

## Innovatives Glattdrück-Werkzeugsystem zur Hochpräzisions-Nachbearbeitung in Fräsmaschinen

# Steigerung der Effizienz von Glattdrückprozessen

E. Uhlmann, M. Polte, T. Hocke, M. Wendt

**ZUSAMMENFASSUNG** Das Glattdrücken als Nachbearbeitungsverfahren ist aufgrund seiner vergleichbar hohen Prozessgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen erzeugbaren Oberflächengüten im Vergleich zur konventionellen Fräsbearbeitung industriell von großem Interesse. Dennoch werden die erreichbaren Oberflächengüten durch auftretende Prozesskraftschwankungen während des Prozesses limitiert. Ein neuartiges und innovatives Glattdrück-Werkzeugsystem mit integrierter Messensorik soll diese Einflüsse deutlich reduzieren und gesteigerte Oberflächengüten erzeugen. Im Rahmen dieses Beitrages werden umfassende Ergebnisse zur Messsensitivität des Glattdrück-Werkzeugsystems detailliert dargestellt.

### STICHWÖRTER

Glattdrücken, Optimierung, Nachbearbeitung

### Approaches for optimising diamond slide burnishing

**ABSTRACT** Diamond Slide Burnishing as a finishing process is of great industrial interest due to its comparably high process speeds combined with high surface roughness qualities compared to conventional milling. However, the achievable surface roughnesses are limited by process force deviations that occur during the process. A new and innovative Diamond Slide Burnishing tool system with integrated measuring sensors is designed to significantly reduce these influences and produce improved surface roughness qualities. In this article, comprehensive results on the measurement sensitivity of the Diamond Slide Burnishing tool system are presented in detail.

## 1 Einleitung

Die Fertigungsindustrie im Werkzeug- und Formenbau sieht sich mit ständig steigenden Anforderungen an Qualität und Präzision bei der Herstellung optisch funktionaler Oberflächen von Stahlwerkstoffen konfrontiert. Insbesondere der kontinuierliche Anstieg der industriell geforderten Formgenauigkeiten  $G_F$  sowie die Oberflächenrauheitskennwerte stellen eine stetig wachsende Herausforderung dar. Zugleich sind einer wirtschaftlicheren und nachhaltigeren Produktion mit den derzeit eingesetzten Fertigungsverfahren Grenzen gesetzt. Die Verbesserung der herstellbaren Funktionsmerkmale von Werkzeugformen sowie die Senkung der Produktionskosten  $K_P$  zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit werden dabei von der Industrie fokussiert. Um dieses Ziel zu erreichen, werden neue Produktionswerkzeuge, -technologien und -prozessketten benötigt, um Werkzeugformen hochpräzise herzustellen.

Zur Erhöhung der Formgenauigkeiten  $G_F$  sowie zur Reduzierung der Oberflächenrauheitskennwerte der gefertigten Bauteile werden nach dem heutigen Stand der Technik konventionell spanende und abtragende Verfahren eingesetzt [1]. Diese Prozesse sind jedoch verfahrensbedingt durch eine eingeschränkte Flexibilität, hohe Investitionskosten  $k_i$  sowie lange Bearbeitungszeiten  $t_B$  gekennzeichnet, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Fertigung auswirkt. Zur Produktion von Funktionsflächen in Stahlwerkzeugen wird im Umfeld der zerspanenden Fertigung vorrangig das Hochpräzisionsfräsen eingesetzt. Werden techni-

sche Oberflächen durch die Hochpräzisionsfräsbearbeitung erzeugt, bestimmen der Zahnvorschub  $f_z$ , die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und die Werkzeuggeometrie maßgeblich die erreichbaren Oberflächenrauheitskennwerte. Hieraus folgt, dass für die Bearbeitung von Werkstücken mit hohen Anforderungen an die Oberflächenrauheitskennwerte reduzierte Prozessparameter mit kleinen Zahnvorschüben  $f_z$  eingesetzt werden müssen [2]. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Bearbeitungszeiten  $t_B$  sowie des Werkzeugverschleißes und damit zu einer Limitierung der Wirtschaftlichkeit. Darüber hinaus ist zu beachten, dass selbst bei der Reduzierung der Prozessparameter die Fräsbearbeitung in der Hochpräzisionszerspanung auf Oberflächenrauheitskennwerte von  $R_a \geq 0,05 \mu\text{m}$  begrenzt ist.

Das Glattdrücken mit superharten Werkstoffen stellt dabei eine effiziente Technologie zur Überwindung der beschriebenen Herausforderungen dar. Bei diesem Fertigungsverfahren handelt es sich um ein Nachbearbeitungsverfahren, welches nach DIN 85835 [3] als Druckumformprozess definiert ist.

Um den Umformprozess zu realisieren, ist das präzise Aufbringen einer vordefinierten Prozesskraft  $F_{Pr}$  notwendig [4]. Dies wird durch den Einsatz eines Glattdrückkopfes erreicht, welcher aus einem monokristallinen Diamanten gefertigt ist und translatorisch auf der Bauteiloberfläche bewegt wird. Das Glattdrücken als Nachbearbeitungsverfahren zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten  $v_B$  während des Prozesses realisieren zu können.

Für diese Anwendung ist am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin ein dediziertes Glattdruck-Werkzeugsystem entwickelt worden, welches in der Lage ist, eine direkte Nachbearbeitung in der Fräsmaschine als nachgelagerten Prozess zu ermöglichen. Die für den Umformprozess benötigte Prozesskraft  $F_{Pr}$  wird nach dem aktuellen Stand der Technik mithilfe einer im Werkzeugsystem integrierten vorgespannten mechanischen Feder erzeugt. Diese Feder ist auf den jeweiligen erwarteten Bereich der Prozesskraft  $F_{Pr}$  abgestimmt und weist eine vordefinierte Federkonstante  $c_f$  auf [5, 6]. Vorangegangene Untersuchungen am IWF haben aufgezeigt, dass aktuelle Glattdruckwerkzeuge mit mechanischen Federn während des Nachbearbeitungsprozesses erhöhte Prozesskraftabweichungen von mindestens  $F_{Pr} \geq 20 \text{ N}$  aufweisen, wodurch die maximal erreichbaren Oberflächenrauheitskennwerte limitiert werden. Zur Kompensation dieses negativen Effekts ist von der Firma Baublies AG, Renningen, in Zusammenarbeit mit dem IWF ein neuartiges experimentelles Glattdruck-Werkzeugsystem entwickelt worden, welches in der Lage ist, die aufzubringende Prozesskraft  $F_{Pr}$  konstant zu halten und somit oberflächenabhängige Prozesskraftabweichungen  $F_{Pr,Abw}$  zu reduzieren.

## 2 Glattdruck-Werkzeugsystem im Detail

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zwischen dem konventionellen Glattdruck-Werkzeugsystem und dem innovativen, neu entwickelten Werkzeugsystem liegt in deren Funktionsprinzip zur Bereitstellung der Prozesskraft  $F_{Pr}$ . Im Gegensatz zum zuvor etablierten Werkzeugsystem, welches auf den Einsatz einer mechanischen Feder mit einer festgelegten Federkonstante  $c_f$  zurückgreift, nutzt das neue System eine Luftdruckkammer, welche mit variablen Kammerdrücken  $p_{GD}$  beaufschlagt werden kann. Dies ermöglicht eine zuverlässige und hochpräzise Anwendung der Prozesskraft  $F_{Pr}$ , wodurch das Werkzeug befähigt wird, diese in sämtlichen Prozesskraftbereichen konstant zu halten. Das modulare Werkzeugsystem, hergestellt von der Firma Baublies AG, Renningen, besteht aus einem Glattdruckkopf mit einem fixierten sphärisch geformten Diamanten sowie einer Luftdruckkammer als entscheidendes Funktionselement.

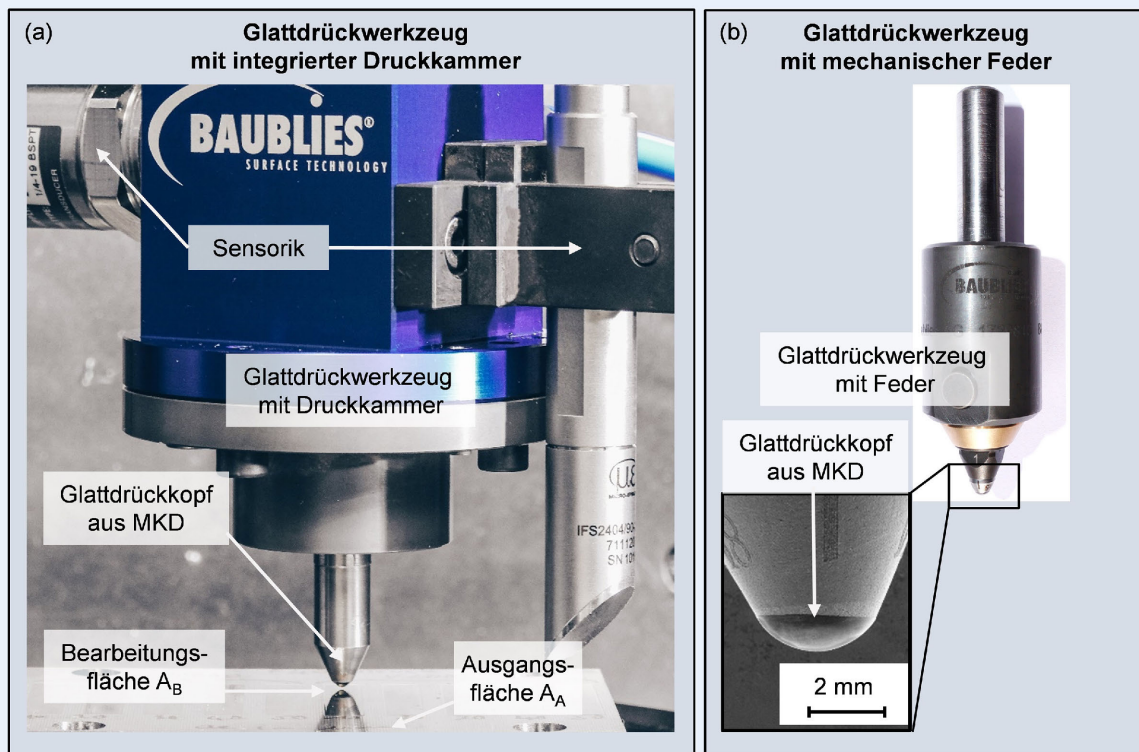
Das auf Luftdruck basierende Glattdruck-Werkzeugsystem weist demnach eine Luftdruckkammer ohne mechanische Feder auf. Hierbei wird die für den hochpräzisen Nachbearbeitungsprozess benötigte Prozesskraft  $F_{Pr}$  mittels eines definierten Luftdrucks  $p$  aus der Maschinenumgebung und axialer Zustellung  $a_p$  eingestellt. Bei der axialen Zustellung  $a_p$  handelt es sich um einen relevanten Einstellparameter, welcher die Zustellung der Werkzeugachse in Richtung des Werkstücks, zur Einstellung der im Prozess notwendigen Prozesskräfte  $F_{Pr}$ , beschreibt. Die Einstellung der Prozesskraft  $F_{Pr}$  wird einmalig mithilfe einer Kraftmessplattform der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur/Schweiz, realisiert. Dafür wird der Druckkammer die notwendige Druckluft über das Maschinensystem bereitgestellt und das Glattdruckwerkzeug in z-Richtung zum Werkstück beziehungsweise der Kraftmessplattform geführt. In Abhängigkeit der sich eindrückenden Druckkammer mit der steigenden Prozesskraft  $F_{Pr}$  kann eine direkte Korrelation erfolgen. Hierüber sind die in Abhängigkeit zur Druckluft stehenden spezifischen Prozesskräfte  $F_{Pr}$  für den nachfolgenden Nachbearbeitungsprozess ableitbar. Darüber hinaus ist das Werkzeugsystem mit hochauflösenden Sensorkom-

ponenten ausgestattet, wodurch das Werkzeugsystem digitale Daten zu relevanten Parametern, die für den Fertigungsprozess entscheidend sind, zur Verfügung stellt. Durch den Wegfall der mechanischen Feder, durch die in konventionellen Werkzeugsystemen die Prozessbereiche festgelegt werden, bietet das luftdruckbasierte System die Möglichkeit einer erweiterten Flexibilität hinsichtlich potenzieller Prozesskraftbereiche, ohne dass ein Umbau des Werkzeugs erforderlich ist. Weiterhin ermöglicht der Einsatz einer Druckkammer mit variablem Kammerdruck  $p_{GD}$  die Integration eines Regelungssystems, mit dem die Konstanz der Prozesskraft  $F_{Pr}$  durch einen ständigen Abgleich des in Abhängigkeit zur Oberfläche stehenden Kammerdrucks  $p$  signifikant verbessert werden kann [7]. Der integrierte Drucksensor, welcher den Innendruck  $p_{GD}$  der Druckkammer hochgenau misst, arbeitet mit einer Druckgenauigkeit von  $GD \leq 0,25 \%$  des gemessenen Drucks  $p_{GD}$ . Der in das Werkzeugsystem verbaute hochsensitive konfokale Messsensor, welcher die axiale Zustellung  $a_p$  des Werkzeuges präzise aufnehmen kann, besitzt eine Messgenauigkeit von  $G_M \leq 0,040 \mu\text{m}$ . In dem nachfolgenden **Bild 1** ist eine Gegenüberstellung beider Glattdruck-Werkzeugsysteme vergleichend dargestellt.

Durch die Erfassung dieser Messdaten können sowohl im Einrichtungsprozess der Maschine als auch während der Bearbeitung die Eingriffsbedingungen in Richtung der axialen Zustellung  $a_p$  in Echtzeit zugänglich gemacht werden. Für den Einrichtungsprozess können diese Messdaten in Kombination mit den hochgenauen Daten des verbauten Drucksensors verwendet werden, um die für den Fertigungsprozess vorgesehene Prozesskraft  $F_{Pr}$  mit hoher Genauigkeit prozesssicher einzustellen. Dies ermöglicht den Einsatz des Werkzeuges während des Nachbearbeitungsprozesses ohne Zuhilfenahme einer externen Kraftmessplattform, wodurch ein Einrichten des Werkstückes in der Maschine signifikant erleichtert wird, da eine dedizierte Spannvorrichtung entfallen kann. Lediglich für die einmalige Kalibration des Werkzeugsystems zum Aufbau einer Datenbank für werkstoffspezifische Einstellparameter-Kennlinien wird eine zusätzliche Kraftmessung benötigt. Diese ist erforderlich, damit zu den gemessenen Prozesskräften  $F_{Pr}$  entsprechende Kammerdruckwerte  $p_{GD}$  sowie axiale Zustellungen  $a_p$  erfasst und korreliert werden können. Durch ein zielgerichtetes Parameterfitting können zu jedem kalibrierten Werkstoff geeignete Einstellparameter erstellt werden, zu denen für jeden erforderlichen Prozesskraftbereich spezifische axiale Zustellungen  $a_p$  und Kammerdrücke  $p_{GD}$  zugeordnet werden können. Hierdurch wird es Anwendern ermöglicht, auf eine Datenbank zurückzugreifen, bei der durch Auswahl eines Werkstoffes geeignete Prozessparameter je nach Anforderung erzeugt werden.

## 3 Funktion und Sensitivität

Zunächst sind im Vorfeld zu den Versuchen zur Sensitivität des Glattdruck-Werkzeugsystems umfassende systematische Untersuchungen des Systems durchgeführt worden, um die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit des Versuchsaufbaus sicherzustellen. Diese bildeten somit eine fundierte Grundlage für die weiteren Analysen und durchgeführten Schlussfolgerungen zur Bewertung. Damit das Glattdruck-Werkzeugsystem einsatzbereit zur Verfügung steht, ist eine Kalibration des Systems durchzuführen. Innerhalb dieser Arbeit wird exemplarisch eine Kalibration des Systems für den Aluminiumwerkstoff des Typs 3.3547 durchge-



**Bild 1.** Gegenüberstellung beider Glattrück-Werkzeugsysteme a) Glattrückwerkzeug mit Druckkammer und b) Glattrückwerkzeug mit Federmechanismus. Grafik: eigene Darstellung

führt und erstmalig eine Datenbank zur Anwendung des Glattrückens aufgebaut. Perspektivisch werden in weiterführenden Arbeiten zusätzliche Kalibrationen für eine Vielzahl an weiteren Werkstoffen vorgenommen, um die entwickelte Datenbank gezielt zu erweitern. Insbesondere ist die Abhängigkeit der Prozesskraft  $F_{Pr}$  bei schrittweiser Erhöhung der axialen Zustellung  $a_p$  bei verschiedenen Druckniveaus für die Kalibration des System von großer Bedeutung, da hierbei durch ein Parameterfitting geeignete Prozessparameter für die Nachbearbeitung erstellt werden können. Liegen diese einmal vor, ist das Erzeugen gewünschter Prozessparameter durch Auswählen eines Werkstofftyps in der Datenbank und ohne Benutzung einer externen Kraftmessung möglich. Durchgeführt wurden die Kalibrationsmessungen an der 5-Achs-Hochpräzisions-Fräsmaschine des Typs „Primacon PFM 4024–5D“ der Firma Primacon GmbH, Peissenberg. Die einmalige messtechnische Erfassung der Prozesskräfte  $F_{Pr}$  erfolgte dabei mithilfe des Dreikomponenten-Dynamometers des Typs „9256C2“ der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur/Schweiz. Dieses Messinstrument ermöglicht eine präzise Erfassung und Analyse der auftretenden Kräfte  $F$  während der experimentellen Versuchsreihen. Für diese Untersuchungen sind dedizierte Versuchsreihen entwickelt worden, bei denen in Abhängigkeit vom Kammerdruck  $p_{GD}$  die axiale Zustellung  $a_p$  gezielt variiert wurde und hierdurch die resultierende Prozesskraft  $F_{Pr}$  ermittelt werden konnte. Die experimentellen Versuchsreihen erstreckten sich über einen Druckbereich von  $2 \text{ bar} \leq p \leq 7 \text{ bar}$ , während die axialen Zustellungen bis zu  $a_p = 2 \text{ mm}$  variiert wurden. Zudem ist die maximale Prozesskraft auf  $F_{Pr} \leq 100 \text{ N}$  limitiert worden. Als Referenzwerkstoff wurde eine Aluminiumlegierung vom Typ 3.3547 mit einer Härte von  $H = 75 \text{ HV}$  verwendet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in **Bild 2** grafisch dargestellt. Wie anhand der Abbildung zu erkennen ist, konnte für jeden analysierten Druckbereich ein linearer Zusammenhang zwischen der eingestellten axialen Zustellung  $a_p$  und der resultierenden Prozesskraft  $F_{Pr}$  ermittelt werden. Beim Einstellen des minimalen untersuchten Kammerdrucks von  $p_{GD} = 2 \text{ bar}$  wurden die niedrigsten Prozesskräfte von  $F_{Pr} = 3,9 \text{ N}$  aufgenommen. Während bei reduzierten Kammerdrücken  $p_{GD}$  nur geringe Anstiege in der aufbringbaren Prozesskraft  $F_{Pr}$  erzielt werden konnte, wurde hingegen bei großen Kammerdrücken  $p_{GD}$  die maximale Prozesskraft  $F_{Pr}$  der Spindel bereits nach einer geringen axialen Zustellung  $a_p$  erreicht. Bei Kammerdrücken bis zu  $p_{GD} \leq 4 \text{ bar}$  wurde bis zu der maximal festgelegten axialen Zustellung von  $a_p \leq 2000 \mu\text{m}$  die Limitierung der Spindel bei  $F_{Pr} = 100 \text{ N}$  weiterhin unterschritten. Die maximale Prozesskraft  $F_{Pr}$  wird bei weiterer Erhöhung des Kammerdrucks ab  $p_{GD} \geq 5 \text{ bar}$  erreicht. Beim höchsten Druck von  $p_{GD} = 7 \text{ bar}$  wurde bereits bei der niedrigsten axialen Zustellung von  $a_p = 250 \mu\text{m}$  eine hohe Ausgangsprozesskraft von  $F_{A,Pr} \geq 94,1 \text{ N}$  identifiziert, wodurch der potenzielle Einsatzbereich dieses Druckniveaus erheblich limitiert ist.

Die Messergebnisse zeigen auf, dass die Funktionalität des Glattrück-Werkzeugsystems für den Nachbearbeitungsprozess gegeben ist und eine Kalibrierung des Glattrück-Werkzeugsystems für den untersuchten Werkstoff möglich. Mithilfe dieser Datensätze können nun entsprechende Prozessparameter für diesen Werkstoff für unterschiedliche Prozesskräfte  $F_{Pr}$  korreliert und der Datenbank zur Verfügung gestellt werden.

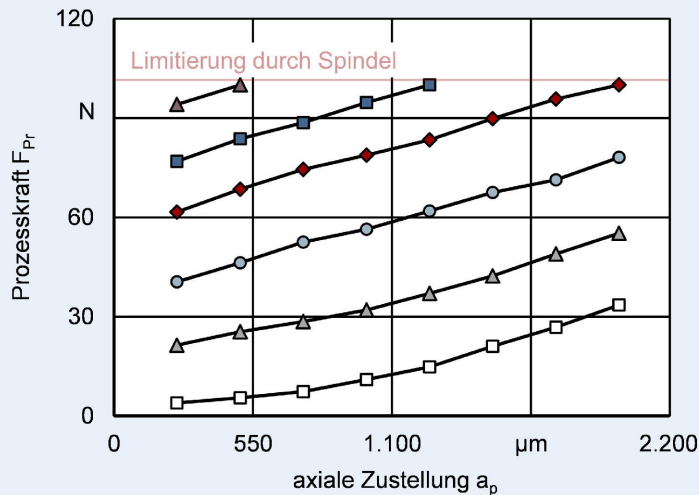
Ein weiteres Hauptmerkmal des druckluftbasierten Glattrück-Werkzeugsystems besteht in der Möglichkeit, die nachbearbeiteten Bauteile direkt in der Fräsmaschine bezüglich der

**Maschine:**  
Primacon PFM 4024-5D

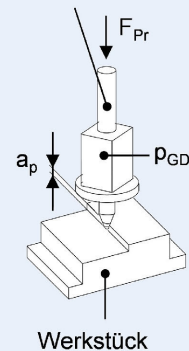
**Werkzeug:**  
MKD-Glattdrückwerkzeug

**Prozessparameter:**

□  $p_{GD} = 2$  bar    ♦  $p_{GD} = 5$  bar  
 ▲  $p_{GD} = 3$  bar    ■  $p_{GD} = 6$  bar  
 ○  $p_{GD} = 4$  bar    ▲  $p_{GD} = 7$  bar



Glattdrückwerkzeug



Werkstück

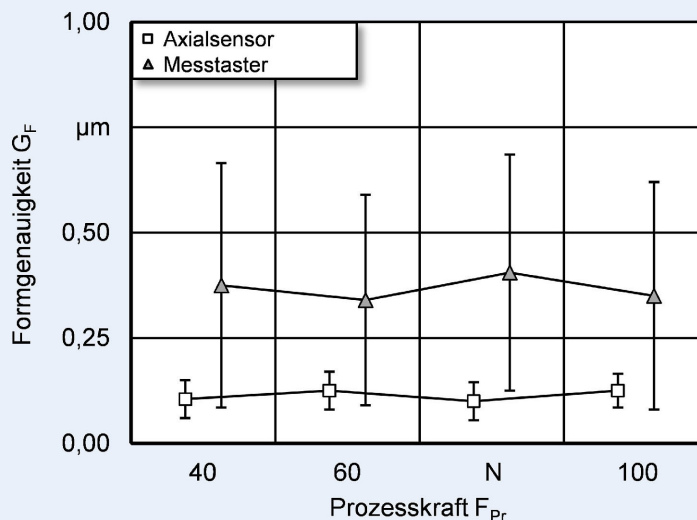
**Bild 2.** Darstellung der Prozesskraft  $F_{Pr}$  in Abhängigkeit von der axialen Zustellung  $a_p$  bei verschiedenen Druckniveaus. Grafik: eigene Darstellung

**Maschine:**  
Primacon PFM 4024-5D

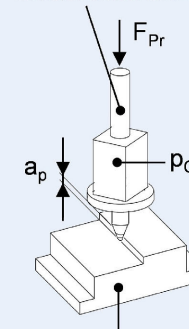
**Werkzeug:**  
MKD-Glattdrückwerkzeug

**Prozessparameter:**

$a_e = 20 \mu\text{m}$   
 $v_f = 4.000 \text{ mm/min}$



Glattdrückwerkzeug



Werkstück

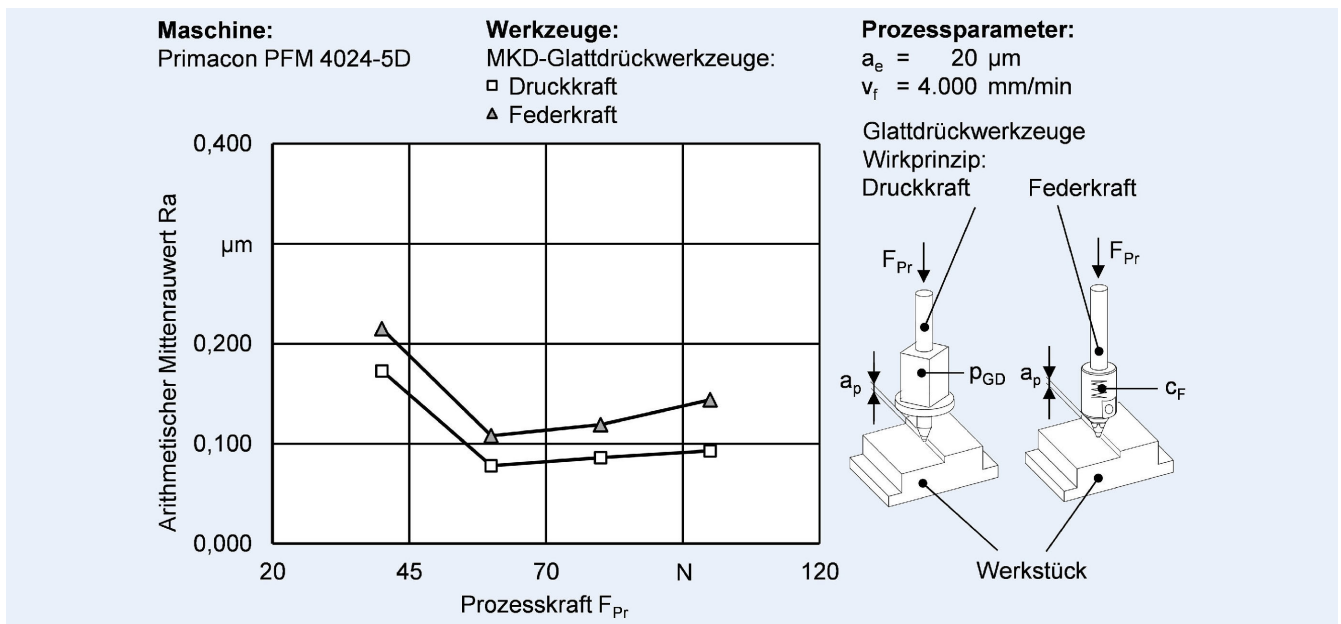
**Bild 3.** Vergleichende Darstellung der Formgenauigkeit  $G_F$  mit deren Messwertschwankungen  $G_{M, Sch}$  zwischen dem Axialsensor des Glattdrück-Werkzeugsystems und dem eingebauten Messtaster der Fräsmaschine. Grafik: eigene Darstellung

erzielten Formgenauigkeit  $G_F$  nach dem Umformprozess untersuchen zu können. Die hohe Messgenauigkeit des integrierten konfokalen Axialsensors von  $G_M \leq 0,040 \mu\text{m}$  ermöglicht hochpräzise Messungen, die mit konventionellen Messtastern in Werkzeugmaschinen nicht erreichbar sind. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, gezielt vorhandene Abweichungen zur geplanten Soll-Geometrie des Werkstücks in der Fräsmaschine nachzustellen und direkt mit höchster Präzision korrigieren zu können. Die nachfolgenden Untersuchungen hatten zum Ziel, die Messgenauigkeit  $G_M$  des digitalen Glattdrückwerkzeugs im direkten Vergleich mit dem in der Maschine verbauten Messtaster vergleichend bewerten zu können. Bei den verwendeten Werkstücken handelte es sich um Proben aus einer Aluminiumlegierung des Typs 3.3547, auf denen

glattdruckte Bahngeometrien erzeugt wurden. Diese Flächen wurden mit verschiedenen Prozesskräften  $F_{Pr}$  gefertigt, um für alle Versuchsmessungen unterschiedliche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Die kleinste verwendete Prozesskraft lag bei  $F_{Pr} = 40 \text{ N}$  und steigerte sich schrittweise jeweils um  $\Delta F_{Pr} = 20 \text{ N}$  auf  $F_{Pr} = 100 \text{ N}$ . Zuvor sind diese Proben durch Planfräsen mit einem arithmetischen Mittenrauwert von  $R_a = 1 \mu\text{m}$  präpariert worden, damit für alle glattdruckten Oberflächen einheitliche Ausgangsbedingungen vorherrschen. Das nachfolgende **Bild 3** zeigt die Messergebnisse dieser Untersuchungsreihen.

In der Abbildung sind die mit den beiden Messsystemen durchgeführten Versuche im Hinblick auf die resultierende Formgenauigkeit  $G_F$  der glattdruckten Oberflächen dargestellt.





**Bild 4.** Darstellung des arithmetischen Mittenrauheits  $R_a$  in Abhängigkeit von der eingestellten Prozesskraft  $F_{Pr}$  bei Verwendung verschiedener Glattdrück-Werkzeugsysteme. Grafik: eigene Darstellung

Insbesondere wurde die Qualität der Messungen durch das Identifizieren von Messschwankungen bei wiederholten Messungen an der gleichen Position ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Messungen, welche mit dem Axialsensor des Glattdrück-Werkzeugsystems durchgeführt worden sind, deutlich geringere Schwankungswerte  $G_{M, Sch}$  zwischen den einzelnen Messungen auftraten als bei den Messungen mit dem in der Maschine verbauten Messtaster. Der Bereich der Schwankungswerte des Axialsensors beschränkte sich lediglich auf  $0,040 \mu\text{m} \leq G_{M, Sch} \leq 0,170 \mu\text{m}$ , wohingegen die Messungen mit dem Messtaster einen Schwankungsbereich von  $0,100 \mu\text{m} \leq G_{M, Sch} \leq 0,660 \mu\text{m}$  aufzeigten. Zwischen den ausgewählten Parameterkonfigurationen zeigte der axiale Sensor des Werkzeugsystems gleichbleibend präzise Messungen ohne signifikante Schwankungen. Das Messverhalten des Axialsensors kann somit als prozesssicher und stabil angesehen werden. Der Messtaster der Werkzeugmaschine hingegen wies signifikant höhere Schwankungen auf, wodurch keine Messungen im oberen zweistelligen Nanometerbereich prozesssicher durchgeführt werden konnten. Dass der Axialsensor durch einen geringen Messschwankungsbereich charakterisiert ist, kann auf die hohe Messgenauigkeit  $G_M$  des Sensors zurückgeführt werden.

Im Anschluss an die Messungen zur Sensitivität der in dem Werkzeugsystem integrierten Messsensoren erfolgten vergleichende Versuchsreihen unter Verwendung des federbasierten sowie des druckluftbasierten Glattdrückwerkzeugs. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den beiden Werkzeugsystemen herzustellen, um so die Eignung der Messsysteme für den Einsatz in der Nachbearbeitung zu ermitteln. Hierzu wurden die Einflüsse der Prozesskraft  $F_{Pr}$  auf die resultierenden Oberflächenrauheitskennwerte nach der Bearbeitung analysiert. Die Variation der Prozesskraft lag bei diesen Versuchsreihen im Bereich  $40 \text{ N} \leq F_{Pr} \leq 100 \text{ N}$ . Damit für alle Versuche die gleichen Ausgangsbedingungen gegeben waren, sind zuvor alle verwendeten Werkstoffproben durch Planfräsen mit einem arithmetischen Mittenrauwert von  $R_a = 1 \mu\text{m}$  präpariert

worden. In dem nachfolgenden **Bild 4** werden die Untersuchungsergebnisse grafisch dargestellt. Abgebildet sind die resultierenden Oberflächenrauheitskennwerte in Abhängigkeit von der eingestellten Prozesskraft  $F_{Pr}$  beim Glattdrücken. Die Ergebnisse zeigen für beide untersuchten Werkzeuge ein grundlegend ähnliches Bearbeitungsverhalten. Während bei geringen Prozesskräften  $F_{Pr}$  die in der Versuchsreihe höchsten ermittelten Oberflächenrauheiten erreicht wurden, kam es bei weiterer Steigerung der Prozesskraft  $F_{Pr}$  zu einer signifikanten Verbesserung der Oberflächenrauheitskennwerte. Bei einer Prozesskraft von  $F_{Pr} = 40 \text{ N}$  sind für beide Werkzeugsysteme deutlich erhöhte Oberflächenrauheitskennwerte von mindestens  $R_a \geq 0,173 \mu\text{m}$  erzielt worden. Der Grund dafür ist das Unterschreiten der für den Glattdruckprozess erforderlichen Flächenpressung  $p_A$ . Der niedrigste arithmetische Mittenrauwert ist für beide Werkzeugsysteme bei einer Prozesskraft von  $F_{Pr} = 60 \text{ N}$  messtechnisch erfasst worden. Im direkten Vergleich konnte allerdings das druckluftbasierte Werkzeugsystem deutlich geringere arithmetische Mittenrauwerte von  $R_a = 0,086 \mu\text{m}$  erzeugen, wohingegen das federbasierte System nur Oberflächenrauheitskennwerte von  $R_a = 0,108 \mu\text{m}$  erreichen konnte. Dies liegt an auftretenden Prozesskraftabweichungen  $F_{Pr, Abw}$ , welche im Fall des druckluftbasierten Werkzeuges durch eine aktive Regelung des Kammerdrucks  $p_{GD}$  minimiert werden können. Diese ist dadurch in der Lage, die eingestellten Prozesskräfte  $F_{Pr}$  während der Bearbeitung konstant zu halten und somit auftretende Prozesskraftabweichungen  $F_{Pr, Abw}$  aktiv zu reduzieren. Bei weiterer Erhöhung der Prozesskraft  $F_{Pr}$  ist bei beiden Werkzeugsystemen ein kontinuierlicher Anstieg der arithmetischen Mittenrauwerte  $R_a$  identifiziert worden. Bei dem Werkzeug mit mechanischer Feder ist hingegen der Anstieg stärker ausgeprägt als bei dem druckluftbasierten System.

Es konnte im Falle des federbasierten Werkzeuges ein Anstieg des arithmetischen Mittenrauheits um  $R_a = 0,036 \mu\text{m}$  auf einen maximalen Wert von  $R_a = 0,151 \mu\text{m}$  identifiziert werden. Der Anstieg des druckbasierten Systems belief sich auf einen Wert von

$R_a = 0,015 \mu\text{m}$  und erreichte einen maximal gemessenen Oberflächenrauheitskennwert von  $R_a = 0,093 \mu\text{m}$ . Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, ermöglicht das luftdruckbasierte Werkzeugsystem aufgrund der reduzierten Prozesskraftabweichungen  $F_{Pr,Abw}$  infolge der Regelung deutlich geringere arithmetische Mittenrauwerte  $R_a$ . Durch zunehmende Prozesskraftabweichungen  $F_{Pr,Abw}$  bei steigenden Prozesskräften  $F_{Pr}$  ergeben sich bei der Verwendung des federbasierten Werkzeugs deutlich steigende arithmetische Mittenrauwerte  $R_a$ , die zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität führen. Insgesamt kann durch den Einsatz des druckluftbasierten Systems eine Verbesserung des Glattdruckprozesses im Hinblick auf eine Verringerung der Oberflächenrauheitskennwerte erreicht werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neuartiges Glattdruck-Werkzeugsystem präsentiert, welches sich durch dessen Funktionsweise zur gezielten Nachbearbeitung auf Fräsmaschinen eignet und vom derzeitigen Stand der Technik erheblich abhebt. Das neuartige Glattdruck-Werkzeugsystem ist in der Lage, prozessrelevante Parameter wie den Kammerdruck  $p_{GD}$ , die axiale Zustellung  $a_p$  sowie die Prozesskraft  $F_{Pr}$  in Echtzeit zu erfassen und dem Anwender zur Verfügung zu stellen. Hierzu wurde das Werkzeugsystem exemplarisch für die Aluminiumlegierung vom Typ 3.3547 bei unterschiedlichen Druckniveaus kalibriert. Auf Basis dieser Messdaten konnte ein hochpräzises Einrichten des Glattdruckprozesses durch das gezielte Einstellen der Prozesskraft  $F_{Pr}$  sowie im Anschluss an den Glattdruckprozess ein hochgenaues Messen der resultierenden Formgenauigkeiten  $G_F$  der nachbearbeiteten Bauteile realisiert werden. Auf Basis der Ergebnisse zur Messsensitivität sowie durch die druckluftbasierte Funktionsweise des Gesamtwerkzeugsystems konnte ein Regelungssystem integriert werden, mit dem die Prozesskraft  $F_{Pr}$  während des Nachbearbeitungsprozesses konstant gehalten und die Oberflächenrauheitskennwerte erhöht werden können. Weiterführende Untersuchungen adressieren die Erweiterung der bereits entwickelten Datenbank. Demnach wird das Glattdruck-Werkzeugsystem für eine Vielzahl an weiteren Werkstoffen kalibriert und die Datenbank um zusätzliche spezifische Werkstoffeigenschaften wie die Härte  $H$  erweitert. Hierdurch soll ein größeres Anwendungsspektrum des Werkzeugsystems erschlossen werden. Zusätzlich wird die Datenbank um weitere Variablen für die Erzeugung von Prozessparametern erweitert. Hierdurch wird es ermöglicht, direkt

anhand von den geforderten Oberflächenrauheitskennwerten, Formgenauigkeiten  $G_F$  sowie maximalen Bearbeitungszeiten  $t_B$  geeignete Prozessparameter zum Glattdrücken zu generieren.

## Literatur

- [1] Kumbhar, N. N.; Mulay, A. V.: Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. J. Inst. Eng. India Ser. C 99 (2018) 4, S. 481 – 487
- [2] Kuche, Y.; Siebel, D.; Polte, J.; Polte, M.; Uhlmann, E.: Herstellung optischer Oberflächen durch das Glattdrücken von PMX170CrMo18–3–1. Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP) (2019)
- [3] DIN 8583–5, Teil 5, (09.2003) Fertigungsverfahren Druckumformen; Eindrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
- [4] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren: Umformen, 6. Auflage. Berlin: Springer, 2018
- [5] Maximov, J. T.; Anchev, A. P.; Duncheva, G. V.; Ganey, N.; Selimov, K. F.: Influence of the process parameters on the surface roughness, microhardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (2017) 39, S. 3.067 – 3.078
- [6] Polte, J.; Polte, M.; Lahoda, C.; Uhlmann, E.: Precision finishing of additive manufactured Ti-Al-components using diamond slide burnishing. 37th ASPE (2022), S. 70 – 73
- [7] Uhlmann, E.; Polte, M.; Hocke, T.; Wendt, M.: Neuartiges luftdruckbasiertes Glattdruck-Werkzeugsystem zur Nachbearbeitung von Stahlwerkstoffen. Diamond Business (2023)



**Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing.  
Eckart Uhlmann**

Foto: Fraunhofer IPK

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen  
und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
www.ipk.fraunhofer.de

**Dr.-Ing. Mitchell Polte**

**Toni Hocke, M.Sc.**

Tel. +49 30 314-75301

hocke@tu-berlin.de

**Michael Wendt, M.Sc.**

wendt@tu-berlin.de

Technische Universität Berlin  
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
www.tu.berlin/iwf

## DANKSAGUNG

Die vorgestellte Arbeit entstand im Rahmen des ZIM-Kooperationsprojekts „EchtGlatt – Entwicklung eines innovativen Werkzeugsystems für das echtzeitfähige und autonome Prozess-Monitoring zum Glattdrücken auf Fräsmaschinen“ in Zusammenarbeit mit der Firma Baublies AG, Renningen. Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) wird für die Förderung dieses Projekts gedankt. Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## LIZENZ



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