Methoden zur Strömungsfeldmessung der Kühlmittelzufuhr beim Schleifen

Methods for coolant flow field measurement in surface grinding

Björn Espenhahn¹, Lukas Schumski², Christoph Vanselow¹, Daniel Meyer^{2,3}, Dirk Stöbener^{1,3}, Andreas Fischer^{1,3}

¹Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen

²Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Badgasteiner Straße 3, 28359 Bremen ³Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes

Schleifen, Zweiphasenströmung, PIV, Shadowgraphy, in situ grinding, two-phase flow, PIV, shadowgraphy, in situ

Zusammenfassung

Da der Kühlmechanismus beim industriellen Schleifen nicht vollständig verstanden ist, ist eine Messung des Strömungsfeldes der Kühlflüssigkeit in der Nähe der Schleifscheibe gewünscht. Die zufällig fluktuierende Oberfläche des Zweiphasenfreistrahls der Kühlströmung führt jedoch zu unvorhersehbaren Lichtablenkungen und -reflexionen, die optische Strömungsmessungen erschweren. Um qualitative und quantitative Informationen über das Strömungsgeschwindigkeitsfeld der Kühlflüssigkeit zu erhalten, kommen hier die Ansätze der Shadowgram Image Velocimetry (SIV) bzw. der Particle Image Velocimetry (PIV) zum Einsatz, deren quantitative Geschwindigkeitsauswertungen auf der Methode der Kreuzkorrelation basieren. Hierzu werden sowohl Strömungsvisualisierungen in Form von Schattenbildern mit einer diffusen Hintergrundbeleuchtung als auch eine Beleuchtung von Streupartikeln in der Strömung mit einem Laserlichtschnitt durchgeführt. Bei den Untersuchungen des Strömungsfelds der Kühlflüssigkeit zeigt sich, dass die PIV Strömungsmessungen innerhalb des laminaren Bereichs des Kühlmittelstrahls ermöglicht, wobei die SIV diese Messungen ergänzt und insbesondere für die turbulente Strömungsbereiche geeignet ist.

Als Ergebnis wird gezeigt, dass optische Strömungsfeldmessungen der Kühlmittelströmung in einer Schleifmaschine machbar sind, so dass darüber das Verständnis der Strömungsmechanismen, die den Schleifkühlprozess beeinflussen, erweitert werden kann.

Einleitung

Das Schleifen ist ein essenzieller Fertigungsprozess zur Herstellung metallischer Bauteile. Bei diesem Prozess wird Kühlschmierstoff (KSS) aus einer Düse auf die Schleifscheibe gespritzt, um die Wärmeerzeugung beim Schleifprozess zu regulieren und Schleifbrand zu vermeiden C. Heinzel et al. 2015. Um den Kühlprozess möglichst nachhaltig zu gestalten ohne die Bauteilqualität zu mindern, ist die Kühlmittelströmung hinsichtlich der Kühlmittelmenge und -leistung zu optimieren, siehe M. Gradeck et al. 2011. Bisher wurden mehrere Experimente und Simulationen unterschiedliche zur Charakterisierung der Kühlleistung für KSS-Anströmbedingungen wie verschiedene Düsenformen, Anströmwinkel und Volumenströme durchgeführt, wobei nur eine indirekte Optimierung der KSS-Strömung erreicht wurde (C. Heinzel et al. 2020; D. Meyer und A. Wagner 2016; W. Stachurski et al. 2019; E. Brinksmeier et al. 2015). Um die zugrundeliegenden Strömungsmechanismen zu verstehen, die für eine effiziente Kühlung des Schleifprozesses verantwortlich sind, werden prozessbegleitende Strömungsfeldmessungen der Strömungsgeschwindigkeit der Kühlflüssigkeit benötigt M.N. Morgan et al. 2008. Eine direkte KSS-Strömungsfeldmessung wurde in einer Schleifmaschine bisher jedoch noch nicht durchgeführt.

Qualitative Strömungsuntersuchungen der KSS-Strömung in der Schleifmaschine mit dem Messprinzip der Shadowgraphy sind bereits erfolgt von P. Geilert et al. 2017, ebenso wie eine Strömungsvisualisierung basierend auf turbulenten Strukturen in Luftströmungen siehe D. R. Jonassen et al. 2006. Dabei wird das Messvolumen homogen ausgeleuchtet und Änderungen der Brechzahl in Luft oder der Oberflächengeometrie von Flüssigkeiten führen zu Schattenwürfen, mit denen sich die Strömung visualisieren lässt, siehe G. S. Settles und M. J. Hargather 2017. Das resultierende Kamerabild der beleuchteten Strömung wird als Schattenbild bezeichnet und ist exemplarisch für eine Strömung in Wechselwirkung mit einer Schleifscheibe in Abb. 1 dargestellt. Um Erkenntnisse über die entscheidenden Faktoren für die effiziente Versorgung der Kontaktzone beim Schleifen zu gewinnen, ist jedoch eine quantitative Geschwindigkeitsmessung des Kühlmittelströmungsverhaltens erforderlich.



Abb. 1: Schematische Darstellung des Kühlschmierstoffzufuhr im Schleifprozess ohne Werkstück mit Hintergrundbeleuchtung. Die Kühlströmung wird aus der Düse als Freistrahl auf die rotierende Schleifscheibe gestrahlt, wo die Flüssigkeit in einzelne Tropfen zerstäubt.

eignen ist zu prüfen.

Das Schattenbild der Kühlmittelströmung in Abb. 1 zeigt charakteristische Strukturen, die gegebenenfalls durch Algorithmen in Bildserien verfolgt werden können. Damit scheint eine quantitative Geschwindigkeitsmessung des Kühlmittelströmungsfeldes über eine qualitative Strömungsvisualisierung hinaus prinzipiell machbar. Ob sich die turbulenten Strukturen für eine quantitative Geschwindigkeitsmessung der Kühlmittelströmung hinreichend gut

Wenngleich es Anhaltspunkte gibt, dass Doppler-basierte Messverfahren robuster gegenüber Lichtbrechungen zu sein scheinen, wird in diesem Artikel die Particle Image Velocimetry (PIV) für zusätzliche Geschwindigkeitsmessungen bevorzugt, da sie weniger spezifische Anforderungen an den eingesetzten Laser stellt. Dabei ist der Einfluss der Lichtbrechung auf die PIV-Messtechnik am Ort des Phasenübergangs der Zweiphasenströmung ein entscheidender Faktor und hängt maßgeblich von der Oberflächengeometrie des Phasenübergangs ab. Für stationäre Zweiphasenströmungen kann die systematische Lichtablenkung durch Ray-Tracingund Mapping-Algorithmen korrigiert werden, wie von Y. Wu et al. 2019; J. R. Castrejón-Pita et al. 2012 gezeigt wurde. Somit kann von einer generellen Messbarkeit mit PIV in laminaren Zweiphasenströmungen ausgegangen werden. Im konventionellen Schleifbetrieb sind die vorliegenden Strömungen jedoch stark turbulent, siehe S. P. Lin und R. D. Reitz 1998, so dass zufällig fluktuierende Variationen auf der Oberfläche zu erwarten sind und damit keine stationäre Zweiphasenströmung vorliegt. Die Fluktuationen führen zu Variationen im Beleuchtungsund Beobachtungsstrahlengang und damit zu einer erhöhten Messunsicherheit R. Schlüßler et al. 2014. Für PIV-Messungen in fluktuierenden Brechungsindexfeldern in Luft wurde die systematische Messabweichung ermittelt und teilweise korrigiert (C. Vanselow und A. Fischer 2018; C. Vanselow et al. 2019). Ansätze zur Messung und Korrektur der Messabweichung bei zufällig fluktuierenden Oberflächen des Phasenübergangs Flüssigkeit-Luft wurden vorgeschlagen, dabei ist das Verfahren von M. Teich et al. 2018 zu langsam ist oder andere Verfahren wie von N. Koukourakis et al. 2016 nur für Änderungen in der Größenordnung von Mikrometern durchführbar sind. Tatsächlich sind PIV-Messungen der Kühlmittelströmung in einer Schleifmaschine bisher nicht untersucht worden. Insbesondere ist die Anwendbarkeit von PIV zur Messung der Freistrahlströmung in einer Schleifmaschine noch zu klären.

Messmethode

Um die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffstrahls mit optischer Messtechnik zu messen, wird die Bewegung der Schattenwürfe von turbulenten Strukturen im Strahl durch eine Bildkorrelation ausgewertet, ähnlich zur Auswertung der Bewegung von Seedingpartikeln bei der PIV. Für diesen Messansatz wird hier der Begriff Shadowgram Imaging Velocimetry (SIV) verwendet, also die Verfolgung charakteristischer Strömungsstrukturen, die mit der Shadowgraphy visualisiert werden. Um das Strömungsverhalten und die Verwendung der Strukturen in der Strömung auf die Geschwindigkeitsauswertung bewerten zu können, werden Vergleichsmessungen mit PIV durchgeführt. Sowohl das Strömungsverhalten der Partikel als Tracer, als auch die Auswertung von den Partikelbildern ist gut bekannt, weshalb die PIV-Messung als Referenzmessung dienen soll.



Abb. 2: Schematische Darstellung der Strömungszufuhr und der Strömungsvisualisierung (Seitenansicht) mit einem Laserlichtschnitt (PIV) und der diffusen Hintergrundbeleuchtung (Shadowgraphy). Bildaufnahmen werden mit einer Kamera erzeugt, die in z-Richtung auf Höhe des Düsenauslasses schaut.

Um das PIV- und SIV-Messystem in der Schleifmaschine zu realisieren, wird die in Abb. 2 dargestellte Messanordnung umgesetzt. Eine diffuse Hintergrundlichtquelle wird verwendet, um das Fluid zu beleuchten, und eine Kamera auf der gegenüberliegenden Seite nimmt das resultierende Schattenbild auf. Dabei ist zu beachten, dass keine Tiefeninformation erfasst wird und eine Überlagerung von Strömungsstrukturen aus unterschiedlichen Tiefen des Fluids nicht getrennt werden kann und die Identifikation der Strukturen vermindert.

Um diesen Einfluss bewerten zu können, werden Messungen in einer Drauf- und Seitenansicht der Strömung durchgeführt. In der Draufsicht liegt ein gutes Gesamtbild der Strömung entlang der Breite der etwa 2 mm dicken Strömungsschicht vor. Aufgrund der geringen Schichtdicke kann da-

von ausgegangen werden, dass eine Strukturüberlagerung aus unterschiedlich strömenden Schichten ausgeschlossen ist. Für eine Messung der Strömung mit Interaktion der Schleifscheibe muss jedoch seitlich auf die Strömung geschaut werden, wie es in Abb. 2 dargestellt ist. Ein Vergleich der Messungen von Drauf- und Seitenansicht gibt Information darüber, wie stark sich der Einfluss der volumetrischen Beobachtung auf die Messergebnisse auswirkt.

Abschließend wird untersucht, wie sich die Bewegung der Strömungsmerkmale zur Strömungsgeschwindigkeit verhält. Dazu wird zusätzlich die Geschwindigkeit des Freistrahls in beiden Perspektiven mit PIV als Referenzmessverfahren bestimmt. Aufgrund des Einflusses der Lichtbrechung muss jedoch auch die Durchführbarkeit von PIV-Messungen bestätigt werden. Schwierigkeiten können bei der Beleuchtung in Form von ungewollten Reflexionen und Beobachtung durch optische Verzerrungen in den Partikelbildern durch den Einfluss der Lichtbrechung auftreten. Diese Einflüsse nehmen mit dem Auftreten von durch Turbulenzen verursachte Oberflächenstrukturen in der Strömung zu. Um die Durchführbarkeit von PIV für Messungen im Kühlmittelfreistrahl sicherzustellen, werden zunächst Messungen für eine laminare Freistrahlströmung ohne turbulente Strukturen durchgeführt. Nachdem die Machbarkeit für eine laminare Zulaufströmung nachgewiesen wurde, erfolgen Messungen an einer laminarturbulenten instationären Strömung, bei der schwache Strömungsstrukturen vorhanden sind und auch Strömungsmessungen mit SIV machbar sind. Ein Vergleich der absoluten Messunsicherheiten für den laminaren und laminar-turbulenten Fall erlaubt eine Bewertung der turbulenten Strukturen auf die PIV-Messung.

Versuchsaufbau und Signalverarbeitung

Die experimentellen Untersuchungen finden in einer konventionellen Schleifmaschine für Volumenströme von 15 L/min, 25 L/min und 35 L/min statt. Die KSS-Zufuhr erfolgt über eine Rouse-Düse mit einer Auslassbreite von 21 mm, angepasst an die Breite der Schleifscheibe. Für die Untersuchungen an der KSS-Zufuhr liegt eine Auslassöffnung von 1,6 mm Höhe vor,



Abb. 3: Messanordnung in der Schleifmaschine für SIV.

wohingegen für die Untersuchungen an der Schleifscheibe eine reduzierte Auslasshöhe von 0,9 mm eingesetzt, um auf industriell verwendete KSS-Einstrahlgeschwindigkeiten zu kommen. Die verwendete Schleifscheibe hat einen Radius von 200 mm und rotiert mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 25 m/s.

Der experimentelle Aufbau für die SIV-Messtechnik ist in Abb. 3 dargestellt. Zur Strömungsvisualisierung der Shadowgraphy ist an der Rückwand im Arbeitsbereich der Schleifmaschine eine LED-Hintergrundbeleuchtung mit einer Lichtstärke von 2400 Im in Neutralweiß (Farbtemperatur 4300 K) angebracht. Zeitlich aufgelöste Bildaufnahmen mit

einer Aufnahmerate von 13.700 Hz vom Schattenbild der Strömung werden mit der High-Speed-Kamera Pro Y4 von Integrated Design Tools Motion in Kombination mit einem Sigma 105 mm F2,8 EX Makro Objektiv erreicht.

Als Tracer für die PIV-Messungen dienen Polyamid-Streupartikel mit einer gemittelten Größe von 50 µm und einer Dichte von 1,03 g/cm³, die in den Kühlmitteltank der Schleifmaschine gefüllt werden. Zur Beleuchtung der Streupartikel wird ein gepulster Nd:YAG-Doppelpuls-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm mit einer maximalen Energie pro Puls von 200 mJ und einer Pulslänge von 10 ns des Typs Evergreen der Firma Quantel verwendet. Die Messrate der Partikelbilder beträgt 15 Hz, wobei jede Messung eine Doppelaufnahme der Partikel umfasst, deren zwei Bilder mit einem zeitlichen Abstand zwischen 70 µs – 100 µs erfasst werden. Um den Lichtschnitt in der Schleifmaschine realisieren zu können, wird ein Lichtleitarm verwendet, der die notwendige Flexibilität und den Schutz der optischen Komponenten vor kontaminierendem Kühlmittel gewährleistet. Für die Aufnahmen der Partikelbilder wird eine Andor Zyla 5.5 Mpx sCMOS-Kamera mit dem Zeiss Planar T* 1,4/50 Objektiv verwendet.

Machbarkeitsstudie zu PIV-Messungen der laminaren Zufuhrströmung

Zuerst wird gezeigt, dass die PIV-Messung für eine laminare Kühlmittelstrahlströmung anwendbar ist und somit im Folgenden als Referenzmessmethode dienen kann. Deshalb wurden PIV-Geschwindigkeitsfeldmessungen für die Drauf- und Seitenansicht der laminaren Kühlmittelzufuhrströmung mit einer Durchflussrate von 15 L/min durchgeführt. Die gemittelten 2d-Geschwindigkeitsfelder und zugehörigen Standardunsicherheiten beider Perspektiven sind in Abb. 4 dargestellt. Die Strömungsrichtungen sind durch ihre Vektoren dargestellt und der Hintergrund zeigt den farbkodierten Betrag der Geschwindigkeitskomponenten *U* in m/s. Gemessen wurde ab einer Entfernung von 40 mm hinter dem Auslass über eine Länge von 90 mm. Die Messung aus der Draufsicht (links oben) zeigt ein homogenes Geschwindigkeitsfeld entlang der Strömungsrichtung von 5,55 m/s mit Abweichungen von maximal 0,2 m/s an den Rändern der Strömung. In der Seitenansicht (links unten) ergibt sich ein sehr ähnlicher Geschwindigkeitsverlauf mit derselben mittleren Strömungsgeschwindigkeit, wobei eine höhere Geschwindigkeitsabnahme entlang der Strömungsrichtung zu erkennen ist.

Als Maß der Messunsicherheit wird die Standardabweichung vom Mittelwert von 350 Messungen betrachtet. Für die Draufsicht (rechts oben) zeigen sich Unsicherheiten von 0,2 m/s bis zu 0,6 m/s. Die erhöhten Unsicherheiten im anfänglichen Bereich der Strömung sind auf eine nicht ausreichende Beleuchtung des PIV-Systems in der Schleifmaschine zurückzuführen. Folglich ist dieser Einfluss nicht der Zweiphasenströmung zuzuordnen, sondern den erschwerten Messbedingungen in einer Schleifmaschine. In der Seitenansicht (rechts unten) sind konstant niedrige Messabweichungen im Bereich von 0,2 m/s erzielt worden, wobei diese im letzten Bereich der Strömung schlagartig auf bis zu 0,8 m/s ansteigt. Die erhöhten Unsicherheiten entstehen durch systematisch auftretende lokale Reflexionen, welche nicht unterdrückt werden können. Somit werden, trotz der schwierigen Messbedingungen hinsichtlich der Zugänglichkeit und des Einflusses der Lichtbrechung, im gut ausgeleuchteten Bereich PIV-Messungen der laminaren Kühlmittelzufuhr mit einer Standardabweichung der zufälligen Messabweichungen von 4 % erreicht.



Abb. 4: Links: Geschwindigkeitsfelder aus den PIV-Messungen für die Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten). Rechts: Berechnete Standardabweichung vom Mittelwert über 350 Messungen von der Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten).

Laminar-turbulente Strömung: Vergleich zwischen PIV und SIV

Um zu prüfen, ob die oberflächennahen charakteristischen Strukturen der KSS-Zufuhr-Strömung für SIV-Messungen geeignet sind, werden die Geschwindigkeitsmessungen von PIV und SIV miteinander verglichen. Dafür wird ein Volumenstrom von 25 L/min benutzt, bei dem die Strömung in einem laminar-turbulenten Übergangszustand vorliegt. In dieser Strömung treten schwach ausgeprägte Strukturen in der Strömung auf, die zum einen im Schattenbild für die SIV sichtbar sind, zum anderen aber die Beleuchtung und Partikelbeobachtung der PIV-Messtechnik nicht zu sehr beeinflussen.

In Abb. 5 sind die gemittelten Geschwindigkeitsfelder von 350 PIV-Messungen und 1000 SIV-Messungen für die Drauf- und Seitenansicht. Für alle Messungen zeigt sich eine mittlere Geschwindigkeit um 9,5 m/s für die KSS-Zufuhrströmung, wobei es in den Geschwindigkeitsverläufen und der Standardabweichung deutliche Unterschiede gibt. Für die PIV-Messtechnik zeigt sich dieselbe Standardabweichung von 4 % für beide Perspektiven, wohingegen die SIV eine Standardabweichung von 6 % in der Draufsicht und 11 % in der Seitenansicht aufweist. Diese Ergebnisse zeigen auf, dass die PIV-Messtechnik weniger stark durch optische Verzerrungen beeinträchtigt zu sein scheint, als ursprünglich vermutet und sich demnach für eine Untersuchung der KSS-Zufuhrströmung aus einer Rouse-Düse für laminare und laminar-turbulente Strömungsverhältnisse gut eignet. Für die SIV-Messtechnik zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zu der PIV-Messung in der Draufsicht, da die Geschwindigkeitsverläufe nahezu identisch sind. Die erhöhte Standardabweichung ist auf eine Dekorrelation der aufeinanderfolgenden Bilder zurückzuführen, was aus der veränderlichen Form der turbulenten Strukturen resultiert. Dieser Effekt fällt besonders stark in der Seitenansicht auf, bei der volumetrisch durch den gesamten Freistrahl beobachtet wird. Die turbulenten Strukturen können nicht ihrer Position in der Tiefe zugeordnet werden und es findet eine überlagerte Beobachtung statt. Dabei kommt es zu Fehlinterpretation der Zuordnung der Strukturen und entsprechend erhöht sich die Messunsicherheit. Dennoch sind die mittleren Geschwindigkeitsverläufe von allen



Abb. 5: Mittlere Geschwindigkeitsfelder für PIV und SIV in der Draufsicht (a) und Seitenansicht (b).

Messungen unabhängig von der Messmethode und Messansicht qualitativ und quantitativ vergleichbar. Folglich spiegelt die Bewegung der turbulenten Strukturen die Strömungsgeschwindigkeit wider, die mit der diffusen Hintergrundbeleuchtung visualisiert werden kann. Dies ermöglicht eine Messung der Zufuhrgeschwindigkeit, was ein entscheidendes Maß für die Kühlbedingung im Schleifprozess darstellt, wie von M.N. Morgan et al. 2008 und C. Heinzel et al. 2020 beschrieben.

Strömungsfeldmessung an der rotierenden Schleifscheibe

Das Strömungsfeld vom Kühlprozess ohne Werkstück ist sowohl für den KSS-Zufuhrbereich als auch für den Interaktionsbereich mit der Schleifscheibe mit der SIV-Messtechnik für Volumenströme von 15 L/min, 25 L/min und 35 L/min gemessen worden. Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit betrug dabei 25 m/s. Die Messergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt.

Durch die Verwendung von sowohl den turbulenten Strukturen als auch den entstehenden Tropfen bei der Interaktion mit der Schleifscheibe als flow tracer ist es mit der SIV möglich,

das gesamte Strömungsgeschwindigkeitsfeld des Kühlprozesses quantitativ zu bestimmen. Als grobes Maß für die Zufuhrbedingung vom KSS in den Schleifprozess wird oft das Geschwindigkeitsverhältnis R zwischen Einstrahlgeschwindigkeit und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit verwendet, welches um 0,8 bis 1 als ausreichend für eine hohe Kühleffizienz angenommen wird, wie es von M.N. Morgan et al. 2008 beschrieben wird. Die hier

Tab. 1: Übersicht der gemessenen KSS- Zufuhrgeschwindigkeiten v_{KSS} und Ge- schwindigkeitsverhältnisse R.			
Q / L/min	<i>v_{KSS} /</i> m/s	$R = \frac{v_{KSS}}{w}$	

Q/L/min	v_{KSS} / m/s	$R = \frac{v_{RSS}}{v_s}$
15	12,4 ± 1,3	0,50 <u>+</u> 0,05
25	19,1 ± 1,8	0,76 ± 0,07
35	26 <u>+</u> 2,8	1,04 <u>+</u> 0,11

erreichten Geschwindigkeitsverhältnisse sind in Tab. 1 dargestellt.



Abb. 6: Strömungsgeschwindigkeitsfeld von der KSS-Zufuhr und der Interaktion mit der Schleifscheibe. Gemessen für 15 L/min (a), 25 L/min (b) und 35 L/min (c) bei einer Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit von 25 m/s.

In den Geschwindigkeitsfeldern ist ein Unterschied in der Verteilung der Geschwindigkeiten zu erkennen. Für die Volumenströme von 15 L/min und 25 L/min sind die Einstrahlgeschwindigkeiten der KSS-Zufuhr geringer als die der Umfangsgeschwindigkeit (R < 1). Deswegen wird der KSS beim Auftreffen auf die Oberfläche der Schleifscheibe beschleunigt. Für einen Volumenstrom von 35 L/min ist das Geschwindigkeitsverhältnis von $R \approx 1$ erreicht, weswegen keine Beschleunigung der KSS-Strömung beim Auftreffen auf die Schleifscheibe mehr erfolgt. Die unterschiedlichen Phänomene sind in der Geschwindigkeitsverteilung der Strömungsfeldmessungen erkennbar und stützen somit die gegenwärtigen Erklärungsansätze zum Verhalten der KSS-Strömung beim Auftreffen auf eine rotierende Schleifscheibe.

Zusammenfassung und Ausblick

Zum ersten Mal konnte die KSS-Strömung in einer Schleifmaschine sowohl für die Zufuhr als auch den Bereich der Interaktion mit der Schleifscheibe quantifiziert werden. Für die Messungen der KSS-Zufuhr wurde die SIV eingesetzt, die im Vergleich zu der PIV-Messtechnik zwar höhere Messunsicherheiten aufweist, jedoch deutlich einfacher umzusetzen ist und insbesondere bei Oberflächenstrukturen durch Turbulenzen keinen Störungen durch Lichtreflexionen unterliegt. Folglich ist SIV für die KSS-Zufuhr eine brauchbare Alternative zu PIV.

Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass mit SIV plausible Strömungsfeldmessungen der gesamten Strömung vom Kühlprozess erzielt werden können. Die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen im Kontakt mit der Schleifscheibe stimmen sowohl mit den absoluten Geschwindigkeitswerten als auch mit deren zu erwartenden Beschleunigungen überein. Lediglich die Strömung im direkten Kontakt mit der Schleifscheibe ist aufgrund der nicht auflösbaren Strukturen nicht messbar. Hierzu sind weitere Untersuchungen zur Messbarkeit der Strömung in Abhängigkeit von den Beleuchtungsbedingungen zu empfehlen.

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 415003387

Literaturverzeichnis

C. Heinzel, B. Kirsch, D. Meyer, J. Webster **2020**: "Interactions of grinding tool and supplied fluid", CIRP Annals, Vol. 2, pp. 624–645.

C. Heinzel, D. Meyer, B. Kolkwitz, J. Eckebrecht **2015**: "Advanced approach for a demand-oriented fluid supply in grinding", CIRP Annals, Vol. 1, pp. 333–336.

C. Vanselow, A. Fischer **2018**: "Influence of inhomogeneous refractive index fields on particle image velocimetry", Optics and Lasers in Engineering, pp. 221–230.

C. Vanselow, D. Stöbener, J. Kiefer, A. Fischer **2019**: "Particle image velocimetry in refractive index fields of combustion flows", Experiments in Fluids, Vol. 10.

D. Meyer, A. Wagner **2016**: "Influence of metalworking fluid additives on the thermal conditions in grinding", CIRP Annals, Vol. 1, pp. 313–316.

D. R. Jonassen, G. S. Settles, M. D. Tronosky **2006**: "Schlieren "PIV" for turbulent flows", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 3-4, pp. 190–207.

E. Brinksmeier, D. Meyer, A.G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann **2015**: "Metalworking fluids—Mechanisms and performance", CIRP Annals, Vol. 2, pp. 605–628.

G. S. Settles, M. J. Hargather **2017**: "A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques", Measurement Science and Technology, Vol. 4, pp. 42001.

J. R. Castrejón-Pita, S. D. Hoath, I. M. Hutchings **2012**: "Velocity Profiles in a Cylindrical Liquid Jet by Reconstructed Velocimetry", Journal of Fluids Engineering, Vol. 1.

M. Gradeck, A. Kouachi, J.L. Borean, P. Gardin, M. Lebouché **2011**: "Heat transfer from a hot moving cylinder impinged by a planar subcooled water jet", International Journal of Heat and Mass Transfer.

M. Teich, J. Grottke, H. Radner, L. Büttner, J. W. Czarske **2018**: "Adaptive particle image velocimetry based on sharpness metrics", Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, Vol. 1.

M.N. Morgan, A.R. Jackson, H. Wu, V. Baines-Jones, A. Batako, W.B. Rowe **2008**: "Optimisation of fluid application in grinding", CIRP Annals, Vol. 1, pp. 363–366.

N. Koukourakis, B. Fregin, J. König, L. Büttner, J. W. Czarske **2016**: "Wavefront shaping for imaging-based flow velocity measurements through distortions using a Fresnel guide star", Optics Express, Vol. 19, pp. 22074.

P. Geilert, C. Heinzel, A. Wagner **2017**: "Grinding Fluid Jet Characteristics and Their Effect on a Gear Profile Grinding Process", Inventions, Vol. 4, pp. 27.

R. Schlüßler, J. Czarske, A. Fischer **2014**: "Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 1, pp. 93–104.

S. P. Lin, R. D. Reitz **1998**: "Drop and spray formation from a liquid jet", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 1, pp. 85–105.

W. Stachurski, J. Sawicki, K. Krupanek, K. Nadolny **2019**: "Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 5-8, pp. 1999–2012.

Y. Wu, Y. Liu, S. Shao, J. Hong **2019**: "On the internal flow of a ventilated supercavity", Journal of Fluid Mechanics, pp. 1135–1165.