

Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen lässt Verarbeitung hochlegierter Werkzeugstähle zu

Additiv gefertigte Gewindefertigungswerkzeuge aus HSS

T. Kelliger, M. Meurer, T. Bergs

Eine verlängerte Werkzeuglebensdauer bei der Gewindefertigung ist durch eine Neugestaltung der inneren Kühlschmierstoffzufuhr am Werkzeug möglich. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren wie dem Laser Powder Bed Fusion erlaubt die Fertigung innen liegender und komplexer Kanal- und Düsengeometrien. In umfangreichen Einsatztests konnten Prozesssicherheit und Potenziale additiv gefertigter Gewindeform- und Gewindefertigungswerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl nachgewiesen werden.

STICHWÖRTER

Werkzeuge, Additive Fertigung, Gewindebohren

Additively manufactured threading tools made from HSS

Extended tool life in thread production is possible by an adapted internal cutting fluid supply on the tool. The use of additive manufacturing techniques such as Laser Powder Bed Fusion allows the production of internal and complex channel and nozzle geometries. Extensive performance investigations demonstrated the process reliability and great potential of additively manufactured tapping and threading tools made of high-speed steel. The results can now be used for further tool developments.

1 Einleitung

Die Einbringung von Innengewinden erfolgt meist in einem fortgeschrittenen Stadium der Fertigungskette eines Bauteils und damit zu einem Zeitpunkt hoher Wertschöpfungshistorie [1]. Deshalb ist aus ökonomischer Sicht die Prozesssicherheit bei der Gewindefertigung entscheidend. Durch den Einsatz von Kühlschmierstoff (KSS) kann die Prozesssicherheit im Sinne eines fortschreitenden Werkzeugverschleißes sowie der Gewinde-Lehrenhaltigkeit bei der Innengewindefertigung gesteigert werden [2]. Wird die hoch belastete Werkzeug-Werkstück-Kontaktzone durch eine interne KSS-Zufuhr zielgerichtet mit Schmierstoff versorgt, können die Reibung reduziert und die Kühlung verbessert werden [3]. Dies bedingt reduzierte Zerspankräfte und Drehmomente und verlangsamt den Verschleißfortschritt am Gewindefertigungswerkzeug. Die zielgerichtete Benetzung der Kontaktzone mit KSS erfordert vor allem bei der Fertigung von Durchgangsgewinden radiale Kanalauslässe am Werkzeug, die konventionell aufwendig und nur begrenzt herstellbar sind [4]. Durch Einsatz additiver Fertigungsverfahren (AM-Verfahren), speziell dem Laser-Powder-Bed-Fusion-Verfahren (PBF-LB, deutsch: Pulverbettbasiertes Schmelzen mittels Laserstrahl), ist die Fertigung geometrisch deutlich komplexerer, innen liegender Strukturen möglich [5]. Dieser Vorteil kann für die Gewindefertigung nutzbar gemacht werden, um eine prozessindividuelle KSS-Zufuhr am Werkzeug, zum Beispiel durch eine angepasste Düsengeometrie, umzusetzen.

Bisher kam die additive Fertigung für Zerspanwerkzeuge vor allem für Werkzeuggrundkörper, zum Beispiel wendeschneidplattenbestückte Drehklemmhalter, Bohrer oder Messerkopfwerkzeuge

zum Einsatz [6–9]. Die Verarbeitung des Schneidstoffs selbst erfolgte aufgrund der hohen Anforderungen an die Prozessführung des AM-Prozesses bisher nur selten. So wurden zum Beispiel die Schneidstoffe WCCo-Hartmetall mittels Binder Jetting [10], PBF-LB [11] und 3DP-Technologie (slurry-based three-dimensional printing) [12] hergestellt und Keramiken mittels LCM-Technologie (Lithography-based Ceramic-Manufacturing) [13] verarbeitet.

Die Verarbeitung von HSS im PBF-LB-Verfahren ist aufgrund des hohen Kohlenstoffanteils und der damit verbundenen schweren Schweißbarkeit anspruchsvoll. Die Werkstoffcharakteristik mit geringer Duktilität und hoher Härte führt zu hohen thermisch induzierten Eigenspannungen, die im Aufbauprozess zur Rissbildung und Ablösung des Bauteils von der Substratplatte führen können [14]. Zur Reduktion der Temperaturgradienten und Abkühlraten müssen deshalb hohe Vorheiztemperaturen an der Bauplattform der PBF-LB-Maschine appliziert werden. Um gleichzeitig eine produktive, porenarme Fertigung zu erlauben, müssen die Prozessparameter in einem engen Bereich identifiziert werden. Mehrere Forschungsarbeiten beschäftigten sich in der Vergangenheit mit der Prozessführung zur Verarbeitung von HSS-Werkstoffen im PBF-LB [14–16]. Eine Demonstration der Eignung als Schneidstoff für die spanende Fertigung, vor allem an Gewindefertigungswerkzeugen, wurde bisher aber noch nicht gezeigt.

In den Forschungsarbeiten des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen University, des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT und eines breiten Industrie-Konsortiums werden daher additiv gefertigte Gewindefertigungswerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl mit interner, angepasster KSS-Zufuhr entwickelt. Die Eignung des Schnellarbeitsstahls HS6–5–3–8 (ASP 2030) als

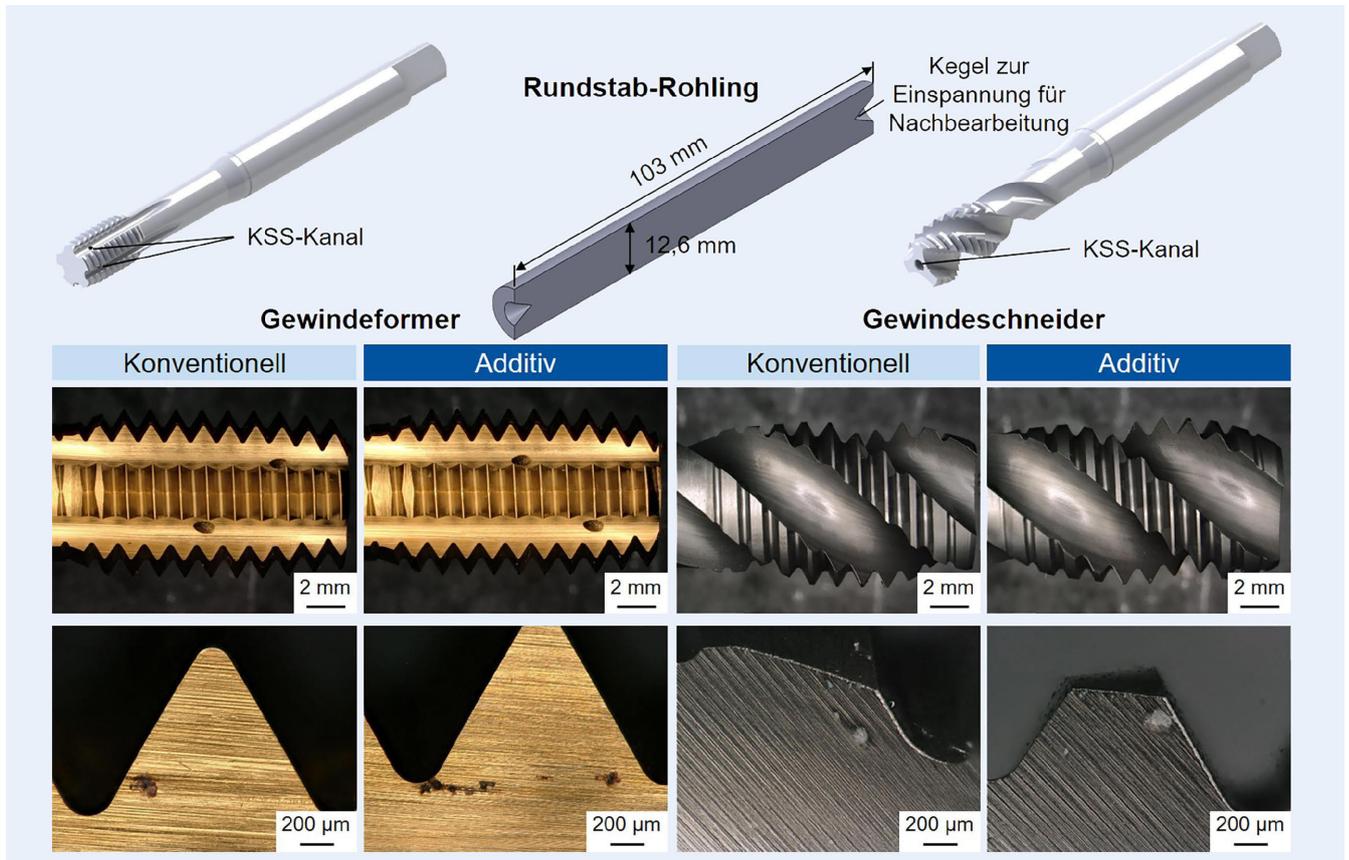


Bild 1. Werkzeuggeometrien Gewindeformer und Gewindeschneider und beispielhaft dargestellte qualitative lichtmikroskopische Bewertung.
Grafik: WZL, Emuge

Schneidstoff zur Zerspaltung unterschiedlichster, teils schwer zerspanbarer Werkstoffe, konnte in umfangreichen Orthogonal-schnitt-Untersuchungen bereits nachgewiesen werden [17]. Im zweiten Schritt muss nun gezeigt werden, dass additiv aufgebaute Gewindeformer für eine prozesssichere Innengewindefertigung einsetzbar sind. Im letzten Schritt wird die interne KSS-Zufuhr entsprechend der zulässigen geometrischen Gestaltungsfreiheiten der additiven Fertigung prozessspezifisch angepasst.

Für die dargestellten Untersuchungen wurden additiv und konventionell hergestellte Gewindeformer- und Gewindeschneiderwerkzeuge aus HS6-5-3-8 hinsichtlich ihres Einsatzverhaltens in unterschiedlichen Werkstoffen gegenübergestellt. Werkzeugverschleiß, Zerspankraft und Drehmoment wurden analysiert. Die vielversprechenden Ergebnisse lassen auf eine Einsatzfähigkeit von AM-Werkzeugen auch in der industriellen Anwendung schließen.

2 Werkzeugcharakterisierung

Ziel der Untersuchungen war die Bewertung des Einsatzverhaltens additiv gefertigter Gewindeformerwerkzeuge und die Gegenüberstellung zu konventionell hergestellten, geometrisch identischen Werkzeugen. In Zusammenarbeit mit der Firma Emuge-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG wurden dazu zwei Werkzeuge ausgewählt. Zur Herstellung von Durchgangslochgewinden kam ein M10-Gewindeformerwerkzeug mit fünf geraden Schmiernuten zum Einsatz. Die Versorgung mittels KSS erfolgte bei diesem Werkzeug über einen radialen Austrittskanal je

Schmiernut mit einem Austrittswinkel von $\beta = 45^\circ$ und einem Kanaldurchmesser von $d = 0,8 \text{ mm}$. Zur Herstellung von Grundlochgewinden wurde ein M10-Gewindeschneiderwerkzeug mit drei gedrahten Spanntuten und axialem KSS-Auslass mit einem Kanaldurchmesser von $d = 1,6 \text{ mm}$ gewählt.

Das Gewindeformer beziehungsweise -furchen zeichnet sich insbesondere durch eine Festigkeitssteigerung im gefertigten Gewinde aus, stellt aber auch höhere Anforderungen an die Toleranzen des Kernlochs [18]. Alle additiven und konventionellen Werkzeuge wurden aus dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-3-8 (ASP 2030) gefertigt. Zum Zeitpunkt der Versuchsplanung war die endkonturnahe PBF-LB-Fertigung aufgrund der hohen Rissanfälligkeit des HSS-Werkstoffs noch nicht prozesssicher möglich. Deshalb wurden im PBF-LB-Verfahren Rundstäbe ohne KSS-Kanal stehend aufgebaut und anschließend in zum konventionell pulvermetallurgisch hergestellten Rundstab identischer Fertigungsroute nachbearbeitet. Die Nachbearbeitung bestand aus einer Wärmebehandlung, einem Schleif-, Bohr- beziehungsweise Erodierprozess, einer Schneidkantenpräparation sowie einem Beschichtungsprozess.

Alle Probekörper wurden am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT auf einer modifizierten PBF-LB-Anlage „Aconity Midi“ gefertigt (Laserleistung $P_L = 200 \text{ W}$; Scangeschwindigkeit $v_s = 740 \text{ mm/s}$; Spurabstand $\Delta y = 100 \text{ µm}$; Schichtdicke $D_s = 30 \text{ µm}$; Vorheizung $T = 350^\circ\text{C}$). In Vorversuchen wurde für die verwendeten Parameter eine relative Bauteildichte von $>99,9\%$ gemessen. Es ist also davon auszugehen, dass die Rundstäbe nahezu porenfrei aufgebaut werden konnten. Zur Normalisierung des

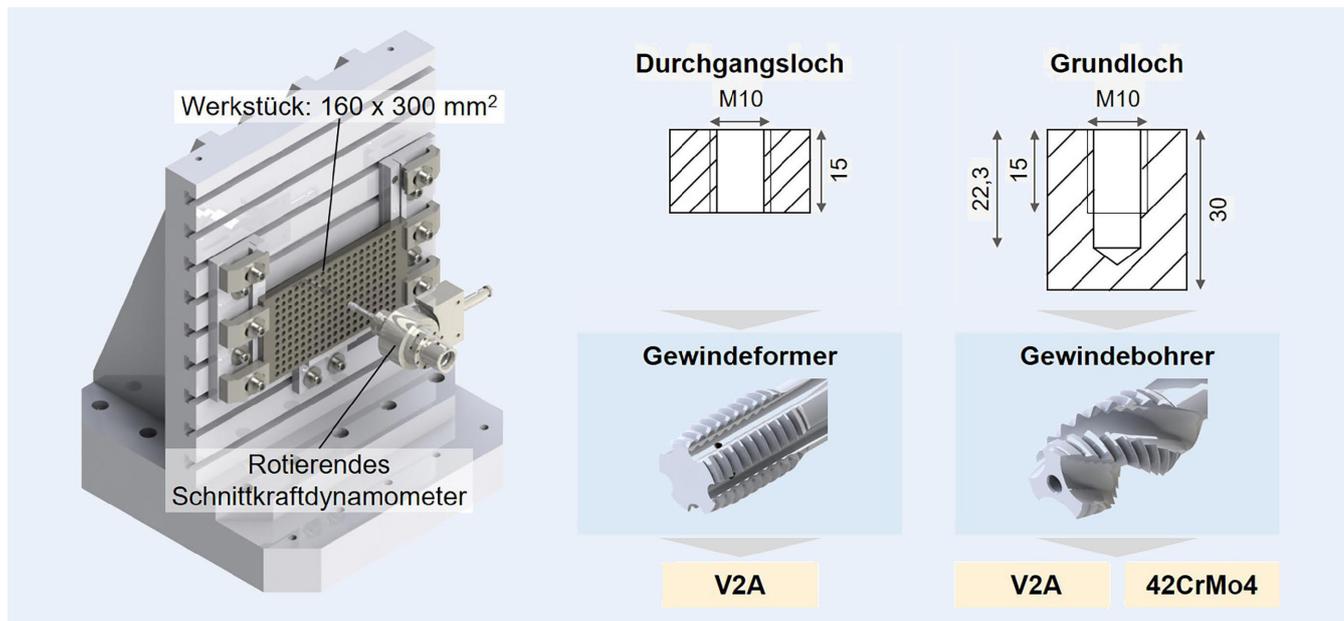


Bild 2. Versuchsaufbau sowie Gewinde-Spezifikationen. Grafik: WZL

AM-Gefüges und Reduzierung der thermisch induzierten Eigenspannungen wurden die additiv aufgebauten Rundstäbe beim Werkzeughersteller bei $T = 820^\circ\text{C}$ vakuumgeglüht. Anschließend wurden konventionelle und additiv gefertigte Rundstäbe in der gleichen Charge einer Wärmebehandlung, bestehend aus Härten ($T = 1180^\circ\text{C}$) und Anlassen ($T = 3 \times 555^\circ\text{C}$) unterzogen. Eine Mikrohärteprüfung auf der Stirnseite der Rundstäbe nach der Wärmebehandlung ergab vergleichbare Werte von $H_{\text{Additiv}} = 67,5$ HRC gegenüber $H_{\text{Konventionell}} = 67,1$ HRC.

Neben den Werkzeuggeometrien sind in Bild 1 beispielhafte Übersichts- und Detailbilder der lichtmikroskopischen Auswertung vor dem Werkzeugeinsatz dargestellt. Die additiv gefertigten Werkzeuge wiesen keine extern sichtbaren Defekte in Form von Poren oder Rissen auf. Kleinere Fehlstellen waren beim Formwerkzeug vereinzelt sowohl für das konventionelle als auch das additive Werkzeug erkennbar. Diese sind wahrscheinlich auf den Nachbearbeitungsprozess, nicht aber auf die Fertigungsroute des Werkzeugrohrlings zurückführbar.

3 Gewindefertigung – Untersuchung des Einsatzverhaltens

3.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethodik

Für die zerspanntechnologischen Untersuchungen wurden zwei Werkstoffe mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften gewählt. Die Schneidwerkzeuge wurden für die Grundlochgewindefertigung im Vergütungsstahl 42CrMo4+QT sowie im rostfreien Stahl X5CrNi18–10 untersucht, die Formwerkzeuge für die Durchgangslochgewindefertigung wurden lediglich im rostfreien Stahl X5CrNi18–10 eingesetzt. Der Werkstoff 42CrMo4+QT weist eine vergleichsweise hohe Zähigkeit und Festigkeit auf. Durch das martensitische Gefüge tritt am Zerspanwerkzeug vermehrt abrasiver Verschleiß auf [19]. Der Werkstoff X5CrNi18–10 neigt aufgrund der hohen Duktilität zu Adhäsion und führt vermehrt zu Aufbauschneidenbildung am Werkzeug sowie Gratbildung am Werkstück [20].

Für die Untersuchungen zum Einsatzverhalten der Gewindefertigungswerkzeuge wurden Versuchsbauteile mit vorgebohrten Kernlöchern gefertigt. Zur Fertigung des Kernlochs kam ein Prototypenbohrwerkzeug der Firma Emuge zum Einsatz. Dabei wurden die eingesetzten Bohrwerkzeuge regelmäßig lichtmikroskopisch auf Verschleißerscheinungen geprüft und mit jedem Bohrwerkzeug eine maximale Anzahl von 800 Bohrungen realisiert.

Bei den Einsatztests der Gewindefertigungswerkzeuge wurde für jeden Versuchspunkt ein neues konventionell oder additiv gefertigtes Gewindefertigungswerkzeug eingesetzt. Alle Versuche wurden auf einem Horizontal-Bearbeitungszentrum „DMG Mori NHX 5000“ durchgeführt. Als KSS kam Emulsion vom Typ „Fuchs Ecocool Global 1000“ (9%) mit einem Zufuhrdruck von $p = 30$ bar zum Einsatz. Der Versuchsaufbau sowie die Gewindefertigungsspezifikationen sind in Bild 2 dargestellt.

Mit jedem Werkzeug wurde eine maximale Anzahl von 400 Gewinden eingebracht. Der Tabelle sind die Schnittparameter zu entnehmen. Für jeden Versuchspunkt wurde ein Wiederholversuch durchgeführt.

Zerspankraft und Drehmoment wurden kontinuierlich mittels rotierendem Schnittdynamometer (RCD) „Kistler 9170A“ gemessen. Zusätzlich wurde die Lehrenhaltigkeit mittels Gewindelehre regelmäßig geprüft und, soweit vorhanden, Späne zu definierten Zeitpunkten gesammelt. Der Werkzeugverschleißzustand wurde kontinuierlich lichtmikroskopisch erfasst.

Zur Auswertung des RCD-Messsignals wurde eine automatisierte Auswertung entwickelt, um unterschiedliche Kennwerte aus Drehmoment- und Axialkraftsignal eines jeden gefertigten Gewindes systematisch zu extrahieren. Die Signalverläufe sind beispielhaft in Bild 3 dargestellt (Auswertung in Anlehnung an [21, 22]).

Zum Vergleich der in unterschiedlichen Herstellungsrouten gefertigten Werkzeuge wurden einzelne, aus dem Messsignal extrahierte Bewertungskenngrößen definiert. Für das Gewindefertigen wurden drei Kenngrößen herangezogen: die Minimal- und Maximalpeaks von Moment oder Axialkraft am Umkehrbeziehungsweise Reversierpunkt, das durchschnittliche Schnitt-

Tabelle. Schnittparameter für die Gewindefertigung.

			Schneider		Former
			X5CrNi18-10	42CrMo4	42CrMo4
Grundloch	Durchmesser	d / mm	8,5	8,5	9,32
	Schnittgeschw.	$v_{s,B}$ / m/min	60	80	80
Gewinde	Vorschub	f / mm	0,15	0,24	0,26
	Schnittgeschw.	$v_{s,G}$ / m/min	9	15	15

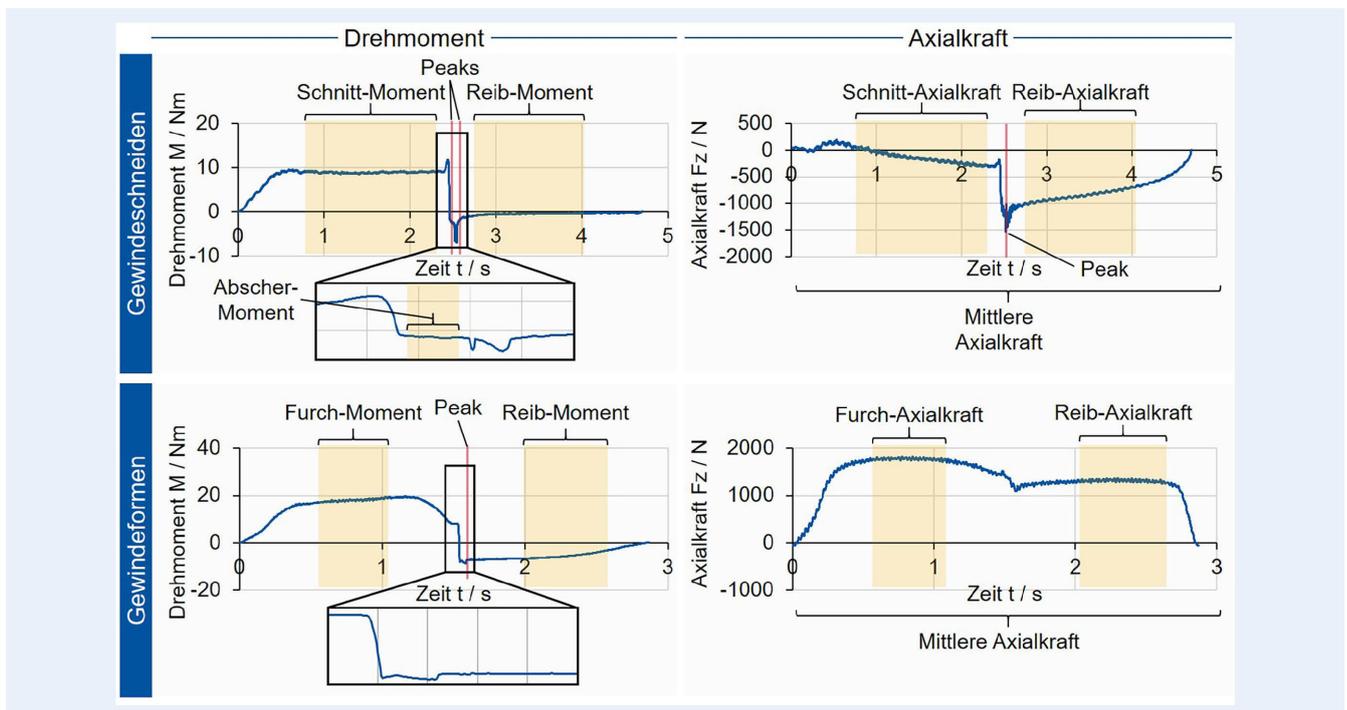


Bild 3. Kennwertbestimmung zur Auswertung von Drehmoment- und Axialkraftsignal. Grafik: WZL

moment beziehungsweise die durchschnittliche Schnitt-Axialkraft und das durchschnittliche Reibmoment beziehungsweise die durchschnittliche Reib-Axialkraft. Für das Gewindeformen erfolgte die Bewertung analog.

3.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden einzelne Versuchsergebnisse der in Kapitel 3.1 beschriebenen experimentellen Untersuchungen exemplarisch aufgegriffen. Die Gewinde-Lehrenhaltigkeit wurde für alle durchgeführten Versuche auch nach 400 gefertigten Gewinden eingehalten.

In Bild 4 sind die Verläufe des mittleren Schnittmoments sowie der mittleren Schnitt-Axialkraft entsprechend der in Bild 3 definierten Systematik über alle gefertigten Gewinde für die Grundlochgewindefertigung in X5CrNi18-10 dargestellt.

Der konstante Anstieg des Schnittmoments und der Schnitt-Axialkraft sind auf den fortschreitenden Werkzeugverschleiß zurückführbar. Allerdings ist für beide Werkzeugvarianten (additiv und konventionell) ein Abflachen der Kurve erkennbar, das heißt es stellte sich nach Erreichen des Initialverschleißes ein fast gleichbleibender Verschleißzustand ab circa 200 gefertigten

Gewinden ein. Drehmoment- und Axialkraft-Amplitude waren über die 400 gefertigten Gewinde für das konventionell und additiv gefertigte Werkzeug ähnlich. Für das konventionell gefertigte Werkzeug waren das Schnittmoment der letzten 50 gefertigten Gewinde (Gewinde Nr. 350-400) circa 4% und die Schnitt-Axialkraft circa 11% gegenüber dem additiv gefertigten Werkzeug erhöht.

Bild 4 zeigt außerdem die zeitabhängigen Signalverläufe des letzten gefertigten Gewindes. Die Signale für konventionell sowie additiv gefertigtes Werkzeug überdecken sich zu nahezu 100%. Auch die sichtbaren Verschleißerscheinungen auf Frei- und Spanfläche sowie die erzeugten Späne waren zwischen den beiden Werkzeugvarianten vergleichbar. Auf der Freifläche zeigten sich für den Werkstoff typische Adhäsionserscheinungen sowie Ansätze von Aufbauschneidenbildung auf der Schneidkante. An den hinteren, voll ausgebildeten Schneiden (nicht dargestellt) traten vermehrt Ausbrüche auf den vorderen Zahnflanken auf. Da die Hauptlast beim Gewindeformen auf den sich im Anschnitt befindlichen Zähnen liegt, sind die Ausbrüche wahrscheinlich auf Spanklemmer im Reversiervorgang zurückzuführen. Die Ausbrüche bei den additiv gefertigten Werkzeugen traten in größerer Anzahl und Stärke auf.

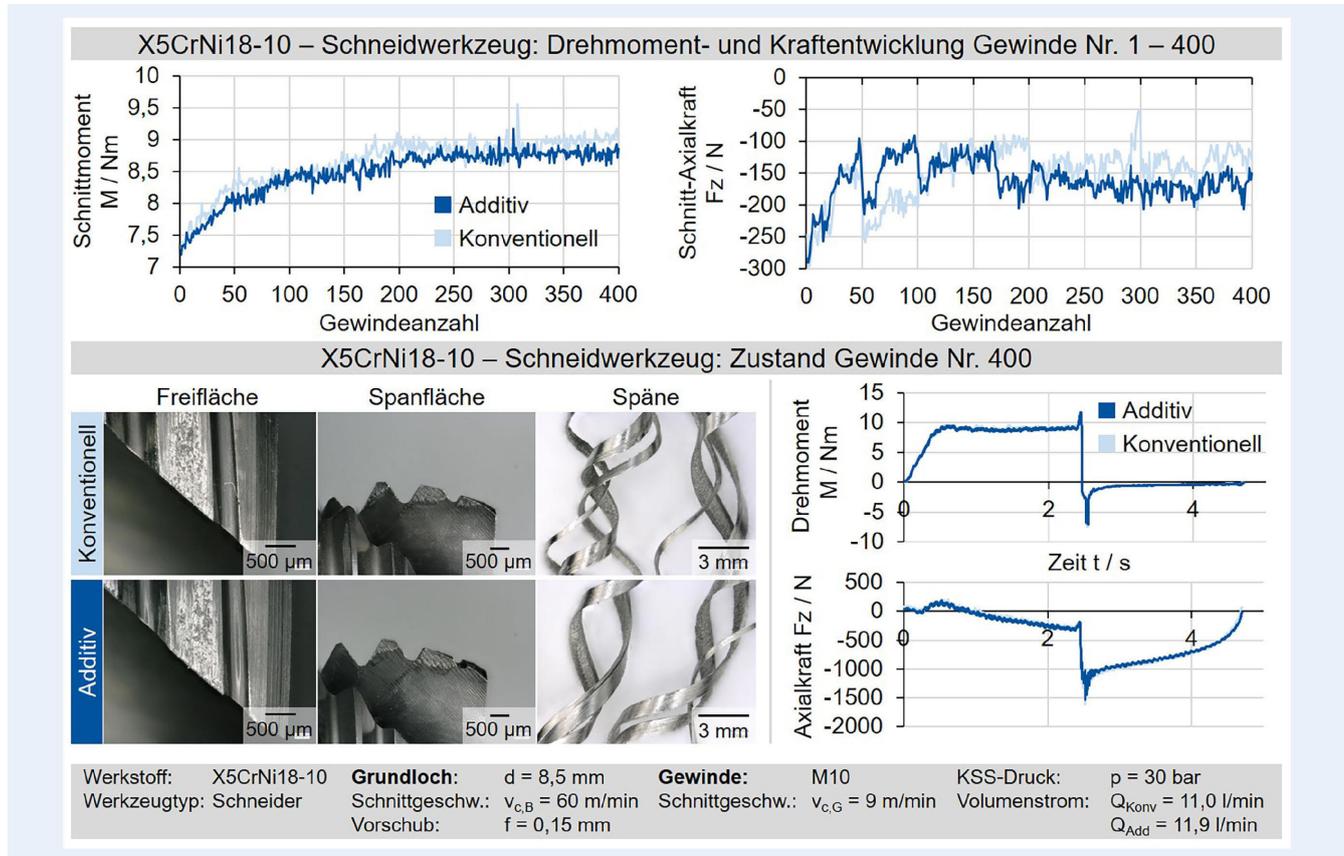


Bild 4. Vergleich additiv versus konventionell gefertigter Gewindeschneider in X5CrNi18-10. Grafik: WZL

Für die Grundlochgewindefertigung in 42CrMo4+QT konnten ähnliche Ergebnisse beobachtet werden. Verschleißerscheinungen wurden insbesondere in Form von Abrasivverschleiß auf der Spanfläche sichtbar. Unterschiede in der Schichthaftung zwischen konventioneller und additiv gefertigter Werkzeugvariante konnten nicht festgestellt werden.

Der optische Werkzeugzustand sowie Signalverläufe für das letzte gefertigte Gewinde beim Durchgangslochgewinde mittels Gewindeformer im Werkstoff 42CrMo4+QT sind in **Bild 5** abgebildet.

Auch hier zeigte sich ein nahezu identischer Drehmoment- und Axialkraftverlauf zwischen konventionellem und additivem Formwerkzeug. Auf den Zahnflanken insbesondere der hinteren Zähne wurden bei beiden Werkzeugvarianten dunkel erscheinende Ablagerungen sichtbar, die vermutlich auf verdampften KSS zurückführbar sind. Auch bei diesem Werkzeugtyp konnte kein Unterschied in der Schichthaftung je nach Herstellungsrouten des Werkzeugrohrlings festgestellt werden.

Die berechneten Kennwerte entsprechend Bild 3 sind für die Grundlochgewindefertigung mit Schneidwerkzeug in X5CrNi18-10 sowie für die Durchgangslochgewindefertigung mit Formwerkzeug in 42CrMo4+QT in **Bild 6** exemplarisch zusammengefasst.

Für die Darstellung wurden die Werte der Gewinde 100–150 sowie 350–400 gemittelt. Es lässt sich festhalten, dass bei relativem Vergleich zwischen den Werkzeugvarianten additiv und konventionell fast alle Kennwerte ähnliche Tendenzen hinsichtlich der Messwertamplitude aufwiesen und somit redundant sind. Für das Gewindeschneiden war die Steigerung des Schnitt-

moments zwischen den gemittelten Gewindebereichen 100–150 und 350–400 für das konventionelle Werkzeug um circa 0,1 Nm größer. Eine ähnliche Tendenz konnte für das Gewindeformen festgestellt werden. Im Bereich der 400 gefertigten Gewinde schien das additive Werkzeug gegenüber dem konventionellen Werkzeug also minimal langsamer zu verschleifen, was eventuell auf sich unterscheidende Mikrostrukturen und damit unterschiedliche mechanische Eigenschaften zurückführbar ist. Allerdings waren die Absolut-Amplituden für das Gewindeformen beim additiven Werkzeug je nach Kennwert um circa 0,5 Nm (Drehmoment) beziehungsweise 150 N (Axialkraft) erhöht.

Obwohl beide Werkzeugvarianten mit der gleichen Beschichtung versehen wurden, gab es also geringe Unterschiede in den Reibbedingungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt. Ob diese durch das Fertigungsverfahren des Werkzeug-Rohrlings bedingt sind, konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht abschließend festgestellt werden. Da beide Werkzeuge aber die gleiche schleifende Nachbearbeitung, Kantenpräparation und damit Oberflächenaktivierung vor der Beschichtung durchliefen, sind die im Zerspanversuch auftretenden Unterschiede wahrscheinlich nicht auf die Fertigungsrouten zurückzuführen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einsatzfähigkeit, die Prozesssicherheit und das Potenzial additiv gefertigter Gewindeschneid- und Gewindeformwerkzeuge konnte im Rahmen der Untersuchungen nachgewiesen werden. Zwischen den konventionell und additiv gefertigten Werkzeugvarianten konnte in den Untersuchungen weder für die Schneid-

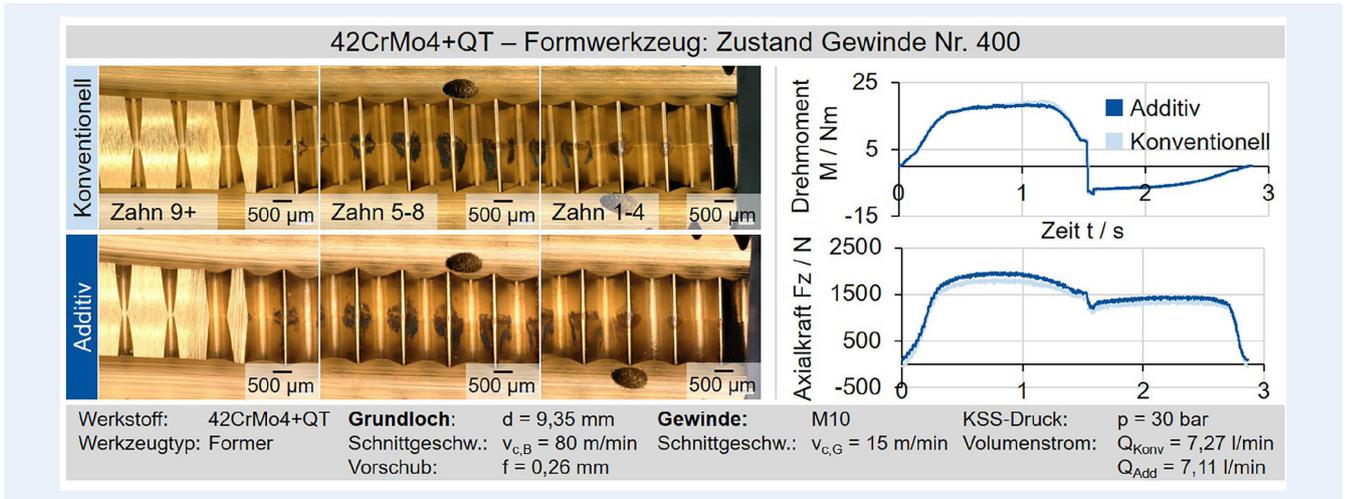


Bild 5. Vergleich additiv versus konventionell gefertigter Gewindeformer in 42CrMo4+QT. Grafik: WZL

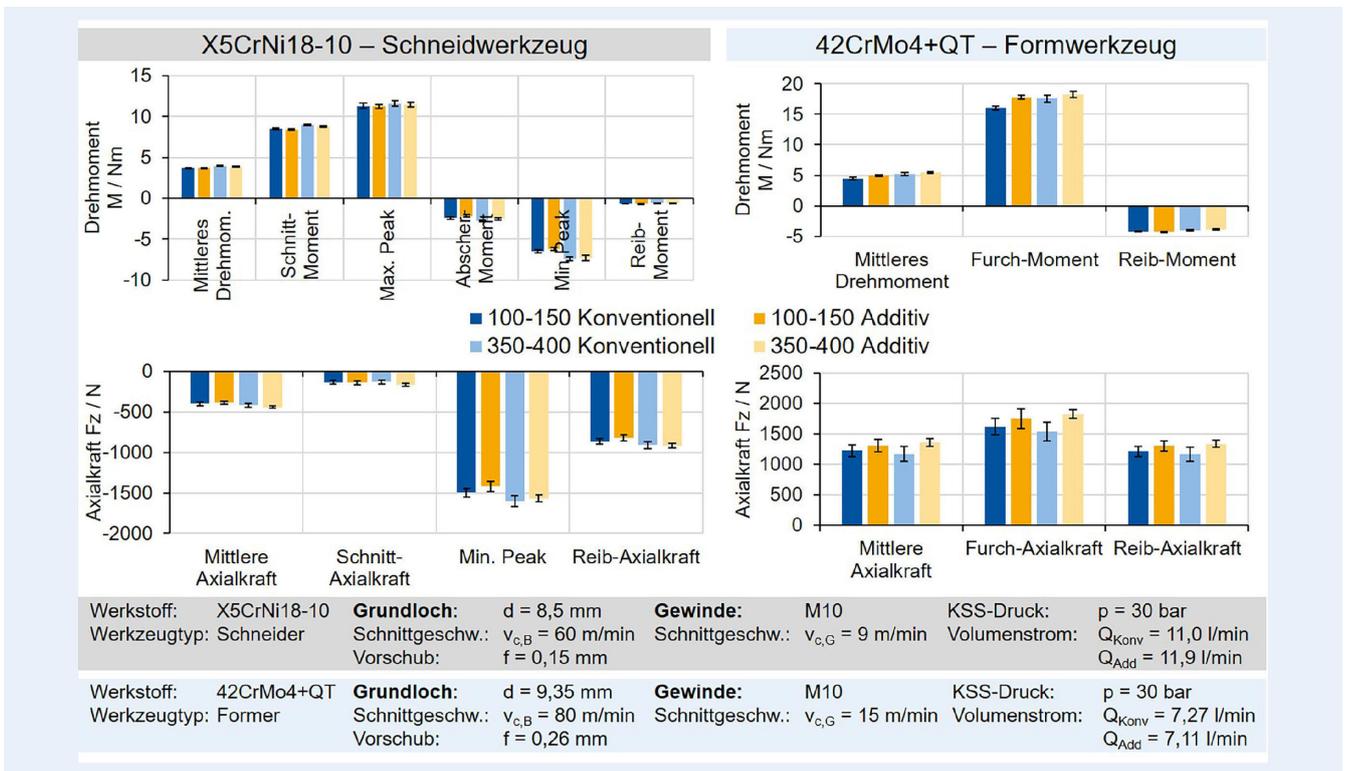


Bild 6. Gemittelte Kennwerte für Drehmoment und Axialkraft. Grafik: WZL

noch für Formwerkzeuge ein eindeutiger Einfluss des Fertigungsverfahrens festgestellt werden. Weder die optisch qualitativ bewertbaren Verschleißerscheinungen, noch die Signalverläufe von Drehmoment und Axialkraft ließen einen eindeutigen Einfluss des schichtweisen Aufbaus erkennen. Auf der Oberfläche der AM-Werkzeuge konnten keine fertigungsbedingten Fehlstellen festgestellt werden. Die aufgebrauchte Werkzeugbeschichtung hielt den Belastungen in allen Anwendungen stand.

Dies lässt in Einklang mit den Vorversuchen auf eine defektfreie additive Fertigung der Werkzeugrohlinge schließen. Durch die identische Wärmebehandlung wurde der Einfluss des Fertigungsverfahrens weitestgehend normalisiert, das heißt die Richtungsabhängigkeit des ausgebildeten Gefüges und der mechani-

schen Eigenschaften reduziert. Dies konnte durch die Messung einer vergleichbaren Härte bestätigt werden. Da die Rundstäbe porenfrei gefertigt wurden, wirkten keine zusätzlichen Riss-Initiatoren während des Einsatzes im Gewindewerkzeug.

In weiteren Untersuchungen müssen der Wärmebehandlungszyklus der additiv aufgebauten Bauteile systematisch ausgelegt und darauf aufbauend die resultierenden Gefügeeigenschaften und mechanischen Eigenschaften identifiziert werden. Im Vergleich zum konventionell pulvermetallurgisch verarbeiteten HSS-Werkstoff können dann eventuell auftretende Unterschiede im Werkzeugeinsatz erklärbar gemacht werden. In einer weiteren Versuchsreihe muss geklärt werden, inwieweit auch bei größerer

Anzahl gefertigter Gewinde beide Werkzeugtypen ein vergleichbares Einsatzverhalten aufweisen.

Die Ergebnisse zeigen das enorme Potenzial additiv gefertigter, geometrisch angepasster Gewindewerkzeuge. Da das Einsatzverhalten vom Fertigungsverfahren des Werkzeugrohlings unabhängig scheint, verspricht eine Anpassung und prozessindividuelle Gestaltung der KSS-Zufuhr eine Steigerung der Prozesssicherheit, Werkzeugstandzeit und Produktivität. Die Neugestaltung der KSS-Zufuhr hinsichtlich Kanal- und Düsengeometrie wird nun im Rahmen der Forschungsarbeiten weiter untersucht.

FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben 21581 N (Projektname „AddBo“) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW wird 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.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Firma Emuge-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG, insbesondere Herrn Zeus und Herrn Hader, für die intensive Beratung sowie die Bereitstellung der Werkzeuggeometrien und die Nachbearbeitung der Werkzeugrohlinge. Der HSS-Pulverwerkstoff wurde durch die Firma Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG bereitgestellt. Alle PBF-LB-Bauteile wurden am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT gefertigt.

- [12] Kernan, B. D.; Sachs, E. M.; Oliveira, M. A. et al.: Three-dimensional printing of tungsten carbide–10wt% cobalt using a cobalt oxide precursor. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 25 (2007) 1, pp. 82–94
- [13] Weigold, M.; Scherer, T.; Schmidt, E. et al.: Additive Fertigung keramischer Schneidstoffe. *wt Werkstattstechnik online* (2020) 110, S. 2–6. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [14] Kempen, K.; Vrancken, B.; Buls, S. et al.: Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (2014) 6, doi.org/10.1115/1.4028513
- [15] Zumofen, L.; Beck, C.; Kirchheim, A. et al.: Quality Related Effects of the Preheating Temperature on Laser Melted High Carbon Content Steels. *Industrializing Additive Manufacturing – Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications – AMPA2017* (2018), pp. 210–219
- [16] Saewe, J.; Gayer, C.; Vogelpoth, A. et al.: Feasibility Investigation for Laser Powder Bed Fusion of High-Speed Steel AISI M50 with Base Preheating System. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 164 (2019) 3, S. 101–107
- [17] Kelliger, T.; Meurer, M.; Bergs, T.: Orthogonal cutting with additively manufactured grooving inserts made from HS6–5–3–8 high-speed steel. *Materials Research Proceedings* 28 (2023), pp 1235–1244, doi.org/10.21741/9781644902479–134
- [18] BASS GmbH & Co. KG: Gewindefurchen – die spanlose Alternative zum Gewindebohren. *Fräsen & Bohren* (2020) 4, S. 30–31
- [19] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [20] Hesterberg, S.: *Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle. Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten*. Dissertation, Universität Dortmund, 2006
- [21] Walter AG: *Produktionshandbuch Gewinden. Präzise, sicher, wirtschaftlich - Gewinden mit Walter Prototyp*. Stand: 2012. Internet: cdn.walter-tools.com/files/sitecollectiondocuments/downloads/global/manuals/de-de/handbook-prototyp-threading-2012-de.pdf. Zugriff am 25.04.2023
- [22] muge-Franken (Hrsg.): *Handbuch der Gewindetechnik und Frästechnik. Anwendungen, Tipps, Tabellen*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004

Literatur

- [1] Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH: *Prozesssicher Gewinde fertigen*. Stand: 2022. Internet: www.form-werkzeug.de/a/fachartikel/prozesssicher-gewinde-fertigen-3184910. Zugriff am 24.04.2023
- [2] Biermann, D.; Özkaya, E.; Hannich, S. et al.: *Strömungstechnische Optimierung von Hochleistungsgewindebohrern*. VDI-Z Integrierte Produktion (2016) 158, S.30–33
- [3] Lakner, T.: *High-pressure cutting fluid supply in milling*. Dissertation, RWTH Aachen University, 2021
- [4] Özkaya, E.: *FEM-basiertes Softwaresystem für die effiziente 3D-Gewindebohrsimulation und Werkzeugoptimierung mittels CFD-Simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2017
- [5] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. et al.: *Additive manufacturing technologies*. Cham: Springer-Verlag 2021
- [6] Neher Group: *Additive Fertigung. Das Fertigungsverfahren für die Zukunft*. Stand: 2019. Internet: www.neher-group.com/de/Aktuelles/2019/03/06/Additive-Fertigung. Zugriff am 24.04.2023
- [7] N. N.: *Lasersintern erweitert Fertigungsmöglichkeiten von Präzisionswerkzeugen*. Firmenbroschüre Mapal Dr. Kress KG, Aalen, 2017
- [8] Urma AG Werkzeugfabrik: *Serien-Drehwerkzeug mit innenliegenden Kanalstrukturen*. Maschinenbau Schweiz (2019) 11, S. 14–15
- [9] Kulmala, T.: *Geringeres Gewicht – höhere Leistung*. Sandvik Coromant. Internet: www.sandvik.coromant.com/de-de/www/pages/t_cm390am.aspx. Zugriff am 24.04.2023
- [10] Padmakumar, M.: *Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hard-metal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques*. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 7 (2020) 3, pp. 338–371
- [11] Schwanekamp, T.: *Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen von Hartmetallen zur additiven Herstellung von Zerspanwerkzeugen*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2021



Tobias Kelliger, M.Sc.

Foto: WZL

Markus Meurer, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Bergs** MBA
Werkzeugmaschinenlabor WZL
der RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 241 80-20523
t.kelliger@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Bergs** MBA
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik IPT
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen
www.ipt.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)