

Titel

Steigerung der Werkzeugstandzeit und Prozesssicherheit durch additiv gefertigte, funktionsangepasste Gewindewerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl (AddBo)

IGF-Nr.: 21581 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, Aachen
(Seit 01.01.2024: Manufacturing Technology Institute MTI der RWTH Aachen University)

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen



Ansprechpartner beim MTI (WZL): Tobias Kelliger
+49 241 80-20523
t.kelliger@mti.rwth-aachen.de

Ansprechpartner beim ILT: Niklas Prätzsch
+49 241/8906-193
niklas.praetzsch@ilt.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 21581 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

Die Einbringung von Innengewinden erfolgt meist in einem fortgeschrittenen Stadium der Fertigungskette eines Bauteils und damit zu einem Zeitpunkt hoher Wertschöpfungshistorie. Aus ökonomischer Sicht ist die Prozesssicherheit bei der Gewindefertigung deshalb entscheidend. Innengewinde in Maschinenbauanwendungen werden hauptsächlich mithilfe von drei Fertigungsverfahren hergestellt: dem Gewindebohren, dem spanlosen Gewindeformen und dem Gewindefräsen. Ein wichtiges Element zur Sicherstellung bzw. Erhöhung der Prozesssicherheit bei der Innengewindeherstellung ist die zielgerichtete Versorgung der Kontaktzonen mit Kühlschmierstoff (KSS). Durch den Einsatz von KSS kann die Prozesssicherheit im Sinne eines fortschreitenden Werkzeugverschleißes sowie der Gewinde-Lehrenhaltigkeit bei der Innengewindefertigung gesteigert werden [BIER16]. 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. Dies bedingt reduzierte Zerspankräfte und Drehmomente und verlangsamt den Verschleißfortschritt am Gewindewerkzeug. Die zielgerichtete Benetzung der Kontaktzone mit KSS erfordert insbesondere bei der Fertigung von Durchgangsgewinden radiale Kanalauslässe am Werkzeug, die konventionell aufwändig und nur begrenzt herstellbar sind.

Durch Einsatz additiver Fertigungsverfahren (AM-Verfahren), speziell dem Laser Powder Bed Fusion (LPBF, deutsch: Pulverbettbasiertes Schmelzen mittels Laserstrahl) Verfahren, ist die Fertigung geometrisch deutlich komplexerer, innenliegender Strukturen möglich. Dieser Vorteil kann für die Gewindewerkzeugfertigung nutzbar gemacht werden, um eine prozessindividuelle KSS-Zufuhr am Werkzeug, zum Beispiel durch eine angepasste Kanal- und Düsengeometrie, umzusetzen. Bisher kam die additive Fertigung für Zerspanwerkzeuge insbesondere für Werkzeuggrundkörper, z.B. wendeschneidplattenbestückte Drehklemmhalter, Bohrer oder Messerkopfwerkzeuge zum Einsatz. Der additive Aufbau des Schneidstoffs selbst erfolgte aufgrund der hohen Anforderungen an die Prozessführung des AM-Prozesses bisher nur selten. Die Verarbeitung von Schnellarbeitsstahl (HSS), wie er in einer Vielzahl von Gewindewerkzeug-Anwendungen zum Einsatz kommt, im LPBF-Verfahren ist aufgrund des hohen Kohlenstoff-Anteils und der damit verbundenen schweren Schweißbarkeit anspruchsvoll. Die Werkstoff-Charakteristik 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. Zur Reduktion der Temperaturgradienten und Abkühlraten müssen deshalb hohe Vorheiz-Temperaturen an der Bauplatzform der LPBF-Maschine appliziert werden. Um gleichzeitig eine produktive, porenarme Fertigung zu ermöglichen, 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 LPBF. Eine Demonstration

der Eignung als Schneidstoff für die spanende Fertigung, insbesondere an Gewindewerkzeugen, wurde bisher aber noch nicht gezeigt.

Forschungsziel

Im Rahmen des Forschungsprojektes AddBo wurden deshalb additiv gefertigte Gewindewerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl mit interner, angepasster KSS-Zufuhr entwickelt, getestet und hinsichtlich ihres Potenzials für die industrielle Anwendung bewertet. Dabei stand die Entwicklung der additiven Fertigung, speziell des LPBF-Verfahrens, für Gewindewerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl mit komplexen innenliegenden Kanalstrukturen im Vordergrund.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zur Realisierung der Zielsetzung des Vorhabens wurden Forschungsarbeiten in sechs Arbeitspunkten durchgeführt. Zunächst stand in AP1 die Qualifizierung des LPBF-Prozesses für einen geeigneten Schnellarbeitsstahl im Fokus. Die Ergebnisse wurden anschließend in AP2 zur Fertigung erster Schneidkeilgeometrien und Fluid-Probekörper genutzt. Die additiv gefertigten Schneidplatten wurden im Orthogonalschnitt-Versuch hinsichtlich ihres Einsatzverhaltens untersucht. Die Fluid-Probekörper dienten der Analyse unterschiedlicher Kanal- und Düsenstrukturen zur verlustarmen und zielgerichteten KSS-Zufuhr an die Werkzeugschneide. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden in AP3 zur Auslegung einer angepassten KSS-Zufuhr in Gewindeschneid- und Gewindeformwerkzeugen genutzt. Die Auslegung wurde durch in AP4 durchgeführte Strömungssimulation unterstützt. Ein in AP5 entwickelter finaler Werkzeugdemonstrator wurde im letzten Schritt in AP6 hinsichtlich des ökonomischen und ökologischen Potenzials bewertet.

Im **AP1** wurde der LPBF-Prozess für den Schnellarbeitsstahl ASP2030 (HS6-5-3-8) qualifiziert. Zunächst wurde eine Parameterstudie für die Verarbeitung von HS6-5-3-8 durchgeführt. Das übergeordnete Ziel dieser Studie waren LPBF-Prozessparameter für die Bauteilschraffur (Hatch), mit welchen ggü. bereits bekannten Hatch-Parametern eine größere theoretische Aufbaurate (Produktivität) bei bestenfalls unveränderter Bauteilqualität (z.B. relative Dichte) möglich ist. Die gefertigten Würfelproben wurden nach dem Bauprozess hinsichtlich ihrer relativen Bauteildichte sowie Härte untersucht. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass ein großer Energieeintrag bei kleiner Schichtdicke vorteilhaft ist, um HS6-5-3-8 mittels LPBF defektfrei zu verarbeiten. Erklärbar ist dieser Effekt damit, dass nur mit großem Energieeintrag ein vollständiges Aufschmelzen der hoch- und niedrigschmelzenden Phasen des Werkstoffes und damit auch eine vollständige Durchmischung dieser erzielt werden kann. Mit steigender Scangeschwindigkeit wurde vor allem bei kleineren Laserleistungen eine Abnahme der relativen Dichte festgestellt. Die Härte korrelierte in starkem Maße mit den LPBF-Prozessparametern. Auf Basis der Untersuchungen wurden folgende

Parameterkombinationen ausgewählt (Hatch-Parameter Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_s , Hatchabstand Δy_s , Schichtdicke D_s , Substratplattenvorheizung konstant 350 °C):

P_L [W]	v_s [mm/s]	Δy_s [mm]	D_s [mm]	E_v [J/mm ³]	V' [mm ³ /s]	T_H [°C]	ρ_{rel} [%]	HV10
200	740	0,100	0,030	90,1	2,22	350	99,93	687
250	940	0,100	0,030	83,3	2,82	350	99,91	674

Zusätzlich wurden Prozessparameter zur Belichtung der Bauteilkontur identifiziert. Die Oberfläche der gefertigten Proben wurde hinsichtlich der arithmetischen Mittenrauheit analysiert. Innerhalb des getesteten Parameterfensters wurde dabei eine Reduktion der Oberflächenrauheit bei Vergrößerung der Linienenergie festgestellt. Dabei ist die Kombination aus kleiner Scangeschwindigkeit und kleiner Laserleistung zu bevorzugen, da bei großen Scangeschwindigkeiten (und großer Laserleistung) eine Welligkeit in den Oberflächen der belichteten Proben identifiziert wurde, was insbesondere für die beabsichtigte Fertigung von Kühlkanälen als ungeeignet bewertet wird. Basierend auf der Kontur-Parameterstudie wurde folgender Parametersatz ausgewählt:

P_L [W]	v_s [mm/s]	HOB [mm]	D_s [mm]	E_s [J/mm]	T_H [°C]	R_a [µm]
150	500	0,040	0,030	0,03	350	8,2

Für die Fertigung funktionsangepasster Gewindewerkzeuge wurden grundlegende Untersuchungen für die Herstellung von Kühlkanälen durchgeführt. Diese Untersuchungen hatten zum einen zum Ziel geeignete Kühlkanal-Querschnittsgeometrien zu identifizieren und die Limitationen hinsichtlich der Kühlkanal-Größe zu bestimmen. Zum anderen wurde im Überhangbereich der Kanäle die Anwendung angepasster Hatch-Parameter (sog. Downskin-Parameter) erprobt (vgl. Bild 1).

Experimente mit den folgenden Parametervariationen:

- Laserleistung:
 - 150 W - 250 W
- Hatchabstand:
 - 80 µm - 100 µm
- Scangeschwindigkeit:
 - 740 mm/s - 1200 mm/s

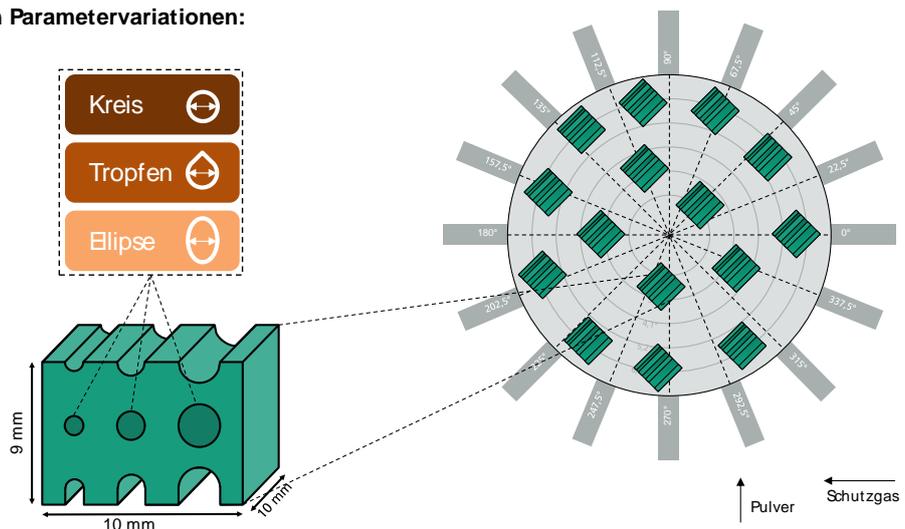


Bild 1: Versuchsaufbau zur Fertigung von Kühlkanälen

Unter Verwendung der Downskin-Parameter konnten deutlich kleinere Kühlkanaldurchmesser geometrietreu gefertigt werden. Im Querschnitt kreis- und tropfenförmige Kühlkanäle konnten mit größerer Geometrietreue aufgebaut werden als elliptische. Kühlkanäle mit einem Durchmesseräquivalent von 0,2 mm konnten nicht

gefertigt werden. Kühlkanäle mit einem Durchmesseräquivalent von 0,4 mm sind über der Kanallänge partiell verschmolzen, sodass keine durchgehenden Kühlkanäle gefertigt wurden. Zudem konnten elliptische Kühlkanäle mit einem Durchmesser unter 0,6 mm nicht durchgängig gefertigt werden. Für tropfenförmige Kühlkanalquerschnitte wurde reduzierte Rissneigung ggü. den anderen Querschnittsgeometrien nachgewiesen.

Abschließend wurden die mechanischen Eigenschaften in zylindrischen Probekörpern untersucht. Die Ergebnisse der Härtemessung wiesen für beide Hatch-Parametersätze einen Anstieg der gemittelten Härte über der Bauhöhe auf (bis ca. 800 HV), wobei dieser Effekt bei vergrößertem Energieeintrag deutlicher ausgeprägt war. Der Anstieg der Härte weist auf veränderte Erstarrungsbedingungen des umgeschmolzenen Werkstoffes aufgrund veränderter Abkühlbedingungen hin. Zur Ermittlung weiterer Werkstoffkennwerte wurden Stauch- und Schlagbiegeversuche für die Prüfung von LPBF-Probekörpern im as-built Zustand, im wärmebehandelten Zustand (WB) sowie im wärmebehandelten Zustand mit anschließender Behandlung durch heißisostatisches Pressen (WB + HIP) definiert. Mit der Route WB + HIP konnten aus der Literatur vergleichbare Werte für Härte und Kerbschlagbiegearbeit erreicht werden:

Zustand	Weichglühen	Härte [HRC]	Härten	Härte [HRC]	Anlassen	Härte [HRC]	Schlagbiegearbeit [J]
As-built	-	58,9 59,1 – 58,7 – 59,1	-	-	-	-	14 12 - 13 - 16
WB + HIP	820°C/3h/L	-	1200°C/ 10'/7bar	-	3x555°C/ 1h/L	68,4 68,5 – 68,3 – 68,5	22 22 – 22 - 22

In **AP2** standen zwei wesentliche Fragestellungen im Fokus. Zum einen sollte geklärt werden, inwieweit im LPBF-Verfahren verarbeiteter HSS entsprechend der in AP1 durchgeführten Parameterentwicklung zum Einsatz als Schneidstoff in der Zerspaltung geeignet ist. Zum anderen sollten geeignete Geometrien identifiziert werden, die sich für die KSS-Zufuhr im additiv gefertigten Werkzeug eignen und eine verlustarme und zielgerichtete Fluid-Zufuhr versprechen. Zur Validierung der Eignung des additiv verarbeiteten HSS als Schneidstoff zur Zerspaltung unterschiedlichster Werkstoffe wurden LPBF-gefertigte Einstechplatten in orthogonalen Zerspaltungsversuchen untersucht. Hauptbewertungskriterien waren Zerspalkraftkomponenten, Werkzeugverschleiß und Spanform. Beispielhaft dargestellt sind in Bild 2 die von der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Spanbildung sowie die daraus resultierenden Spanformen. Alle as-built, unbeschichteten additiv gefertigten Einstechplatten hielten den thermischen und mechanischen Belastungen bei der Zerspaltung der unterschiedlichen Werkstoffe im Rahmen der Versuchsdurchführung stand. Die Härte der as-built Probekörper variierte über die Aufbauhöhe sowie zwischen den beiden LPBF-Parameterkombinationen mit reduzierter Härte bei kleinen Abständen zur Bauplatte und produktiven LPBF-Prozessparametern. Ein Einfluss der LPBF-Parameter und der Aufbauhöhe konnte nur bei der Zerspaltung von Inconel 718 mit steigender Schnittkraft und Schnittnormalkraft über mehrere Schnitte festgestellt werden. Die produktiven LPBF-Parameter und ein geringer Abstand zur Bauplatte führten zu höheren Kräften und schnellerem Verschleißfortschritt an der Schneidkante.

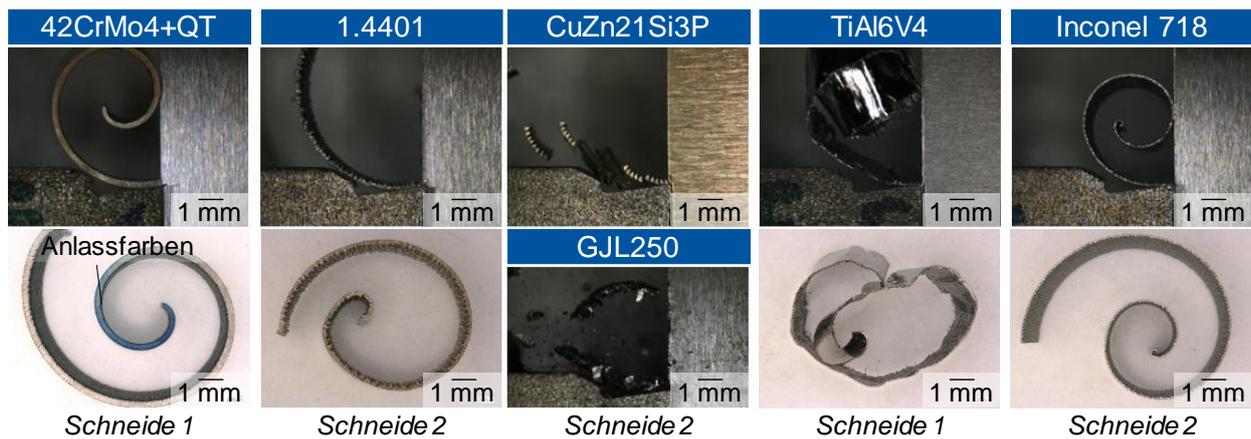


Bild 2: Spanbildung und Spanform aller zerspannten Werkstoffe

Zur Bewertung unterschiedlicher Kanal- und Düsengeometrien wurde ein Prüfstand entwickelt, der die Vermessung des KSS-Freistrahls ermöglicht, Bild 3. Die konstruierten Probekörper wurden aus der realen Werkzeuggeometrie und KSS-Zufuhr basierend auf den Überlegungen in AP3 abgeleitet. Der Einfluss von Kanal- und Düsengestaltung wurde getrennt untersucht. Für den Untersuchungsbereich des Kanals wurden Übergangsradius, Umlenkwinkel, Kanaldurchmesser (und damit geförderter Volumenstrom bei eingestelltem Druck), Kanalquerschnittsgeometrie sowie Nachbearbeitungszustand (strömungsgeschliffene Kanäle) gegenübergestellt. Zur Bewertung unterschiedlicher Ausführungen wurde der Volumenstrom Q sowie die vom KSS-Strahl ausgeübte Gesamtkraft F_{ges} gemessen. Im Untersuchungsbereich Düse wurden Düsendurchmesser, Düsengeometrie, Übergangslänge zwischen rundem Kanal und geformtem bzw. verjüngtem Auslassquerschnitt sowie Richtungsänderung bzw. Umlenkwinkel variiert. Dabei wurden neben Volumenstrom und Gesamt-Strahlkraft auch die Strahlkraftverteilung über den Strahlquerschnitt (Staukraft F) sowie die Freistrah-Ausbreitung analysiert. Der eingestellte Druck lag zwischen $p = 70$ und 150 bar. Die experimentellen Analysen zeigten den positiven Effekt eines stetigen Übergangs bzw. Radius zwischen zwei Kanälen, der zu einer deutlichen Volumenstromsteigerung führt. In Abhängigkeit des Winkels zwischen den Kanälen steigt der Verlust an. Mit steigendem Durchmesser wächst der geförderte Volumenstrom und die damit verbundene Strahlkraft stark an, da der Einfluss der Wandrauheit auf die Verluste abnimmt. Für einen Kanaldurchmesser von $d = 0,6$ mm konnte kein konstanter Volumenstrom aufgebaut werden, was auf die bereits diskutierte geometrische Abweichung zurückzuführen ist. Aufgrund der größten Ist-Querschnittsfläche konnte mit dem dreieckigen Kanal der größte Volumenstrom gefördert werden. Die Unterschiede zu kreisförmigem und elliptischem Kanal sind jedoch sowohl für den Volumenstrom als auch für die Strahlkraft marginal. Die höchste Bündelung der Strahlenergie wird für einen Düsendurchmesser $d = 1,5$ mm mit vorteilhafter Kombination aus maximaler Amplitude F_{max} , minimaler Strahlbreite b und homogener Geschwindigkeitsverteilung erzielt. Für die maximale mechanische Wirkung ist eine elliptische Düsenform vorteilhaft. Die dreieckige Düsenform ist für eine flächige Schneidenbenetzung geeignet. Wo möglich sind Umlenkungen zu vermeiden, um die Turbulenzbildung zu reduzieren und das Geschwindigkeitsprofil zu homogenisieren.

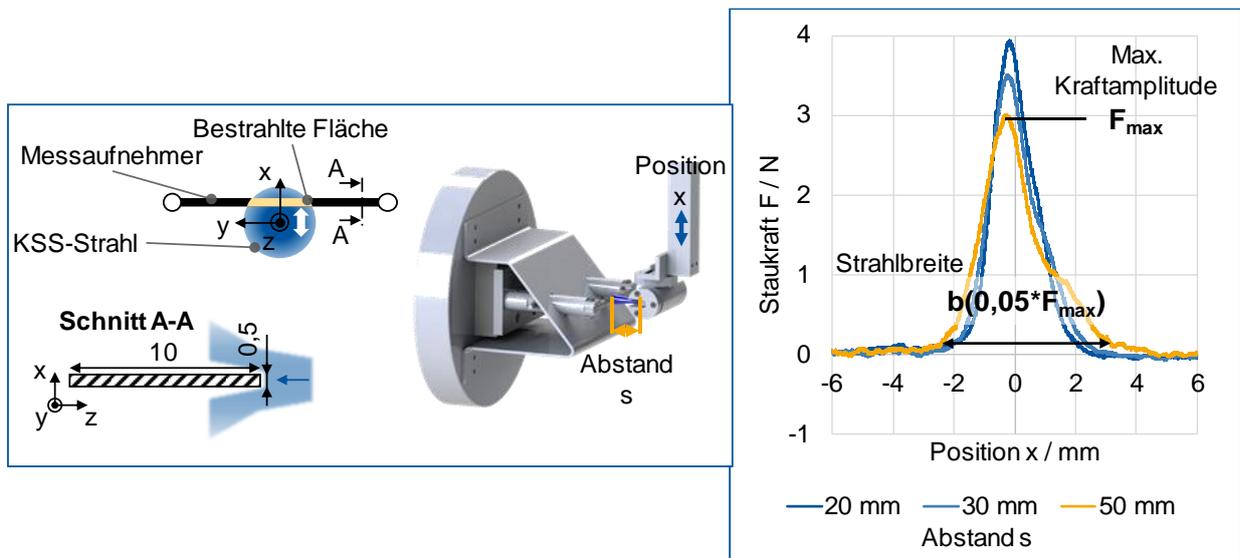


Bild 3: Messung der Staukraft zur Bewertung der Kraftverteilung und Strahlbreite bzw. Strahlauffächerung

Die Arbeiten in **AP3** wurden in zwei Iterationen aufgeteilt. Die Eignung des additiv verarbeiteten HSS HS6-5-3-8 als Schneidstoff zur Zerspaltung unterschiedlichster, teils schwer zerspanbarer Werkstoffe, konnte in den Orthogonalschnitt-Untersuchungen entsprechend AP2 bereits nachgewiesen werden. In der ersten Iteration von AP3 galt es die Einsatzfähigkeit additiv gefertigter Gewindewerkzeuge für eine prozesssichere Inngengewindefertigung nachzuweisen. Die zweite Iteration hatte die Untersuchung einer angepassten KSS-Zufuhr entsprechend der zulässigen geometrischen Gestaltungsfreiheiten und Erkenntnisse aus AP2 der additiven Fertigung zum Ziel. In Zusammenarbeit mit dem PA wurden zwei Werkzeuge der Firma EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG ausgewählt. Zur Herstellung von Durchgangslochgewinden kam ein M10 Gewindeformwerkzeug mit fünf geraden Schmiernuten zum Einsatz. Zur Herstellung von Grundlochgewinden wurde ein M10 Gewindeformwerkzeug mit drei gedrahten Spannuten und axialem KSS-Auslass gewählt. Für die zerspantechnologischen 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 in denselben Werkstoffen. Der Versuchsaufbau ist exemplarisch in Bild 4 dargestellt. Die Einsatzfähigkeit, die Prozesssicherheit und das Potenzial additiv gefertigter Gewindeform- und Schneidwerkzeuge konnte im Rahmen der Untersuchungen nachgewiesen werden. Zwischen den konventionell und additiv gefertigten Werkzeugvarianten konnte weder für die Schneid-, 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 aufgetragene Werkzeugbeschichtung hielt den Belastungen in allen Anwendungen stand. Dies lässt in Einklang mit den Vorversuchen auf eine defektfreie additive Fertigung der Werkzeug-Rohlinge schließen. Durch die identische Wärmebehandlung wurde der

Einfluss des Fertigungsverfahrens auf Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften normalisiert, d.h. die Richtungsabhängigkeit des ausgebildeten Gefüges und der mechanischen 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. Somit verspricht eine Anpassung und prozessindividuelle Gestaltung der KSS-Zufuhr eine Steigerung der Prozesssicherheit, Werkzeugstandzeit und Produktivität.

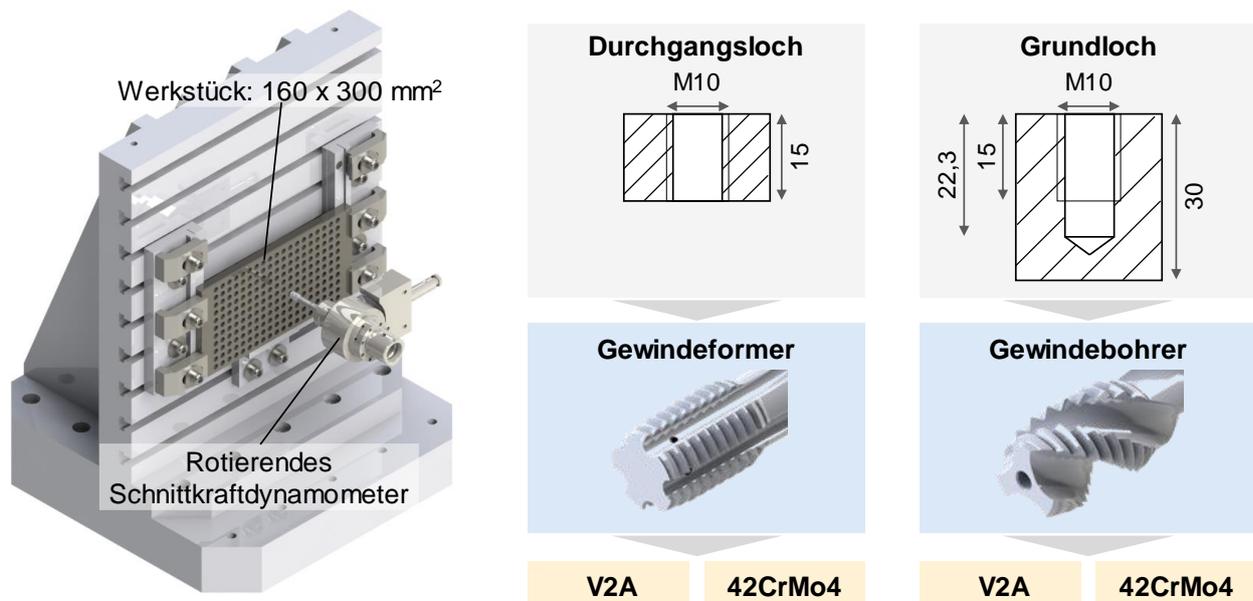


Bild 4: Versuchsaufbau sowie Gewinde-Spezifikationen

Die in der zweiten Iteration entwickelten KSS-Zufuhr-Varianten sind in Bild 5 gezeigt. Allen Varianten S1, S2, S3 und F1, F2 ist gemein, dass die Verbindung zwischen axialem Zufuhr-Kanal und axial oder radial ausgeführten Austrittsdüsen in Verlauf und Übergang möglichst stetig ausgeführt wird. Bei Rundstrahldüsen wurde entsprechend den Gestaltungsrichtlinien aus AP2 der Zufuhr-Kanal über eine große Lauflänge groß gehalten. Für das Schneidwerkzeug wurden drei angepasste Varianten S1, S2, S3 entwickelt. S1 zeichnet sich durch eine axiale, kreisförmige Düse und drei radial in die Spankammer gerichtete elliptische Düsen aus, die in Vorschubrichtung (entgegen Spanablaufrichtung) gerichtet sind. S2 besitzt die gleiche Düsenkonfiguration, die radial austretenden Düsen sind allerdings mit einer Umlenkung versehen, sodass der KSS in die Richtung der Spanabfuhr wirkt. Beide Varianten S1 und S2 fokussieren die radialen KSS-Strahlen auf die Spanfläche. S3 ist ähnlich zu S1 ausgeführt, mit radial austretenden Düsen in die Spankammer-Mitte. Für das Formwerkzeug wurden zwei angepasste Varianten F1, F2 entwickelt. F1 fokussiert eine jeweils elliptische, möglichst lang gezogene Düse auf die Zähne der in Rotationsrichtung nächstgelegenen Zahnreihe. In Variante F2 wird die Düse dreiecksförmig ausgeführt. Beide Varianten F1, F2 fokussieren auf den gleichen Auftreffpunkt.

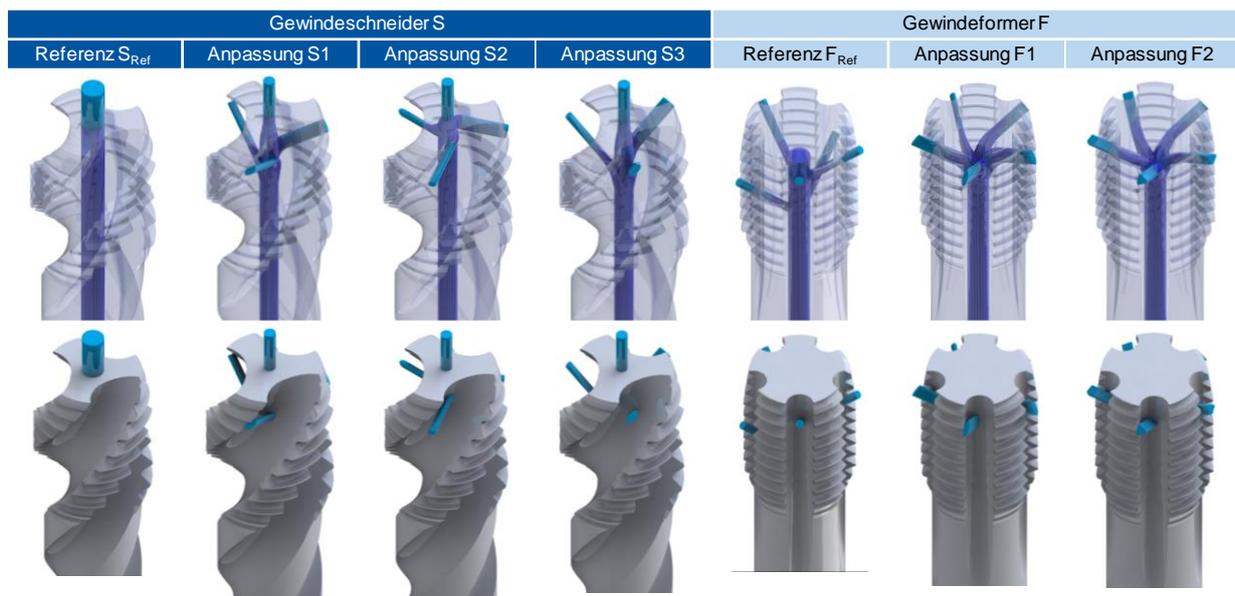


Bild 5: Übersicht aller Varianten einer angepassten KSS-Zufuhr

Auf Basis der zerspantechnologischen Untersuchungen mit additiv gefertigten Gewindewerkzeugen mit angepasster KSS-Zufuhr kann festgehalten werden, dass zwar Potenziale aufgezeigt werden konnten, es für eine optimale Nutzung der Vorteile der LPBF-Fertigung aber weiterer numerischer wie auch experimenteller Analysen bedarf. Die spanende Nachbearbeitung der AM-Rohling konnte nicht prozesssicher wiederholbar umgesetzt werden. Für eine Industrialisierung bedarf es durchgängiger Spann- und Referenzierungselemente, die auch mit bestehender Maschinenteknik integriert werden können. Zur Fertigung von Grundlochgewinden erscheint das Potenzial einer angepassten KSS-Zufuhr mit radial in der Spannute austretendem KSS begrenzt. Der KSS wirkt dem Spanablauf entgegen und kann kontraproduktiv wirken und Spanklemmer begünstigen. Für das Gewindeformen von Durchgangsgewinden ermöglicht die geometrische Gestaltungsfreiheit des LPBF-Verfahrens die Fertigung von Kanal- und Düsenstrukturen mit positiver Wirkung. Durch die Anpassung der radialen KSS-Düsen in der Spannute kann die Umformzone homogener und fokussierter benetzt werden und der Werkzeugverschleiß so reduziert werden. Für eine abschließende Beurteilung bedarf es weiterer Untersuchungen, insbesondere Langzeittests. Eine direkte Korrelation zwischen Werkzeugverschleiß und CFD-Simulation konnte auf Basis der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse nur begrenzt festgestellt werden.

In **AP4** stand die CFD-Simulation im Vordergrund. Ziel war die numerische Analyse der Strömungsbedingungen zur Auslegung und Bewertung der KSS-Zufuhr. Dazu wurden einerseits die Kanalströmungen, andererseits die Ausbreitung des KSS-Freistrahls im Gewinde untersucht. Beispielhafte Ergebnisse sind für das Schneidwerkzeug in Bild 6 dargestellt. Variante S2 zeigt die höchsten Geschwindigkeiten am axialen Düsenauslass. Die Strömungsbedingungen für S1 und S3 erscheinen vergleichbar sowohl innerhalb des Kanals als auch innerhalb der Spannkammer. Die Fluidgeschwindigkeit innerhalb der Spannkammer ist im Vergleich zum Kanalinneren gering. Am radialen Auslass ist für Variante S1 der Auftreffpunkt auf der Spanfläche innerhalb der Spannute unter Rotationseinfluss deutlich zu erkennen.

Variante S3 lässt unter Berücksichtigung des ablaufenden Spans eine verminderte Schneidkantenbenetzung ggü. Variante S1 erwarten.

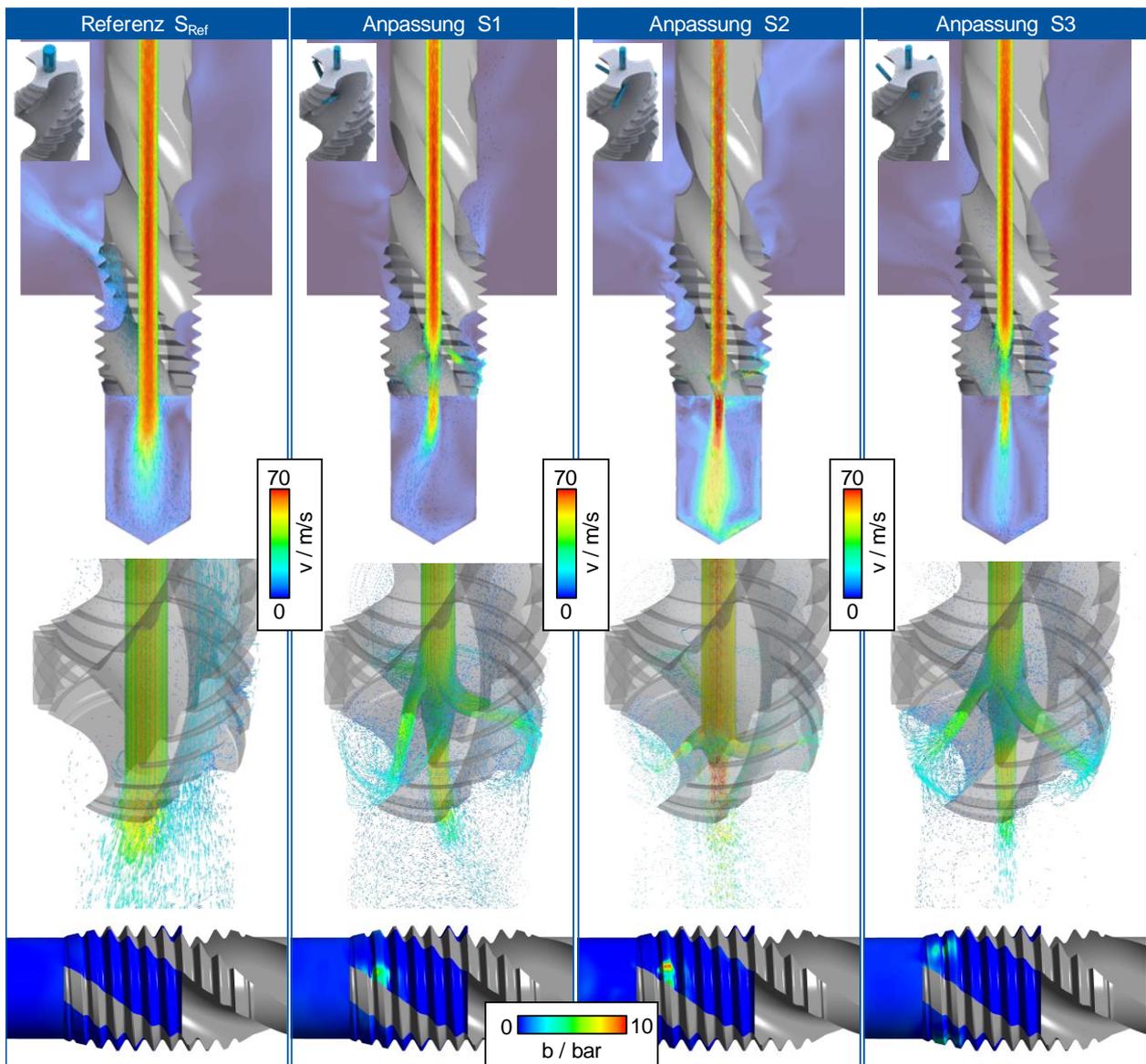


Bild 6: Gewindeschneider - Strömungsgeschwindigkeit und Druckverteilung

In **AP5** und **AP6** stand die Analyse des ökonomisch-ökologischen Potenzials additiv gefertigter Gewindewerkzeuge aus HSS im Fokus. Zur Bewertung der Werkzeugfertigung wurde im ersten Schritt die Prozesskette der Fertigung aufgestellt, um die Einzeleinflussgrößen sichtbar zu machen. Darauf aufbauend wurden Fertigungszeiten und -aufwände abgeschätzt und der Energiebedarf je gefertigtem Werkzeug berechnet. Für die Analyse wurden entsprechend vier Szenarien untersucht. Neben dem konventionellen wurde drei additiv gefertigte Werkzeuge definiert. Der prozesssicher gefertigte Rohling aus AP3 war ein Rundstab mit den intern eingebrachten Strukturen, der anschließend spanend weich- und hartbearbeitet wird. Daneben wurde ein endkonturnah additiv gefertigtes Werkzeug in die Betrachtung mit aufgenommen, welches mit Aufmaß von 0,5 mm an Schneiden und Nut versehen ist. Im vierten Szenario wurde ein hybrider Aufbau angenommen, bei dem lediglich der geometrisch komplexe Teil des Werkzeugs im Bereich der Helix und der ggf. radial austretenden Kühlkanäle auf einem PM-Rohling aufgebaut wird. Neben

den Werkzeug-Szenarien wurden im Rahmen der LPBF-Fertigung unterschiedliche Fertigungsvarianten betrachtet, die einer Manufaktur- und einer Serienfertigung entsprechend. Beispielhaft ist die Kostenberechnung in Bild 7 dargestellt.

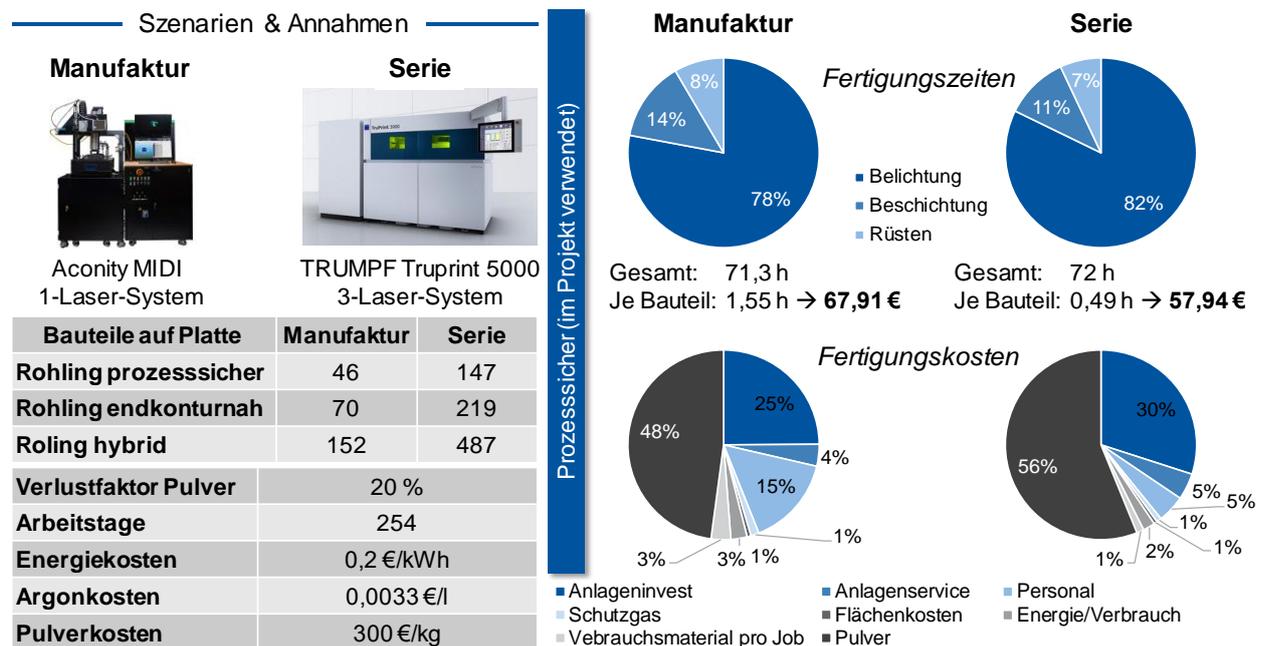


Bild 7: LPBF-Szenarien und ökonomische Bewertung (beispielhaft für Werkzeug-Szenario „Additiv prozesssicher“)

Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt AddBo stand die Entwicklung der additiven Fertigung, speziell des LPBF-Verfahrens, für Gewindewerkzeuge aus Schnellarbeitsstahl (HSS) mit angepasster KSS-Zufuhr im Fokus. Im AP1 wurde der LPBF-Prozess für den Schnellarbeitsstahl ASP2030 (HS6-5-3-8) qualifiziert. Auf Basis der Parameterstudien konnten riss- und porenfreie Proben einfacher Geometrien aufgebaut werden. Auch die Fertigung innenliegender Kanalstrukturen wurde erfolgreich etabliert. Durch eine anschließende Wärmebehandlung konnten die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden. Auf Basis der Erkenntnisse war in AP2 die Fertigung erster Schneidkeilgeometrien sowie Fluid-Testkörper möglich. Die LPBF-gefertigten Einstechplatten hielten im orthogonalen Schnitt bei Zerspanung unterschiedlichster, teils schwer zerspanbarer Werkstoffe, den thermo-mechanischen Belastungen stand. Die fluidmechanische Untersuchung unterschiedlicher Kanal- und Düsengeometrien hinsichtlich der auftretenden Strömungsverluste und der Freistrahlarbeit ermöglichte die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Gestaltung der KSS-Zufuhr am Realwerkzeug. Durch die geometrische Gestaltungsfreiheit konnten die Druckverluste deutlich gesenkt und der Freistrahlfokussierter und damit energetischer geformt werden. Die entwickelten Gestaltungsrichtlinien wurden in AP3 zur Auslegung einer angepassten KSS-Zufuhr in M10 Gewindeschneid- und Gewindeformwerkzeugen genutzt. Im ersten Schritt wurde die Eignung des LPBF-verarbeiteten Schneidstoffs im Vergleich zu konventionell PM-verarbeiteten Werkzeugen der gleichen Legierung validiert. Im Gewindeschneiden

(Grundlochgewinde) und Gewindeformen (Durchgangsgewinde) von 42CrMo4+QT und X5CrNi18-10 waren keine eindeutigen Unterschiede zwischen den beiden Herstellungsrouten erkennbar. Im zweiten Schritt wurden KSS-Zufuhrvarianten abgeleitet, konstruiert und additiv gefertigt, die eine verbesserte Schneidenbenetzung versprechen. Die experimentelle Untersuchung zeigte Vor- und Nachteile einer angepassten radialen Zufuhr auf. Im Gewindeschneiden von Grundlochgewinden konnte festgestellt werden, dass ein radialer Kanalaustritt in der Spanablaufnut kontraproduktiv wirken und zu Spanklemmen führen kann. Demgegenüber zeigte die geometrische Anpassung der Austrittsdüsen in den Schmiernuten des Formwerkzeugs bei Fertigung von Durchgangsgewinden eine Reduktion des Werkzeugsverschleißes. Für eine abschließende Bewertung sind weitere experimentelle Untersuchungen nötig. Unterstützt wurden die experimentellen Untersuchungen durch numerische Strömungssimulationen sowohl der Kanalströmung als auch der sich in der Bohrung ausbreitenden Freistahlströmung. Die CFD-Simulationen helfen, erste Aussagen über die Eignung einer digital entwickelten KSS-Zufuhr zu treffen. In einer abschließenden ökonomisch-ökologischen Bewertung wurde festgestellt, dass die LPBF-Fertigung gegenüber der konventionellen, subtraktiven Herstellungsrouten mit erhöhten Zeit- und Kostenaufwänden einhergeht. Diese können durch die Funktionalitätsverbesserungen im Werkzeugeinsatz teilweise kompensiert werden. Alternative Fertigungskonzepte wie ein endkonturnahes Rohlingsdesign, die hybride Bauweise oder eine modulare Bauweise können helfen, die Aufwände zu reduzieren und eine konkurrenzfähige Alternative zum Stand der Technik darzustellen.

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.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Tobias Kelliger unter +49 241 80-20523