

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-
Datum der Einreichung: 20.02.2026
Datum der Annahme: 08.04.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Einfluss von Durchmesseränderungen auf die Geometrie beim Strömungsschleifen

Lokale Geometrieeffekte beim Strömungsschleifen

E. Uhlmann, A. Rozek, E. Berg, S. Gröger, S. Stöckel, S. Fiebig

ZUSAMMENFASSUNG Diese Arbeit untersucht den Einfluss von Durchmesseränderungen Δd in der Ausgangsgeometrie sowie von Strömungsrichtung und Volumenstrom $\dot{V}$ des abrasiven Mediums auf die geometrischen Eigenschaften strömungsgeschliffener Werkstücke. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungsrichtung einen signifikanten Einfluss auf die Art der lokalen Effekte hat und die Höhe der Durchmesseränderungen Δd sowie die Höhe des Volumenstroms $\dot{V}$ die lokale Änderung des Zeitspannungsvolumen Q_w wesentlich beeinflussen.

STICHWÖRTER

Forschung, Schleifen, Oberfläche

Influences on the diameter of internal geometric features in abrasive flow machining – Local geometry-induced effects in abrasive flow machining

ABSTRACT This study investigates the influence of diameter variations Δd in the initial geometry as well as the flow direction and volumetric flow rate $\dot{V}$ of the abrasive medium on the geometric properties of abrasive flow machined workpieces. The results show that the flow direction has a significant impact on the type of local effects and that the magnitude of diameter changes Δd and the magnitude of volume flow $\dot{V}$ substantially influence the local change in material removal rate Q_w .

1 Einleitung

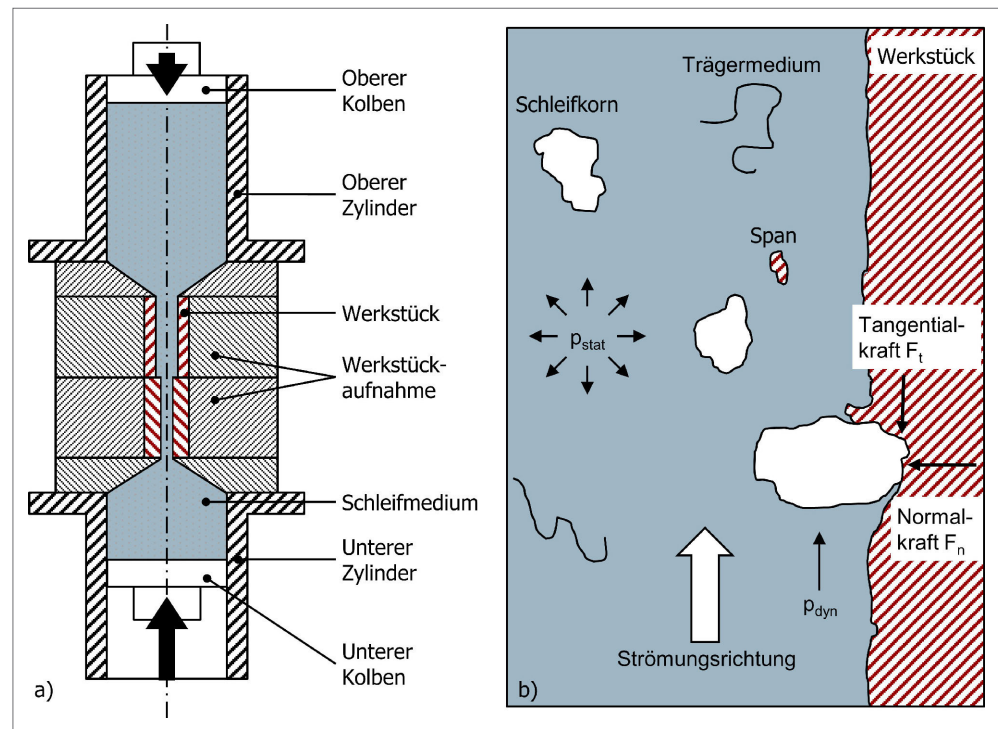
Das Strömungsschleifen ist ein Feinbearbeitungsprozess, der industriell für das Entgraten, Kantenverrunden und die Rauheitsverringerung von komplexen Geometrien, insbesondere schwer zugängliche Innengeometrien, verwendet wird. Der Prozess zeichnet sich durch die Verwendung eines viskoelastischen Trägermediums aus, das Schleifkörner durch die Werkstücke führt und lokal an der Werkstückoberfläche Eigenschaften einer Werkzeugbindung aufweist. Übliche Trägermedien umfassen Polymere wie Silikone oder Siloxane, wobei als Schleifkorn unter anderem Siliziumkarbid, Diamant und Aluminiumoxid verwendet werden. Die Wahl des Materials, der Größe und der Anzahl der Schleifkörner, des Trägermediums und der Additive spielt eine entscheidende Rolle bei der Einstellung der rheologischen Eigenschaften des Strömungsschleifmediums. Gleichwohl bleibt die Klassifizierung des Strömungsschleifmediums als nicht-newtonsches Fluid bestehen. Neben der Korngröße d_k und dem Kornmaterial spielt das Fließverhalten des Strömungsschleifmediums eine entscheidende Rolle für die hervorgebrachte Oberflächenbeschaffenheit und das Zeitspannungsvolumen Q_w [1].

Beim Strömungsschleifen wird ein hydraulisches System verwendet, welches aus zwei Kolben besteht, die das Strömungsschleifmedium alternierend durch das Werkstück beziehungsweise die Werkstückaufnahme drücken, **Bild 1**. Die Werkstückaufnahme stellt sicher, dass das Strömungsschleifmedium innerhalb des Systems verbleibt und an die zu bearbeitenden Werkstückoberflächen herangeführt wird. Vor der Werkstückbearbeitung wird das Strömungsschleifmedium durchmischt und vorge-

wärmt, um die geforderte Bearbeitungstemperatur und Homogenität zu erreichen. Nach der Medienpräparation werden der untere Zylinder und die Haltevorrichtung mit dem Strömungsschleifmedium gefüllt. Die Haltevorrichtung und das Werkstück werden dann zwischen den oberen und unteren Zylindern eingespannt, um eine spaltlose Abdichtung zu gewährleisten. Wenn die Kolben synchron und alternierend in Bewegung sind, fließt das Strömungsschleifmedium entlang der Werkstückoberfläche, was zu einer Materialabtrennung führt. Die Bauteilbearbeitung wird unter Wechselwirkung der Prozessparameter sowie Trägermedium und Korn so lange durchgeführt, bis die Zielgrößen bezüglich Rauheit und Kantenrundungen erreicht werden.

Die Bearbeitungsergebnisse beim Strömungsschleifen werden von mehreren Schlüsselparametern beeinflusst, darunter die Zyklenzahl N , der Gegendruck p_g , der Kolbengeschwindigkeit v_K , der Medientemperatur T und der Medienzusammensetzung [1]. Die Medienzusammensetzung umfasst verschiedene Faktoren, wie die Viskosität des Trägermediums sowie die Konzentration C , Korngröße d_k und Topologie der Schleifkörner. Das Vorwärmen des Mediums ist ein entscheidender Schritt, da die Molekülketten der polymeren Struktur sich dadurch erst strecken und die Schleifkörner effektiv binden können. Zusätzlich hilft das Vorwärmen, eingeschlossene Luft aus dem Medium zu entfernen, die ansonsten die Bearbeitungsergebnisse beeinträchtigen können. Um konsistente und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten, ist während des Bearbeitungsprozesses die Medientemperatur T möglichst konstant zu halten. Typischerweise beträgt die Medientemperatur $25^\circ\text{C} \leq T_M \leq 40^\circ\text{C}$.

Bild 1 Strömungsschleifen;
a) Maschinentechnik; b) Span-
bildung an der Wirkstelle.
Grafik: TU Berlin IWF



2 Stand der Forschung

Die aktuelle Forschung im Bereich Fluidodynamik von Strömungsschleifprozessen konzentriert sich zunehmend auf das Verständnis der Strömungsphänomene mittels Computational Fluid Dynamics (CFD), Diskrete-Elemente-Methode (DEM), Discrete Phase Modeling (DPM) und experimenteller Visualisierung, um Strömungsschleifprozesse zu optimieren und Bearbeitungsergebnisse vorher-zusagen [1]. Studien haben den Einfluss der Kanalgeometrie, der Medienrheologie, des Wandschlupfs und der Prozessparameter auf das Strömungsverhalten sowie auf die Oberflächenqualität und uniformität der bearbeiteten Werkstücke untersucht. *Kum et al.* führten experimentelle Untersuchungen an lasergesinterten Düsenabschnitten durch, um das lokale Zeitspannungsvolumen Q_w des Strömungsschleifens zu messen, und verglichen die Ergebnisse mit einem entwickelten CFD-Modell [2]. Ihre experimentellen Untersuchungen zeigten ein ungleichförmig verteiltes Zeitspannungsvolumen Q_w entlang des Werkstückprofils, mit Höhendifferenzen des abgetrennten Materials im Bereich von $z_H = 50$ bis $550 \mu\text{m}$. Als Haupteinflussfaktoren wurden Systemdruck p_s , Mediengeschwindigkeit v_M und die Bauteilgeometrie identifiziert.

Ein weiteres Modell zur Vorhersage des lokalen Zeitspannungsvolumens Q_w und der Oberflächenrauheiten von mittels Selektiv-Laser-Schmelzens hergestellten und anschließend strömungsgeschliffenen Kanälen wurde von *Ferchow et al.* publiziert, wobei rheologische und CFD-Daten genutzt wurden [3]. Die Verteilung des lokalen Zeitspannungsvolumens Q_w entlang des Kanals stellte sich als ungleichförmig heraus, mit dem größten lokalen Zeitspannungsvolumen Q_w an den Kanaleingängen. In der Arbeit wurde dieser Effekt dem Weissenberg-Effekt beziehungsweise dem damit verbundenen Extrusionsquellen zugeschrieben. Weiter stromabwärts, wo der Weissenberg-Effekt beziehungsweise die Extrusionsquellen nicht mehr dominant sind, stellen der lokale Druck p_{lok} und die Mediengeschwindigkeit v_M die Hauptfaktoren

dar, die den Materialabtrennung beeinflussen. *Chih-Hua et al.* kombinierten experimentelle Untersuchungen mit einem CFD-Modell, um die Schleifmediumbewegung in verzweigten Geometrien vorherzusagen [4]. Sie beobachteten einen Wandgleiteffekt zwischen Schleifmedium und Werkstückoberfläche, dessen Erklärung durch gleichförmige Geschwindigkeitsprofile und signifikante, nicht-lineare Druckabfälle über die Geometrieänderungen gestützt wird. Darüber hinaus tritt ein deutlicher Druckabfall am Übergang zwischen der Werkstückaufnahme und dem Werkstück auf, mit einem lokalen Druckmaximum in der Übergangszone. Diese Beobachtung zeigte sich sowohl in den experimentellen Daten, als auch in den durchgeführten Simulationen. Weiterhin wird gefolgert, dass eine Verschlechterung der Medieneigenschaften den Strömungsverlauf umlenkt und typischerweise die Strömung in bestimmten Verzweigungen verstärkt, in denen lokal überhöhte Zeitspannungsvolumina Q_w hervorgerufen werden.

Im Hinblick auf das dem Strömungsschleifen verwandte Soft-Abrasive-Flow-Verfahren schlugen *Li et al.* ein Berechnungsmodell für räumlich beschränkte Strukturen vor [5]. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die lokalen Zeitspannungsvolumina Q_w positiv mit der lokalen Mediengeschwindigkeit v_M , dem Schleifkornvolumen V_p und dem dynamischen Druck p_{dyn} korrelieren. Darüber hinaus zeigt sich, dass wenn die Turbulenz in der Bearbeitungszone verstärkt wird, mehr Schleifkörner die wandnahe Grenzschicht durchdringen und dadurch an der Materialabtrennung beteiligt sein können, was zu einem höheren lokalen Zeitspannungsvolumen Q_w führt.

Die Forschung von *Uhlmann und Roßkamp* beschreibt die Auswirkungen von Durchmesseränderungen auf die Arbeitsergebnisse des Strömungsschleifprozesses [6, 7, 8]. Sie zeigten, dass eine plötzliche Verengung der Querschnittsfläche eines Bohrlochs einen Druckabfall sowie eine lokale Erhöhung der Mediengeschwindigkeit v_M infolge der Strömungsablösung bei konstantem Volumenstrom $\dot{V}$ induziert. Als Folge wird ein Teil der kinetischen Energie in turbulente Strömung dissipiert, welche in

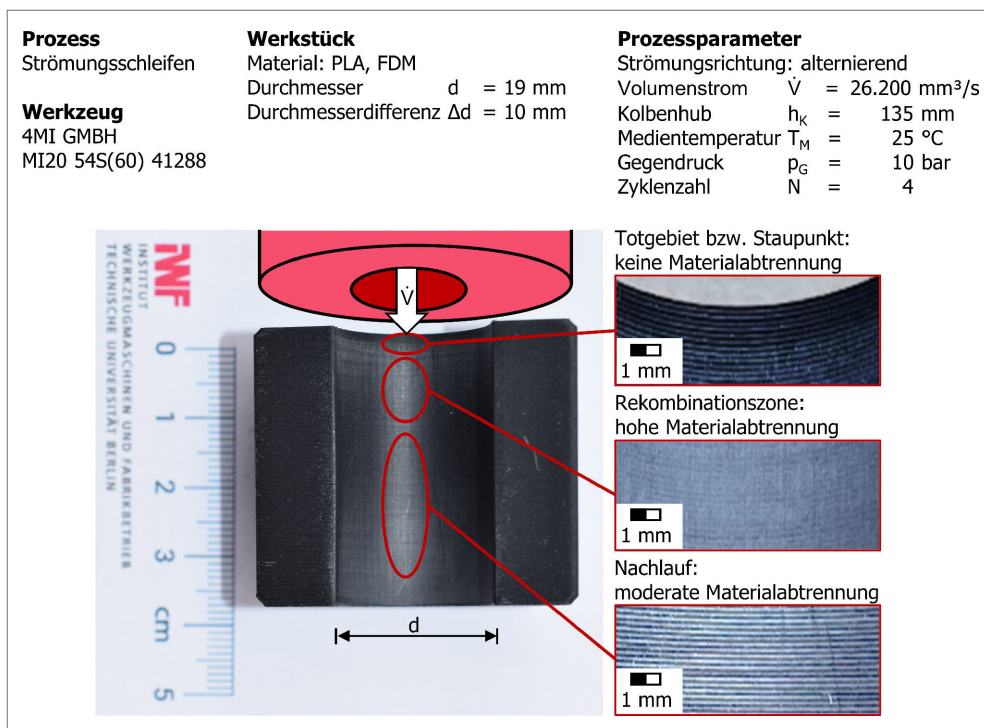


Bild 2 Einfluss von Durchmesseränderungen auf die Intensität der lokalen Materialabtrennung.
Grafik: TU Berlin IWF

Kombination mit der höheren Mediengeschwindigkeit v_M und den erhöhten Wandhaftungskräften F_t zu einem erhöhten lokalen Zeitspannungsvolumen Q_w am oberen Rand der Kante führt. Die Kante wurde jedoch als der Fokus der Studie isoliert vom Rest der Kanalgeometrie betrachtet. Obwohl der Fokus der Studie auf den Effekten auf die Kantenradien r lag, wurden unregelmäßige Formabweichungen in den Abschnitten mit größeren Durchmessern d beobachtet, die hypothetisch mit der Wirbelbildung in Zusammenhang stehen.

Fu et al. untersuchten gezielt die Materialabtrennung über die Länge eines geraden Bauteils mittels Simulationen und Experimenten [9]. Sie differenzierten drei verschiedene Regionen in Bezug auf die lokale Materialabtrennung, mit einer größeren Materialabtrennung am Anfang und am Ende der Geometrie. In ihrem Diagramm zur Materialabtrennung ist neben der Anfangszone auch eine weitere Zone identifiziert, in der eine sehr geringe Materialabtrennung erfolgt. Diese wurde jedoch nicht weiter betrachtet. Eigene Untersuchungen mit gezielter Durchmesserveränderung, zeigten noch stärkere lokale Unterschiede des Zeitspannungsvolumen Q_w über die Kanallänge. Die Unregelmäßigkeiten dieser lokal verschiedenen Zeitspannungsvolumina Q_w sind im **Bild 2** dargestellt, wobei aufgrund der besseren Sichtbarkeit ein Werkstück der Versuche aus Kapitel 4 verwendet wird.

Sowohl vergangene als auch aktuelle Arbeiten zeigen die Notwendigkeit der Modellierung und aktiven Steuerung des Strömungsverhaltens auf, um einen entlang der Werkstückgeometrie definierten Verlauf des lokalen Zeitspannungsvolumen Q_w sicherzustellen, insbesondere in komplexen oder additiv gefertigten Geometrien. Der Eintrittseffekt, bei dem das lokale Zeitspannungsvolumen Q_w am Kanaleingang aufgrund der Strömungsablösung beziehungsweise dem Weissenberg-Effekt höher ist, wird mit der Viskoelastizität des Mediums und der Kanalgeometrie in Verbindung gebracht [10, 11]. Es bleiben jedoch einige Einschränkungen und offene Fragestellungen bestehen. Während die meisten Untersuchungen sich auf vereinfachte oder idealisierte Geome-

trien konzentrieren, stellen reale Bauteile oft komplexere Strömungsherausforderungen dar. Aktuelle Arbeiten betrachten meist nur einzelne Geometrieänderungen, wie Oberflächenrauheit, Formänderungen oder Durchmesseränderungen und diese auch nur losgelöst voneinander. Um Geometrieeffekte zu erklären, bietet sich eine skalenübergreifende und gemeinsame Bewertung dieser Effekte als Grundlage für die Modellbildung an. Darüber hinaus sind Strategien zur Minderung des Eintrittseffekts und der Strömungsablösung zwar gut dokumentiert, deren Umsetzung in der industriellen Praxis jedoch noch in der Entwicklung. Das Forschungsfeld würde von mehr In-situ-Strömungsvisualisierung und Echtzeit-Überwachungstechniken sowie von weiterer Erforschung hybrider und adaptiver Prozesskontrollen profitieren. Trotz signifikanter Fortschritte bestehen Forschungslücken in den Bereichen der Echtzeit-Strömungsüberwachung, der Minderung der Strömungsablösung in hochkomplexen Geometrien, des Einflusses des Weissenberg-Effekts und der Auswirkungen der Medienalterung und Mehrphasenströmungen.

Um die genannten Forschungslücken zu schließen und die komplexen Wechselwirkungen zwischen Strömungsverhalten, Geometrie und Materialeigenschaften besser zu verstehen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, die den Einfluss von Durchmesseränderungen auf das lokale Zeitspannungsvolumen Q_w in strömungsgeschliffenen Werkstücken untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden präsentiert und diskutiert. Um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Strömungsverhalten, Geometrie und Materialeigenschaften besser zu verstehen, wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die in Kapitel 3 durchgeführten Untersuchungen dienten dazu, grundlegende Effekte zu identifizieren und die relevanten Stellgrößen zu bestimmen. Die darauf aufbauenden Untersuchungen des Kapitels 4 dienten dazu, diese Effekte weiter zu differenzieren und die Einflüsse der Stellgrößen quantitativ zu untersuchen. Durch diese zweistufige Vorgehensweise konnten die Ergebnisse systematisch aufgebaut und die Zusam-

Bild 3 Versuchsaufbau;
a) Anordnung in der Strömungsschleifmaschine; b) Detaillierte Darstellung des Aufbaus für Untersuchungen im Kapitel 3; c) Aufbau für Untersuchungen im Kapitel 4.
Grafik: TU Berlin IWF

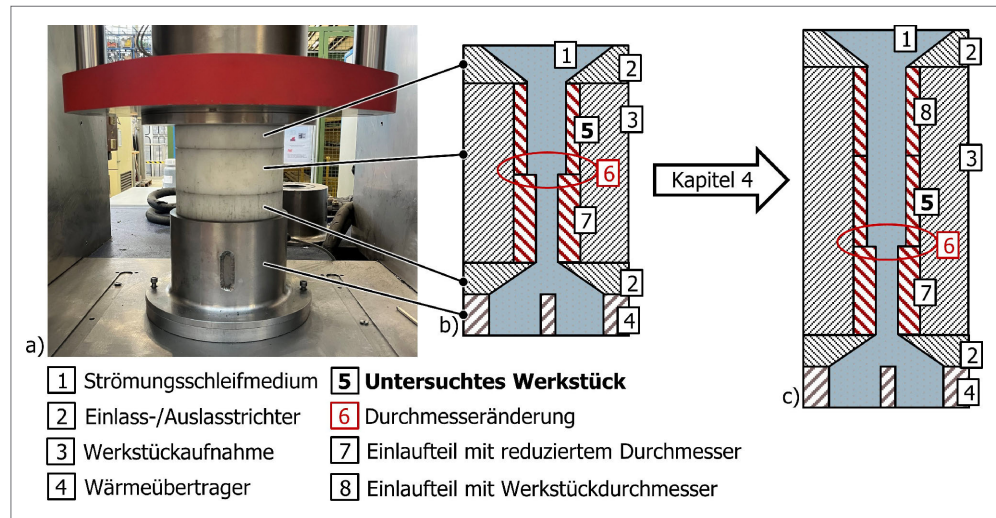


Tabelle 1 Prozessparameter der Versuchsreihe anhand Vergütungsstahl 50CrMo4 (1.7228).

Parameter	Symbol	Werte	Einheit
Volumenstrom	$\dot{V}$	26.200	mm ³ /s
Kolbenhublänge	h_K	135	mm
Gegendruck	p_G	40	bar
Medientemperatur	T_M	35	°C
Durchmesserdiffereenz	Δd	4	mm
Strömungsrichtung		alternierend	

menhänge zwischen den verschiedenen Parametern detailliert analysiert werden.

3 Einfluss der Durchmesseränderung Δd auf das lokale Zeitspannungsvolumen Q_w

3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die experimentellen Untersuchungen wurden mithilfe der Strömungsschleifmaschine „Delta Towers 100D IPC“ der Firma Micro Technica GmbH, Kornwestheim, durchgeführt. Diese Anlage ist mit einer Wärmeübertragereinheit ausgestattet, welche eine Temperaturregelung während des Prozesses ermöglicht. Das Strömungsschleifmedium, das in diesen Untersuchungen verwendet wurde, war das „MI20 54S(60) 41288“ der Firma 4Mi GmbH, Malsburg-Marzell, welches ein deutliches, viskoelastisches Verhalten aufweist. Das verwendete Schleifmedium ist so konzipiert, dass es ein optimales Gleichgewicht zwischen der Kornhaltefähigkeit, die für den Schneidprozess entscheidend ist, und der Fließfähigkeit, die für die Bearbeitung komplexer Geometrien erforderlich ist, erreichen. In den experimentellen Tests wurde ein Siliziumkarbid-Korn mit einer Korngröße von $d_k = 300 \mu\text{m}$ verwendet. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 3** dargestellt.

Die Versuchswerkstücke sind aus dem Vergütungsstahl 50CrMo4 mit der Stahlnummer 1.7228 gefertigt. Dieser Werkstoff wird unter anderem für die Fertigung von Hydraulikadaptoren, Verteilern sowie Steuer- und Ventilblöcken in der Hydraulik verwendet. Zum Entgraten und zur Endbearbeitung innenliegender Oberflächen wird das Strömungsschleifen eingesetzt. Der Versuch wurde zur statistischen Absicherung an drei durchge-

führt, welche einen Durchmesser von $d = 19 \text{ mm}$ und eine Länge von $l = 29 \text{ mm}$ besitzen. Die Bohrungen wurden mittels Drahterosion gefertigt, um unabhängig der Durchmesser eine reproduzierbar isotrope Ausgangsoberfläche zu erhalten. In **Tabelle 1** sind die Versuchsparameter aufgeführt. Die Werkstücke wurden mit bis zu 60 Zyklen bearbeitet, wobei die Oberflächen nach je 15 Zyklen taktil in axialer Richtung gemessen wurden, siehe Kapitel 3.2.

3.2 Mess- und Auswertebedingungen

Die Messungen erfolgten mit einem 3D-Koordinatennmessgerät (KMG) „Micura“ der Firma Zeiss IQS GmbH, Oberkochen. Es wurden axial in Strömungsrichtung taktil Mantellinien im Scanningverfahren mit dem Parameter $v_{\text{Scan}} = 3,0 \text{ mm/s}$ erfasst. Als Antastelement wurde eine Rubinkugel dem Radius $r_t = 3,0 \text{ mm}$ verwendet und der mittlere Punktabstand für jede Mantellinie betrug $l_p = 0,01 \text{ mm}$. Ferner sind ein Randabstand von $x_R = 0,5 \text{ mm}$ zu den jeweiligen Deckflächen sowie die Filterung des Profils mit einem Tiefpass Gauß-Filter mit dem Parameter $Nic = 0,08 \text{ mm}$ zur Entfernung hochfrequenter Anteile zu beachten.

3.3 Ergebnisse

Die Mantellinie eines exemplarischen Werkstücks ist in **Bild 4** dargestellt, wobei die Zonen aus Bild 2 deutlich in den Kurvenverläufen nach dem Strömungsschleifen zu sehen sind. Die Mantellinie im Ausgangszustand, wie sie nach der Fertigung mittels

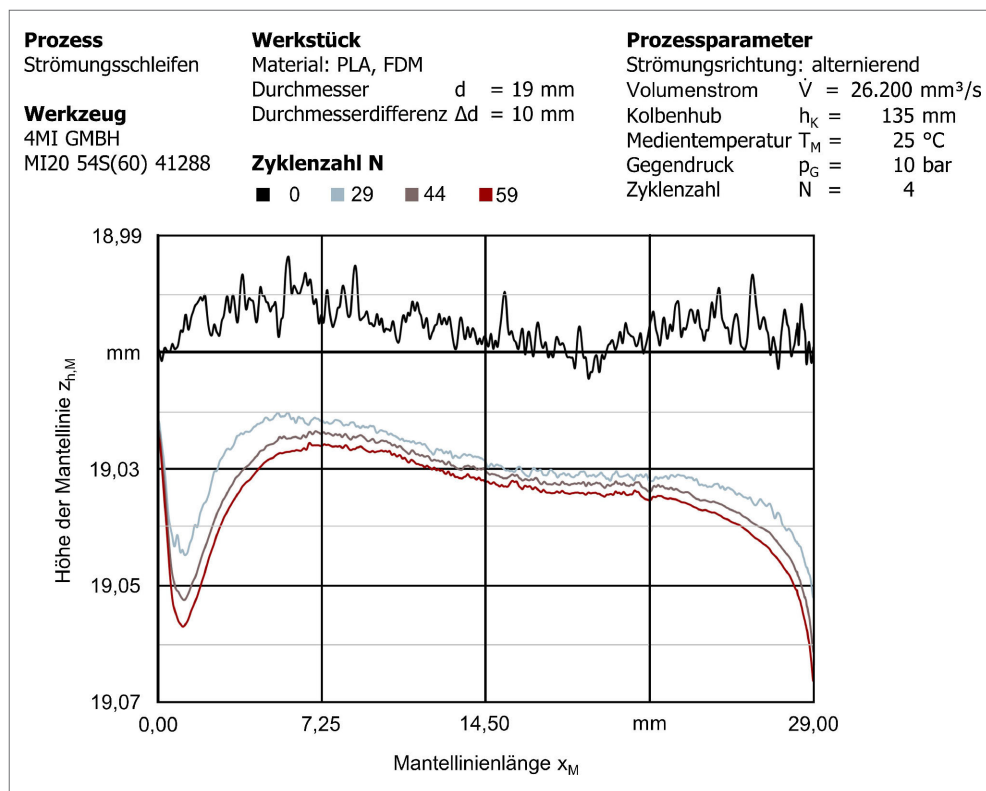


Bild 4 Mantellinien eines Stahlwerkstücks im Ausgangszustand sowie nach der Strömungsschleifbearbeitung mit 29, 44 und 59 Zyklen. Grafik: TU Berlin IWF

Drahterosion vorliegt, ist in schwarz ganz oben im Diagramm dargestellt. Nach insgesamt je 29, 44 und 59 Bearbeitungszyklen wurden die Mantellinien jeweils gemessen und sind ebenfalls im Diagramm dargestellt.

Die größte Höhendifferenz zum Ausgangsprofil beträgt nach 59 Bearbeitungszyklen $\Delta h = 57 \text{ }\mu\text{m}$, was auf eine signifikante Änderung der Oberfläche hinweist. Aus dem Diagramm ist weiterhin ersichtlich, dass in den ersten 29 Bearbeitungszyklen deutlich mehr Material pro Zyklus abgetrennt wird als in den nachfolgenden Zyklen. Der erhöhte Materialabtrennrate ist auf den Oberflächenzustand nach der Vorbearbeitung zurückzuführen. Das Drahterodieren erzeugt eine raue Oberfläche mit einer thermisch beeinflussten Randschicht, die gegenüber abrasiver Beanspruchung weniger widerstandsfähig ist. Mit fortschreitender Bearbeitung wird diese Schicht abgetrennt und die Oberfläche geglättet, wodurch die Abtrennrate sinkt. Es zeigt sich, dass in der Nähe der Querschnittsänderung mit dem Randabstand $x_R = 0,5 \text{ mm}$, welcher der Mantellinienlänge $x_M = 0 \text{ mm}$ entspricht, kaum Material abgetrennt wird und dort das Totgebiet beziehungsweise der Staupunkt liegt. Kurz darauf, in der Rekombinationszone mit der Mantellinienlänge $x_{M4} = 1,8 \text{ mm}$, liegt jedoch lokal ein hohes Zeitspannungsvolumen Q_w vor, was auf eine intensive Zerspanung in diesem Bereich hinweist. Hinter der Rekombinationszone liegt für $3,6 \text{ mm} < x_M < 21,7 \text{ mm}$ das Nachlaufgebiet, welches lokal ein moderates Zeitspannungsvolumen Q_w aufweist. Dahinter, bis zum Ende des Profils, ist wieder ein zunehmendes lokales Zeitspannungsvolumen Q_w zu sehen, was auf eine erneute Zunahme der Zerspanungsintensität hinweist.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Durchmesseränderung einen signifikanten Einfluss auf die Gleichförmigkeit

der Zerspanung hat und dass die Geometrie in verschiedenen Bereichen des Profils unterschiedlich beeinflusst wird. Aus der Mantellinie nach 59 Zyklen, wird die Ungleichförmigkeit des Zeitspannungsvolumens nicht nur aufgrund der maximalen Höhe des Mantellinie $z_{h,M,\max}$ deutlich, sondern auch eine größere Verringerung der Rauheitsspitzen ist aus dem Verlauf ersichtlich. Unter Berücksichtigung der Strömungsgeometrie legt dies für eine Strömungsrichtung von links nach rechts die Schlussfolgerung nahe, dass die Durchmesseränderung Δd zu einer Strömungsablösung führt oder unter Wirkung des Weissenberg-Effekts die Zerspanungsleistung des Strömungsschleifmediums lokal stark beeinflusst [3, 10, 11]. Ein zusätzlicher Effekt kann bei der Strömung von rechts nach links die Entstehung eines Staupunkts sein, welcher die Zerspanungsleistung des Strömungsschleifmediums nahe der Kante zunehmend mindert. Diese Effekte sind in der Forschung bislang kaum untersucht, siehe aktueller Stand im Kapitel 2.

Der Verlauf der Mantellinie am rechten Ende für die Mantellinienlänge $x_M > 21,7 \text{ mm}$ kann so jedoch nicht vollständig erklärt werden, insbesondere weil kein lokales Minimum ausgeprägt ist. Eine nachträgliche Untersuchung der Werkstücke und der Werkstückaufnahme zeigt, dass die Ursache in einer übermäßigen Kantenverrundung der Aufnahme aufgrund der hohen Zahl an Bearbeitungszyklen liegen kann. Auf Grundlage der Erkenntnisse am linken Werkstückrand ist es außerdem wahrscheinlich, dass der Wirkbereich des Weissenberg-Effekts, verursacht durch den Einlauftrichter, sich nur teilweise auf die Werkstücklänge erstreckt und teilweise auf den Einlauftrichter selbst wirkt. Um diesen Effekt zu minimieren, wurde der Versuchsaufbau für die nachfolgenden Untersuchungen des Kapitels 4 angepasst, Bild 3 c.

Tabelle 2 Prozessparameter der Versuchsreihe anhand PLA.

Parameter	Symbol	Werte		Einheit
Volumenstrom	$\dot{V}$	26.200;	65.500	mm ³ /s
Kolbenhublänge	h_K	135		mm
Gegendruck	p_G	40		bar
Medientemperatur	T_M	35		°C
Durchmesserdivergenz	Δd	5;	10	mm
Strömungsrichtung	-	alternierend; anströmend; abströmend		-

4 Untersuchung der Einflussgrößen anhand von Werkstücken aus PLA

4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die in dieser Versuchsreihe eingesetzte Strömungsschleifmaschine, das verwendete Schleifmedium und die Messmittel sind identisch mit denen, die in den Versuchsreihen des Kapitels 3 verwendet wurden. In den Versuchsreihen dieses Kapitels wurden die Test-Werkstücke derart konzipiert, dass sie die geometrischen und materialtechnischen Eigenschaften von Komponenten besitzen, die häufig in biomedizinischen Anwendungen verwendet werden [12, 13]. Die Werkstücke wurden mittels Fused Filament Fabrication (FFF) hergestellt. Um eine zerstörungsfreie Oberflächenanalyse der Bohrungen zu ermöglichen, wurden die Werkstücke als zwei Hälften konzipiert, mit einem Bohrl Lochdurchmesser von $d = 19$ mm und einer Bohrl Lochlänge von $l = 34$ mm, Bild 2.

Zur Überprüfung, ob die in den vorherigen Untersuchungen des Kapitel 3 beobachteten Effekte auch auf PLA-Material anwendbar sind, wurden PLA-Werkstücke mit den gleichen Prozessparametern bearbeitet, wobei die Oberflächen ab dem ersten Zyklus jeden Zyklus vermessen wurde. Diese Voruntersuchungen ergaben, dass die gleiche Verteilung der lokalen Zeitspannvolumina Q_w mit vergleichbaren Abständen im Vergleich zu den Stahlwerkstücken auftritt. Gleichwohl ist das mittlere Zeitspannungsvolumen Q_w um den Faktor zehn bis fünfzehn größer, sodass deutlich weniger Zyklen erforderlich sind, um analoge Veränderungen an der Oberfläche von PLA-Werkstücken zu erzeugen. Dies ermöglicht aufgrund des stark reduzierten Handhabungsaufwandes mit der verfügbaren Strömungsschleifmaschine auch nicht alternierende Strömungen zu untersuchen. Dazu wird ein Bearbeitungszyklus beim erstmaligen Erreichen des oberen Umkehrpunktes manuell gestoppt, die Zylinder auseinandergefahren und das Strömungsschleifmedium vom oberen in den Unteren Zylinder umgefüllt und der Prozess erneut gestartet. Dieses Vorgehen ist für eine Zyklenzahl N bis circa fünf praktikabel, jedoch nicht für Stahlwerkstücke, deren Bearbeitung mehrere Dutzend Zyklen bedarf. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3c dargestellt und unterscheidet sich zum Versuchsaufbau des Kapitels 3 durch die Ergänzung eines Einlaufteils mit dem Werkstückdurchmesser $d = 19$ mm. Diese Versuchsanordnung soll den Einfluss des Einlauftrichters in Strömungsrichtung minimieren und eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleisten. Der Versuchsplan, der die Variation von drei Hauptfaktoren umfasst, wird in **Tabelle 2** dargestellt.

Zunächst wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um den Einfluss der Strömungsrichtung auf die axiale Verteilung des lokalen Zeitspannungsvolumens Q_w zu untersuchen, wobei der Volumenstrom konstant bei $\dot{V} = 26.200$ mm³/s gehalten wurde und die Durchmesserdivergenz $\Delta d = 5$ mm betrug. Basierend auf den Erkenntnissen wurde ein 2x2-faktorielles experimentelles Design für die Abström-Konfiguration verwendet, bei welchem der Volumenstrom $\dot{V}$ und die Durchmesserdivergenz Δd jeweils auf zwei Stufen variiert wurden, um die Auswirkungen dieser Stellgrößen auf die Strömungseffekte weiter zu untersuchen. Zur statistischen Absicherung wurde jedes Experiment dreimal wiederholt, was zu insgesamt 18 Experimenten führte. Um das Potenzial für Änderungen der Einlaufteile aufgrund von Schleifbearbeitung zu reduzieren, wurden für jeden Testlauf neue Einlaufteile verwendet. Voruntersuchungen wurden durchgeführt, um den Versuchsaufbau zu validieren und sicherzustellen, dass die Schnittstelle zwischen dem Versuchswerkstück und den Einlaufteilen keine signifikanten Fehler oder Variationen in den Bearbeitungsergebnissen herbeiführen.

4.2 Mess- und Auswertebedingungen

Anhand der gewonnen Erkenntnisse aus Kap. 3.3 wurden die Messungen besonders in Hinblick auf die Erfassung der Werkstückgeometrie im Bereich der Querschnittsänderung optimiert. Die Messungen erfolgten mit einem Profilometer beziehungsweise Rauheitsmesssystem „PGK-120“ der Firma Mahr GmbH, Göttingen. Die Taststrecke liegt analog zu den Mantellinien der KMG-Messungen in axialer Richtung, wobei hier über die Kante der Querschnittsänderung gemessen werden konnte, was eine nahezu vollständige Abbildung des Bereiches erlaubt. Der deutlich geringere Punktabstand von $l_p = 0,5$ µm und die Verwendung einer Rauheitsspitze mit dem Radius $r_t = 2,0$ µm und dem Spitzenwinkel $\gamma = 60^\circ$ als Tastelement ermöglicht weiterhin eine Analyse der Profile bis in den Bereich der Rauheit. Die erfassten Profile sind Primärprofile bei denen die Form entfernt wurde. Dazu wird ein Polynom 2ten Grades mit dem Least Square Verfahren eingepasst und anschließend entfernt. Damit wird die Bogenform der Mantellinie des Zylinders korrigiert, welche durch den Ausrichtfehler der Profilrichtung zur Zylinderachse auftritt.

4.3 Ergebnisse

Bild 5 a stellt die Profillinien vor und nach dem Strömungsschleifen dar. Die Rekombinationszone, welche in Bild 2 optisch zu erkennen und in Kapitel 3 messtechnisch quantifiziert ist,

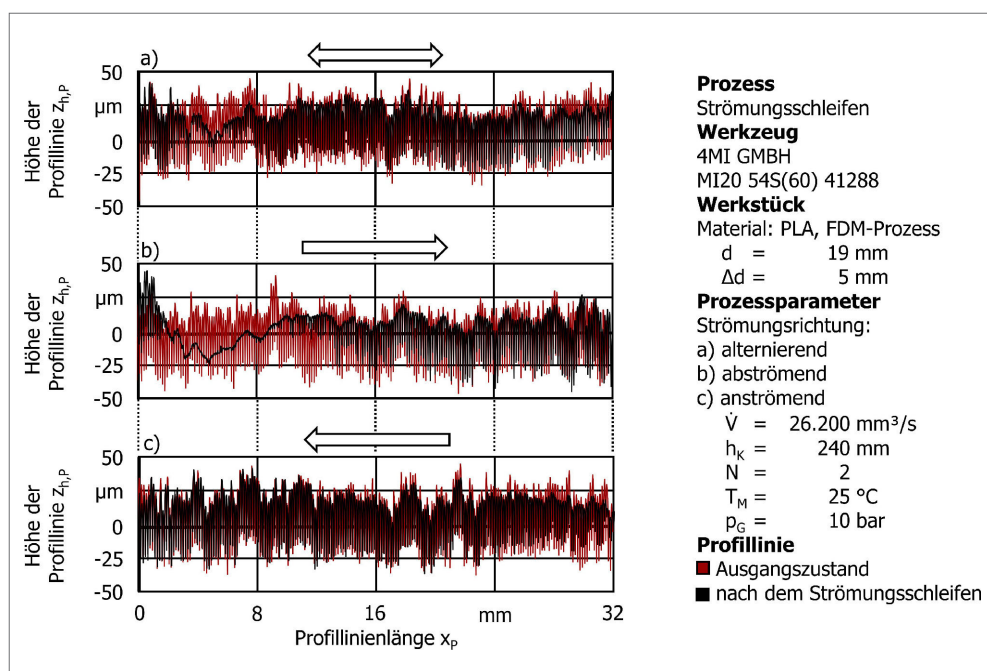


Bild 5 Oberflächenprofile von PLA-Werkstücken im Ausgangszustand sowie nach der Strömungsschleifbearbeitung; a) alternierende Strömungsrichtung; b) nur abströmend bearbeitet; c) nur anströmend bearbeitet. Grafik: TU Berlin IWF

zeigt sich hier ebenfalls deutlich als ein Bereich, der durch eine glatte Oberfläche und eine signifikante Höhenreduktion gekennzeichnet ist. Bezogen auf das mittlere Niveau der Ausgangsfläche besitzt diese Zone ein lokales Minimum von $z_{h,p,\min} = 31,4 \text{ µm}$ Höhe bei Profillinienlänge von $x_p = 5 \text{ mm}$ und einer Gesamtbreite dieser Region von etwa $w_r = 6 \text{ mm}$. Zusätzlich wird am rechten Ende des Werkstücks bei etwa $x_p = 31 \text{ mm}$ ein gegenüber dem Mittelteil moderat erhöhtes lokales Zeitspannungsvolumen Q_w beobachtet, wie durch die allgemein niedrigere Höhe der Profillinie $z_{h,p}$ und verringerte Rauheit angezeigt wird. Im Gegensatz zu den Versuchen des Kapitel 3 ist jedoch kein starker und stetiger Abfall zum rechten Rand hin zu beobachten. Dies bestätigt den am Ende des Kapitels 3 formulierten möglichen Einfluss des Einlauftrichters.

Wegen der Möglichkeit zur monodirektionalen Bearbeitung der Werkstücke infolge der Werkstoffwahl, ist es möglich, die gemessenen Effekte differenziert nach den jeweiligen Strömungsrichtungen zu untersuchen. Es wurden daher Versuchsreihen durchgeführt, bei denen nur eine Strömungsrichtung für einen gesamten Kolbenhubzyklus verwendet wurde, während die Gesamtlänge des Kolbenhubes gleichblieb, Bild 5 b) und Bild 5 c). Die Strömungsrichtung wurde entweder abströmend oder anströmend definiert, abhängig von der Reihenfolge der Durchmesser, die das Medium passiert. Die abströmende Richtung bezieht sich auf die Strömungsrichtung, bei der das Medium zuerst durch den kleineren Durchmesser und dann durch den größeren Durchmesser fließt. Das bedeutet auf Bild 3 bezogen von unten nach oben und auf das Diagramm in Bild 4 bezogen von links nach rechts. Die anströmende Richtung bezeichnet folglich die umgekehrte Strömungsrichtung.

Die beiden in Bild 5 a) beschriebenen Zonen werden auch in Bild 5 b) und Bild 5 c) beobachtet, mit der wesentlichen Unterscheidung, dass jedes Merkmal einer bestimmten Strömungsrichtung zugeordnet werden kann. Dies deutet darauf hin, dass die resultierende Oberflächentopographie eines durch einen konventionellen Strömungsschleifprozess hergestellten Werkstücks als eine Überlagerung dieser beiden Oberflächentopographien be-

trachtet werden kann. Basierend auf den Beobachtungen in Bild 2 und Bild 5 kann gefolgert werden, dass die Zone mit kaum beziehungsweise keinem messbaren Zeitspannungsvolumen Q_w direkt durch eine Art Strömungsablösung im Rahmen der abströmenden Zyklushälfte, überlagert mit dem Staupunktverhalten der anströmenden Zyklushälfte verursacht werden. Die Zone des höchsten lokalen Zeitspannungsvolumens Q_w hingegen scheint gänzlich auf die abströmende Zyklushälfte zurückzuführen zu sein und ist stark ausgeprägt, obwohl während der anströmenden Zyklushälfte aufgrund des Staupunktverhaltens kaum eine Materialabtrennung stattfindet. Offensichtlich scheint die Durchmesseränderung Δd für die Anströmrichtung einen Staupunkt zu erzeugen, was zur stetigen Abnahme des lokalen Zeitspannungsvolumens Q_w in Richtung der Durchmesseränderung führt. Die Überlagerung dieser beiden Effekte erklärt die in Bild 2 sichtbaren Zonen der Oberflächentopographie. Dies deutet darauf hin, dass das komplexe Zusammenspiel zwischen den Strömungsablösungs- und Staupunktphänomenen für die beobachteten Oberflächenmerkmale verantwortlich ist. Durch das Verständnis dieser komplexen Wechselwirkungen kann die Oberflächenqualität von Werkstücken verbessert werden, indem die Prozessparameter und die Geometrie des Werkstücks optimiert werden.

Die Oberflächentopographie, welche infolge der abströmenden Zyklushälfte entsteht, ist ein dominanter und komplexer Effekt, der eine erhebliche Herausforderung für praktische Anwendungen darstellt. Um diesen Effekt weiter zu untersuchen, wurde ergänzend eine weiterführende parametrische Studie durchgeführt, um den Einfluss der Durchmesserdivergenz Δd und des Volumenstroms $\dot{V}$ auf die resultierende Oberflächentopographie für die abströmende Zyklushälfte zu untersuchen. Die Ergebnisse, die in Bild 6 präsentiert werden, zeigen, dass sowohl die Durchmesserdivergenz Δd als auch der Volumenstrom $\dot{V}$ einen deutlichen Einfluss auf die Ausprägung der Rekombinationszone haben. Daher werden im Folgenden die Amplitude A der Differenz der Oberflächenprofile und die Position der Amplitude in axialer Richtung x_A für zur vergleichenden Bewertung herangezogen. Durch die Variation der Prozessparameter kann die Oberflächentopographie

Bild 6 Oberflächenprofile von PLA-Werkstücken im Ausgangszustand sowie nach der Strömungsschleifbearbeitung in abströmender Richtung; a) niedrige Durchmesseränderung Δd und niedriger Volumenstrom $\dot{V}$; b) hohe Durchmesseränderung Δd und hoher Volumenstrom $\dot{V}$.
Grafik: TU Berlin IWF

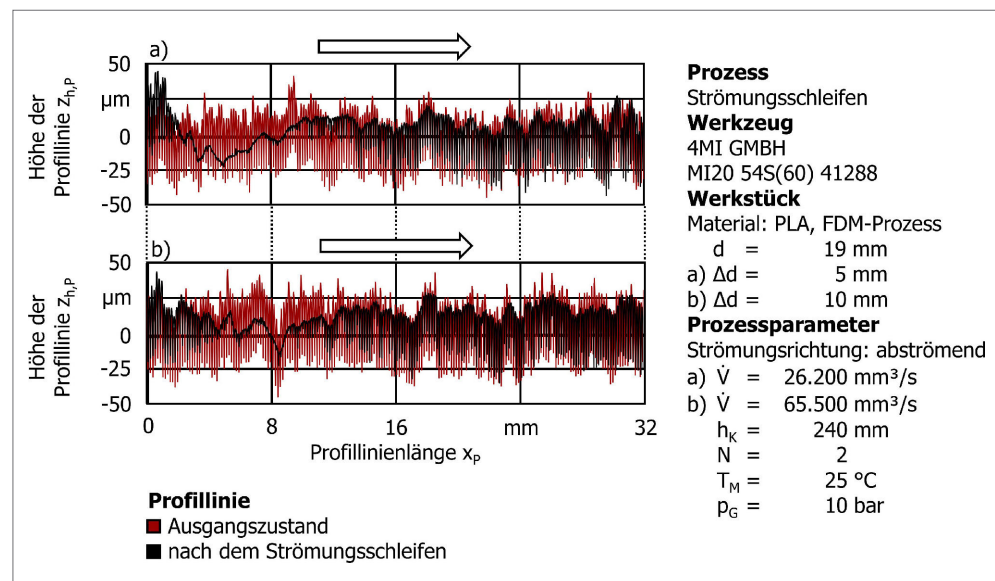
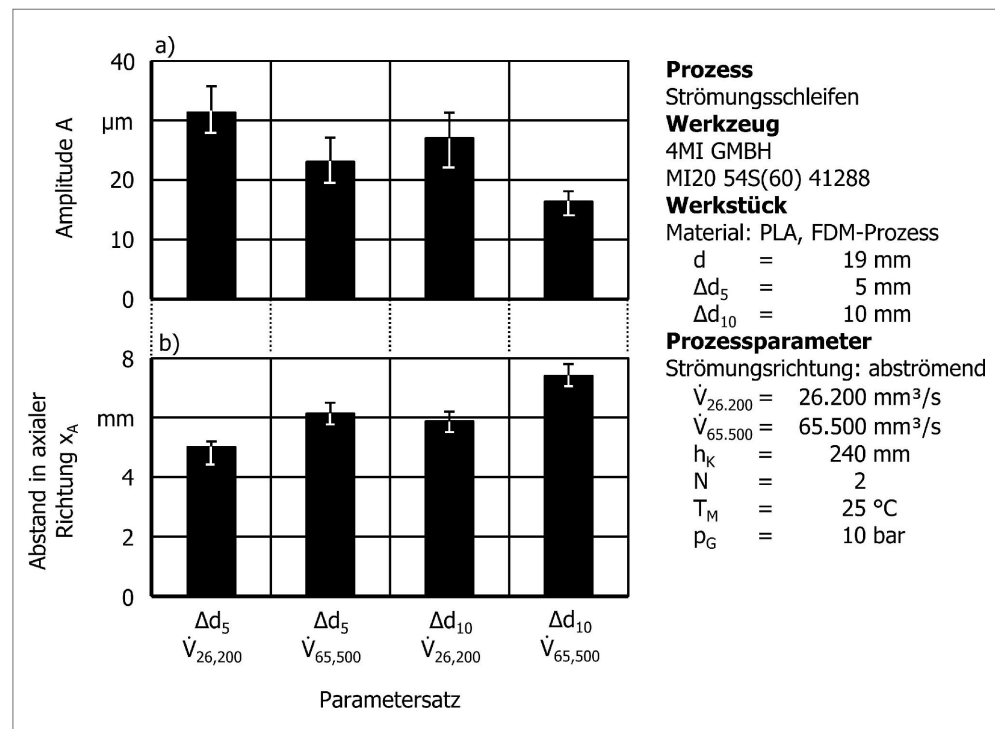


Bild 7 Einfluss der Durchmesser-differenz Δd und des Volumenstroms $\dot{V}$ auf die Geometrie der Rekombinationszone; a) Amplitude A; b) Abstand in axialer Richtung x_A . Grafik: TU Berlin IWF



des Werkstücks gezielt beeinflusst werden, was für praktische Anwendungen von großem Interesse ist.

Für eine Durchmesser-differenz $\Delta d = 5$ mm und einen Volumenstrom von $\dot{V} = 26.200$ mm³/s wurde die größte Amplitude $A = 31,4$ µm gefunden, wobei der Abstand vom Rand $x_A = 5$ mm beträgt, Bild 6a. Eine Erhöhung des Volumenstroms auf $\dot{V} = 65.500$ mm³/s bei der gleichen Durchmesser-Differenz von $\Delta d = 5$ mm führte zu einer relativen Reduzierung der Amplitude um $\Delta A = 26$ % und einer relativen Vergrößerung des Abstands x_A um 22 %. Im Gegensatz dazu liegt für eine Durchmesser-differenz $\Delta d = 10$ mm und einen Volumenstrom von $\dot{V} = 65.500$ mm³/s die kleinste Amplitude mit einem Wert von $A = 16,3$ µm vor, wobei ihr Abstand $x_A = 7,4$ mm beträgt, Bild 6b. Eine Reduzierung des Volumenstroms auf $\dot{V} = 26.200$ mm³/s bei der gleichen Durchmesser-diffe-

renz $\Delta d = 10$ mm führte zu einer relativen Erhöhung der Amplitude A um 65 % und einer relativen Reduzierung des Abstands x_A um 21 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Amplitude und der Abstand vom Rand stark von der Durchmesser-differenz und dem Volumenstrom $\dot{V}$ abhängen und dass eine Optimierung dieser Parameter notwendig ist, um die gewünschte Oberflächentopographie zu erreichen.

Bild 7 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für alle Prozessparameterkonfigurationen. Insbesondere wurde festgestellt, dass eine kleinere Durchmesser-differenz Δd zu einer größeren Amplitude A mit einem kleineren Abstand x_A von der Durchmesser-änderung führt. Ebenso führt ein kleinerer Volumenstrom $\dot{V}$ auch zu einer größeren Amplitude A und einem kleineren Abstand x_A von der Durchmesser-änderung. Diese Ergebnisse decken sich mit dem Stand der Technik für scherverdünnende

Medien [14, 15]. Dies deutet darauf hin, dass die viskoelastischen Eigenschaften des Mediums eine wichtige Rolle für die resultierende Oberflächentopographie des Werkstücks spielen und dass die klassischen Prinzipien der newtonschen Flüssigkeitsströme nicht direkt anwendbar sind. Diese Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass für die abströmende Zyklushälfte eine Strömungsablösung stattfindet und die Position sowie die Intensität der Rekombination wesentlich von der Strömungsgeschwindigkeit und der Durchmesserdivergenz abhängig ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit untersuchte die Auswirkungen von Durchmesseränderungen Δd , Strömungsrichtung und Volumenstrom $\dot{V}$ auf die geometrischen Abweichungen in axialer Richtung von Werkstücken, die mittels Strömungsschleifen bearbeitet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungsrichtung einen signifikanten Einfluss auf die geometrischen Abweichungen in axialer Richtung hat, wobei die abströmende Zyklushälfte einen komplexeren und dominanteren Effekt gegenüber der anströmenden Zyklushälfte zeigt. Die Durchmesseränderung Δd und der Volumenstrom $\dot{V}$ haben weiterhin einen Einfluss auf die Amplitude A sowie die Position der Amplitude x_A des Werkstückprofils. Für die kleinere Durchmesserdivergenz $\Delta d = 5 \text{ mm}$ und den geringeren Volumenstrom von $\dot{V} = 26.200 \text{ mm}^3/\text{s}$ wurde die größte Amplitude mit $A = 31,4 \text{ }\mu\text{m}$ gemessen, wobei der Abstand zur Durchmesseränderung mit $x_A = 5 \text{ mm}$ am geringsten war.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern wichtige Implikationen für die Optimierung und Steuerung von Strömungsschleifprozessen. Gleichwohl sind weitere Untersuchungen notwendig, um die zugrunde liegenden Mechanismen und Effekte vollständig zu verstehen und hinreichend komplexe Prozessmodelle zu entwickeln, die verwendet werden können, um die Prozessparameter für spezifische Anwendungen zu optimieren. Darüber hinaus heben die vorgestellten Ergebnisse das Potenzial des Strömungsschleifens für die Bearbeitung komplexer Geometrien und Oberflächen hervor, wobei weitere Untersuchungen notwendig sind, um die Möglichkeiten und Grenzen des Strömungsschleifprozesses zu evaluieren. Die geplante Verwendung computertomographischer Bildgebung wird entscheidend sein, um ein tieferes Verständnis des Strömungsschleifprozesses zu erlangen und diesen zu optimieren. Durch die Kombination von experimentellen und simulativen Ansätzen kann ein tieferes Verständnis des Strömungsschleifprozesses erlangt werden. Die Entwicklung von Vorhersagemodellen kann die Optimierung der Prozessparameter für spezifische Anwendungen ermöglichen. Weiterhin ist der Einfluss der Medienalterung, Mehrphaseneffekte und Geometrien mit hohen Krümmungsgradienten aktuell nicht vollumfänglich erklärbar. Basierend auf den vorgestellten Untersuchungen sind diese Einflussgrößen Gegenstand aktueller Forschung.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Inhalten des DFG-Forschungsprojekts „Entwicklung eines holistischen Geometrie- und Prozessmodells im Strömungsschleifen“, Projekt-Nr. 58887889.

Literatur

- [1] Dixit, N.; Sharma, V.; Kumar, P.: Research trends in abrasive flow machining: A systematic review. *Journal of Manufacturing Processes* 64 (2021), pp. 1434–1461
- [2] Kum, C.; Wu, C.; Wan, S. et al.: Prediction and compensation of material removal for abrasive flow machining of additively manufactured metal components. *Journal of Materials Processing Technology* 282 (2020), 116704
- [3] Ferchow, J.; Baumgartner, H.; Klahn, C. et al.: Model of surface roughness and material removal using abrasive flow machining of selective laser melted channels. *Rapid Prototyping Journal* 26 (2020) 7, pp. 1165–1176
- [4] Chih-Hua, W.; Wai, K.; Ming, W. et al.: Numerical and experimental investigation of abrasive flow machining of branching channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108 (2020), pp. 2945–2966
- [5] Li, C.; Xu, Q.; Ge, J. et al.: Research on the incidence of soft abrasive flow to a wall and the machining characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 237 (2020) 13, pp. 2062–2072
- [6] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.: Definiertes Kantenrunden durch Strömungsschleifen. *Wt Werkstattstechnik online* 6 (2016), pp. 400–406
- [7] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.: Surface integrity and chip formation in abrasive flow machining. *Procedia CIRP* 71 (2018), pp. 446–452
- [8] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.: Modelling of Material Removal in Abrasive Flow Machining. *International Journal of Automation Technology* 12 (2018), pp. 883–891
- [9] Fu, Y.; Gao, H.; Yan, Q. et al.: A new predictive method of the finished surface profile in abrasive flow machining process. *Precision Engineering* 60 (2019), pp. 497–505
- [10] Haibo, W.; Xuanping, W.; Hang, G. et al.: A study on the influences of abrasive media's viscoelasticity on entrance effect in abrasive flow machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141 (2019) 6, 061010
- [11] Can, P.; Qihao, X.; Lan, D. et al.: Novel insights into abrasive flow machining uniformity for SLM. *International Journal of Mechanical Sciences* 262 (2024), 108726
- [12] Vincent, D.; Salaar, K.; Alonzo, T.: Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration* 1 (2020), pp. 76–87
- [13] Saini, P.; Arora, M.; Ravi Kumar, M. N. V.: Poly (lactic acid) Blends in Biomedical Applications. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107 (2016), pp. 47–59
- [14] Pal, B.; Cho, Y. I.; Choi, S.: Separation and reattachment of non-newtonian fluid flows in a sudden expansion pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 37 (1990) 2–3, pp. 175–199
- [15] Rosi, G.; Barnes, M.; Kaiser, F. et al.: Exploring separation and reattachment in shear-thinning suspensions through pipe wall ultrasound measurements. *Experiments in Fluids* 66 (2025), 99

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

André Rozek
andre.rozek@iwf.tu-berlin.de

Elias Santino Berg

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

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sophie Gröger

Stefanie Stöckel

Sven Fiebig

Technische Universität Chemnitz
Professur Fertigungsmesstechnik
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz
www.tu-chemnitz.de/mb/iwp

LIZENZ



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