

Titel

Steigerung der Werkzeugstandzeit und Prozesssicherheit durch additiv gefertigte Fräswerkzeugträger mit tangentialem Plattensitz und strömungsmechanisch optimierten Kühlkanälen

IGF-Nr.: 21049 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren,

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT



Ansprechpartner beim WZL	:	Tobias Kelliger +49 241 80-20523 t.kelliger@wzl.rwth-aachen.de
Ansprechpartner beim ILT	:	Simon Vervoort +49 241 8906-602 simon.vervoort@ilt.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 21049 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) ist bei der Fräsbearbeitung anspruchsvoller, schwer zerspanbarer Werkstoffe und Bauteile, wie Luftfahrt-Strukturbauteilen aus Titanlegierungen, unerlässlich. Die produktive Fräsbearbeitung unter Einsatz von KSS bei teils hohen Zufuhrdrücken stellt das produzierende Gewerbe vor große Herausforderungen zur Reduktion ökonomischer sowie ökologischer Kosten. Insbesondere die Steigerung der Werkzeugstandzeit sowie die Reduktion des notwendigen KSS-Einsatzes können hier einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und wettbewerbsfähigen Fertigung am Standort Deutschland leisten.

Im Vorgängervorhaben ProMill (IGF 18401 N) konnte die Produktivität mit wendeschneidplattenbestückten Walzenstirnfräsern durch eine werkstoffindividuell ausgelegten KSS-Zufuhr hinsichtlich Ausrichtung und Anzahl der Austrittsdüsen um knapp 50 % gesteigert werden [LAKN18]. Die Herstellung innengekühlter Werkzeuge mit konventionellen Fertigungsverfahren ist allerdings sehr aufwändig und damit kostenintensiv und in der geometrischen Komplexität nur begrenzt möglich. Die geometrische Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM) bietet hier ein enormes Potenzial hinsichtlich Individualisierung und zielgerichteter sowie verlustarmer KSS-Zufuhr. Durch Verarbeitung metallischer Pulverwerkstoffe kann beispielsweise im Laser Powder Bed Fusion Verfahren (LPBF) die KSS-Zufuhr von Trägerwerkzeugen neu gedacht werden [LAKN21]

Bisher fehlt es für eine wissensbasierte Auslegung der KSS-Zufuhr in additiv gefertigten Zerspanwerkzeugen allerdings an grundlegendem Verständnis über die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen AM-Fertigungsverfahren, KSS-Zufuhr-Charakteristik und Einsatzverhalten des Werkzeugs während der Zerspanung. Für die industrielle Anwendung des LPBF-Verfahrens sind außerdem bisher nur wenige Stahlwerkstoffe, die für den Einsatz als Trägerwerkzeug infrage kommen, qualifiziert. Es fehlt an Kenntnissen über die LPBF-Prozessführung, mechanische Kennwerte geeigneter Stahlwerkstoffe sowie Nachbearbeitungsaufwände von AM-Werkzeugrohlingen.

Forschungsziel

Ziel des Projekts war die Nutzbarmachung der Potenziale additiv, im LPBF-Verfahren gefertigter Fräswerkzeuge hinsichtlich einer angepassten KSS-Zufuhr zur Steigerung der Werkzeugstandzeit und Prozesssicherheit. Am Beispiel von Fräswerkzeugträgern mit tangentialem Plattensitz wurden die Möglichkeiten und Grenzen strömungsmechanisch optimierter Kühlkanäle sowie einer zielgerichteten Düsenauslegung aufgezeigt. Neben der Qualifizierung eines geeigneten Einsatzstahls für den LPBF-Prozess wurden strömungsmechanische Grundlagen zur Gestaltung

einer zielgerichteten und verlustarmen KSS-Zufuhr erforscht. Einsatzverhalten und Prozesssicherheit additiv gefertigter Werkzeuge wurden analysiert und unterschiedlichste Varianten einer angepassten KSS-Zufuhr im Zerspanversuch bei Bearbeitung verschiedener Werkstück-Werkstoffe untersucht. Der Designprozess wurde dabei durch digitale, numerische Strömungssimulationen (CFD-Simulationen) ergänzt. Neben den technologischen Eigenschaften wurde auch das ökonomisch-ökologische Potenzial bewertet.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zur Realisierung der Zielsetzung des Vorhabens wurden Forschungsarbeiten in sechs Arbeitspunkten durchgeführt. Zunächst wurden in AP1 Grundlagenuntersuchungen an Werkstoff und strömungsmechanischen Analogieprüfstand durchgeführt. In Kombination mit den Erkenntnissen aus AP4 wurden der Werkstoff im Einsatz untersucht (AP2) und die KSS-Zufuhr an einem Fräswerkzeug iterativ verändert und umgesetzt (AP3). Abschließend wurde in AP5 ein Demonstratorwerkzeug unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Einsatz bewertet.

In AP1 wurde ein niedriglegierter Einsatzstahl mit bainitisch ausgebildetem Gefüge („Bainidur AM“, 18MnCrMoV4-8-7) im LPBF-Prozess qualifiziert. Die gute Verarbeitbarkeit des Stahls im LPBF-Verfahren sowie die analysierten vielversprechenden mechanischen Eigenschaften lassen eine Werkzeugfertigung auf konventionell verfügbaren LPBF-Anlagensystemen zu. Im zweiten Schritt wurden in AP1 in fluidmechanischen Grundlagenuntersuchungen Gestaltungsrichtlinien zur konstruktiven Auslegung der internen KSS-Zufuhr im Sinne einer verlustarmen und zielgerichteten Strahlformung erarbeitet. Durch stetige, radienbehafte Übergänge bei Richtungsänderungen im Kanal konnten die Volumenstromverluste um bis zu 21 % reduziert werden. Ein dreieckiger Kanalquerschnitt garantiert die höchste geometrische Genauigkeit der Kanalform und damit die höchsten Durchflussraten. Rundstrahl Düsen sollten aufgrund der Pulveranhaftungen konisch zulaufend ausgeführt werden. Für eine werkzeugspezifisch angepasste KSS-Zufuhr können Düsenformen individuell an die Schneidengeometrie angepasst werden, wobei hier z.B. ein L-förmiger Düsenquerschnitt verwendet werden kann.

Die Ergebnisse von AP2 weisen die Einsatzfähigkeit aus 18MnCrMoV4-8-7 LPBF-gefertigter Fräswerkzeugträger für die Schruppbearbeitung von Vergütungsstahl 42CrMo4+QT sowie Titanlegierung Ti-6Al-4V nach. Die in AP2 durchgeführte Charakterisierung geometrischer Eigenschaften, die Analyse des Schwingungsverhaltens sowie die Untersuchung des Einsatzverhaltens im Zerspanprozess zeigen die Eignung additiv gefertigter, schneidplattenbestückter Trägerwerkzeuge und lassen auf zu konventionell subtraktiv gefertigten Werkzeugen vergleichbare Einsatzcharakteristika schließen. Die hybride Fertigung, im Falle der untersuchten Messerkopfwerkzeuge realisiert durch einen konventionell gefertigten Schaft und einen LPBF-gefertigten Aufbau der komplexen Spankammer-Geometrie, stellt eine einsatzfähige, zeit- und kostensparende Alternative zum vollständig additiven

Aufbau dar. Die prozesssicher wiederholbare spanende Nachbearbeitung der AM-Rohlinge erwies sich als herausfordernd. Zusätzliche Spann- und Referenzierungselemente wurden implementiert und ermöglichten eine den geometrischen Anforderungen an das Werkzeug gerechte Nachbearbeitung.

In AP3 wurden aufbauend auf den in AP1 erzielten Erkenntnissen unterschiedlichste KSS-Zufuhr-Varianten an einem Messerkopf-Werkzeug appliziert, die die geometrische Gestaltungsfreiheit des LPBF-Prozess möglichst weit ausnutzen sollten. Insgesamt wurden 15 Varianten im Ein-Zahn-Versuch bei Zerspänung von Vergütungsstahl 42CrMo4+QT und Titanlegierung Ti-6Al-4V untersucht. Es wurde eine Methodik zur konstruktiven Auslegung einer verlustarmen und zielgerichteten KSS-Zufuhr in einer CAD-Softwareumgebung entwickelt. Bei der Zerspänung des Vergütungsstahls erwies sich eine konzentrierte Kühlung der Schneidkante mit hohem Volumenstrom als kontraproduktiv. Aufgrund der hohen thermischen Wechselbelastung kam es vermehrt zu thermisch induzierten Kammrissen an der Werkzeugschneide. Ein gleichmäßig auf mehrere Düsen aufgeteilter, geringer Volumenstrom, der eine KSS-Benetzung der gesamten sich im Eingriff befindlichen Werkzeugschneide erzielt, erscheint vorteilhaft. Für die Zerspänung der Titanlegierung ermöglichte eine Volumenstromaufteilung auf fünf kleine, kreisförmige Austrittsdüsen eine Standwegsteigerung von knapp 70 %. Auch die Aufteilung des Volumenstroms auf eine L-förmige, auf die Schneidenecke gerichtete Düse und eine zweite, kleinere Rundstrahldüse erwies sich mit einer Steigerung des Standwegs von ca. 40 % bei gleichzeitiger Halbierung des geförderten Volumenstroms als gegenüber der im Referenzwerkzeug indirekt ausgeführten Kühlung vorteilhaft. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Bild 1 dargestellt.

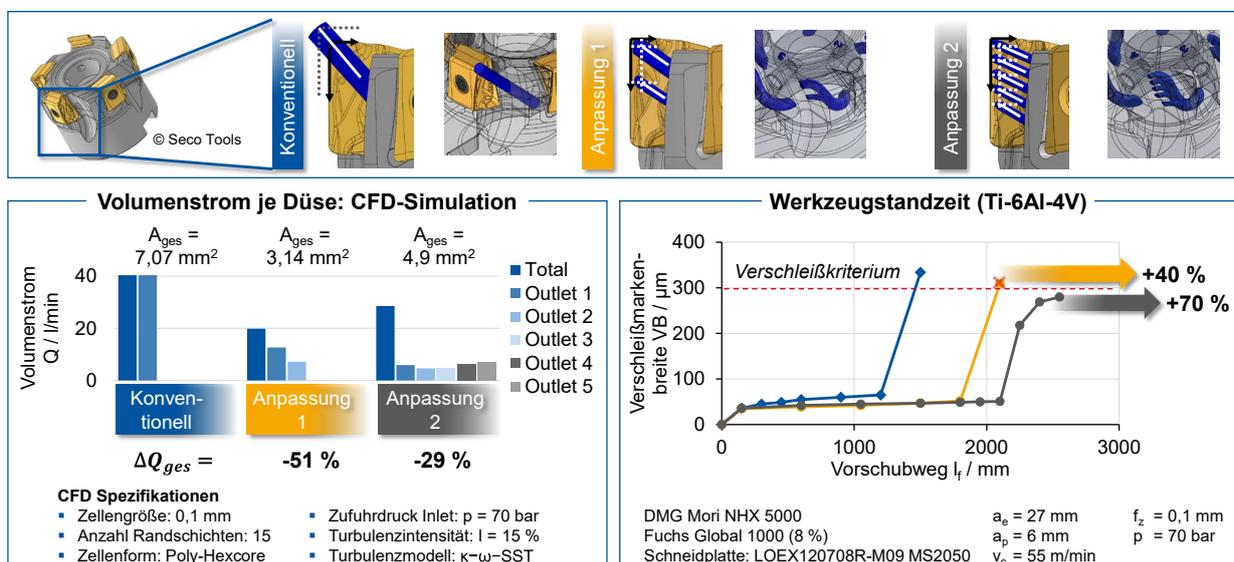


Bild 1: Beispielhafte Ergebnisse für das Schruppfräsen von Ti-6Al-4V mit additiv gefertigten Messerkopfwerkzeugen und angepasster Kühlschmierstoff-Zufuhr

Die in AP4 aufgebauten numerischen Strömungssimulationen dienen der Unterstützung für AP1, AP3 und AP5. Die Modellierung der KSS-Strömung innerhalb des Zufuhrkanals ermöglicht eine Analyse von Turbulenzbildung, Strömungsablösung sowie Kavitationseffekten. Durch die stetige Ausführung von Richtungs- und Querschnittsänderungen können Verlusteinflüsse weitestgehend schon vor der Fertigung und dem Einsatztest des Werkzeugs minimiert werden. Der Aufbau eines

geometrischen Modells zur Berechnung der rotationsbedingten Strahlablenkung ermöglichte die Bewertung des Einflusses von Schnittgeschwindigkeit, KSS-Druck und Düsenquerschnitt auf die Auftreffposition des KSS-Strahls auf der Werkzeugschneide. Im relevanten Druck- und Drehzahlbereich erwies sich die Strahlablenkung mit unter $30\ \mu\text{m}$ als vernachlässigbar. Die Simulation der KSS-Freistrahlausbreitung innerhalb der Spankammer erwies sich als anspruchsvoll. Eine Korrelation zwischen Werkzeugverschleiß und berechneter, durch das Fluid ausgeübter Druckverteilung auf der Spanfläche konnte nicht festgestellt werden. Die ganzheitliche Auslegung der KSS-Zufuhr im Messerkopfwerkzeug mit Unterstützung von CFD-Simulationen ermöglichte die Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien sowie die Identifikation möglicher Verbesserungspotenziale in der Übergabe zwischen Werkzeugaufnahme und Trägerwerkzeug.

In AP5 stand die ökonomisch-ökologische Bewertung der LPBF-gefertigten Messerkopfwerkzeuge mit angepasster KSS-Zufuhr im Vordergrund. Mittels Kostenrechnung einerseits und LCA-Analyse andererseits konnte nachgewiesen werden, dass additiv gefertigte Werkzeuge zwar im Herstellungsprozess gegenüber konventionellen Vergleichswerkzeugen aufgrund des kosten- und energieintensiven LPBF-Prozesses nachteilig wirken, durch die verbesserte Funktionalität aber aufgrund gesteigerter Produktivität oder verlängerter Werkzeugstandzeit trotzdem eine Reduzierung der ökonomisch-ökologischen Kosten im Betrachtungsrahmen des gesamten Werkzeuglebenszyklus erzielen können.

In einem mehrreihigen Demonstratorwerkzeug zum Schruppen von Ti-6Al-4V wurden die Erkenntnisse der vorherigen Arbeitspakete genutzt, um die KSS-Zufuhr prozessindividuell verlustarm und zielgerichtet auszuführen und eine prozesssichere LPBF-Fertigung und Nachbearbeitung zu ermöglichen. Das Werkzeugdesign sowie die Ergebnisse der Standzeituntersuchungen sind ausschnittsweise in Bild 2 dargestellt. Der KSS-Volumenstrom wurde durch effiziente Auslegung der Kanäle und Austrittsdüsen um 25 % reduziert, der Werkzeugverschleiß um 27 % gesenkt und das eingenommene Spanvolumen um 25 % verkleinert. Der Einsatz des Werkzeugs im industriellen Umfeld zeigte die Einsatzfähigkeit additiv gefertigter Trägerwerkzeuge aus 18MnCrMoV4-8-7 auch bei hohen Belastungen in der Großvolumen- bzw. Schwerzerspannung.

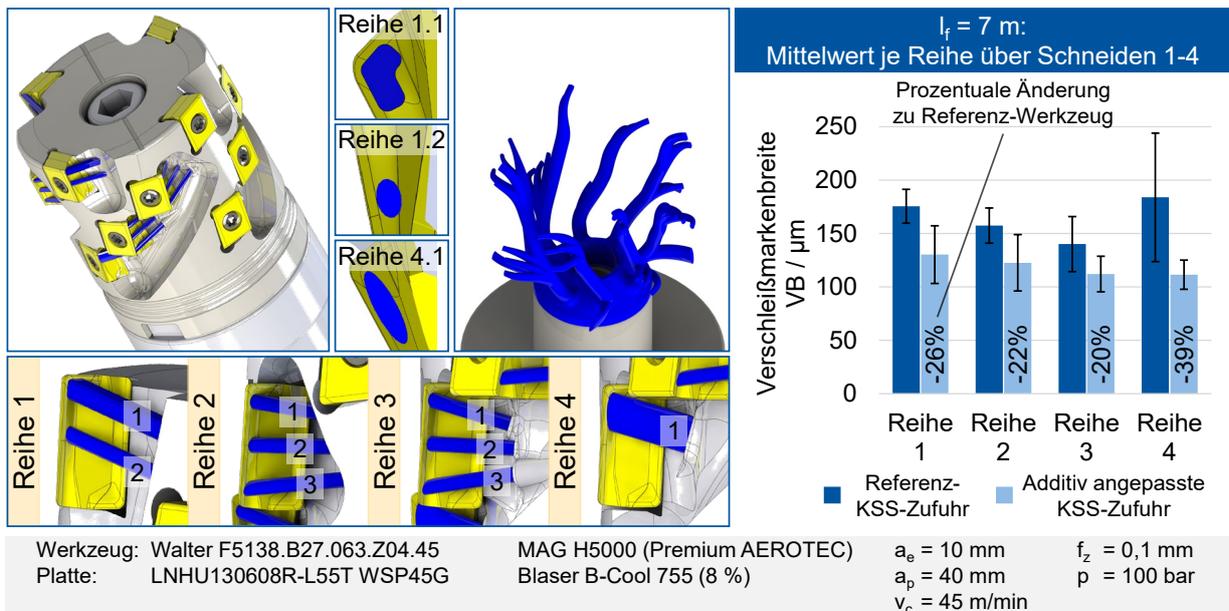


Bild 2: Werkzeugverschleiß am additiv gefertigten mehrreihigen Demonstratorwerkzeug mit zielgerichteter und verlustarmer KSS-Zufuhr bei der Zerspaltung von Ti-6Al-4V

Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben TaCoMA wurden ein- und mehrreihige Trägerwerkzeuge mit verlustarmer und zielgerichteter KSS-Zufuhr als Demonstratorwerkzeuge umgesetzt, im LPBF-Verfahren aus dem niedriglegierten Einsatzstahl 18MnCrMoV4-8-7 gefertigt und in zerspantechnologischen Untersuchungen analysiert. Die Erkenntnisse können von KMU im Rahmen der Werkzeug- und Prozessauslegung genutzt werden. Nach der Qualifizierung eines niedriglegierten Einsatzstahls im LPBF-Prozess wurden in fluidmechanischen Untersuchungen geeignete Kanal- und Düsengeometrien identifiziert, die anschließend in der Konstruktion einer angepassten KSS-Zufuhr im Fräswerkzeug Anwendung fanden. Die Auslegung wurde dabei durch CFD-Simulationen unterstützt. Durch die Testung unterschiedlichster KSS-Zufuhr-Varianten an additiv gefertigten Messerkopfwerkzeugen beim Schruppfräsen des Vergütungsstahls 42CrMo4+QT sowie der Titanlegierung Ti-6Al-4V wurden geeignete Varianten extrahiert und Erkenntnisse für geeignete KSS-Zufuhr-Konzepte gewonnen. Es wurden Standwegsteigerungen von bis zu 70 % gegenüber dem Referenzwerkzeug erzielt. An einem mehrreihigen Demonstratorwerkzeug wurde die Einsatzfähigkeit LPBF-gefertigter Trägerwerkzeuge für die Schwerzerspannung im industriellen Umfeld nachgewiesen. Durch die verbesserte Funktionalität können additiv gefertigte Fräswerkzeuge mit angepasster KSS-Zufuhr auch aus ökonomisch-ökologischer Sicht eine sinnvolle Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik darstellen.

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 Tobias Kelliger unter +49 241 80-20523.

Literatur:

- [LAKN18] Lakner, T.; Peng, B.; Klocke, F.: Steigerung der Produktivität beim Fräsen durch zielgerichtete Zufuhr des Kühlschmierstoffs mit Hochdruck - ProMill. Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 18401 N. In: 2018
- [LAKN21] Lakner, T.: High-pressure cutting fluid supply in milling. Dissertation. Aachen, 2021