

Analyse zum Verfahrenspotenzial des Flakkotierens für die Feinbearbeitung von Umformwerkzeugen

Flakkotieren von Umformwerkzeugen

P. Frank, J. Teichert, A. Oleszak

ZUSAMMENFASSUNG Die Studie untersucht das Potenzial des Hochpräzisionsbürstens (Flakkotierens) zur automatisierten Finishbearbeitung von Umformwerkzeugen. In einem ersten Schritt wurde eine Parameterstudie zur Identifizierung des Einflusses ausgewählter Prozess- und Werkzeugparameter auf die Oberflächenausbildung durchgeführt, im zweiten Schritt erfolgte die Bewertung des Substitutionspotenzials gegenüber der manuellen Politur. Das Verfahren ermöglicht vergleichbare Oberflächen bei höherer Reproduzierbarkeit und Automatisierbarkeit.

High-precision brushing of forming tools

ABSTRACT The study investigates the potential of high-precision brushing (“flakkotieren”) for automated finish machining of forming tools. In a first step, a parameter study was conducted to identify the influence of selected process and tool parameters on surface formation. In a second step, the substitution potential compared to manual polishing was evaluated. The process creates comparable surfaces with higher reproducibility and automation capability.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Feinbearbeitung, Werkzeug-/Formenbau

1 Einleitung

Die Massivumformbranche ist vor allem durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägt und stellt einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor in Deutschland dar. Vor allem die Kaltmassivumformung nimmt durch ihre präzise und ressourcenschonende Fertigung eine Schlüsselrolle ein. Werkzeuge wie Matrizen und Stempel müssen dabei extremen mechanischen Belastungen standhalten und höchsten Qualitätsanforderungen genügen. Diese Werkzeuge bestehen meist aus hochfesten Stählen oder Hartmetallen, die eine hervorragende Oberflächenqualität erfordern, um sowohl die Werkzeugstandzeit als auch die Bauteilqualität sicherzustellen. Stahl nimmt hier eine dominierende Rolle ein, da er durch seine gute Bearbeitbarkeit, gezielte Einstellung von Eigenschaften und sein umformgerechtes Verhalten überzeugt [1].

Während die formgebende Bearbeitung etwa durch HSC (High Speed Cutting)-Fräsen oder Erodieren bereits weitgehend automatisiert ist, erfolgt die abschließende Finishbearbeitung von Werkzeugen nach wie vor überwiegend manuell [1–5]. Laut Untersuchungen des EU-Projekts “Symplexity” werden rund 90 % der Veredelungsarbeiten weiterhin händisch durchgeführt [6]. Ein flächendeckend etabliertes automatisiertes Polierverfahren existiert bisher nicht. Insbesondere bei großflächigen Freiformflächen ist die manuelle Politur nach wie vor Stand der Technik, um die erforderliche Oberflächenqualität zu erzielen.

Dieser manuelle Prozess ist jedoch mit erheblichen Nachteilen verbunden: Er erfordert geschultes Fachpersonal mit langjähriger Erfahrung, ist stark zeit- und kostenintensiv und zeigt eine hohe Ergebnisvariabilität. Studien zeigen, dass bis zu 30 % der Gesamt-

kosten und etwa 50 % der Gesamtbearbeitungszeit auf das manuelle Finish entfallen [5]. Hinzu kommt, dass die Bewertung der erzielten Oberflächengüte meist visuell oder haptisch erfolgt, vor allem gestützt auf subjektive Einschätzungen und Erfahrungswerte. Eine exakte Tolerierung der Oberflächenbeschaffenheit ist in der industriellen Praxis selten gegeben, da entsprechende Messmethoden fehlen oder nicht standardisiert sind. Dies führt dazu, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse begrenzt ist und eine Integration des Prozesses in deterministische, automatisierte Fertigungsketten kaum möglich erscheint.

Vor diesem Hintergrund besteht ein erheblicher Bedarf, die Bearbeitungszeiten beim Polieren deutlich zu verkürzen und gleichzeitig eine wirtschaftlich tragfähige, automatisierte Feinbearbeitungstechnologie zu etablieren [4, 5, 7].

Ein vielversprechender, bislang jedoch unterschätzter Ansatz ist das Bürsten mit flexiblen Filamenten und gebundenem Korn. Ursprünglich vorrangig für Anwendungen wie Entgraten oder Kantenverrundung eingesetzt, bietet dieses Verfahren durch die hohe Werkzeugflexibilität und Anpassungsfähigkeit Potenziale für anspruchsvollere Anwendungen wie die Finishbearbeitung. Die Flexibilität der Filamente ermöglicht eine geometrieangepasste Bearbeitung auch komplexer Freiformflächen [8]. Ein wesentlicher Nachteil konventioneller Bürstverfahren liegt aber im Filamentverschleiß: Verkürzte Filamente verlieren an Elastizität und führen zu einem inhomogenen Bearbeitungsbild [9–11]. Darüber hinaus erfordert die Werkzeugkonditionierung zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand, um eine gleichmäßige Bearbeitung zu gewährleisten.

Mit zunehmendem Qualitätsdruck wurde das Verfahren technologisch weiterentwickelt. Das sogenannte Hochpräzisionsbürsten, auch Flakkotieren genannt, kombiniert flexible Schleifmittel mit prozesssicherer Maschinenführung und Echtzeitüberwachung [12]. Es hat sich bereits für die Nachbearbeitung von Einspritzkomponenten etabliert und erlaubt durch den Einsatz von Sensorik eine adaptive Prozessführung bei gleichzeitig hoher Bearbeitungsqualität. Entsprechende Patente dokumentieren vielfältige industrielle Anwendungsfelder, unter anderem bei der Bearbeitung von Zylinderlaufbuchsen und Innenflächen.

Im Gegensatz zur herkömmlichen manuellen Politur bietet das Flakkotieren den entscheidenden Vorteil, als deterministisches Verfahren deutlich besser automatisierbar zu sein und reproduzierbare Ergebnisse bei gleichbleibender Qualität zu liefern.

Bislang wurde das Hochpräzisionsbürsten nicht systematisch für die Finishbearbeitung von Umformwerkzeugen untersucht. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, das Anwendungspotenzial des Flakkotierens für die automatisierte Feinbearbeitung solcher Werkzeuge zu evaluieren. Im ersten Schritt wurden durch Screening-Tests die grundlegenden Einflüsse von Prozess- und Werkzeugparametern auf die erreichbare Oberflächengüte analysiert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen erfolgte im zweiten Schritt eine automatisierte Bearbeitung ausgewählter Werkstücke mit optimierten Parametern und der anschließende Vergleich mit manuell polierten Referenzflächen.

2 Verfahrensgrundlagen zum Hochpräzisionsbürsten/Flakkotieren

Das Hochpräzisionsbürsten ist eine weiterentwickelte Form des klassischen Bürstverfahrens mit gebundenen Korn. Gegenüber dem herkömmlichen Bürsten zeichnet sich das Flakkotieren vor allem durch den Einsatz spezieller Bürstwerkzeuge, verbesserte Prozessüberwachungstechniken und eine präzisere Prozesssteuerung aus. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bürsten, welche Nylonfilamente verwenden, bestehen die Filamente der Flakkotierwerkzeuge aus hochtemperaturbeständigen Kunststoffen, die Temperaturen von bis zu 260 °C widerstehen und mit abrasiven Partikeln, beispielsweise aus Siliziumkarbid, kubischem Bornitrid (cBN) oder synthetischen Diamant, durchsetzt sind [12]. Diese Filamente sind in Form von Bündeln gruppiert und sind in einem Tellerbürstwerkzeug eingegossen. Die Prozesskinematik des Flakkotierens basiert auf der Kombination aus Werkzeugrotation, Kopffrotation und Tischrotation. Darüber hinaus lässt sich der Werkzeugkopf linear in der Höhe verstellen, um die gewünschte Zustelltiefe einzustellen. Auf Seiten des Werkstücks ermöglicht die Rundtischrotation einschließlich der darauf befestigten Werkstückhalterung eine definierte Relativgeschwindigkeit zwischen den Filamenten und der Werkstückoberfläche. Die Überlagerung mehrerer Rotationsbewegungen ermöglicht eine gleichmäßige, isotrope Bearbeitung der Kanten und Oberflächen.

Neben der Nachbearbeitung von Einspritzkomponenten wird das Flakkotieren vor allem im Bereich der Kantenpräparation von Werkzeugen eingesetzt [13, 14]. Dies betrifft insbesondere Werkzeuge für die definierte Zerspanung, wie Wendeschneidplatten, Schafffräser und Wendelbohrer, aber auch vereinzelt Umformwerkzeuge wie Scher- oder Feinschneidwerkzeuge. Abhängig vom angestrebten Prozessergebnis kann das Filament gezielt angestellt werden, um das Fließverhalten zu beeinflussen und so die resultierende Form der Schneidkante zu steuern. Herstellerangaben

zufolge lassen sich auf diese Weise sowohl symmetrische als auch asymmetrische Schneidkantenprofile, wie ein Trompetenradius oder Wasserfallradius, prozesssicher erzeugen, wahlweise im Trocken- oder Nassverfahren. Um Radien im einstelligen Mikrometerbereich reproduzierbar herstellen zu können, sind präzise Kenntnisse über die tatsächliche Besatzhöhe des Werkzeugs nötig. Diese werden mithilfe einer Laservermessung der Bürstscheiben sowie eines Acoustic-Emission-Sensors gewonnen, der den exakten Zeitpunkt des Werkzeugeingriffs am Werkstück detektiert. Darauf aufbauend wird die erforderliche Zustellung bestimmt [12].

3 Parameterstudie zur Einflussanalyse

3.1 Experimentelle Methodik

Zur Bewertung des Substitutionspotenzials des Hochpräzisionsbürstens gegenüber dem manuellen Polieren wurde ein zweistufiges Versuchsprogramm durchgeführt.

In der ersten Stufe wurden gehärtete Analogiewerkstücke über eine Bearbeitungszeit von 15 Minuten mit variierenden Prozessparametern (Zustellung a_p , Spindel-Drehzahl n_1 , Drehrichtung) sowie unterschiedlichen werkzeugspezifischen Eigenschaften (Körnung K , Filamentmaterial FA , Filamentlänge FL) bearbeitet. Ziel war es, den Einfluss dieser Faktoren auf die erreichbare Oberflächenqualität und mögliche Prozessgrenzen in Form von Sättigungswerten zu quantifizieren. Hierzu wurde die Oberfläche vorab und in regelmäßigen Zeitabständen mit dem Abtastgerät "MarSurf PS 10" dokumentiert. Dank der niedrigen vertikalen Auflösung des taktilen Messsystems, das mit einer Diamantspitze mit einem Radius $r = 2 \mu\text{m}$ die Oberfläche abtastet, konnten auch die reflektierenden Oberflächen vermessen werden.

Auf Basis der so identifizierten Parametereinstellungen erfolgte in der zweiten Stufe eine gezielte Feinbearbeitung weiterer Werkstücke. Die damit erzeugten Oberflächen wurden anschließend mit manuell polierten Referenzflächen verglichen. Aufgrund der hohen Oberflächengüten erfolgte der Vergleich auf Basis von Messungen der Oberflächenausbildung mit einem hochauflösenden Weißlichtinterferometer, mit dessen Hilfe profilbasierte und flächenbasierte Kennwerte ermittelt wurden. Im Fokus stand die Frage, ob durch Flakkotieren eine gleichwertige oder gar überlegene Oberflächenqualität bei gleichzeitig höherer Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann. Im Gegensatz zum konventionellen Bürst-Polieren, wo Bürsten mit Poliersuspension eingesetzt werden, erfolgte die Bearbeitung trocken. Als Bearbeitungszeit wurde in der Untersuchung die tatsächliche Maschinenbelegungszeit herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass diese nicht der effektiven Kontaktzeit zwischen dem Tellerbürstwerkzeug und der Werkstückoberfläche entspricht. Aufgrund der gewählten Maschinenkinematik – bestehend aus einem auf einem Rundtisch fixierten Werkstück sowie einem pendelnd über den Rundtisch bewegten Werkzeugträger mit rotierendem Tellerbürstwerkzeug (**Bild 1**) – befindet sich das Werkzeug nur zeitweise im Eingriff mit dem Werkstück.

Die effektive Kontaktzeit pro Umdrehung des Rundtischs ist durch die begrenzte Überlappung zwischen Werkzeugbahn und Werkstückfläche eingeschränkt und beträgt nur etwa 11 Sekunden. Die übrige Zeit einer Umdrehung entfällt auf Leerlaufbewegungen, in denen keine Materialbearbeitung stattfindet. Daher stellen die in den Diagrammen angegebenen Bearbeitungszeiten stets die Gesamtprozesszeiten dar, während die tatsächlich wirk-

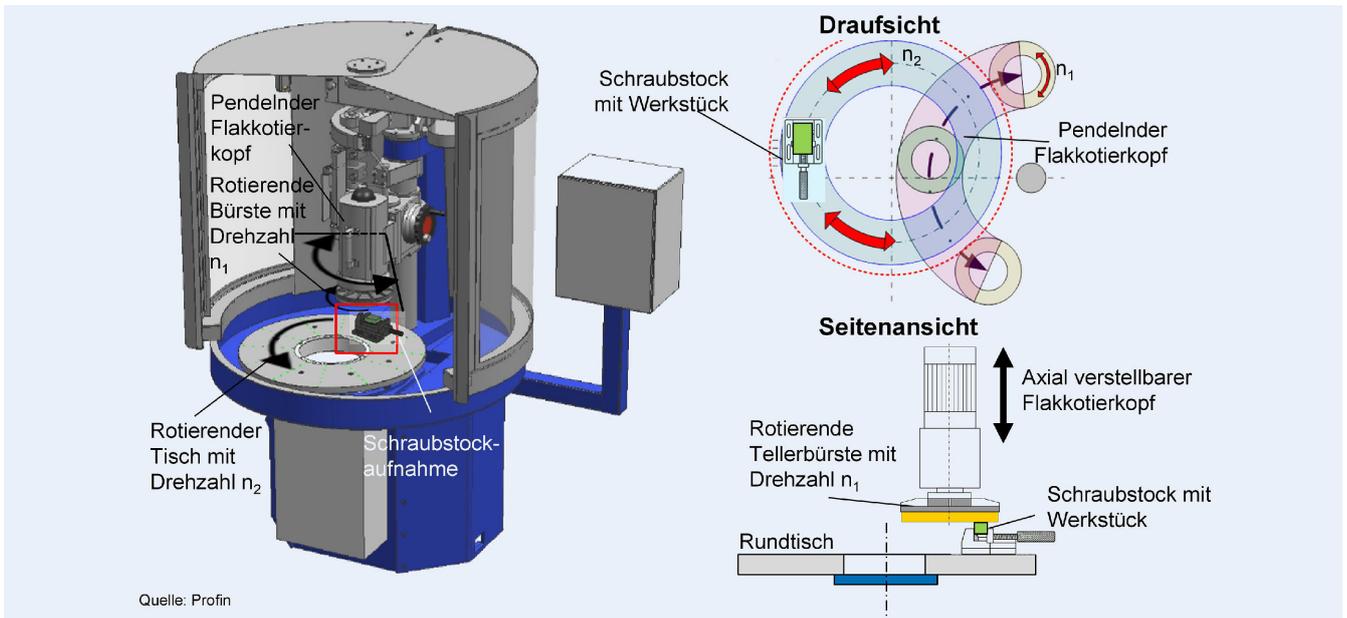


Bild 1 Flakkotieranlage HFM (Hand-Flakkotier-Maschine) und Ansichten des Versuchsaufbaus. Grafik: Profin AG / THGA

Tabelle. In der Studie eingesetzte Flakkotier-Werkzeuge.

Übersicht - Werkzeugparameter					
Werkzeug	R1272	R1273	R1273X	R1284	R1430
Körnung K	8000	4000	4000	4000	1000 / 500
Werkzeug-Ø	230 mm				
Filamentart FA	Habraflex	Habraflex	Habrelast	Habrelast	Gemischt
Anstellung	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ
Filamentlänge FL	19 mm	19 mm	19 mm	29 mm	18 mm
Bündel-Ø	8 mm				

same Kontaktzeit deutlich darunter liegt. Diese Differenz ist bei der Bewertung der Bearbeitungseffizienz sowie bei der Übertragung der Ergebnisse auf alternative Kinematiken zu berücksichtigen.

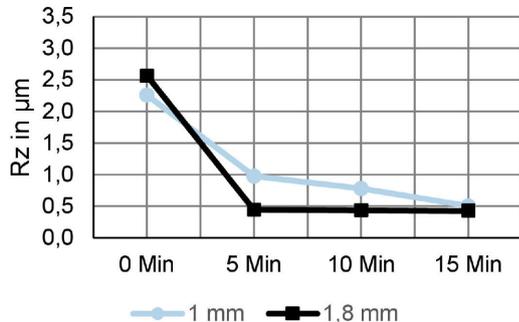
3.2 Versuchsaufbau

In der Untersuchung kommen Tellerbürstwerkzeuge mit Filamenten aus hochtemperaturbeständigen Kunststoffen zum Einsatz, in die Schleifpartikel aus synthetischen Diamant eingebettet sind. Der Materialabtrag erfolgt durch die kumulative Wirkung der im Eingriff befindlichen Schleifpartikel, die einzelne Späne aus der Werkstückoberfläche lösen. Die eingesetzten Werkzeuge unterschieden sich hinsichtlich Körnung (500, 1000, 4000, 8000) Filamentmaterial (Habrelast, Habraflex), Anstellwinkel der Bündel und Filamentlänge (19 mm, 29 mm), siehe **Tabelle**.

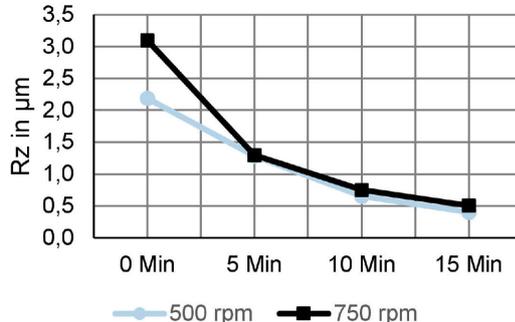
Bei dem Werkstück handelt es sich um ein Analogiewerkstück aus dem hochlegierten Kaltarbeitsstahl 1.2379 im gehärteten Zustand (60 HRC). Zur Einstellung praxisnaher Randbedingungen wurden die zu polierende Oberfläche - entsprechend einer realen Bearbeitungsfolge - im gehärteten Zustand HSC gefräst. Die Auflagefläche wurde für die Erreichung einer ausreichenden Ebenheit mittels Flachsleifen bearbeitet.

In Bild 1 ist die in den Versuchsreihen eingesetzte Flakkotieranlage zu sehen. Das Werkstück wurde für die Bearbeitung auf einem rotierenden Rundtisch in einer Spannvorrichtung, einem Maschinenschraubstock, befestigt. Die Werkzeug führende Bürstenspindel wird von einem Motor angetrieben, der die Drehzahl präzise regulieren kann. Sie ist selbst an einem Bearbeitungsarm befestigt, sodass über einen pneumatischen Antrieb das Tellerbürstwerkzeug eine pendelnde Schwenkbewegung über den Rundtisch und das darauf befindliche Werkstücke ausführen kann. Zusätzlich ist die Bürstenspindel mit einem pneumatisch-

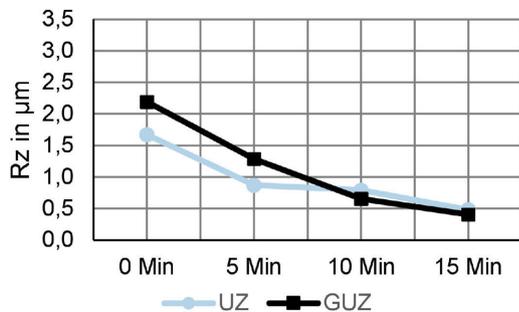
a) Einfluss der Zustellung auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



b) Einfluss der Drehzahl auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



c) Einfluss der Drehrichtung auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



Konstante Versuchsbedingungen

Körnung K	K4000
Filamentlänge FL	19 mm
Filamentart FA	Habraflex
Tisch-Drehzahl n ₂	1 U/min
Versuchsbedingungen in Diagrammen	
a) Oben links	GUZ / n ₁ = 500 U/min
b) Oben rechts	n ₁ = 500 U/min: GUZ/a _p = 1,1 mm n ₁ = 750 U/min: GUZ/a _p = 1,2 mm
c) Unten links	a _p = 1,1 mm / n ₁ = 500 U/min

Bild 2 a) Einfluss der Zustellung (oben links), b) der Drehzahl (oben rechts) und c) der Drehrichtung (unten links) auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz. Grafik: THGA

mechanischen Zustellmechanismus ausgestattet, sodass die Bürste mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm zum Werkstück geführt werden kann. Die Tisch-Rotation n₂ kann in 0,1-U/min-Schritten eingestellt werden.

3.3 Einfluss der Prozessparameter: Zustellung, Drehzahl und Drehrichtung

In der ersten Versuchsreihe zu den Screening Tests wurde der Einfluss der Prozessparameter Zustellung, Drehzahl und Drehrichtung auf die Oberflächenrauheit ermittelt (Bild 2).

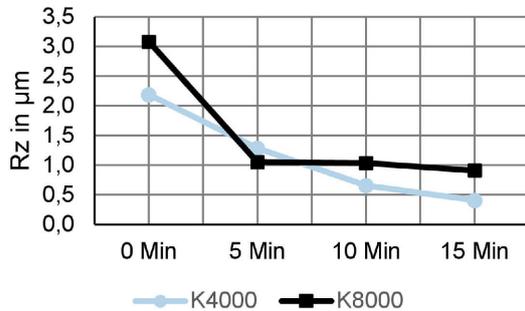
Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhe der Zustellung keinen signifikanten Einfluss auf das erreichte Endniveau der Rauheit hat. Die gemessenen Endwerte der Rautiefe lagen bei beiden Zustellgrößen in einem vergleichbaren Bereich. Dies ist insofern positiv zu bewerten, als es belegt, dass der Prozess auf einen charakteristischen Sättigungswert der Oberflächenrauheit hin arbeitet – unabhängig von der gewählten Zustellung.

Eine vergleichbare Beobachtung wurde von Sommerfeld [15] gemacht, der nachweisen konnte, dass mit zunehmender Zustellung zwar sowohl die Normalkraft F_n, gleichzeitig aber auch die Kontaktfläche A_k zwischen Schleiffilament und Werkstückoberfläche ansteigen, die flächenbezogene Normalkraft jedoch weitgehend konstant bleibt. Daraus lässt sich schließen, dass der auf die Oberfläche wirkende Druck und somit auch der resultierende Materialabtrag pro Flächeneinheit weitgehend konstant bleiben. Eine Annahme, die durch die in dieser Arbeit beobachtete konstante Endrauheit gestützt wird. Allerdings variiert der zeitliche

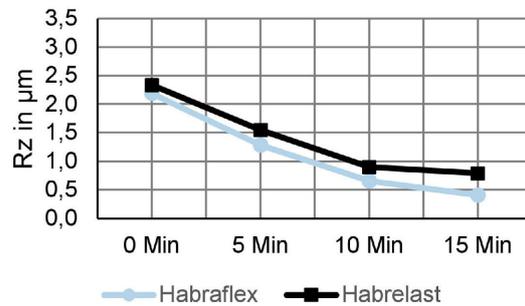
Verlauf bis zur Erreichung dieses Sättigungswertes in Abhängigkeit von der Zustellung: Höhere Zustellwerte führten zu einer schnelleren Annäherung an das Endbearbeitungsergebnis. Diese Erkenntnis ist insbesondere für Anwendungen mit geometrisch komplexen Werkzeugoberflächen von hoher Relevanz. So kann beispielsweise bei Fließpressstempeln mit variierenden Kavitätstiefen, und somit lokal unterschiedlichen Zustellungen dennoch ein einheitliches Oberflächenfinish erzielt werden.

In einem weiteren Versuch wurde der Einfluss der Drehzahl auf die zeitliche Entwicklung der Oberflächenrauheit während der Finishbearbeitung untersucht. Dazu wurde der Prozess bei zwei verschiedenen Drehzahlen (500 min⁻¹ und 750 min⁻¹) durchgeführt. Die Analyse der Messdaten ergab, dass sich der Verlauf der Rauheitswerte (Rz) über die Bearbeitungszeit hinweg bei beiden Drehzahlen weitgehend vergleichbar entwickelte. In beiden Fällen konnte eine deutliche Reduzierung der Rauheit beobachtet werden, wobei die Endwerte der Rauheit nahezu identisch waren. Jedoch zeigte sich, dass bei erhöhter Drehzahl eine schnellere Abnahme der Rauheitswerte in der initialen Bearbeitungsphase auftrat. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass mit steigender Drehzahl die Kontaktfrequenz zwischen den abrasiv wirkenden Filamenten des Werkzeugs und der Werkstückoberfläche zunimmt. Dadurch erhöht sich die Materialabtragsrate, was wiederum zu einer früheren Annäherung an den Sättigungswert der Oberflächenrauheit führt. Zum anderen führt die erhöhte Geschwindigkeit zu einem höheren Impuls des Filamentes, was ebenfalls zu einem schnelleren Abtrag führen kann. Trotz des beschleunigten Verlaufs beeinflusst die Drehzahl das erreichbare

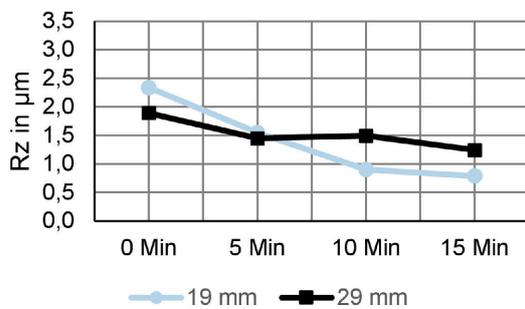
a) Einfluss der Körnung auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



b) Einfluss der Filamentart auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



c) Einfluss der Filamentlänge auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz



Konstante Versuchsbedingungen

Zustellung a_p	1,1 mm
Bürsten-Drehzahl n_1	500 U/min
Tisch-Drehzahl n_2	1 U/min
Drehrichtung Bürste	GUZ

Versuchsbedingungen in Diagrammen

a) Oben links	FL = 19 mm / FA = Habraflex
b) Oben rechts	FL = 19 mm / K4000
c) Unten links	K4000 / FA = Habraflex

Bild 3 a) Einfluss der Körnung (oben links), b) der Filamentart (oben rechts) und c) Filamentlänge (unten rechts) auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz. Grafik: THGA

Endniveau der Rautiefe jedoch nicht signifikant, siehe Bild 2, rechts oben. Zu beachten ist, dass der Versuch mit der Drehzahl von $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ mit einer um 0,1 mm geringeren Zustellung durchgeführt wurde.

In den Parameterstudien wurde zudem der Einfluss der Drehrichtung (GUZ: gegen Uhrzeigersinn versus UZ: Uhrzeigersinn) auf die zeitliche Entwicklung der gemittelten Rautiefe Rz untersucht. Bei der Bearbeitung im GUZ waren die Filamente negativ zur Drehrichtung angestellt, was eine geneigte Angriffslage und eine aggressivere Bearbeitung zur Folge hatte, sodass im Verlauf der ersten 5 Minuten im GUZ eine schnellere Einebnung der Oberfläche erreicht wurde. Ab etwa 10 Minuten Bearbeitungszeit nähern sich die Resultate beider Drehrichtungen an, sodass gegen Ende der Bearbeitungszeit eine vergleichbare Endrautiefe erzielt wird. Dies lässt darauf schließen, dass die Drehrichtung vor allem in der initialen Bearbeitungsphase eine signifikante Rolle spielt, während ihr Einfluss bei längerer Bearbeitungszeit abnimmt.

3.4 Einfluss der Werkzeugparameter: Körnung, Filamentart und Filamentlänge

In der anschließenden Versuchsreihe zu den Screening Tests wurde der Einfluss ausgewählter Werkzeug-Spezifikationen auf die zeitliche Entwicklung der Oberflächenrauheit untersucht (Bild 3).

Dabei wurde zunächst die Körnung der abrasiven Filamente zwischen 4000 und 8000 Mesh variiert, während alle anderen Prozessparameter konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse zei-

gen, dass mit beiden Körnungen zunächst eine deutliche Abnahme der Rauheit erreicht wurde. Im weiteren Verlauf verliefen die Rauheitskurven aber divergierend auf unterschiedliche Endwerte hinaus. Mit der größeren Körnung von 4000 Mesh konnten insgesamt geringere Rz-Werte erzielt werden als mit der feineren Körnung von 8000 Mesh. Dieser Befund lässt sich dadurch erklären, dass die feinere Körnung aufgrund ihrer geringeren abrasiven Wirkung innerhalb der gegebenen Bearbeitungszeit nicht in der Lage war, tiefer liegende Riefen und Mikroschliffeffekte vollständig zu egalisieren. Dagegen erlaubte die gröbere Körnung einen effektiveren Materialabtrag in diesen Bereichen und somit eine wirksamere Einebnung der Oberfläche.

Dieser Zusammenhang wurde auch durch mikroskopische Analysen gestützt: Die mit 8000 Mesh bearbeiteten Oberflächen wiesen im Vergleich zur 4000-Mesh-Bearbeitung deutlichere Reststrukturen auf, vor allem in Form ungleichmäßig geglätteter Riefen. Aus den Erkenntnissen dieser Untersuchung lässt sich ableiten, dass eine prozessoptimierte Vorgehensweise darin bestehen könnte, den Bearbeitungsprozess in zwei oder mehr Stufen zu unterteilen: Zunächst sollte mit einer gröberen Körnung gearbeitet werden, um makroskopische Unebenheiten effizient zu reduzieren. In einem anschließenden Feinbearbeitungsschritt mit einer höheren Körnung kann dann das finale Oberflächenfinish erzielt werden. Dieses sequenzielle Vorgehen erlaubt eine gezielte Kombination aus Materialabtrag und Oberflächenglättung und stellt eine sinnvolle Strategie für die reproduzierbare Erzeugung hochwertiger Oberflächen dar.

Anschließend wurde der Einfluss unterschiedlicher Filamentmaterialien auf das Bearbeitungsergebnis untersucht. Verglichen wurden zwei Varianten: Habrelast und Habraflex. Die Analyse der Rauheitswerte zeigte, dass mit Habraflex geringfügig bessere Endwerte der gemittelten Rautiefe R_z erzielt werden konnten als mit Habrelast. Dieser Unterschied lässt sich auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Filamente zurückführen: Habrelast weist ein signifikant höheres Elastizitätsmodul auf als Habraflex, was zu einer höheren Steifigkeit der Filamente führt. Die resultierende reduzierte Anpassungsfähigkeit an die Mikrostruktur der Werkstückoberfläche kann dazu führen, dass tiefer liegende Riefen nicht in gleichem Maße geglättet werden wie bei dem flexibleren Habraflex-Material. Diese Erkenntnisse erlauben eine gezielte Auswahl des Filamenttyps in Abhängigkeit vom gewünschten Oberflächenprofil: Während Habraflex vorteilhaft für die gleichmäßige Einebnung auch tieferer Riefenstrukturen ist, kann Habrelast gezielt zur Reduktion der Rauheitsspitzen eingesetzt werden. Aufgrund seiner höheren Steifigkeit dringt das Filament weniger tief in vorhandene Vertiefungen ein und trägt bevorzugt die Oberflächenhöhen ab. Damit eignet sich Habrelast besonders für Anwendungen, bei denen plateauartige Strukturen mit tragfähigen Oberflächenanteilen und definierten Talstrukturen angestrebt werden, beispielsweise bei Zylinderlaufflächen oder tribologisch belasteten Funktionsflächen.

Darüber hinaus konnte eine deutliche Abhängigkeit der Endrauhheit von der Filamentlänge festgestellt werden: Kürzere Filamente führten zu einer stärkeren Rauheitsreduktion. Ursache ist die erhöhte Biegefedersteifigkeit, die eine intensivere mechanische Wechselwirkung mit der Werkstückoberfläche bewirkt. Die Länge von 29 mm war im Versuchsprogramm ausschließlich für das Filamentmaterial Habrelast verfügbar. Entsprechend beziehen sich die in Bild 3 (links unten) dargestellten Ergebnisse ausschließlich auf dieses Filamentmaterial.

3.5 Bewertung des Verfahrenspotenzials durch Vergleich mit Referenzfläche

Um das Potenzial des Hochpräzisionsbürstens zur Substitution der manuellen Finishbearbeitung zu bewerten, wurden auf Basis der vorangegangenen Parameterstudie gezielt Prozess- und Werkzeugparameter gewählt, mit denen sich Oberflächen mit möglichst geringer Rauheit erzeugen lassen. Ziel ist es, das Verfahren systematisch auf Reproduzierbarkeit, Effizienz und erreichbare Oberflächenqualität zu analysieren.

In der industriellen Praxis fehlt für die Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit häufig eine exakte Tolerierung. Technische Zeichnungen enthalten in vielen Fällen keine präzisen Vorgaben zur Oberflächengüte, da diese messtechnisch nur eingeschränkt erfassbar ist. Stattdessen erfolgt die Beurteilung meist visuell durch erfahrene Fachkräfte, sofern die geometrischen Toleranzen eingehalten wurden. Diese Vorgehensweise ist jedoch subjektiv, nicht normbasiert und nur begrenzt reproduzierbar. Eine konsistente Reproduzierbarkeit oder gar Integration in automatisierte Prozessketten ist damit kaum möglich.

Zur Herstellung einer objektiven Vergleichsgrundlage wurde in dieser Studie ein mittels HSC-Fräsen gefertigtes Analogiewerkstück zunächst manuell poliert. Ziel war es, eine Oberflächengüte zu erzielen, die im regulären Produktionsbetrieb als funktionsgerecht akzeptiert wird. Die Analyse der resultierenden Oberfläche erfolgte ergänzend zur visuellen Bewertung mittels hochauflösen-

der Weißlichtinterferometrie. Dabei wurden sowohl klassische Rauheitskennwerte wie die arithmetische Mittenrauheit (R_a) und die gemittelte Rautiefe (R_z) als auch funktionale Parameter der Materialtraganteilkurve (R_k , R_{pk} , R_{vk}) erfasst. Diese Kennwerte bildeten die Grundlage für den strukturierten Vergleich mit den durch Flakkotieren erzeugten Oberflächen.

Dazu erfolgte im zweiten Schritt eine automatisierte Bearbeitung von zwei ebenfalls mittels HSC-Fräsen hergestellten Analogiewerkstücken, wobei eine abgestufte Werkzeugfolge eingesetzt wurde. Zur initialen Einebnung fräsbedingter Riefenstrukturen kam ein Kombinationswerkzeug zum Einsatz, das im äußeren Bereich mit einer Körnung von 1000 Mesh und im inneren Bereich mit 500 Mesh ausgestattet war. Anschließend folgte eine Zwischenbearbeitung mit einem Werkzeug der Körnung 4000 Mesh. Die abschließende Feinbearbeitung zur Erzeugung einer hochglänzenden, plateauförmigen Oberfläche erfolgte mit einer Körnung von 8000 Mesh. Zur Bewertung der Bearbeitungszeit auf die Oberflächenausbildung wurden zwei Varianten betrachtet:

- Kurzvariante: 15 Minuten Gesamtzeit (5 Minuten je Werkzeug)
- Langvariante: 45 Minuten Gesamtzeit (15 Minuten je Werkzeug)

Dabei handelte es sich jeweils um Maschinenbelegungszeiten. Aufgrund der gewählten Kinematik lag die effektive Werkzeug-Werkstück-Kontaktzeit nur bei 2,75 Minuten (Kurzvariante) beziehungsweise 8,25 Minuten (Langvariante). Die Ergebnisse zur Oberflächenrauheit in Bild 4 zeigen deutliche Unterschiede in der Oberflächenausbildung in Abhängigkeit von der Bearbeitungsdauer.

Mit zunehmender Prozesszeit verbesserten sich die Rauheitskennwerte signifikant, besonders im Hinblick auf die Reduktion von Rauheitsspitzen und die generelle Glättung der Oberfläche. Sowohl der Mittenrauwert R_a als auch die maximale Rautiefe R_z nahmen mit verlängerter Bearbeitungsdauer deutlich ab und erreichten schließlich ein Niveau, das mit dem der manuell polierten Referenz vergleichbar ist. Besonders der Parameter R_{pk} , der die verbleibenden Rauheitsspitzen beschreibt, konnte durch verlängertes Flakkotieren erheblich reduziert werden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch eine angepasste Bearbeitungsstrategie mit Flakkotierwerkzeugen eine Oberflächenqualität erzielt werden kann, die der manuellen Politur entspricht.

Bild 4 zeigt zudem Ausschnitte der flakkotierten (45 Minuten Bearbeitungszeit) und der manuell polierten Oberflächen im Bereich von sich kreuzenden Fräsbahnen. Der Vergleich verdeutlicht hinsichtlich der Homogenität die Vorteile des Flakkotierens: Die flakkotierte Oberfläche aus dem Langzeitversuch erscheint großflächig gleichmäßig bearbeitet und frei von makroskopisch erkennbaren Defekten. Charakteristisch sind weiche, fließende Übergänge zwischen den ehemaligen Frässpuren, was auf ein gleichförmiges, deterministisches Wirkverhalten des Werkzeugs hinweist. Die manuell polierte Oberfläche wirkt dagegen unregelmäßiger und weist ausgeprägte topografische Abweichungen auf. Auffällig sind zudem punktuelle Vertiefungen und Einschlüsse, die auf Rückstände von Poliermitteln oder inkonsistente Bearbeitungsmuster zurückzuführen sind.

Zur quantitativen Bewertung der lokalen Oberflächenstruktur wurde die Anzahl der Spitzen pro Flächeneinheit Sp_d erfasst. Für die flakkotierte Oberfläche ergab sich ein durchschnittlicher Sp_d -Wert von 1958 Spitzen/mm², während die manuell polierte Fläche mit durchschnittlich 3840 Spitzen/mm² nahezu die dop-

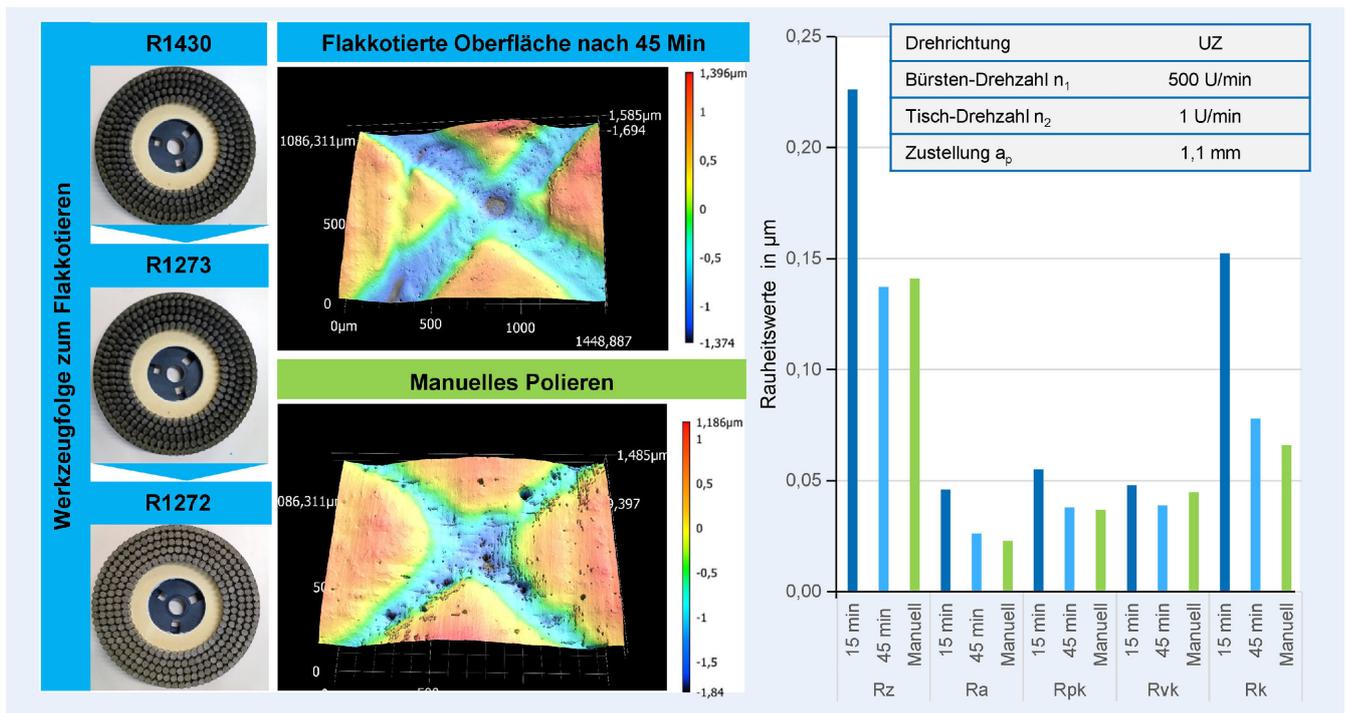


Bild 4 Vergleich Flakkotieren versus manuelles Polieren. Grafik: THGA

pelte Spitzendichte aufwies. Eine geringere Spitzendichte ist aus tribologischer und funktionaler Sicht vorteilhaft, insbesondere für einen möglichen, folgenden Beschichtungsprozess.

4 Fazit

Die vorliegende Untersuchung belegt, dass das Hochpräzisionsbürsten (Flakkotieren) grundsätzlich in der Lage ist, Oberflächenqualitäten zu erzeugen, die mit denen der manuellen Politur vergleichbar sind. Durch gezielte Auswahl und Kombination geeigneter Werkzeug- und Prozessparameter konnten sowohl klassische Rauheitskennwerte (R_a , R_z) als auch für das tribologische Verhalten relevante Parameter (R_{pk} , R_{vk} , R_k) in einem Bereich erreicht werden, der üblicherweise nur durch erfahrene Fachkräfte im Rahmen manueller Finishbearbeitung realisiert wird. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass:

- höhere Zustellwerte zu schnellerem Abtrag führen, das Endniveau der Rauheit jedoch nicht beeinflussen,
- höhere Drehzahlen eine beschleunigte Glättung bewirken, ohne das Endniveau zu verändern,
- gegenläufige Drehrichtung (GUZ) in der Anfangsphase aggressiver wirkt,
- kürzere Filamente intensiveren Materialabtrag ermöglichen,
- flexible Filamente (Habreflex) glattere Oberflächen erzeugen als steifere (Habrelast),
- grobe Körnungen (K4000) eine bessere Einebnung erzielen als feine (K8000) innerhalb der vorgegebenen Bearbeitungszeit.

Insbesondere die hohe Strukturhomogenität und die reduzierte Defektdichte der flakkotierten Oberflächen sprechen für ein deterministisches Wirkprinzip, das sich unabhängig von der Bedienerqualifikation zuverlässig in industrielle Fertigungsketten integrieren lässt. Die beobachtete Reduktion der Spitzendichte (Spd) deutet zudem auf eine tribologisch günstige Oberflächen-

ausbildung hin, die sich positiv auf Folgeprozesse wie Beschichtungen oder auf die Standzeit von Werkzeugen auswirken kann.

Mit Blick auf zukünftige Anwendungen eröffnet das Verfahren insbesondere im Bereich der automatisierten Finishbearbeitung konturierter Formeinsätze ein hohes Potenzial zur Substitution manueller Polierprozesse. In weiterführenden Arbeiten sollen die gewonnenen Erkenntnisse gezielt auf realgeometrische Werkzeugkonturen übertragen werden. Ziel ist es, die Übertragbarkeit des Verfahrens auf konturierte Formwerkzeuge zu evaluieren und diese möglichst automatisiert bearbeiten zu können. Besonders vielversprechend ist in diesem Zusammenhang die beobachtete Tendenz zur Endrauhheits-Sättigung, die auf das geometrieadaptive Verhalten der Filamente zurückzuführen ist. Diese Eigenschaft erlaubt es, lokale Rauheitsunterschiede, etwa infolge variierender Kavitätstiefen, gezielt auszugleichen. Die weitgehende Unabhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses von der Zustellung legt nahe, dass auch bei komplexen Oberflächentopografien eine gleichmäßige Finishqualität erreichbar ist. Außerdem sollte in künftigen Untersuchungen geprüft werden, inwieweit sich das Verfahren auf andere Werkstoffe mit abweichenden Härten und tribologischen Eigenschaften übertragen lässt, um sein Einsatzspektrum über gehärtete Werkzeugstähle hinaus zu erweitern.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der esw Group für die Bereitstellung der Analogiewerkstücke, auf deren Basis die vorliegenden Ergebnisse erarbeitet wurden.

L I T E R A T U R

- [1] Dambon, O.: Das Polieren von Stahl für den Werkzeug- und Formenbau. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2005
- [2] Klocke, F.; Dambon, O.; Behrens, B.: Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels. *Production Engineering: Research Development* 5 (2011), pp. 475–483, doi.org/10.1007/s11740-011-0301-6
- [3] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 2. Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*. Berlin: Springer 2017
- [4] Zelinko, A.: *Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, TU Dortmund, 2022
- [5] Rosemann, B.; Schleicher, A.: Automatisierung der Oberflächenfeinbearbeitung auf CNC-Bearbeitungszentren – Strategieableitung zur Verringerung manueller Nacharbeit. In: Hoffmeister, H.-W.; Dekena, B. (Hrsg.): *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan Verlag 2020, S. 256–270
- [6] European Commission: *Symbiotic Human-Robot Solutions for Complex Surface Finishing Operations*: Stand: 2022. Internet: cordis.europa.eu/project/id/637080 . Zugriff am 05.09.2025
- [7] Altan, T.; Lilly, B.; Yen, Y.C.: *Manufacturing of Dies and Molds*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 50 (2001) 2, pp. 405–423
- [8] Przyklenk, K.: Bestimmen des Bürstenverhaltens anhand einer Einzelborste. *IPA-IAO – Forschung und Praxis* 87. Heidelberg: Springer-Verlag 1985, doi.org/10.1007/978-3-642-82628-3
- [9] Overholser, R. W.; Stango, R. J.; Fournelle, R. A.: Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2002) 2, pp. 193–202
- [10] Rentschler, J.; Muckenfuß, G.: Neue Anwendungsmöglichkeiten durch hochtemperaturbeständige Schleiffilamente in der Oberflächenbearbeitung. In: Hoffmeister, H.-W.; Dekena, B. (Hrsg.): *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan Verlag 2013, S. 387–403. Internet: FH21– Nachhaltige Forschung an Fachhochschulen in NRW
- [11] Stango, R.J.: Filamentary brushing tools for surface finishing applications. *Metal Finishing* 100 (2002) Supplement 1, pp. 82–91
- [12] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. Berlin: Springer 2018
- [13] Frank, P.; Otto, A.: Flakkotieren von Fräsern zum Mikro-Hartfräsen. *wt Werkstatttechnik online* 109 (2019) 11/12, S. 833–839. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [14] Frank, P.; Otto, A.: Stumpf ist das neue Scharf! Neue Technik zur Ver rundung von Arbeitsmitteln verbessert die Zerspanungstechnik. *fh21 – Nachhaltige Forschung an Fachhochschulen in NRW* 09 (2016), S. 7, Internet: expydoc.com/download/10796100. Zugriff am 05.09.2025
- [15] Sommerfeld, C.: *Modellbasierte Prozessvorhersagen für das Bürstspanen mit gebundenen Schleifmittel*. Dissertation, TU Berlin, 2022

Prof. Dr.-Ing. Peter Frank
peter.frank@thga.de

Arne Oleszak, B.Eng.
arne.oleszak@thga.de

Jonas Teichert
Technische Hochschule Georg Agricola
Staatlich anerkannte Hochschule der DMT-Gesellschaft
für Lehre und Bildung (DMT-LB)
Herner Str. 45, 44787 Bochum
www.thga.de

L I Z E N Z



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