

Optimierung der Kühlschmiermittelverteilung vor dem Schleifspalt beim Aussenrunds Schleifen

Christoph BAUMGART¹, Nicolás CALLEJO GOENA, Friedrich KUSTER, Konrad WEGENER
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zürich, Schweiz
¹baumgart@iwf.mavt.ethz.ch

Zusammenfassung:

Beim Schleifen findet ein hoher Wärmeeintrag in das Werkstück statt, weshalb der Einsatz von Kühlschmiermitteln (KSM) essentiell ist und dies auf weitere Sicht auch bleiben wird. Heutige Systeme zur Einbringung von KSM arbeiten oft mit geringem Druck und grossen Volumenströmen, mit denen durchaus stabile Prozesse gefahren werden können. Werden jedoch hohe Ansprüche an Oberflächenbeschaffenheit und Formgenauigkeit gestellt muss die Zuführung der KSM optimiert werden, um wirtschaftliche Zerspanleistungen zu erreichen oder hohe Schnittgeschwindigkeiten nutzen zu können. Anschaffung, Entsorgung sowie Nutzung der KSM sind mit hohem Aufwand und erheblichen Kosten verbunden. Neue Konzepte werden gesucht, um die Energieeffizienz und Ökobilanz von Werkzeugmaschinen und damit der Fertigung im Allgemeinen durch die Minimierung des Einsatzes von KSM zu verbessern. Diese Arbeit soll eine Möglichkeit zeigen, wie beim Aussenrunds Schleifen mit geringen Zerspanraten und hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Einsatz von KSM massgeblich reduziert werden kann, indem die Menge des ungenutzten KSMs minimiert wird. Dazu wird zunächst das Einflussgebiet eines einzelnen KSM-Strahls einer Düse mit rundem Querschnitt auf ein relativ breites Werkstück längs der Drehachse untersucht. Ausgehend von den Ergebnissen soll eine Konfiguration von mehreren KSM-Kanälen mit konventionell im Einsatz befindlichen System hinsichtlich der erreichten Oberflächenqualität und dem KSM-Volumenstrom verglichen werden. Die bei der Rotation der Schleifscheibe entstehende Luftströmung wird berücksichtigt.

Schlüsselwörter: Kühlschmiermittel, Energieeffizienz, Aussenrunds Schleifen, useful flow rate

1. Einleitung

Schleifen zählt zu den spanenden Bearbeitungsverfahren, bei denen nach Malkin et al. [1] mehr als die Hälfte der Bearbeitungsenergie, die beim Trennen und Umformen des Werkstoffs aufgebracht wird, in das Werkstück fliesst. Nur ein geringer Teil der Energie wird über die Späne abgeführt. Die dabei entstehenden Temperaturen können an die Schmelztemperatur des Werkstoffes heranreichen, wie ebenfalls von Malkin [2] festgestellt wurde. Um gewünschte Oberflächenqualitäten und Formgenauigkeiten zu erreichen sowie Materialschäden durch zu hohe thermische Belastungen zu vermeiden, werden üblicherweise Kühl-Schmiermittel eingesetzt, welche auch weitere Funktionen wie das Spülen der Späne aus der Prozesszone, die Reinigung der Scheibe sowie Korrosionsschutz für die Maschine haben. Nach Brinksmeier et al. [3] kann durch den gezielten Einsatz zudem die Werkzeugstandzeit verbessert und die Formgenauigkeit erhöht werden. Die Versorgung mit Kühlschmiermittel, dessen Aufbereitung und Entsorgung kann einen bedeutenden Kostenfaktor in der Fertigung darstellen. Laut Klocke et al. [4] fallen zwischen 7 – 17% für die Werkstück bezogenen Fertigungskosten in der Automobilindustrie auf die Nutzung von Kühlschmiermittel ab. Neben den ökonomischen Gesichtspunkten ist die Reduzierung oder sogar eine Vermeidung des Kühlschmiermitteleinsatzes beim Schleifen auch aus ökologischer Sicht äusserst wünschenswert. Kühlschmiermittel basieren in der Regel auf

Öl (z.B. Mineralöle oder Emulsionen aus diesen) und enthalten eine komplexe Mischung von Additiven (z.B. gegen Schaum, Pilzbildung oder Geruch). Eine häufige Umwälzung aufgrund hoher Volumenströme bei der Überflutungskühlung oder hohe Drücke bei der Zuführung des Kühlschmiermittels können zu erhöhter Verdampfung und Zerstäubung des KSMs und damit gesundheitlichen Belastung der Maschinenbediener führen, wie von Ramesh et al. [5] angemerkt wird. Während für manche Anwendungen der Einsatz von Minimalmengenschmierung (MMS) möglich ist und kyrogene Aerosol KSM Systeme bei Nischenanwendungen zu finden sind, bleibt die Kühlschmierung mit ausreichenden Mengen KSM für die meisten Schleifprozesse unerlässlich wie unter anderem von Klocke et al. [6] oder Brinksmeier et al. [7] mit den thermischen Grenzen für die Werkstoffe begründet wird.

Mit Hilfe dieser Forschungsarbeit werden Strategien zur Optimierung der Zuführung des KSMs in den Schleifprozess aufgezeigt. Die Verminderung des KSM-Volumenstromes steht dabei im Vordergrund, wobei die geometrischen und Oberflächentoleranzen der Bauteile gewährleistet und thermische Schäden vermieden werden müssen. Wichtiger Bestandteil ist die genaue Untersuchung der Mechanismen zum Eintrag von KSM in den Schleifspalt und die axiale Verteilung des KSMs in diesem beim Runds Schleifen. Zur Bestimmung der minimal notwendigen KSM-Menge gibt es verschiedene Ansätze.

Einige Forschungsarbeiten, wie jene von Jackson et al. [8] oder Gviniashvili et al. [9], beschäftigen sich mit der maximalen Menge KSM, die vom Prozess genutzt werden kann. Allgemeine Regeln sind aufgrund der vielen verschiedenen Parameter der Schleifscheibe (Porosität, Umfangsgeschwindigkeit etc.) und der KSM Zuführbedingungen schwer aufzustellen. Neben einer berechneten minimalen Menge des KSMs sind die Austrittsgeschwindigkeit, die Ausrichtung der KSM-Düse und die Art der Düse entscheidend für die optimale Nutzung. Wichtige Grundlagen zum Aufbau von Kühlschmiermitteldüsen liefert Webster et al. [10] mit einem Design, das auf einen möglichst langen kohärenten KSM-Strahl ausgelegt ist. Morgan et al. [11] führte Untersuchungen zum Geschwindigkeitsfeld am Düsenaustritt durch. Eine drehende Schleifscheibe erzeugt immer eine Luftströmung, welche in der Regel nicht gleichmässig in axialer Richtung, das heisst auch bei geraden Schleifscheiben bezüglich der Mantelfläche, über die Schleifscheibenbreite verteilt ist, wie experimentell zum Beispiel von Wu et al. [12] gezeigt wird. Baines-Jones [13] nutzte CFD-Simulationen, um eine visuelle Darstellung der Luftströmung um die Schleifscheibe zu geben. Die Art der KSM-Düse bestimmt wesentlich welcher Anteil des KSMs in die Schleifzone gelangt und so den Prozess kühlt und schmiert. Massgebend sind dabei die Form des Austrittsquerschnittes und die Strahlqualität. Strömungen mit grossen Störungen begünstigen ein Aufbrechen von einem kohärenten Strahl zu einem Spray, wodurch es zur Durchmischung mit Luft kommt. Dies führt zu einer verminderten Kühlleistung in der Prozesszone. Nach Jackson et al. [14] ist der Anteil des KSMs, der maximal durch die Schleifzone gelangen kann, im Wesentlichen von der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe als auch deren Porosität begrenzt. Während ein Teil des Mediums vor dem Korn oder in Zwischenräumen transportiert wird, kann ein weiterer Teil in den Poren der Schleifscheibe in die Schleifzone beziehungsweise an dieser vorbei befördert werden und hat damit eine Kühlwirkung. Speziell beim Rundschleifen gestaltet sich eine experimentelle Messung der KSM-Menge, die durch den Schleifspalt gelangt, zur Überprüfung der Modelle als äusserst schwierig.

Der Impuls des Flüssigkeitsstrahls muss zudem ausreichen um die Luftströmung zu durchbrechen, damit diese auf die Schleifscheibe und in die Schleifzone gelangen kann. Die dazu nötige Strahlgeschwindigkeit entspricht der minimalen Austrittsgeschwindigkeit aus der KSM-Düse. Alte und viel zitierte Anhaltswerte für die minimale Strahlaustrittsgeschwindigkeit des KSMs, die auch heute in der Industrie noch weit verbreitet sind, gehen von 60-100% der Schnittgeschwindigkeit aus, welche mit Standard KSM Zuführsystemen in der Regel nicht erreicht werden kann. In jüngerer Zeit konnten diese auf etwa 30% reduziert werden. Dieser Wert ist abhängig vom Aufbau und der Ausrichtung der Kühlschmiermitteldüse und der Schleifscheibe.

2. Materialien und Methoden

Zur Reduzierung des KSM-Volumenstroms müssen zwei wesentliche Dinge beachtet werden: Volumenströme, die höher sind als die physikalische Grenze für die Strömung durch den Schleifspalt, dienen nicht der Schmierung des Prozesses. Weiterhin kann abhängig von der Art der Zuführung, wie beispielsweise durch falsche Dimensionierung oder Ausrichtung der Düse sowie Abprallen des KSMs an der Schleifscheibe, ein Teil des KSMs die Schleifzone nicht erreichen. Dieses KSM kann unter Umständen das Werkstück und die Schleifscheibe kühlen, jedoch nicht in der Schleifzone, in der die höchste thermische Belastung vorliegt. Der Anteil nützlicher Strömung (*useful flow* nach [14]) ist mit möglichst zielgerichteten Strahlen zu erhöhen.

Für genaue Messungen des Einflusses einer bestimmten Menge KSM wurde ein Versuchsaufbau auf einer Rundschleifmaschine mit einzelnen KSM-Kanälen entwickelt. Anhand eines Einstechschleifprozesses wird untersucht, wie gross der Einflussbereich eines einzelnen KSM-Strahles auf ein Werkstück ist. Dazu soll insbesondere die Verteilung des KSM beim Aussenrundschleifen entlang der Drehachse betrachtet werden. Ist das Einflussgebiet eines einzelnen Strahles bekannt, kann auch eine optimale Verteilung von mehreren Kanälen einer Kühlschmiermitteldüse gefolgert werden. Einzelne Strahlen bieten gegenüber konventionellen Systemen, die hier auch gegenübergestellt werden sollen, den Vorteil eines geringeren Austrittsquerschnittes sowie die Möglichkeit zur freien Anordnung über der Schleifzone. Bei geringem Austrittsquerschnitt kann der Volumenstrom reduziert und dennoch eine vergleichsweise hohe Austrittsgeschwindigkeit des KSMs erreicht werden. Wichtige Messgrössen, die hierbei zum Vergleich der Zuführung des KSMs untersucht werden sollen, sind der Einfluss auf die Randschichten des Materials, die Formfehler des Werkstücks und die Rauigkeit und deren axiale Verteilung auf dem Werkstück. Variiert werden dabei der Volumenstrom und das Verhältnis zwischen Austrittsgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit, welches mit einem Ventil oder dem Austrittsquerschnitt der einzelnen Kanäle angepasst werden kann.

2.1 Versuchsanlage für die Schleifexperimente

Für die Untersuchungen dient eine Studer S31 Universalrundschleifmaschine. Die Maschine wurde vor den Versuchen mit neuer Emulsion befüllt (Blaser B-Cool 9665, Konzentration 4%, regelmässige Kontrolle) und verfügt über einen etwa 1000l grossen Tank, was für die Temperaturbeständigkeit von Vorteil ist. Der Versuchsraum befindet sich drei Stockwerke unter der Erde und ist klimatisiert, sodass äussere thermische Einflüsse über den Tag und auch über Jahreszeiten als gering einzuschätzen sind. Die Versorgung mit Kühlschmiermittel kann über ein Ventil am Maschineneingang gedrosselt werden. Folgende Modifikationen wurden vorgenommen und sind in Abbildung 1 dargestellt. Über einen Adapter und eine gerade Einlaufstrecke sind ein Volumenstrommessgerät

(IFM Electronic SU8000) und Piezoelektrischer Drucksensor (Kistler Type 4005B) an der regulären KSM-Versorgung der Maschine angeschlossen. Der maximale statische Druck, der am Anschluss der Düse gemessen werden kann beträgt etwa 1.9bar . An einem rotationssymmetrischen Verteiler wird die Strömung gleichmässig auf bis zu acht einzelne Kanäle aufgeteilt und über Schläuche und Kupplungen an einzelne, gerade, hydraulische Rohre mit drei verschiedenen Innendurchmessern (1.5 , 2.0 und 3.0mm) und einer Länge von mindestens 140mm angeschlossen. Die Anzahl der verwendeten Einzeldüsen ist zwischen einem und acht frei wählbar. Es wurden Runddüsen gewählt, da diese für einen Einzelstrahl die strömungstechnisch günstigste Variante darstellen. Die relativ lange Einlaufstrecke erlaubt es Störungen in der Strömung durch die Anschlüsse abzubauen und dient als Beruhigungsstrecke für das KSM. Die Maske mit den Kanälen wurde an einer in vier Achsen verstellbaren Halterung befestigt, mit der der Düsenaustritt im Winkel zur Scheibe sowie in allen drei Raum-Koordinaten verstellt werden kann. Zudem besteht die Möglichkeit an derselben Schleifscheibe konventionelle KSM-Düsen zum Vergleich zu nutzen, wie etwa Flachdüsen mit rechteckigem Querschnitt oder das Loc-Line – System. Die Korundschleifscheibe mit keramischer Bindung (Aussendurchmesser 500mm , Breite 63mm) konnte mit maximal 50m/s Schnittgeschwindigkeit benutzt werden (Körnung 120 , hohe Porosität). Die Breite wurde gewählt, um zum einen die axiale Verteilung untersuchen zu können und zum anderen den Einfluss und die Unterschiede der Luftströmung über diese. Als Abrichtwerkzeug dient eine Nadelfliese.

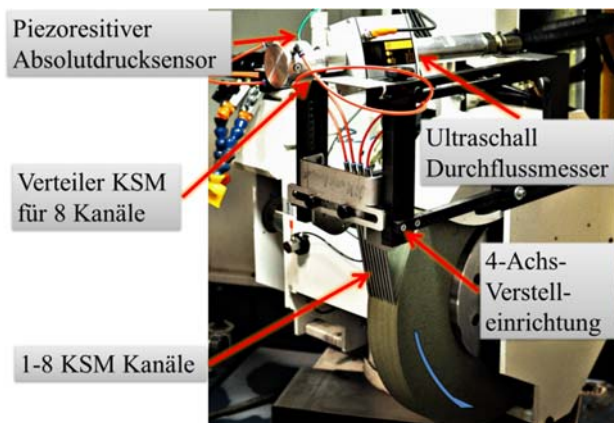


Abbildung 1: Versuchsaufbau auf der Schleifmaschine mit Messtechnik

2.2 Einfluss des Kühlschmiermittels auf die Oberflächenqualität

Die schmierende Wirkung des Kühlschmiermittels beeinflusst die Reibpaarung Schneide (Schleifkorn) - Werkstück signifikant und hat einen Einfluss auf den Zerspanvorgang an sich. Nach Klocke und König [15] verringert sich die Effizienz der Zerspanung aufgrund der durch die verbesserte Schmierwirkung veränderten Reibverhält-

nisse, wodurch sich der Materialtrennpunkt zur Werkstückoberfläche verschiebt. Aufgrund dessen entstehen dünnere Späne und der Anteil der Verdrängung (elastische Verformung) gegenüber der Zerspanung (plastische Verformung, Spantrennung) nimmt zu. In diesen Versuchen wird Emulsion mit geringer Ölkonzentration verwendet, bei welcher der Kühleffekt den Schmiereffekt überwiegt. Dennoch wird beim Einsatz von KSM eine geringere Rauheit gegenüber dem Trockenschleifen entlang der Werkstückbreite erwartet.

3. Experimente und Simulation

3.1 Versuchsdurchführung

Als Werkstoff für die Versuchsteile wird ein gehärteter (61HRC) Kaltarbeitsstahl genutzt (90MnCrV8). Die Breite des zu schleifenden Bereiches beträgt 60mm , der Grunddurchmesser der zylindrischen Teile (die Versuchsteile wurden mehrfach genutzt) ebenfalls 60mm . Vor jedem Schleifversuch wurde die Schleifscheibe über die gesamte Breite mit KSM gereinigt (alle Kanäle und maximaler Volumenstrom) sowie zwei Abrichtzyklen ausgeführt, um Profil und Oberfläche zurückzusetzen. Die beiden Zyklen, jeweils bestehend aus zwei Durchläufen, wurden so ausgelegt, dass die Scheibe nach einem Versuch wieder ein gerades Profil erhält und eventuelle Veränderungen aus den Versuchen beseitigt werden können. Im ersten Zyklus wird dazu pro Durchlauf 0.1mm zugestellt während der Zweite mit 0.02mm Zustellung und einem hohem Überdeckungsgrad von über zwölf gekennzeichnet ist. In Kombination mit der feinen Körnung der Scheibe ermöglichen diese Einstellungen theoretisch sehr feine Oberflächen, was dem Erkennen von Unterschieden bei der Kühlschmiermittelversorgung zugutekommt. Als Schleifprozess wird ein einfacher Einstechzyklus gewählt. Da mit steigenden Abtragsraten auch der KSM-Bedarf zunimmt, soll, um den Einfluss des KSMs respektive das Fehlen dieses zu erkennen, nur ein Schruppprozess ausgeführt und auf Schlichten, Feinschlichten und Ausfunken verzichtet werden. Der axiale Vorschub bleibt unterdessen konstant bei $0.4\text{mm}/\text{min}$. Für jedes Werkstück wird in fünf einzelnen Schleifzyklen insgesamt 1mm im Durchmesser geschliffen. Verschiedene Konfigurationen, Durchmesser der einzelnen Düsen sowie verschiedene Austrittsgeschwindigkeiten des KSMs werden für eine Schnittgeschwindigkeit von 50m/s untersucht. Ebenso wurde ein Referenzversuch ohne KSM gemacht. Das Kühlschmiermittel wird bei den Versuchen in einem sehr flachen Winkel zur Schleifscheibe kurz vor dem Schleifspalt eingebracht.

3.2 Auswertung

Für eine statistische Auswertung werden jeweils drei Teile nacheinander geschliffen und die Rauheit dreimal an drei verschiedenen Positionen in axialer Richtung auf dem Werkstück gemessen. Dazu dient ein optisches Profilometer, das Taylor Hobson Talysurf Oberflächenmessgerät. Die Messdaten können als Höhenprofil mit einem Gaussfilter jeweils für die Rauheit und die Welligkeit in

ein MATLAB-Skript importiert und ausgewertet werden. Dazu werden unter anderem die Rauheiten R_a und R_z sowie die Welligkeit angelehnt an die DIN 4760 bestimmt und ausgewertet. Um eine möglichst genaue Aufteilung des Messbereiches bei der Rauheit zu erzielen, wurde auf die Bildung des Durchschnittes aus fünf Segmenten für die Berechnung der Rauheitskennzahlen verzichtet. Für die entsprechende Rauheitsklasse für aperiodische Profile ($0.1 < R_a < 2\mu\text{m}$) kann eine Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 800\mu\text{m}$ gewählt werden, so dass unter Berücksichtigung der Einlauf- und Auslaufstrecke eine auswertbare Messstrecke von 53.6mm genutzt wird. Dies ermöglicht die Unterteilung in 67 Segmente unter der besagten Grenzwellenlänge, mit welcher der Verlauf der Rauheit in Richtung der Drehachse dargestellt wird. Ähnlich funktioniert die Auswertung für die Welligkeit, die hier als Mass für den Formfehler dient (geometrische Abweichung). Auch hier findet die Auswertung mittels MATLAB statt. Die Grenzwellenlänge für den Gaussfilter wird dazu auf $\lambda_c = 2.5\text{mm}$ gesetzt.

4. Resultate

4.1 Rauheit

In Abbildung 2 ist ein typisches Rauheitsdiagramm für das Schleifen des Versuchskörpers mit einer einzelnen Düse am linken äusseren Ende, hier als massstabgetreuer roter Balken, dargestellt. Die einzelnen Punkte entsprechen den berechneten Rauheitsgrößen für eine Segmentbreite von $\lambda_c = 800\mu\text{m}$. Die gestrichelte Linie gibt eine Glättungsfunktion dieser Werte wieder während die durchgezogene rote Linie mit einem Schwellenwert als Rampe berechnet wird und das Einflussgebiet des Kühlschmiermittels darstellen soll. Deutlich ist der Verlauf der Rauheiten zu erkennen, wobei das Einflussgebiet (schwach eingefärbter Bereich) eines Strahles wesentlich breiter als der Strahl selbst ist. Der Austrittsdurchmesser beträgt 3mm , hingegen die Breite des Einflussgebietes etwa 16mm bei einer Rauheit von $R_a \approx 0.3\mu\text{m}$. Weiterhin kann man beobachten, wie die Streuung mit der Entfernung vom KSM-Strahl zunimmt, die maximale Rauheit mit $R_a \approx 0.5\mu\text{m}$ jedoch nicht ganz der des Trockenschleifens ($R_{a\text{-trocken}} \approx 0.7\mu\text{m}$) entspricht.

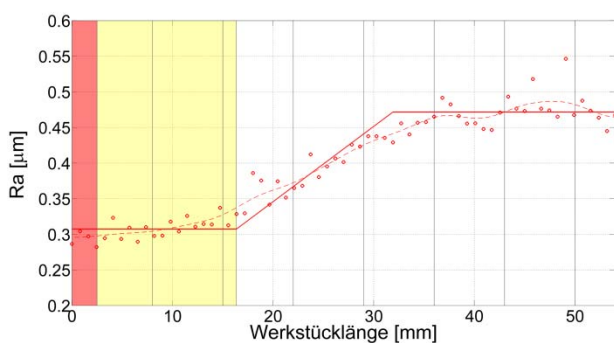


Abbildung 2: Verteilung der Rauheit in axiale Richtung auf dem Werkstück, KSM-Versorgung mittels einer Düse, 3mm Austrittsdurchmesser

Will man ein über die gesamte Breite möglichst gleichmässiges Schleifergebnis erreichen, kann somit aus dem maximal möglichen Abstand der KSM-Düsen eine Mindestkonfiguration abgeschätzt werden. In Abbildung 3 ist die Rauheitsverteilung für vier einzelne Düsen mit jeweils 1.5mm Austrittsdurchmesser dargestellt.

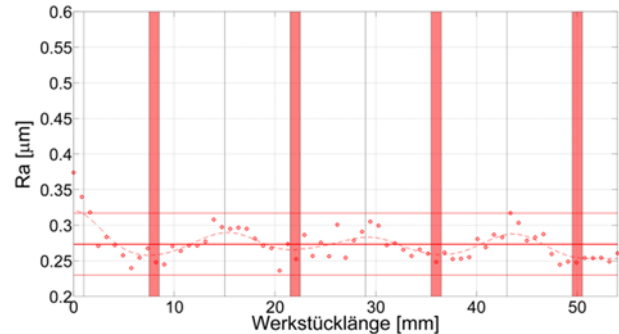


Abbildung 3: Verteilung der Rauheit in axiale Richtung auf dem Werkstück, KSM-Versorgung mittels vier Düsen, 1.5mm Austrittsdurchmesser

Die Rauheit in den Zwischenräumen ist sichtbar erhöht. Für industrielle Anwendungen sind geringere Abstände zu wählen, um eine gleichmässige Oberflächenqualität zu erreichen. Um die Anordnung einzelner Düsen, die eingesetzt werden um die Menge überflüssiges KSM zu reduzieren, mit industriellen Lösungen zu vergleichen werden die folgenden Versuche gemacht.

In einen neuen Versuchsaufbau wird der Abstand der Kanäle durch die doppelte Anzahl von Austrittsöffnungen auf 7mm halbiert. Als konventionelle Düsensysteme werden das weitverbreitete Loc-Line Düsensystem und eine Flachdüse mit rechteckigem Austrittsquerschnitt und 63mm Breite gegenübergestellt. Es wird der gleiche experimentelle Aufbau genutzt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass zum Erreichen einer mittleren Rauheit auf dem Werkstück von $R_a \approx 0.30\mu\text{m}$ für die verschiedenen KSM-Düsentypen sehr unterschiedliche Volumenströme benötigt werden. Abbildung 4 zeigt die erreichte Rauheit in Abhängigkeit vom Volumenstrom für verschiedene Austrittsquerschnitte, die wiederum zu verschiedenen Austrittsgeschwindigkeiten als auch direkt benetzten Längenabschnitten führt. Die geringste erreichte Rauheit liegt bei $R_a \approx 0.25\mu\text{m}$ bei einem Volumenstrom von $Q \approx 20\text{l/min}$. Es wird davon ausgegangen, dass dies etwa der minimal möglichen Rauheit, die mit diesen Schleifparametern (etwa Schleifscheibe – Werkstückkombination, Abricht und Prozessparameter) erreicht werden kann. Eine weitere Erhöhung der Menge von KSM würde in dem Fall keine Verbesserung der Prozessqualität bringen. Bereits ab einem Volumenstrom von $Q \approx 5.5\text{l/min}$ wird für die Durchmesser 1.5mm & 2.0mm der Umschlagspunkt erreicht.

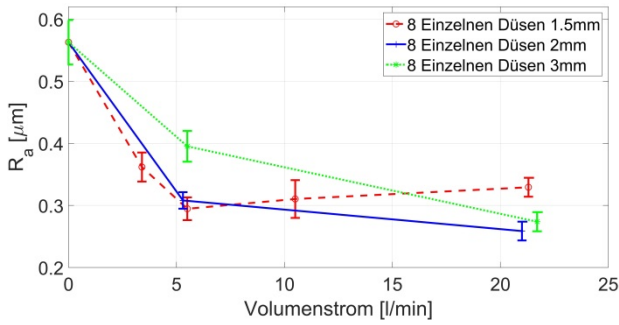


Abbildung 4: Rauheit gegenüber Volumenstrom für 8 Kanäle mit drei verschiedenen Austrittsdurchmessern

Abbildung 5 zeigt den grossen Einfluss des Düsentyps, mit dem das KSM zugeführt wird. Im Vergleich zu den einzelnen Düsen mit 1.5mm Durchmesser werden, um Rauheiten von $R_a \approx 0.30\mu\text{m}$ auf dem Werkstück zu erreichen, ein Volumenstrom von etwa $Q = 22\text{l/min}$ mit den Loc-Line Düsen und etwa $Q = 30\text{l/min}$ mit der Flachdüse benötigt. Auch eine Erhöhung des Volumenstroms auf $Q > 80\text{l/min}$ erbrachte keine Verbesserung der Oberflächenqualität. Ausgehend von den in Abschnitt 2.2 genannten Mechanismen zur Auswirkung des KSMs auf die Oberfläche, kann davon ausgegangen werden, dass ein grosser Teil des KSMs nicht direkt zum Prozess beiträgt. Weiterhin sind die höheren Volumenströme zum Erreichen des Sättigungsbereiches für die konventionellen Systeme auf die schlechtere Einbringung zurückzuführen. Die Variationen der Rauheiten auf dem Werkstück bei geringen Volumenströmen sind speziell bei der Verwendung des Loc-Line Systems sehr gross.

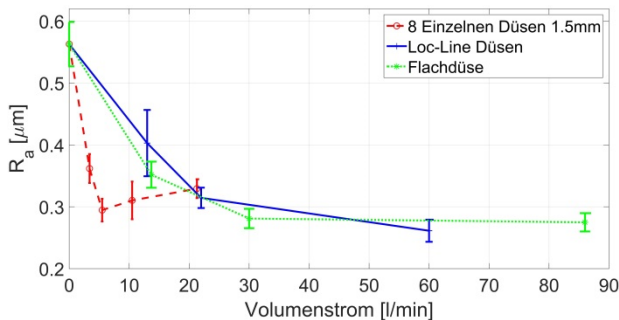


Abbildung 5: Rauheit gegenüber Volumenstrom für drei verschiedene Düsensysteme

Bei einem Vergleich der Systeme fällt auf, dass die Einzeldüsen nur etwa 18.3 – 25% des Volumenstroms der Vergleichsdüsen benötigen um gleiche Oberflächeneigenschaften zu erreichen.

Düsentyp	Volumenstrom	Rauheit
Einzeldüsen	5.5 l/min	0.29µm
Loc-Line	22 l/min	0.33µm
Flachdüse	30 l/min	0.27µm

Tabelle 1: Vergleich der Düsensysteme

4.2 Formfehler

Ein ungleichmässiger KSM-Eintrag kann ebenso Einfluss auf die Wärmeverteilung der durch den Prozess eingebrachten Energie auf das Werkstück haben und Formfehler hervorrufen. Betrachtet man den Extremfall des Trockenschleifens wird die Wärme im Wesentlichen an den Seiten des Werkstückes sowie an den Einspannungen abgeführt. Die höchsten Temperaturen herrschen daher vermutlich im mittleren Bereich des Werkstückes, wo dann auch dessen höchste thermische Dehnung zu finden ist. In diesem Fall wird das meiste Material in der Mitte abgetragen. Kühlt das Werkstück ab, ist dies entsprechend der Teil mit dem geringsten Durchmesser. Es wurden Abweichungen von minimalen zu maximalen Durchmessern von $9\mu\text{m}$ festgestellt, wie man an der roten Kurve in Abbildung 6 ablesen kann.

Dem soll der Fall für eine stark verbesserte Kühlung des Werkstücks durch maximalen KSM-Volumenstrom gegenüber gestellt werden. Es ergibt sich ein leicht balliges Profil. Die Höhenunterschiede sind wesentlich geringer und die Abweichungen von den äusseren zum inneren Durchmesser betragen etwa $3\mu\text{m}$, wie in Abbildung 6 anhand der blauen Kurve gesehen werden kann. Es wird vermutet, dass die äusseren Enden des Werkstückes, die von Luft umgeben sind, schlechter gekühlt werden können und dadurch eine höhere Ausdehnung und Abtrag durch die Schleifscheibe haben. Schon geringe Mengen KSM, die gleichmässig verteilt werden, genügen um diesen Wert zu erreichen.

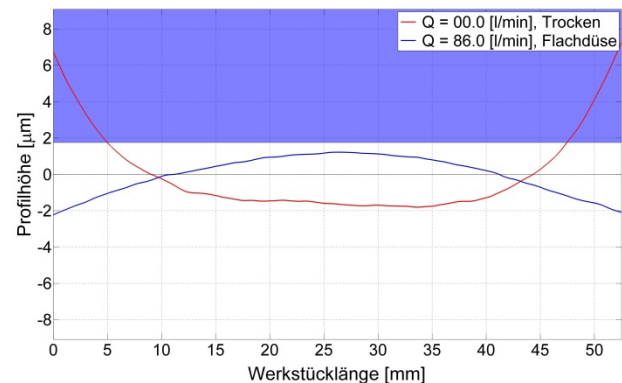


Abbildung 6: Formfehler beim Trockenschleifen (rote Linie) und mit maximalem KSM-Volumenstrom (blaue Linie). Blaues Rechteck stellt den Düsenquerschnitt dar.

4.3 Schleifscheibe

Auch an der Schleifscheibe können Veränderungen festgestellt werden. Bei grossen Abständen zwischen den einzelnen Kanälen ist die Reinigungswirkung des KSMs an der Schleifscheibe visuell erkennbar. In Abbildung 7 wird gezeigt, wie bereits ein Strahl mit 3mm Durchmesser die Schleifscheibe auf einer Breite von 5 – 6mm vollständig reinigt. Auf einer Breite von etwa 20mm ist nur eine geringe Zusetzung der Schleifscheibe erkennbar. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen aus den Rauheitsuntersuchungen.

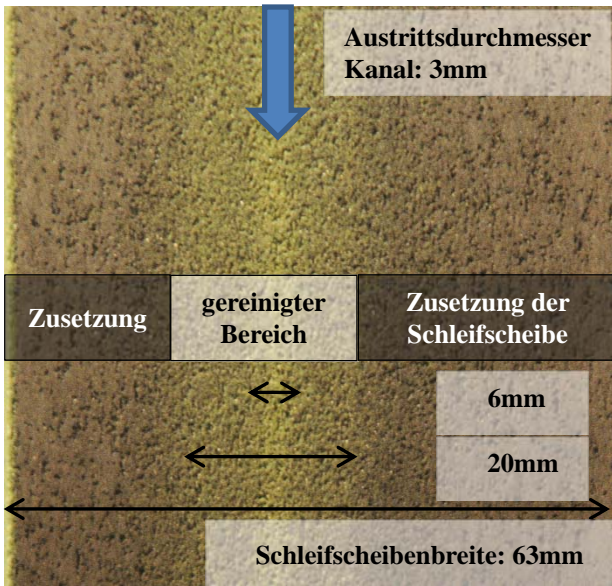


Abbildung 7: Schleifscheibenoberfläche nach Nutzung mit eines Kanales mit 3mm Austrittsdurchmesser (Schleifscheibe: Winterthur 54A 120 H15 VPMF604W)

Auch beim Erstellen eines Abdruckes ist die vielfach breitere Reinigungswirkung sowohl an der Verschmutzung als auch an der Porentiefe erkennbar. Abbildung 8 zeigt dies exemplarisch für das Schleifen mittels einer KSM-Düse auf der linken Seite. Deutlich sind die Zwischenräume unter der Düse zu erkennen, während nach einem graduellen Verlauf am rechten Rand eine deutliche Zusatzung der Schleifscheibe zu sehen ist.

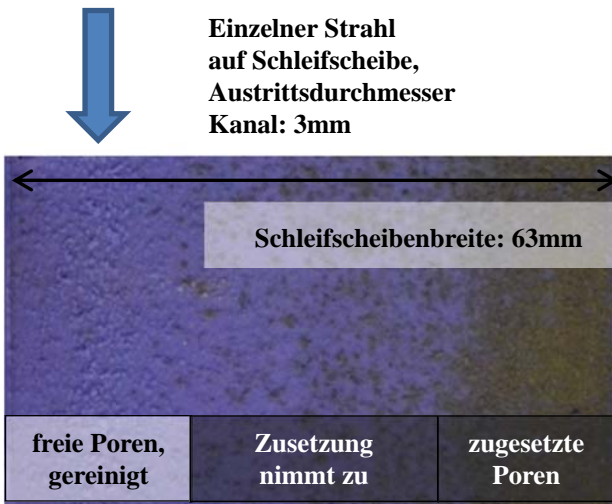


Abbildung 8: Abdruck der Schleifscheibe (Negativ der Schleifscheibe) und Abbild der Verunreinigung und Zusatzung der Poren

5. Diskussion

Aufgrund der gezeigten Ergebnisse ist bei der Nutzung von einzelnen Düsen davon auszugehen, dass sich das KSM bereits vor dem Schleifspalt auf der Schleifscheibe verteilen kann und entsprechend einen breiteren Bereich abdeckt als durch den Austrittsquerschnitt der Düse vorgegeben. Alle wesentlichen Funktionen, das sind Kühlen,

Schmieren und Reinigen, können dort erfüllt werden. Basierend auf einer Gleichung von Jackson et al. [14] kann der Volumenstrom \dot{Q}_u des KSMs, das durch den Schleifspalt transportiert werden kann, für die hier beschriebene Versuchsanordnung, abgeschätzt werden.

$$\dot{Q}_u = h_{uf} \cdot v_s \cdot b_s = 10.5 \text{ l/min} \quad (1)$$

Die Variablen $v_s = 50 \text{ m/s}$ sowie $b_s = 60 \text{ mm}$ geben die Schnittgeschwindigkeit respektive die Scheibenbreite an. Die angenommene Dicke des Flüssigkeitsfilms auf den Schleifkörnern h_{uf} wird aus dem mittleren Durchmesser der Schleifkörner (Annahme: $d_g = 350 \mu\text{m}$) berechnet: $h_{uf} = 0.2 \cdot d_g = 70 \mu\text{m}$.

Es konnte gezeigt werden, dass durch eine geeignete Zuführstrategie bereits geringere Menge als diese genügen um akzeptable Oberflächenqualitäten zu erreichen. Gleichfalls kann die benötigte Menge von KSM weitaus höher als der berechnete Wert sein. Die konventionellen Düsensysteme haben erheblich höhere Mengen KSM benötigt und werden vermutlich auch in der Industrie weit über den nötigen Volumenströmen genutzt, obwohl eine Erhöhung keinen positiven Einfluss auf das Schleifergebnis hat.

Die Verteilung der Rauheit bei ungleichmäßigem KSM-Eintrag wurde mit steigendem Abtragsvolumen deutlich sichtbar, beziehungsweise stärker ausgeprägt. Bei einem neuen Schleifvorgang ohne Abrichtzyklus der so genutzten Schleifscheibe auf einem neuen Werkstück mit gleichmässiger und günstiger KSM-Verteilung, konnte das vorherige Profil in einer geringeren Ausprägung erkannt werden. Daraus lässt sich ein Einfluss auf das Werkzeug ableiten. Das Rauheitsprofil kann auch als eine Abbildung des Schleifscheibenoberflächenprofils verstanden werden. Demzufolge kann der Schleifscheibenverschleiss an der Rauheitsverteilung und umgekehrt die Wirkbreite des Kühlschmiermittels an diesem abgelesen werden.

Der Formfehler wurde kaum von der KSM-Menge beeinflusst, sobald es etwa der Hälfte der Abschätzung \dot{Q}_u entsprach, wie in Abbildung 9 abgelesen werden kann. Dort ist der Fall 5.5 l/min aus acht Einzeldüsen (rote Kurve) dem Fall 86 l/min aus einer Flachdüse (blaue Kurve) gegenübergestellt.

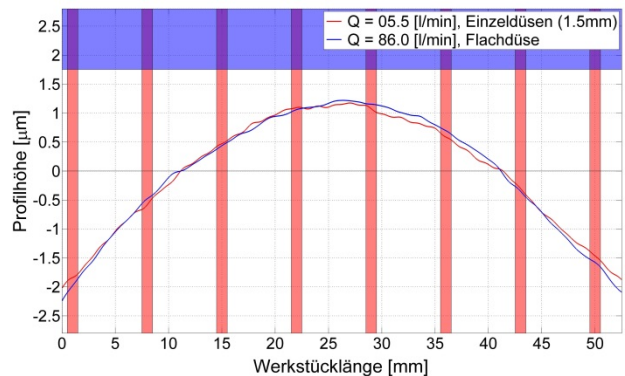


Abbildung 9: Formfehler für zwei Verschiedene KSM-Mengen (Minimal 5.5l/min und maximal 86l/min). Blaue und rote Rechtecke stellen Position und Grösse der Düsenquerschnitte dar.

An einem Werkstück, das als markantes Beispiel dient, wurde eine metallographische Untersuchung der Randschichten vorgenommen. Auch beim Schleifen mit wenig KSM und nur einem Strahl in der Mitte des Werkstücks können keine Veränderungen am Gefüge festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass bei ähnlichen Schleifparametern und einer höheren Anzahl von KSM-Kanälen ebenfalls keine Oberflächenschäden auftreten.

6. Fazit und Ausblick

Bei Aussenrundscheifprozessen mit poröser Edelkorundscheifscheibe und Kühlschmiermittel auf Basis von Emulsion konnte in der Anwendung mit geringen Zeitspanvolumina, wie sie bei hohen Genauigkeitsanforderungen vorkommen, festgestellt werden, dass die axiale Wirkbreite des Kühlschmiermittels weit über die der Strahlbreite hinausgeht. Dies kann die Basis für eine entscheidende Reduktion des KSM-Verbrauchs werden. Die hier verglichenen Düsen, die weit verbreitet in der Industrie eingesetzt werden, benötigen etwa die vier- bis fünffache Menge an KSM, bei gedrosselter Ventilstellung, im Vergleich zu den vorgestellten Einzeldüsen, um ähnliche Ergebnissen der Oberflächenqualität und Formgenauigkeit zu erreichen.

Ist das Ziel die Verringerung des Volumenstroms, kann die Luftströmung um die Scheibe nicht ausser Acht gelassen werden. Eine Verringerung des Austrittsquerschnittes ist nötig, um auch mit geringeren Volumenströmen eine ausreichende Austrittsgeschwindigkeit zu erreichen, um die Luftströmung um die Scheibe zu überwinden. Runde Einzeldüsen können ein Weg sein, um den Austrittsquerschnitt zu verringern und sind gut dazu geeignet das KSM auch auf breiten Schleifscheiben zu verteilen.

Das Verringern des Kühlschmiermitteleintrags bezüglich des Volumenstroms und der Austrittsgeschwindigkeit (Impuls auf Bauteil) kann weiterhin Vorteile für die Formgenauigkeit haben. Relativ geringe Mengen KSM sind ausreichend für eine gleichmässige Kühlung des Werkstücks. Zu hohe Volumenströme können dazu führen, dass das Werkstück von der Schleifscheibe weggedrückt wird. Dies ist insbesondere für geringe Durchmesser bei hohen Genauigkeitsanforderungen interessant. Zudem ist der KSM-Bedarf für die letzten Prozessschritte, das Schlichten, Feinschlichten und Ausfunken und damit die Gefahr für Oberflächenschädigungen erheblich geringer. Eventuelle Ungleichmässigkeiten können mittels dieser Prozessschritte verringert werden.

Bei der Nutzung von Öl als KSM werden grosse Unterschiede aufgrund der vielfach höheren Viskosität sowie der schlechteren spezifischen Wärmekapazität des Mediums erwartet. Untersuchungen dazu sind geplant und sollen im Anschluss an dieses Projekt durchgeführt werden.

7. Danksagung

Die Autoren möchten der KTI für die Förderung des Projektes KSM-Düse unter der Nummer KTI P-Nr: 13963.2 PFIW-IW sehr herzlich danken. Weiterhin gilt

grosser Dank an die Projektpartner namentlich die Fritz Studer AG in Thun sowie Blaser Swisslube AG in Hasle-Rüegsau, insbesondere für das Bereitstellen der Versuchsmaschine respektive des Kühlschmiermittels.

8. Referenzen

- [1] Malkin, S. und Anderson, R.B., 1974, Thermal Aspects of Grinding Part 1 - Energy Partition. *Journal Of Engineering For Industry S.* 1177-1183.
- [2] Malkin, S., 1974, Thermal Aspects of Grinding Part 2 - Surface Temperatures and Workpiece Burn. *Journal Of Engineering For Industry S.* 1184-1191.
- [3] Brinksmeier, E., Heinzl, C. und Wittmann, M., 1999, Friction, cooling and lubrication in grinding. *Annals of the CIRP Vol. 48/2/1999.S.* 581-598.
- [4] Klocke, F. und Eisenblätter, G., 1997, Dry Cutting. *Annals of the CIRP Vol. 46/2/1997, S.* 519-526.
- [5] Ramesh, K., Huang, H. und Yin, L., 2004, Analytical and experimental investigation of coolant velocity in high speed grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, S.* 1069-1076.
- [6] Klocke, F. und Bücken, C., 1996, Trockenschleifen - Grenzbetrachtung zur Kühlschmierstoffreduzierung. *Industriediamanten 1/26-35.*
- [7] Brinksmeier, E., Brockhoff, T. und Walter, A., 1997, Minimalmengenkühlschmierung und Trockenbearbeitung. *Werkstattstechnik 87/467-470.*
- [8] Jackson, A.R., Morgan, M.N., Batako, A.D.L. und Allanson, D.R., 2005, Fluid Delivery in Grinding: A Review of the Term: 'Useful Flow'. *GERI Annual Research Symposium 2005.*
- [9] Gviniashvilli, V.K., Woolley, N.H. und Rowe, W.B., 2004, Useful coolant flowrate in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture 44/629-636.*
- [10] Webster, J.A., Cui, C., Mindek, R.B. und Lindsay, R., 1995, Grinding Fluid Application System Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, S.* 333-338.
- [11] Morgan, M.N. and Baines-Jones, V.A., 2009, On the Coherent Length of Fluid Nozzles in Grinding. *Key Engineering Materials, S.* 61-67.
- [12] Wu, H., Morgan, M. and Lin, B., 2011, An experimental investigation of air boundary layer flow in grinding using the laser doppler anemometry technique. *International Journal of Abrasive Technology 4(2)/174-189.*
- [13] Baines-Jones, V.A., Morgan, M.N., Batako, A.D.L. und Brown, E., 2008, Modelling and Simulation of Grinding Fluid Nozzles. *Brunel University, UK, The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08).*
- [14] Jackson, A., 2008, An investigation of useful fluid flow in grinding, PhD thesis at Liverpool John Moores University.
- [15] Klocke, F., König, W., 2005, *Fertigungsverfahren – Schleifen, Honen, Läppen.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.