erwartenden zunehmenden Einsatz der Hochdruck-KSS-Zufuhr in produzierenden Unternehmen wird in den nächsten Jahren ein zunehmender Bedarf an Hochdruck-Werkzeugen entstehen. Für die Werkzeughersteller entstehen durch die Weiterentwicklung vorhandener, konventioneller Werkzeugkonzepte nur sehr geringe und überschaubare zeitliche und finanzielle Aufwände. Auch deutsche Werkzeugmaschinen- und Komponentenhersteller können die erzielten Ergebnisse umsetzen und vermarkten.

Die Beobachtungen an der Werkzeugmaschine und das gewonnene Know-How können unmittelbar zur Weiterentwicklung und Neukonstruktion von Werkzeugmaschinen im Hinblick auf den Einsatz und die Integration der Hochdrucktechnologie in die Maschine genutzt werden. Ein finanzieller Aufwand entsteht lediglich bei der Weiterentwicklung bestehender Maschinenkonzepte und Komponenten und kann als gering angesehen werden.

Demgegenüber stehen große Erfolgsaussichten durch den zunehmenden Bedarf „hochdrucktauglicher Werkzeugmaschinen“. Anwender der Hochdruck-KSS-Zufuhr appellieren bereits seit längerer Zeit den Bedarf der Weiterentwicklung und Anpassung von Maschinen und deren Peripherie an die Hochdrucktechnologie. Viele potentielle Anwender der Technologie verzichten derzeit noch auf dessen Einsatz aufgrund nicht existierender und nicht ausreichend angepasster und ausgereifter Maschinen- und Werkzeugkonzepte.

Die Anpassung der Werkzeugmaschine und Werkzeuge an die Hochdrucktechnologie trägt also dazu bei, dass die Technologie bei den Anwendern zunehmend auf Interesse stößt und sich der Einsatz zunehmend verbreitet, wodurch ein Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen vor der Konkurrenz aus Niedriglohnländern geleistet wird.

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen:

Wo	Maßnahme	Zeitraum
Messe EMO 2011	Vorstellung erster Ergebnisse auf WZL Messestand zum Thema HD-KSS-Zufuhr. Ergebnispräsentation auf Leinwand, Ausstellung der entwickelten HD-Werkzeughalter.	Oktober 2011
2. Aachener KSS-Tagung, ca. 120 Industrieteilnehmer	Vortrag zum Thema HD-KSS-Zufuhr mit ersten Ergebnissen aus Projekt	20. und 21. Oktober 2011
Sachstandsberichte im Arbeitskreis VI	Vorstellung der bisherigen Ergebnisse, Transfer an Mitglieder des AK VI im VDW Forschungsinstitut e.V.	17. Oktober 2011, 14. März 2012, 17. Oktober 2012, 06. März 2013, 16. Oktober 2013
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortschrittsbericht, Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse, Beratung und Abstimmung der weiteren Vorgehensweise	14. September 2011 23. März 2012 23. Oktober 2012, 28. Februar 2013, 24. September 2013
Vorstellung auf Konferenz High Speed Machining HSM in San Sebastian / Spanien	Transfer von Projektergebnissen; Vortrag zu Kühlschmierkonzepten in der Zerspanung	7. und 8. März 2012
4. Aachener HPC Konferenz, ca 70 Teilnehmer	Transfer von Projektergebnissen an Industrieunternehmen im Rahmen eines Vortrags zur Hochdruck-K Kühlschmierstoffzufuhr	24. und 25. Oktober 2012 am WZL der RWTH Aachen
Veröffentlichung im Branchenreport des VDW	Breite Veröffentlichung der Ergebnisse für die interessierte Öffentlichkeit und Technologietransfer in die Wirtschaft	Oktober 2012

Veröffentlichung in „Excellence in Production, Fertigungstechnologien und -prozesse“	Nationale Sichtbarkeit der Projektergebnisse	Dezember 2012
Beratung von Anwendern	Bilaterale Beratungsprojekte zur wirtschaftlichen Zerspanung zwischen dem WZL der RWTH Aachen und Industrieunternehmen	Kontinuierlich seit Projektstart
Studien- und Diplomarbeiten, Dissertation	Transfer der Erkenntnisse an Nachwuchssingenieure. Bisher 2 Studien-, 2 Diplomarbeiten und 1 Dissertation im Rahmen des Projekts durchgeführt.	Kontinuierlich seit Projektstart

Geplante Transfermaßnahmen:

2 Veröffentlichungen, voraussichtlich in MM Maschinenmarkt und Industrieanzeiger	Transfer der Ergebnisse aus dem Projekt an Industrieunternehmen	1. Quartal 2014,
Einbeziehung der Projektergebnisse in das Basisseminar Zerspantechnik am WZL (Turnus: halbjährlich)	Beratung von Anwendern ohne eigene Forschungskapazitäten	23. und 24. April 2014
Vortrag auf der 3. Aachener Kühlschmierstoff-Tagung	Transfer der Ergebnisse aus dem Projekt an Industrieunternehmen	12. und 13. November 2013
Vortrag auf der 3. VDI Fachtagung „Stahl- und Gusszerspanung 2013“	Transfer der Ergebnisse aus dem Projekt an Industrieunternehmen	12. und 13. November 2013
Lehre an der RWTH Aachen, Fach Fertigungstechnik	Transfer der Ergebnisse und Erkenntnisse aus Projekt an Nachwuchssingenieure	Kontinuierlich im Jahr 2013

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr (HD-KSS-Zufuhr) stellt bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe eine potenzialträchtige Technologie zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit dar. Vor allem bei Prozessen mit kontinuierlichem Schnitt, wie beispielsweise dem Drehen, ermöglicht die gezielte Zufuhr des KSS zur Schneidkante mit hohem Druck die Steigerung der Schnittparameter aufgrund eines reduzierten Werkzeugverschleißes und die Minimierung von Maschinennebenzeiten durch die Gewährleistung von Spanbruch und sicherem Spanabtransport. Der Begriff „Hochdruck“ ist bis heute nicht klar definiert und umfasst in der Literatur einen Wertebereich von 20 bis 4000 bar, wobei am WZL der RWTH Aachen KSS-Zuführdrücke bis maximal 350 bar als praxisgerecht eingestuft und eingesetzt wurden [SANG13].

In dem durchgeführten Projekt „ProHoKühl“ wurden systematische Zerspanversuche durchgeführt, um die Wirkungszusammenhänge sowie die Grenzen und Leistungsfähigkeit der HD-KSS-Zufuhr bei der Bearbeitung der Stahlwerkstoffe X5CrNi18-10 und 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) zu untersuchen. Die Ergebnisse des Projekts lieferten die Erkenntnis, dass das Potenzial der HD-KSS-Zufuhr sehr stark vom Werkstoff abhängt. Die besten Ergebnisse wurden bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT erzielt, wobei die Werkzeugstandzeiten hierbei vervierfacht werden konnten. In der Regel ging dies mit einer starken Werkzeugtemperaturreduktion einher.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass klassische Spanleitgeometrien die KSS-Freistrahlausbildung negativ beeinflussen können. Daher wurden in diesem Projekt angepasste „Strahlleitgeometrien“ als Ersatz der klassischen Spanformgeometrie entwickelt und in Zerspanversuchen eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass solche Geometrien im Zusammenhang mit der spanflächenseitigen HD-KSS-Zufuhr große Potenziale bieten, um die Leistungsfähigkeit und Effizienz der HD-KSS-Zufuhr bei der Drehbearbeitung von Stahlwerkstoffen weiter zu steigern.

Die KSS-Zuführungsvariante stellt eine der wichtigsten Einflussgrößen dar. Im Rahmen dieses Projekts wurde standardmäßig die spanflächenseitige HD-KSS-Zufuhr eingesetzt, da sie die am meisten verbreitete Variante ist. Beim Drehen von 42CrMo4+QT ($S < 0,01\%$) hat sich eine deutliche Verbesserung der Prozesssicherheit und eine leichte Verbesserung des Verschleißverhaltens von Werkzeugen beim Zu-

schalten der freiflächenseitigen KSS-Zufuhr gezeigt. Dieses Ergebnis wurde auf die reduzierte Temperatur im Bereich der Freifläche zurückgeführt.

Die Parameter KSS-Zufuhrdruck und -Volumenstrom haben einen wesentlichen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß und den Spanbruch. Da die Volumenstromsteigerung stets mit einer Vergrößerung der Strahlfläche (und somit Strahlbreite) zusammenhängt, hat eine Volumenstromsteigerung nur solange einen positiven Einfluss auf den Zerspanprozess, bis die Strahlbreite gleich der Spanbreite ist. Aus dieser Beobachtung wurde die Schlussfolgerung abgeleitet, dass Einstellung des KSS-Volumenstroms durch die Wahl der Größe der Düsenaustrittsfläche in enger Anlehnung an die Schnitttiefe erfolgen sollte. Sobald der KSS-Strahl die gesamte Spanbreite erfasst, kann nur noch eine weitere Steigerung des KSS-Drucks zusätzliche Effekte hervorrufen.

Mit der Durchführung des Forschungsprojekts „ProHoKühl“ konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz der HD-KSS-Zufuhr mit angepassten Werkzeugen zur deutlichen Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen führt. **Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.**

Das IGF-Vorhaben 17178 N der Forschungsvereinigung VDW-Forschungsinstitut e.V., Corneliusstraße 4, 60325 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für die Bewilligung und Förderung des Projekts „ProHoKühl“ bedankt sich das WZL der RWTH Aachen recht herzlich.

Ausschlaggebend für den Projekterfolg war die sehr intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren der RWTH Aachen und den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses. Aus diesem Grund gilt ein weiterer Dank den im Projektbegleitenden Ausschuss tätigen Unternehmen, die durch unentgeltliche Bereitstellung von Probenmaterial und Geräten als auch durch eine intensive Beratungstätigkeit zum Gelingen des Projektes beigetragen haben.

Literatur:

- [ABEL09] Abele, E.; Pfeiffer, P.; Sieber, M.: Es schneit im Arbeitsraum. WB Werkstatt + Betrieb 11/2009, S. 56-59
- [AURI06] Aurich, J.C.; Bil, H.: 3D Finite Element Modelling of Segmented Chip Formation. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 55, Issue 1, 2006, S. 47-50
- [BIER10] Biermann, D.; Felderhoff, F.: Prozessgestaltung für die wirtschaftliche spanende Bearbeitung von Hochleistungsstählen. Stahl und Eisen 130 Nr. 2, 2010, S. 45-48
- [BRAH09] Braham, T.; Germain, G.; Robert, R.; Lebrun, J.L.; Auger, S.: High pressure water jet assisted machining of duplex steel: Machinability and tool life. 12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Donostia-San Sebastián, Spanien, 7.-8. Mai 2009
- [BRIN99] Brinksmeier, E.; Walter, A.; Janssen R.; Diersen, R.: Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Volume 213, Part B, 1999, S. 769-778
- [BULL08] Bullinger, H.J.: Forschung und Entwicklung in der Produktion – Kernkompetenz für Marktwachstum. Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium '08, Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.), Apprimus Verlag, Aachen, 2008, S. 1-11
- [COUR09] Courbon, C.; Kramar, D.; Krajnik, P.; Pusavec, F.; Rech, J.; Kopac, J.: Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 49, Issue 14, 2009, S. 1114-1125
- [CHAN03] Chandrakanth, S.; Xiaomin, D.; Bayoumi, A.E.: Finite element simulation of high-pressure water jet assisted metal cutting. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 45, No. 6-7, 2003, S. 1201-1228

- [CRAF99] Crafoord, R.; Kaminski, J.; Lagerberg, S.; Ljungkrona, O.; Wretland, A.: Chip control in tube turning using a high-pressure water jet. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 213, No. 8, 1999, S. 761-767
- [DAHL04] Dahlmann, P.; Escursell, M.: High-pressure jet-assisted cooling: a new possibility for near net shape tuning of decarburized steel. International Journal of Machining Tools & Manufacture, Volume 44, 2004, S. 109-115
- [DAHL02] Dahlmann, P.: A comparison of temperature reduction in high-pressure jet-assisted turning using high pressure versus high flowrate. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 216, No. 4, 2002, S. 467-473
- [DENK10] Denkna, B.; Dege, J. H.; Groppe, M.; Grove T.: Zerspanbarkeit von β -Titanlegierungen. VDI-Z Special Werkzeuge, Mai 2010, S. 24-27
- [DENK05] Denkna, B.; Becker, J.C.; Jivishov, V.: Scaling Effect on Chip Formation, Forces and Surface Layer in Hard Turning. Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, 10.-11. Mai 2005, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 2005, S. 87-91
- [EZUG06] Ezugwu, E.O.; Bonney, J.; Rosemar, B.; Cakir, O.; Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 47, 2007, S. 884-891
- [EZUG05] Ezugwu, E.O.; Bonney, J.; Fadare, D.A.; Sales, W.F.: Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 162-163, 2005, S. 609-614
- [EZUG04] Ezugwu, E.O.; Bonney, J.: Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 153-154, 2004, S. 1045-1050

- [GERS04] Gerschwiler, K.: Entwicklung neuer Hartmetalle und Hartstoffschichten für die Drehbearbeitung austenitischer Stahlwerkstoffe, Teilprojekt B: Untersuchung der Verschleißphänomene und Verschleißursachen in Zerspan- und Analogieversuchen. Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt 03N5031B, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, RWTH Aachen, 2004
- [GRAß03] Graß, P.: Hochdruckkühlung erschließt Produktivitätsreserven. VDI-Z 145, Nr. 5, Mai 2003, S. 76-79
- [HABA06] Habak, M.; Lebrun, J.-L.; Waldmann S.; Robert P.; Fischer, C.: Residual stress in high pressure water jet assisted turning of austenitic stainless steel. Materials Science Forum, Volumes 524-525, 2006, S. 581-586
- [HEST06] Hesterberg, S.: Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006
- [HINT90] Hintze, W.: Modellgestützte Spanbruchbeurteilung beim Drehen. Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg, 1990
- [HOCK08] Hockauf, W.: Die Weichzerspanung im Grenzbereich des Machbaren. Spanende Fertigung: Prozesse Innovationen Werkstoffe, 5. Ausgabe, Weinert, K.; Biermann, D. (Hrsg.), Vulkan Verlag, Essen, 2008, S. 408-414
- [JAWA88] Jawahir, I.S.; Oxley, P. L. B.: New Developments in Chip Control Research Moving Towards Chip Breakability Predictions for Unmanned Manufacture. Predictions for unmanned Manufacture, Proc. Int. Conf. ASME, Manufacturing International 88, Atlanta, Georgia, USA, S. 311-320
- [JUNG10] Jung, S.: Ausgewählte Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen in Deutschland 2007. Wirtschaft und Statistik, Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.), 1/2010, S. 41-51
- [KAMI00] Kaminski, J.; Alvelid, B.: Temperature reduction in the cutting zone in water-jet assisted turning. Journal of Materials Processing Technology,

Volume 106, 2000, S. 68-73

- [KLOC10a] Klocke, F.; Essig, C.: Beurteilung von Spanformgeometrien, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100, 2010, H.3, S. 190-196
- [KLOC10b] Klocke, F.; Lung, D.; Essig, C.; Sangermann, H.: Automatisierte Produktion-ohne Spanbruch undenkbar. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105. Jahrgang, 1-2/2010, S. 21-25
- [KLOC09] Klocke, F.; Lung, D.; Essig, C.: Kontrollierter Spanbruch als Schlüssel zur automatisierten Fertigung, ATZproduktion, Ausgabe Nr. 5, 2008, S. 38-33
- [KLOC08] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren, 8., neu bearbeitete Auflage, Springer 2008
- [KOVA95] Kovacevic, R.; Cherukuthota, C.; Mohan, R.: Improving Milling Performance with High Pressure Waterjet Assisted Cooling / Lubrication. Journal of Engineering for Industry, Volume 177, August 1995, S. 331-339
- [KURI82] Kurimoto T.; Barrow G.: The Influence of Aqueous Fluids on the Wear Characteristics and Life of Carbide Cutting Tools. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 31, Issue 1, 1982, S. 19-23
- [MACH94] Machado, A.R.; Wallbank, J.: The effects of a high-pressure coolant jet on machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 208, 1994, S. 29-38
- [MAZU89] Mazurkiewicz, M.; Kubala, Z.; Chow, J.: Metal Machining With High-Pressure Water-Jet Cooling Assistance - A New Possibility. Journal of Engineering for Industry, Volume 111/7, Februar 1989, S. 7-12
- [MB137] Klocke, F.; Gerschwiler, K.: Merkblatt 137 „Zerspanen von Stahl“. Ausgabe 2008, Stahl-Informations-Zentrum (Hrsg.)
- [PIGO52] Pigott, R.J.S.; Colwell A.T.: Hi-Jet Systems for Increasing tool life. SAE Q. Trans., Volume 6, No. 3, 1952, S. 547-566

- [RASC81] Rasch, F.O.; Vigeland, T.; Bjørke Ø.: Hydraulic Chipbreaking. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 30, Issue 1, 1981, S. 333-335
- [SANG13] Sangermann, H.: Hochdruck.Kühlschmierstoffzufuhr in der Zerspanung. Dissertation, RWTH Aachen, 2013
- [SHAR08] Sharmann, A.R.C.; Hughes J.I.; Ridgway K.; Surface integrity and tool life when turning Inconel 718 using ultra-high pressure and flood coolant systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 222, 2008, S. 653-664
- [SHAR71] Sharma, C.S.; Rice, W.B.; Salmon, R.: Some Effects of Injecting Cutting Fluids Directly into the Chip-Tool Interface. Journal of Engineering for Industry, May 1971, S. 441-444
- [SORB06] Sørby, K.; Tønnessen, K.: High-pressure cooling of face-grooving operations in Ti6Al4V. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 220, 2006, S. 1621-1627
- [SPAA71] Spaans, C.: The Fundamentals of Three-Dimensional Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control. Dissertation University of Technology Delft, 1971
- [TÖNS03] Tönshoff, H. K.; Denkena, B.: Spanen, 2., erweiterte und neu bearbeitete Auflage, Springer 2003
- [UHLM05] Uhlmann, E.; Zettier, R.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Spanbildung beim Hochgeschwindigkeitsspanen einer Nickelbasislegierung. Hochgeschwindigkeitsspanen metallischer Werkstoffe, Tönshoff, H.K.; Hollmann, F. (Hrsg.), Wiley-VCH, Weinheim, 2005, S. 404–425
- [WARN74] Warnecke, G.: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Dissertation Universität Hannover, 1974
- [WEIN05] Weinert, K.; Hesterberg, S.; Wittkop, S.; Trockenbearbeitung durch Koh-

lendioxid-Kühlung. VDI-Z Special Werkzeuge, August 2005, S. 40-43

- [WEIN04] Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J.W.; Wakanayashi, T.: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 53, Issue 2, 2004, S. 511-537
- [WERT92] Wertheim, R.; Rotberg, A.; Ber, A.: Influence of High-Pressure Flushing through the Rake Face of the Cutting Tool. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 41, Issue 1, 1992, S. 101-106
- [ZHAO02] Zhao, H.; Barber, G.C.; Zou, Q.: A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling. Wear, Volume 253, 2002, S. 957-962

Aachen, 31.10.2013

Ort, Datum

Rechtsverbindliche Unterschrift des Projektleiters und Stempelabdruck der federführenden Forschungsstelle