

Titel

Steigerung der Produktivität beim Fräsen durch die zielgerichtete Zufuhr des Kühlschmierstoffs mit Hochdruck – ProMill

IGF-Nr.: 18401 N

Forschungseinrichtung / -vereinigung

Forschungsvereinigung: FGW Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e. V.

Forschungseinrichtung: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University



Ansprechpartner bei der FGW-Remscheid:

Dr. Christian Pelshenke
02191 / 5921.111
pelshenke@fgw.de

Ansprechpartner beim WZL-Aachen:

Thomas Lakner, M.Sc. MSc
0241 / 80.28001
t.lakner@wzl.rwth-aachen.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 18401 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Das Fräsen zählt zu den bedeutendsten spanenden Fertigungsverfahren, insbesondere, da durch die Vielzahl der Verfahrensvarianten die herstellbaren Geometrien nahezu beliebig sind. Ein Beleg hierfür sind die Produktionsvolumina der Werkzeugmaschinen in Deutschland. Bei über 35 % der hergestellten Maschinen handelt es sich um Fräsmaschinen, Bearbeitungszentren oder flexible Systeme. Drehmaschinen hingegen nehmen etwa nur 10 % des Volumens ein [VDW17].

Motivation und Anlass für das Forschungsprojekt war die große Bedeutung des Fertigungsverfahrens Fräsen für den Maschinenbau, insbesondere für den Werkzeug- und Formenbau und die überragenden Leistungssteigerungen hinsichtlich Produktivität und Prozesssicherheit, die, wie jüngste Forschungsarbeiten beim Drehen eindrucksvoll belegen und zwar durch eine zielgerichtete Kühlschmierstoff (KSS)-Zufuhr mit Hochdruck (HD) erreicht werden können. Eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes, längere Standzeiten, respektive eine Erhöhung von Schnittgeschwindigkeit, Zeitspanvolumen und Produktivität, können beim Drehen durch die zielgerichtete Zufuhr des Kühlschmierstoffes in Form von einem oder mehreren hochenergetischen KSS-Freistrahlen zwischen Werkzeugspanfläche und Span in vielen Anwendungsfällen erreicht werden. Überdies kann zu einer Steigerung der Prozesssicherheit und der Reduzierung von Nebenzeiten für das manuelle Entfernen von Band- und Wirrspänen durch die zielgerichtete HD-KSS-Zufuhr mittels der Gewährleistung eines sicheren Spanbruchs und Spanabtransport beigetragen werden. [SANG13]

Nicht nur in einer Vielzahl von nationalen und internationalen Publikationen und vor allem auch bei den am WZL durchgeführten Forschungsarbeiten bei der Bearbeitung verschiedenster Werkstoffe wurde die hohe Effizienz einer zielgerichteten KSS-Zuführung beim Drehen nachgewiesen. Basierend auf diesen Forschungsarbeiten konnten in den letzten Jahren enorme Fortschritte bei der Entwicklung hochdrucktauglicher Drehwerkzeuge und signifikanter Leistungssteigerungen erreicht werden. Darüber hinaus hat die zielgerichtete Hochdruck-KSS-Zuführung zwischenzeitlich bei vielen Unternehmen Eingang in die Produktion gefunden. Beim Fräsen ist eine vergleichbare Entwicklung bis dato noch nicht zu verzeichnen. Gegensätzlich zum Drehen finden sich zum Thema Fräsen unter Hochdruck-KSS-Einsatz nur wenige Veröffentlichungen. [KOVA95]

Vom Fräsverfahren unabhängig, wird in der Literatur von reduziertem Werkzeugverschleiß und geringeren Zerspankräften, kürzeren Spänen und einer Verbesserung der Oberflächenqualität berichtet. Keine Forschungsergebnisse hingegen sind im Zusammenhang des Hochdruck-KSS-Einsatzes und der geometrischen Gestaltung der Spankammern veröffentlicht. Ferner ist zu den Voraussetzungen und Randbedingungen einer Anwendung der Hochdruck-KSS-Technologie bei der Fräsbearbeitung in der Produktion keine ausreichende Wissensbasis vorhanden.

Der unterbrochene Schnitt beim Fräsen führt dazu, dass im Gegensatz zum Drehen die Spanlänge immer kurz ist und deshalb die Spanabfuhr meist kein Problem darstellt. Von wesentlich größerer Bedeutung ist dagegen die Frage, wie stark sich der Span einrollt und wie die Spankammer zu seiner Aufnahme und prozesssicheren Abfuhr gestaltet sein muss. Diese Informationen sind für die Auslegung und damit für die Wirtschaftlichkeit eines Fräswerkzeuges essentiell. Die maximale Anzahl an Schneiden, welche am Umfang eines Fräswerkzeuges angebracht werden können, ist durch die Größe der Spankammer bestimmt. Infolgedessen ist die Größe der Spankammer im Umkehrschluss mit der Schneidenanzahl ein wichtiger Faktor der Vorschubgeschwindigkeit und somit ein Maß für die Produktivität. Durch enger aufgerollte Späne können die Spankammern kleiner ausgelegt werden, was die Chance eröffnet, mehr Schneiden am Umfang des Fräskörpers zu realisieren, als bei Werkzeugen, welche für die konventionelle KSS-Zufuhr entwickelt wurden. Aufgrund dessen sind auch beim Fräsen maßgebliche Leistungssteigerungen durch die gerichtete Hochdruck-KSS-Zufuhr zu erwarten.

Zur Umsetzung und Nutzung dieser Potenziale sind fundierte Einsatz- und Anwendungsempfehlungen, insbesondere für kleinere und mittelständische Unternehmen, essentiell. Diese zu erarbeiten, war wesentlicher Bestandteil des Forschungsprojektes.

Von zentraler Bedeutung beim Fräsen mit zielgerichteter Hochdruck-KSS-Zufuhr sind in gleichen Maße wie beim Drehen ganz wesentlich der Einfluss von Druck, Volumenstrom und Strahlausrichtung auf die Spanformung in der Spankammer, auf den Werkzeugverschleiß an der Schneide, auf die thermische Wechselbelastung der Schneide und auf die anwendbaren Prozessparameter. Darüber hinaus sind Anzahl, Ausrichtung und Positionierung der Austrittsdüsen in der Spankammer von fundamentaler Bedeutung für die Produktivität und Wirtschaftlichkeit beim Einsatz hochdrucktauglicher Fräswerkzeuge.

Aufgrund des gravierenden Mangels an technologischem Wissen über die Auslegung von Fräsern für die gezielte Hochdruck-KSS-Zufuhr und deren Einsatz bestand erheblicher Forschungsbedarf. In Kombination mit dem zu erwartenden hohen wirtschaftlichen Nutzen, den diese Technologie vor allem für kleinere und mittelständische Unternehmen bieten kann, leitete sich ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie die Motivation für dieses Forschungsvorhaben ab.

Forschungsziel

Die beschriebenen Wissenslücken zu schließen und insbesondere für kleinere und mittelständische Unternehmen die Technologie der gezielten HD-KSS-Zufuhr beim Fräsen und deren Vorteile zu erschließen, war Ziel und zentrales Anliegen des Forschungsvorhabens:

*„Steigerung der Produktivität beim Fräsen durch die zielgerichtete Zufuhr des
Kühlschmierstoffs mit Hochdruck – ProMill“*

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojektes war es, die Produktivität und Prozesssicherheit beim Fräsen mit Wendeschneidplatten bestückten Werkzeugen durch die Entwicklung einer zielgerichteten HD-KSS-Zuführung maßgeblich gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik zu steigern. Für die Realisierung dieser Zielsetzung bietet die HD-KSS-Zufuhr, wie die Ergebnisse mit dieser Zuführungsvariante beim Drehen zeigen, die besten Voraussetzungen und zwar zum einen in Form höherer anwendbarer Schnittparameter aufgrund der gezielten intensiven Kühlung und Schmierung der Schneide, einer größeren Prozesssicherheit durch ein zuverlässiges Herausspülen der Späne aus der Spankammer und zum anderen in einer Vergrößerung der Schneidenanzahl am Werkzeugumfang durch kleinere Spankammern infolge sich enger aufrollender Späne. Alleine letzteres bedeutet bei einer Steigerung der Schneidenanzahl von vier auf fünf Schneidplatten am Werkzeugumfang unter sonst identischen Bedingungen eine Steigerung des Zeitspanvolumens und der Produktivität um 25 %.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung wurden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf mehreren Ebenen durchgeführt. Zunächst wurde in Analogieversuchen der Einfluss von Druck, Volumenstrom und Richtung, mit denen der KSS-Strahl der Werkzeugschneide und dem Span zugeführt wird, auf die thermomechanische Schneidenbelastung, respektive auf den thermomechanisch induzierten Werkzeugverschleiß sowie die Spanbildung grundlegend und systematisch erforscht und analysiert. Parallel zu den Analogieversuchen wurde die Spanbildung unter Berücksichtigung der HD-KSS-Zufuhr mit Hilfe der FEM- und CFD-Simulation in einem gekoppelten Euler-Lagrange-Ansatz modelliert. Die in den Analogieversuchen ermittelten Wirkzusammenhänge stellten in Verbindung mit der FEM-CFD-Simulation die Basis für die geometrische Auslegung von Spankammerformen und Zuführungsvarianten dar, die an Modellgrundkörpern realisiert werden sollten.

Mit unterschiedlichen Modellgrundkörpern wurde die Leistungsfähigkeit und die Grenzen der HD-KSS-Zufuhr beim Fräsen verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von den Schnittbedingungen mit dem Ziel, Empfehlungen für die Gestaltung sowie den Einsatz hochdrucktauglicher Fräser abzuleiten, ermittelt. Für mehrschneidige Fräswerkzeuge war es das Ziel die Anforderungen an die Maschine bzw. an geeignete Komponenten zur Bereitstellung ausreichender KSS-Volumen und -Drücke in einem Prüfstand zu analysieren und zu demonstrieren. Insbesondere stand die Verifikation der Gestaltungshinweisen durch die Funktionstüchtigkeit eines mehrreihigen Walzenstirnfräasers im Vordergrund.

Die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz der HD-KSS-Zufuhr unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Vergleich zur konventionellen Überflutungskühlung bzw. zum Stand der Technik zu analysieren und bewerten war die ökologische und ökonomische Fragestellung des Projekts. Darüber hinaus sollten zur Erleichterung einer schnellen Nutzung der erarbeiteten Ergebnisse durch KMU die Forschungsergebnisse in Form einer Empfehlung für den Einsatz einer zielgerichteten HD-KSS-Zufuhr aufbereitet und zusammengestellt werden.

Forschungsergebnisse

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 1

An einem Analogieprüfstand wurde im unterbrochenen Schnitt beim Inneneinstechdrehen ermittelt, dass eine Erhöhung des KSS-Zufuhrdrucks und -volumenstroms eine engere Aufrollung der Späne begünstigt. Für die untersuchten Werkstoffe TiAl6V4 und 42CrMo4+QT wurden sowohl für den Zufuhrdruck als auch für den Volumenstrom individuelle Effektivzonen hinsichtlich Spanformung und Werkzeugtemperatur identifiziert. Darüber hinaus wurden für die KSS-Düsenauslegung und die Schneidengestalt Empfehlungen hinsichtlich der Spanformung erarbeitet. Insbesondere die Erkenntnis, dass der KSS-Strahl unmittelbar im Spalt zwischen entstehendem Span und der Spanfläche für eine enge Spanaufrollung und eine geringe Werkzeugtemperatur auftreten muss, war von zentraler Bedeutung für das Vorhaben. [KLOC18a], [LAKN16]

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 2

In diesem Arbeitspaket wurden die Erkenntnisse aus den Grundlagenuntersuchungen am Analogieprüfstand durch Fräsversuche mit wendeschneidplattenbestückten Fräswerkzeugen verifiziert. Diese Fräswerkzeuge waren mit unterschiedlichen KSS-Düsen ausgestattet, welche sich in Düsengröße und -ausrichtung unterschieden. Es konnte bestätigt werden, dass die Erhöhung des KSS-Zufuhrdrucks die Späne verkleinert und der KSS-Auftreffpunkt auf der Spanfläche liegen sollte. Je nach Werkstoff waren unterschiedliche Düsenausrichtungen von Vorteil. Beim abrasiv wirkenden Vergütungsstahl wird eine ausreichende Versorgung der Schneidenmitte mit Kühlschmierstoff benötigt, um Kolkverschleiß zu reduzieren. Beim Titanwerkstoff, der einen geringen Elastizitätsmodul besitzt, muss wiederum ausreichend Kühlschmierstoff die stark belastete Schneidenecke erreichen, um dort den Freiflächenverschleiß reduzieren zu können. Der KSS-Strahl darf hierbei nicht die Klemmschraube der Wendeschneidplatte treffen, da dies die Gefahr einer Lockerung der Wendeschneidplatte und schließlich eines Werkzeugbruchs birgt. Basierend auf diesen Untersuchungen wurde das Konzept für das Demonstratorwerkzeug aus AP 3 erarbeitet, wodurch die Schneidenanzahl gesteigert werden konnte. [KLOC17], [KLOC18b], [LAKN17]

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 3

Basierend auf den Erkenntnissen der zerspantechnologischen Untersuchungen und den Erkenntnissen aus der Simulation wurde ein Demonstratorfräswerkzeug gefertigt. In einer Parametervariation wurden geeignete Schnittparameter für einen sicheren Spanabtransport ermittelt. Das Demonstratorwerkzeug wurde mit einem Werkzeug des Stands der Technik verglichen. Die Standzeit und das Verschleißverhalten waren sehr ähnlich, die Produktivität des Demonstrators war jedoch durch die um 50 % erhöhte Schneidenanzahl, respektive die gesteigerte Vorschubgeschwindigkeit, deutlich größer. Hinsichtlich der Maschinentchnik wurden Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz der Hochdrucktechnologie beim Fräsen definiert und

weitere Optimierungspotenziale identifiziert. Darüber hinaus konnten Referenzkennlinien für den Druckverlust ermittelt werden, welche für die bedarfsgerechte Auslegung der KSS-Düsenquerschnitte und der KSS-Anlagentechnik von großer Bedeutung sind. [LAKN17], [KLOC18b]

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 4

Ein FE-Modell für die Spanbildungssimulation unter Berücksichtigung der Kühlschmierstoff-Versorgung wurde aufgebaut. Das Materialmodell für TiAl6V4 und das Reibmodell zwischen TiAl6V4 und Hartmetall für die Spanbildungssimulation wurden invers kalibriert. Das FE-Modell ist ausreichend genau hinsichtlich der Schnittkraft unter verschiedenen Schnittbedingungen. Mithilfe des FE-Modells für die Spanbildungssimulation unter Berücksichtigung eines einphasigen Fluids kann die Spanbildung bei kurzen Spänen vorhergesagt und der Einfluss von der Düsenausrichtung qualitativ untersucht werden. [KLOC16], [Peng17]

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 5

Basierend auf den Ergebnissen aus AP 3, in denen die Vorschubgeschwindigkeit um 50 % gegenüber dem Stand der Technik erhöht werden konnte, wurde eine ökonomische als auch ökologische Bewertung des entwickelten Werkzeugkonzepts durchgeführt. Eine Zunahme der Energiekosten durch die benötigten höheren Drücke hat im Vergleich zu den Werkzeugkosten nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtfertigungskosten. Die Zunahme des Energiebedarfs der HD-KSS-Zufuhr kann durch die starke Produktionssteigerung kompensiert werden. Kosteneinsparungen durch eine gesteigerte Produktivität können durch erhöhte Werkzeugkosten verringert werden. Die Werkzeugkosten steigen, da die Schneidenanzahl um 50 % gesteigert wurde, woraus 50 % Mehrkosten für Wendeschneidplatten entstehen. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung sollte der hohe Anteil der Werkzeugkosten bei der Zerspannung von Titan berücksichtigt und die Prozesse mit diesem Fokus ausgelegt werden. Ökologische Vorteile ergeben sich aus der Reduktion des Kühlschmierstoffbedarfs, des Filtermaterials und der Betriebszeit der Maschinen und Hochdruckaggregate. [LAKN17], [KLOC18b]

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Arbeitspaket 6

In diesem Arbeitspunkt wurden die Auswirkungen der HD-KSS-Zuführung auf die Werkzeugmaschine dokumentiert. Eine starke Scheibentrübung an den Werkzeugmaschinen, wie sie bei Forschungsprojekten zur HD-KSS-Zufuhr beim Drehen auftraten, konnte in dieser Intensität nicht festgestellt werden. Es traten lediglich geringe oberflächliche Lackschäden im Arbeitsraum der Maschinen auf und die Scheiben zeigten eine leichte Trübung. Durch die hohen Drücke und die Rotation der Fräswerkzeuge traten teilweise starke Verneblungen des KSS im Arbeitsraum auf, welche durch leistungsfähigere Absaugvorrichtungen vermieden werden können. [LAKN17], [KLOC18b]

Ausblick

Es wurde zur weiteren Verbesserung des Demonstratorwerkzeugs zusätzliches Verbesserungspotenzial identifiziert. Es stehen die Enden der Klemmschrauben zur Positionierung der Wendeschneidplatte in die Spankammer der jeweils folgenden Wendeschneidplatte hervor. Dabei können Späne sich an der Schraube verhaken und somit nicht sicher abgeführt werden. Die Verwendung von Grundlochbohrungen in Verbindung mit kürzeren Klemmschrauben könnte dieses Risiko vermeiden. Die Aussparungen für die Zugänglichkeit der Klemmschraube und der zugehörigen Gewindebohrungen unterbrechen ebenfalls die Kontur der Spankammer und können die Spanabfuhr behindern. Bei einer Werkzeugkonstruktion mit tangentialen Plattensitzen könnten ununterbrochene Begrenzungskanten der Spankammern realisiert werden, wodurch die Spanabfuhr weiter verbessert werden könnte. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf Tangentialwerkzeuge in Verbindung mit einer weiteren Verbesserung der Kühlschmierung sollte daher in Zukunft analysiert werden. Dies könnte durch eine Optimierung der inneren Kühlkanäle des Fräswerkzeuggrundkörpers realisiert werden, beispielsweise durch eine simulationsgestützte innere Kühlkanalauslegung. Darüber hinaus sollten für das Demonstratorwerkzeug Prozessparameter für weitere Werkstoffe erarbeitet werden, um die Umsetzung der Hochdruck-KSS-Technologie beim Fräsen in andere Branchen zu beschleunigen.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr. Christian Pelshenke unter der Telefonnummer 02191 / 5921 111.

Veröffentlichungen aus dem Projekt ProMill

Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T. Prod. Eng. Res. Devel. (2018).
<https://doi.org/10.1007/s11740-018-0823-2>

Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T.: Influence of coolant nozzle orientation on the machinability of TiAl6V4 and 42CrMo4+QT in rough milling. In: 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)

Peng, B., Klocke, F., Lakner, T., Döbbeler, B.: FE simulation of an analogical milling process with cutting fluid. In.: Procedia CIRP. Jg. 58, S. 341–346

Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T.: Impact of High-Pressure Coolant Supply on Chip Formation in Milling. In: Vortrag: 20th International ESAFORM Conference on Material Forming 2017

Klocke, F., Peng, B., Lakner, T., Döbbeler, B.: Identification of friction and material model parameters for finite element simulation of TiAl6V4. In: Tribologie Fachtagung 2016

Lakner, T.: Zielgerichtete KSS-Hochdruckzuführung beim Fräsen. In: 6. Aachener High-Performance-Cutting (HPC) Konferenz 2016

Lakner, T.: Grundlagenuntersuchungen zur Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr beim Fräsen. In: 5. Aachener Kühlschmierstoff-Tagung 2017

Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T.: Zielgerichtete Kühlschmierstoffzufuhr beim Fräsen. In: fertigung extra: werkzeuge Juni 2017

Klocke, F.; Lakner, T.; Koch, M.; Döbbeler, B.: Innovative Kühlschmierstrategien beim Fräsen zur Steigerung der Produktivität. In: WB Werkstatt + Betrieb 150 (2017), 10 ISSN 0043-2792, S. 42-45

Klocke, F.; Lakner, T.; Döbbeler, B.: Der ökonomische und ökologische Einsatz von Kühlschmierstoffen in der Zerspanung. In: DREHTEIL+DREHMASCHINE 29 (2017), 5, S. 32-34

Klocke, F.; Lakner, T.; Döbbeler, B.: Alternativen für einen ökonomischen und ökologischen Kühlschmierstoffeinsatz in der Zerspanung. In: Industrieanzeiger 139 (2017), 28, ISSN 0019-9036, S. 42-43

Klocke, F., Cayli, T., Lakner, T., Döbbeler, B.: Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit durch eine zielgerichtete Zuführung des Kühlschmierstoffs bei erhöhten Drücken. In: Unter Span 01/2016, S. 20+21, 2016

Lakner, T.: ProMill – Steigerung der Produktivität beim Fräsen durch die zielgerichtete Zufuhr des Kühlschmierstoffs mit Hochdruck. In: Werkzeugbau Akademie - Forschungsbericht 2015/ 2016, Hrsg.: Schuh, G.; Boos, W., Apprimus Verlag Aachen 2016, ISBN 978-3-86359-460-2, S. 86-87

Literatur:

- [KLOC16] Klocke, F., Peng, B., Lakner, T., Döbbeler, B.: Identification of friction and material model parameters for finite element simulation of TiAl6V4. In: Tribologie Fachtagung 2016
- [KLOC17] Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T.: Impact of High-Pressure Coolant Supply on Chip Formation in Milling. In: Vortrag: 20th International ESAFORM Conference on Material Forming 2017
- [KLOC18a] Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T. Prod. Eng. Res. Devel. (2018). <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0823-2>
- [KLOC18b] Klocke, F., Döbbeler, B., Lakner, T.: Influence of coolant nozzle orientation on the machinability of TiAl6V4 and 42CrMo4+QT in rough milling. In: 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)
- [KOVA95] Kovacevic, R.; Cherukuthota, C.; Mazurkiewicz, M.: High pressure waterjet cooling/lubrication to improve machining efficiency in milling. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35. Jg., 1995, Nr. 10, S. 1459–1473
- [LAKN16] Lakner, T.: Zielgerichtete KSS-Hochdruckzuführung beim Fräsen. In: 6. Aachener High-Performance-Cutting (HPC) Konferenz 2016
- [LAKN17] Lakner, T.: Grundlagenuntersuchungen zur Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr beim Fräsen. In: 5. Aachener Kühlschmierstoff-Tagung 2017
- [Peng17] Peng, B., Klocke, F., Lakner, T., Döbbeler, B.: FE simulation of an analogical milling process with cutting fluid. In.: Procedia CIRP. Jg. 58, S. 341–346
- [SANG13] Sangermann, H.: Hochdruck-Kühlschmierstoffzufuhr in der Zerspanung. (Reihe: Edition Wissenschaft, 2013,19). 1. Aufl. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2013
- [VDW17] VDW Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.: Wichtige Zahlen zur deutschen Werkzeugmaschinenindustrie. In: 2017. Jg., 2017