

Kühlschmierung beim Mikrofräsen

Einfluss der Kühlschmierverfahren und -stoffe auf die erzeugte Oberflächengüte beim Mikrofräsen

G. Brudek, J. P. Wulfsberg

Damit beim Mikrofräsen bestmögliche Oberflächengüten erzielt werden und die Standzeiten der Werkzeugschneiden verlängert werden können, muss die Kühlschmierung näher untersucht und optimiert werden. In diesem Fachaufsatz werden Ergebnisse von Untersuchungen beim Mikrofräsen von 1.4301 (X5CrNi1810) unter Minimalmengen-Kühlschmierung (MMKS), unter Tauchkühlschmierung (TKS) und bei der Trockenbearbeitung vorgestellt.

Cooling lubricant during micro milling

Action of cooling lubrication methods and materials on the surface quality produced by micro milling

In order to provide optimal surface quality by micro milling and an extended tool life time the influence of the coolant must be considered and investigated. Therefore in this paper experimental results are presented which shows the influence of minimal quality lubrication, splash lubrication and during dry machining.

1 Überblick

Heutzutage steht die Mikrozerspanung mit den überwiegend eingesetzten Fertigungsverfahren Fräsen, Bohren oder Schleifen immer mehr im Vordergrund, da sich die Anzahl der Anwendungen, beispielsweise im Bereich des Werkzeugbaus oder der Medizintechnik erhöht und eine immer stärkere Einbindung von Funktionen in kleinsten Bauteilen von wenigen Kubikmillimetern gefordert wird. Das Mikrofräsen selbst wird als Technologie noch nicht ausreichend beherrscht, so daß die theoretisch möglichen, aus den Einstellgrößen berechenbaren, Oberflächenrauheiten von wenigen Nanometer nicht erreicht werden können. Um diesem Ziel näher zu kommen und bestmögliche Oberflächengüten beim Mikrofräsen zu erzielen und dabei die Standzeiten der Werkzeugschneiden zu verlängern, müssen alle Eingangsgrößen optimiert werden. Folglich muss neben den Einstellgrößen (Drehzahl, Zustellung, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit etc.), den Werkzeugen an sich, auch die Eingangsgröße Kühlschmierung näher untersucht und optimiert werden [1].

Bei der Kühlschmierung für das Mikrofräsen spielt aufgrund der kleinen Spanquerschnitte der Abtransport der Späne eine untergeordnete Rolle. Zu beachten ist jedoch eine schnelle und effiziente Wärmeabfuhr, eine erhebliche Senkung der Reibung und die damit verbundene Erhöhung der Kühl- und Schmierwirkung. Ursache hierfür ist, im Gegensatz zum konventionellen Fräsen, die Gefahr von höheren Eigenspannungen im Werkstück und größeren Maßabweichungen durch Temperaturerhöhungen beim Mikrofräsen von Bauteilen mit Genauigkeiten von wenigen Mikrometern. Folglich muss bei der Auswahl der zu verwendenden Kühlschmiermittel in erster Linie auf eine hohe Wärmeleitfähigkeit geachtet werden. Da aus ökonomischen und ökologischen Gründen der Einsatz vieler Kühlschmiermittel problematisch und nicht wünschenswert ist, sind ebenfalls alternative Fluide wie beispielsweise Pflanzenöle (Rapsöl, Sesamöl) als Kühlschmiermittel zu untersuchen.

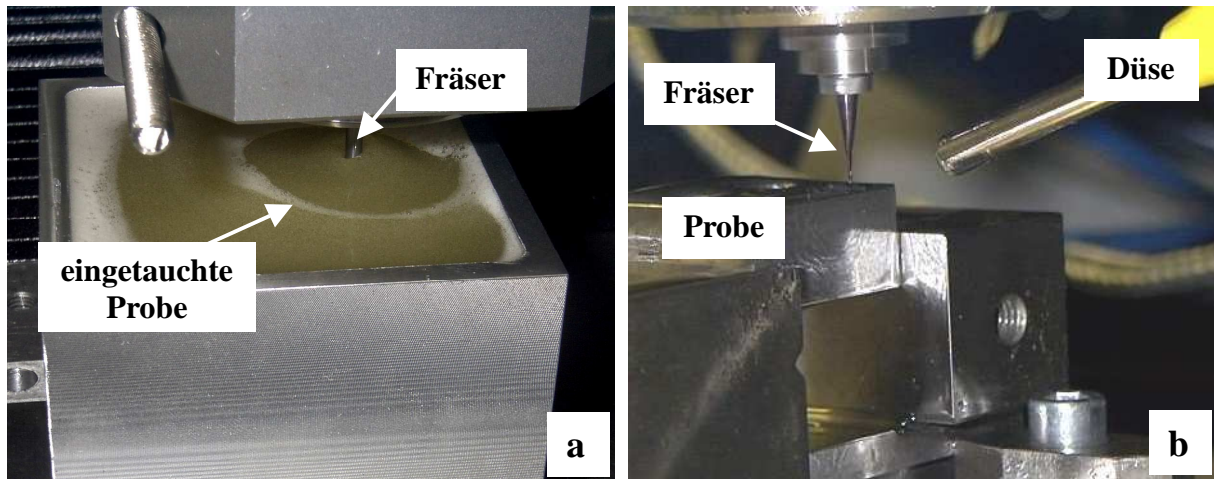


Bild 1: Mikrofräsen a) unter Tauchkühlschmierung b) unter Minimalmengen-Kühlschmierung

Bei der Optimierung der Kühlschmierung wurden neben der Trockenbearbeitung die in Bild 1 dargestellten Kühlschmierverfahren Minimalmengen-Kühlschmierung (MMKS) und Tauchkühlschmierung (TKS) näher untersucht [2,3]. Die Auswertung der Versuche basierte auf Messungen der Oberflächenrauheit R_a beim Mikrofräsen von 1.4301 (X5CrNi1810), wobei sich der Messtaster des Oberflächenrauheitsmessgeräts (Perthometer), wie in Bild 2 dargestellt, zum einen in Richtung des Arbeitseingriffs bzw. der Zustellung (Zustellrichtung) und zum anderen in der Richtung des Vorschubs (Vorschubrichtung) bewegte. Als Werkzeuge wurden TiAlN-beschichtete VHM-Schaftfräser ($d=0,5\text{mm}$) von Horex (Hoffmann Group) eingesetzt. Als Versuchsmaschine diente eine Mikrobearbeitungsmaschine KUGLER Microgantry GU.

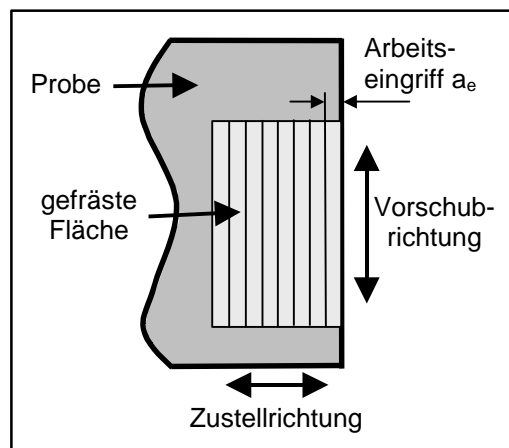


Bild 2: Messrichtungen des Messtasters eines Perthometers beim Messen der Oberflächenrauheit R_a

Damit alle Ergebnisse untereinander verglichen werden können, wurden die Einstellgrößen wie folgt festgelegt: Vorschubgeschwindigkeit $v_f=100\text{mm/min}$, Arbeitseingriff $a_e=0,01\text{mm}$, Schnitttiefe $a_p=0,1\text{mm}$. Um den Einfluss der Drehzahl und der sich daraus ergebenden Schnittgeschwindigkeit auf die Oberflächengüte zu überprüfen, wurde die Drehzahl zwischen $n_{\min}=70.000\text{min}^{-1}$ und $n_{\max}=130.000\text{min}^{-1}$ variiert. Da nach eigenen Schnittkraftuntersuchungen beim Mikrofräsen der Gegenlauf dem Gleichlauf vorzuziehen ist, sind alle Versuche im Gegenlauf durchgeführt worden. Die erzielten Oberflächenrauheiten R_a werden im Folgenden immer als Mittelwert von sechs Messungen angegeben.

2 Trockenbearbeitung

Der Einsatz der Trockenbearbeitung, also der Verzicht auf Kühlschmiermittel, ist für die Mikrozerspannung der betrachteten Werkstoffe problematisch, da die Standzeiten der Werkzeuge durch frühzeitige Werkzeugbrüche sehr kurz sind. Für die drei durchgeführten Messungen (Vorschubgeschwindigkeit

$v_f=100\text{mm/min}$, Arbeitseingriff $a_e=0,01\text{mm}$, Schnitttiefe $a_p=0,1\text{mm}$, Vorschub pro Zahn $f_z=0,00056\text{mm}$, Drehzahl $n=90.000\text{min}^{-1}$, Schnittgeschwindigkeit $v_c=141\text{m/min}$) ergeben sich Oberflächenrauheiten von $R_a=0,4\mu\text{m}$ in Zustellrichtung und $R_a=0,36\mu\text{m}$ in Vorschubrichtung. Folglich macht das Mikrofräsen ohne Kühlschmierung trotz der akzeptablen Oberflächenrauheiten, sowohl aus der fertigungstechnischen als auch aus der wirtschaftlichen Sicht, wenig Sinn.

3 Minimalmengen-Kühschmierung (MMKS)

Um bestmögliche Oberflächenrauheiten beim Mikrofräsen unter MMKS zu erreichen, muss zuerst der optimale Abstand zwischen Düse der MMKS-Vorrichtung und Fräser und anschließend die optimale Sprührichtung von der Düse zum Fräser bestimmt werden. Ist dies geschehen, werden mit dem optimalen Abstand und der optimalen Sprührichtung die Oberflächenrauheiten in Abhängigkeit von der Drehzahl unter MMKS mit den Kühlschmiermitteln *Lubrimax Edel C* (Steidle GmbH, D-51371 Leverkusen) und *AVANTIN 407 NEU* (Carl Bechem GmbH, D-58089 Hagen) bestimmt.

3.1 Ermittlung des optimalen Abstands zwischen Düse der MMKS-Vorrichtung und Fräser

Zur Bestimmung des optimalen Abstandes zwischen Düse der MMKS-Vorrichtung und Fräser wurde das Kühlschmiermittel *Lubrimax Edel C* verwendet. Der Abstand betrug 5, 10, 20, 30, 40 und 50 mm. Bild 3 zeigt die Oberflächenrauheiten R_a unter MMKS in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Düse und Fräser. Dabei wird deutlich, dass sowohl bei Messungen in der Zustell- als auch Vorschubrichtung bei einem Abstand von 10mm die niedrigsten Oberflächenrauheiten ($R_a=0,19\mu\text{m}/0,16\mu\text{m}$) erreicht werden. Nur wenige Millimeter mehr bzw. weniger Abstand ergaben große Änderungen der Oberflächenrauheit. Die Begründung für die Existenz eines optimalen Abstandes mit dazugehöriger niedrigster Oberflächenrauheit liegt in der MMKS selbst. Ist der Abstand zwischen Düse und Fräser zu groß, erreicht nicht ausreichend Kühlschmiermittel die Fräseingriffsstelle, so daß die Kühl- und Schmierwirkung nicht ausreichen, um optimale Oberflächenrauheiten zu erzielen. Bei einem zu kurzen Abstand zwischen Düse und Fräser wird das Kühlschmiermittel am Fräser vorbei gesprüht, so daß ebenfalls keine ausreichende Kühl- und Schmierwirkung erzielt wird.

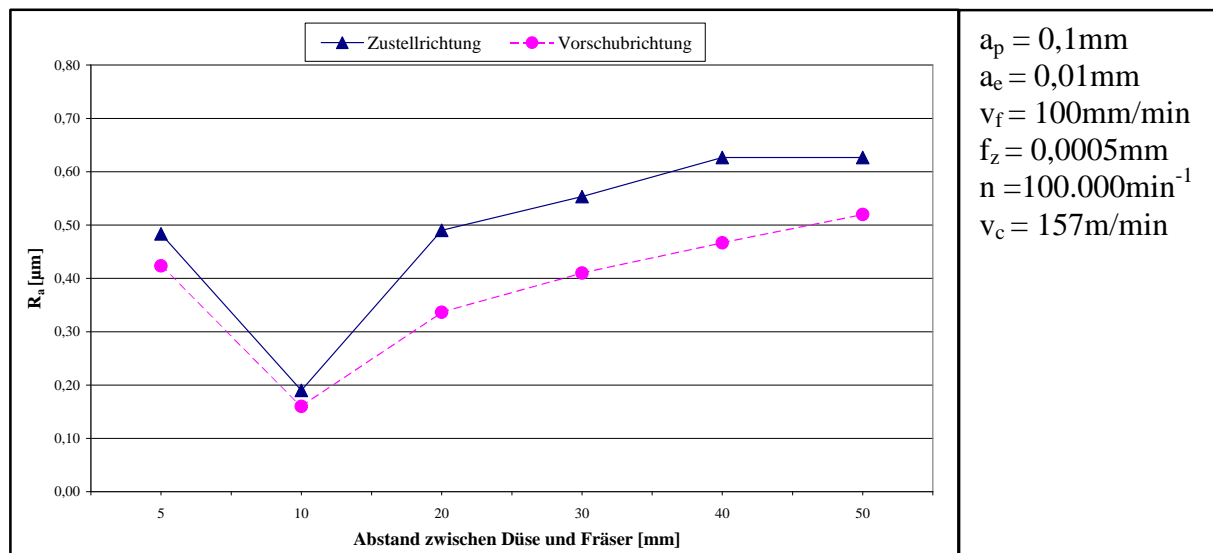


Bild 3: Oberflächenrauheiten R_a beim Mikrofräsen unter MMKS in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Düse der MMKS-Vorrichtung und Fräser

3.2 Ermittlung des optimalen Sprührichtung von der Düse der MMKS-Vorrichtung zum Fräser

Neben der Bestimmung des optimalen Abstands zwischen Düse der MMKS-Vorrichtung und Fräser ist im Weiteren zu überprüfen, ob die Sprührichtung des Kühlschmiermittels von der Düse zum Fräser ebenfalls einen Einfluss auf die erzielbaren Oberflächenrauheiten hat. Bild 4 zeigt erreichte Oberflächenrauheiten in Abhängigkeit von der Drehzahl beim Mikrofräsen unter rechtsseitiger und linksseitiger MMKS. Als Kühlschmiermittel diente wiederum *Lubrimax Edel C*.

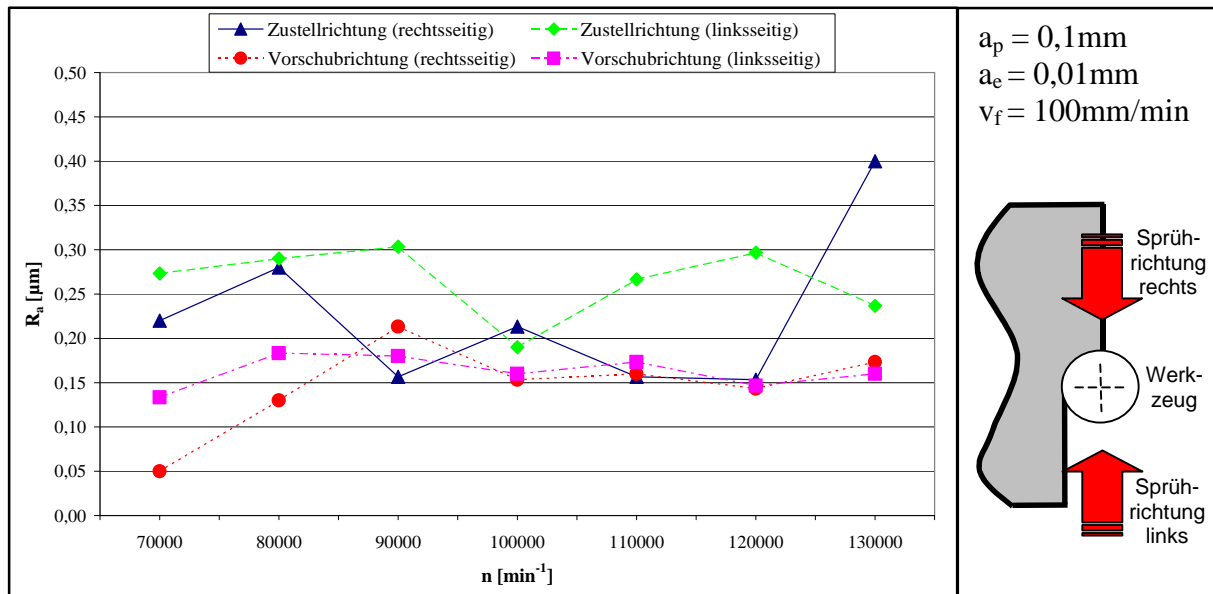


Bild 4: Oberflächenrauheiten R_a in Abhängigkeit von der Drehzahl n beim Mikrofräsen unter rechtsseitiger und linksseitiger MMKS

Bild 4 zeigt, daß die Sprührichtung von der Düse der MMKS-Vorrichtung zum Fräser keinen entscheidenden Einfluss auf die erzeugte Oberflächenrauheit hat. Die gemessenen Oberflächenrauheiten sind zwar in der Vorschubrichtung besser als in der Zustellrichtung, unterscheiden sich aber bei linksseitiger und rechtsseitiger MMKS nicht.

Die besten Oberflächenrauheiten wurden zwar bei kleinen Drehzahlen $n=70.000\text{min}^{-1}$ und $n=80.000\text{min}^{-1}$ erreicht, diese dürfen aber nicht als optimal gesehen werden. Aufgrund der sich aus den Drehzahlen ergebenden, für das Mikrofräsen zu niedrigen Schnittgeschwindigkeiten $v_c=110\text{m/min}$ bzw. $v_c=125\text{m/min}$ findet anstatt des Mikrofräsens ein Reiben und Quetschen statt, das einerseits die Oberfläche glättet, andererseits aber einen sehr hohen Fräserverschleiß mit sich bringt und folglich nicht wünschenswert ist.

3.3 Bestimmung bestmöglicher Oberflächenrauheiten beim Mikrofräsen unter MMKS

Um bestmögliche Oberflächenrauheiten beim Mikrofräsen unter MMKS zu erzielen und den Einfluss der verwendeten Kühlschmiermittel näher zu untersuchen, wurde neben der Anwendung der bisherigen Ergebnisse ein weiteres Kühlschmiermittel, das *AVANTIN 407 NEU*, eingesetzt. Der Druck der MMKS-Vorrichtung, mit dem die Kühlschmiermittel in nebelartiger Form versprüht werden, ist von den Eigenschaften der Kühlschmiermittel, wie z.B. Dichte oder Viskosität abhängig und muss folglich an diese angepasst werden. Daraus ergibt sich beim Einsatz von *Lubrimax Edel C* ein Druck $p_{\text{Lubrimax}}=1,5\text{bar}$, der beim *AVANTIN 407 NEU* auf $p_{\text{Avantin}}=3,1\text{bar}$ erhöht werden muss.

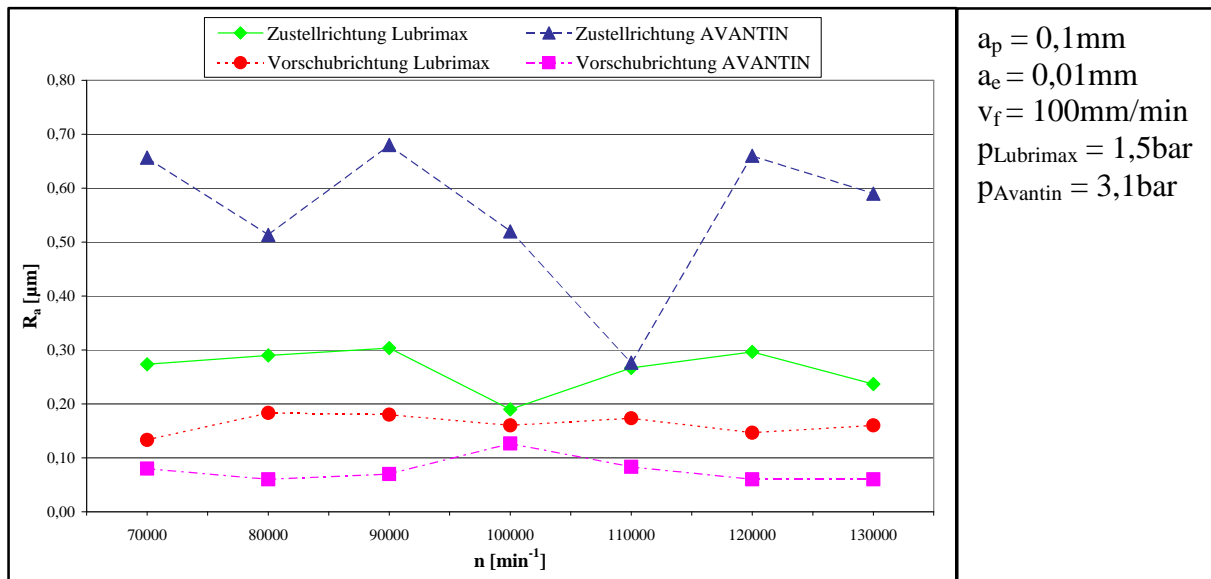


Bild 5: Oberflächenrauheiten R_a in Abhängigkeit von der Drehzahl n beim Mikrofräsen unter MMKS mit den Kühlschmiermitteln *Lubrimax Edel C* und *AVANTIN 407 NEU*

Bild 5 ist zu entnehmen, dass beim Einsatz verschiedener Kühlschmiermittel deutliche Unterschiede bei den erzielten Oberflächenrauheiten auftreten. Die in der Vorschubrichtung gemessene Oberflächenrauheit ist immer besser, als die in der Zustellrichtung gemessene Oberflächenrauheit. Beste Oberflächenrauheiten werden beim Einsatz von *AVANTIN 407 NEU* in der Vorschubrichtung erzielt ($R_{a,min}=0,08\mu\text{m}$), wobei gleichzeitig schlechteste Oberflächenrauheiten in der Zustellrichtung erreicht werden ($R_{a,max}=0,68\mu\text{m}$). Beim Einsatz von *Lubrimax Edel C* werden dagegen sowohl in Zustell- als auch Vorschubrichtung annähernd gleiche Oberflächenrauheiten erzielt. Der Mittelwert beider Messrichtungen liegt ungefähr bei $R_a=0,20\mu\text{m}$. Da bei der Bauteilfertigung die Oberflächengüte auf der komplett erzeugten Fläche bestmöglich und gleichmäßig sein soll, ist beim Mikrofräsen unter MMKS der Einsatz von *Lubrimax Edel C* dem Einsatz von *AVANTIN 407 NEU* vorzuziehen.

4 Tauchkühlschmierung (TKS)

Bei der Untersuchung zum Mikrofräsen unter TKS befanden sich die Probe und die Fräuserschneiden komplett unter Kühlschmiermittel (vgl. Bild 1a). Dabei kamen neben dem eigentlichen Kühlschmiermittel *Lubrimax Edel C* auch die umweltfreundlicheren Pflanzenöle Rapsöl und Sesamöl zum Einsatz. Bild 6 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung graphisch dar.

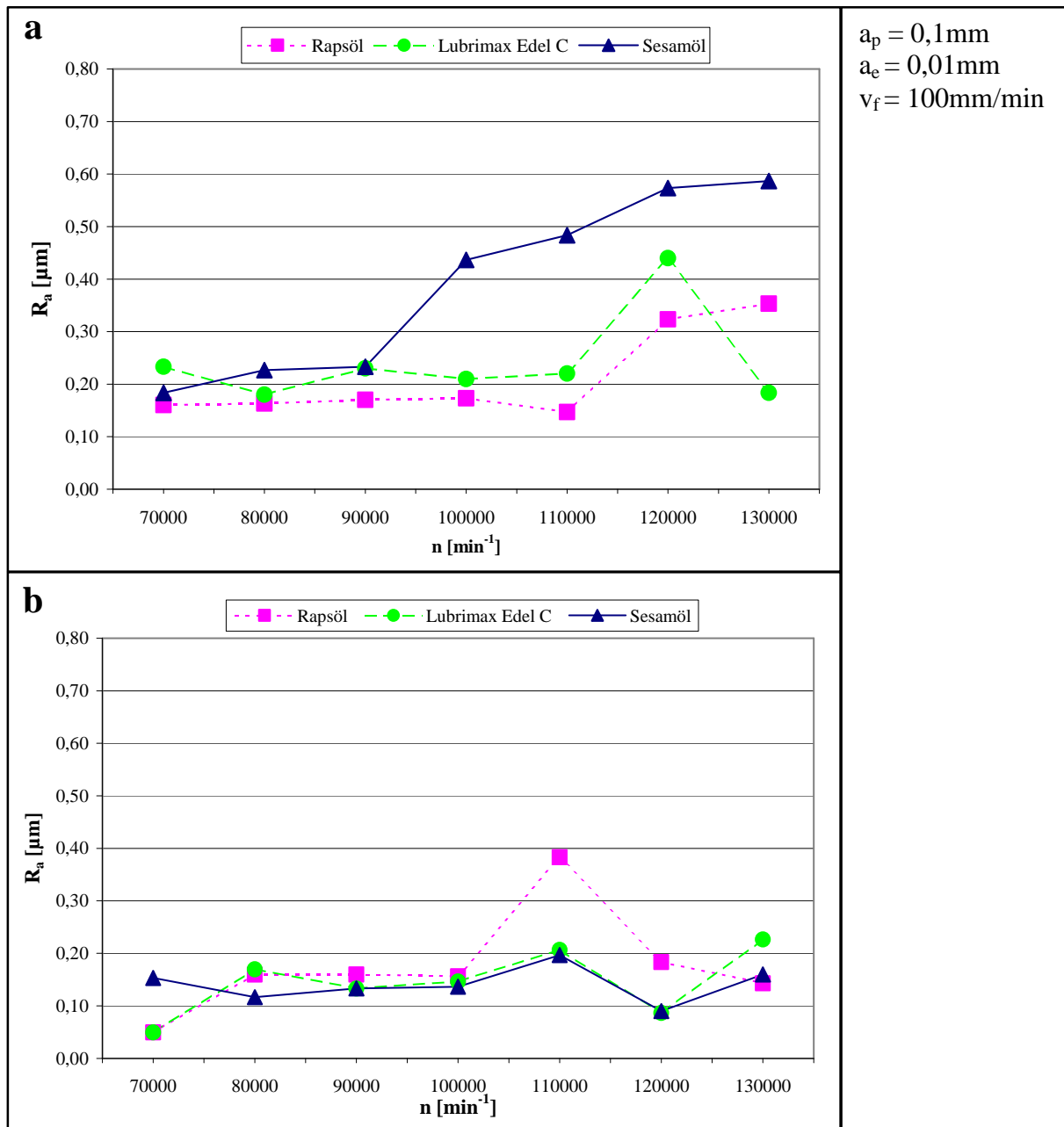


Bild 6: Oberflächenrauheiten R_a in Abhängigkeit von der Drehzahl n beim Mikrofräsen unter TKS mit den Fluiden *Lubrimax Edel C*, *Rapsöl* und *Sesamöl* a) in Zustellrichtung b) in Vorschubrichtung

Bild 6 zeigt, daß *Lubrimax Edel C* als Kühlschmiermittel zum Mikrofräsen unter TKS ($n_{\max}=110.000\text{min}^{-1}$) verwendet werden kann, da sowohl in Zustell- als auch Vorschubrichtung sehr gute Oberflächenrauheiten ($R_a < 0,2\mu\text{m}$) gemessen wurden. Noch besser sieht das Arbeitsergebnis beim Mikrofräsen unter TKS mit *Rapsöl* aus, da in der Zustellrichtung ($n_{\max}=100.000\text{min}^{-1}$) Oberflächenrauheiten von $R_a=0,18\mu\text{m}$ erreicht wurden. Der Einsatz von *Sesamöl* als Kühlschmiermittel beim Mikrofräsen unter TKS ist nur bedingt möglich, da zwar die erzielte Oberflächenrauheit in Vorschubrichtung der von *Lubrimax Edel C* und *Rapsöl* ähnelt, diese aber in Zustellrichtung bereits ab der Drehzahl $n=100.000\text{min}^{-1}$ nicht mehr ausreichend ist ($R_a > 0,4\mu\text{m}$).

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 1 und Bild 7 zeigen zusammenfassend die gemittelten Oberflächenrauheiten, die beim Mikrofräsen mit und ohne Kühlschmierung und beim konventionellen Fräsen (Oberflächenrauheiten der konventionell gefrästen Proben vor dem Mikrofräsversuchen) erzielt wurden. Dabei wird deutlich, dass beim Mikrofräsen

mit Kühlschmierung die besten Ergebnisse erzielt werden können. Die beim konventionellen Fräsen erzielten Oberflächenrauheiten liegen um $R_a=1\mu\text{m}$ und sind somit um ein vielfaches schlechter als die beim Mikrofräsen erzeugten Oberflächenrauheiten.

Oberflächenrauheiten R_a in μm		AVANTIN 407 NEU	Lubrimax Edel C	Sesamöl	Rapsöl
Mikrofräsen unter MMKS	Zustellrichtung	0,56	0,27	-	-
	Vorschubrichtung	0,08	0,16	-	-
Mikrofräsen unter TKS	Zustellrichtung	-	0,24	0,39	0,21
	Vorschubrichtung	-	0,15	0,14	0,18
Mikrofräsen bei Trockenbearbeitung	Zustellrichtung	0,4			
	Vorschubrichtung	0,36			
konventionelles Fräsen	Zustellrichtung	1,18			
	Vorschubrichtung	0,91			

Tabelle 1: Erzielte Oberflächenrauheiten R_a beim Fräsen von 1.4301

In der Praxis kommt es bei der Bauteilfertigung darauf an, neben der hohen Oberflächenqualität an sich auch eine gleichmäßige Oberflächenqualität zu erzielen. Dieses konnte entgegen aller Erwartungen am besten beim Mikrofräsen unter TKS mit Rapsöl erreicht werden, wo hervorragende Oberflächenrauheiten von $R_a=0,18\mu\text{m}$ (Vorschubrichtung) bzw. $R_a=0,21\mu\text{m}$ (Zustellrichtung) erreicht wurden und die Differenz dieser Oberflächenrauheiten lediglich bei $\Delta R_a=0,03\mu\text{m}$ lag. Da beim Mikrofräsen unter TKS mit dem Kühlschmiermittel *Lubrimax Edel C* ähnliche Ergebnisse erzielt wurden, kann man daraus schlussfolgern, daß sich die Tauchkühl schmierung als bestes Kühlschmierverfahren für das Mikrofräsen eignet.

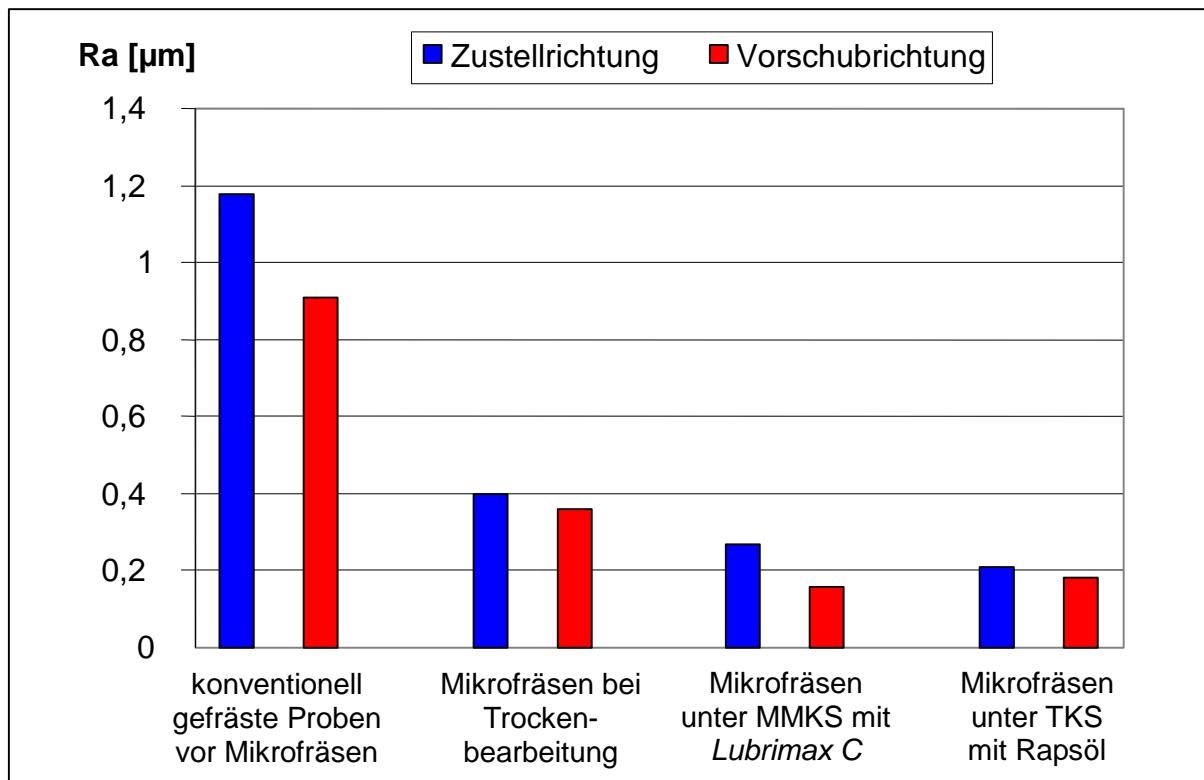


Bild 7: Erzielbare Oberflächenrauheiten R_a beim Mikrofräsen von 1.4301

Im Weiteren wurde festgestellt, daß die Oberflächenrauheiten bei Messungen in Vorschubrichtung immer besser sind als Oberflächenrauheiten bei Messungen in der Zustellrichtung. Dies wurde vor allem beim Mikrofräsen unter MMKS mit dem Kühlschmiermittel *AVANTIN 407 NEU* deutlich, wo in Vorschubrichtung die beste Oberflächenrauheit aller durchgeführten Versuche ($R_a=0,08\mu\text{m}$) erreicht wurde, diese jedoch in der Zustellrichtung ($R_a=0,59\mu\text{m}$) nicht akzeptabel war. Das liegt daran, daß die Fräser sich prozessbedingt in der Zustellrichtung verbiegen bzw. abdrängen lassen, dadurch unter einer ständigen kleinen Neigung zu der zu erzeugenden Oberfläche fräsen und so kleinste sägezahnartige Kanten zwischen den einzelnen Zustellungen erzeugen, die die Oberflächenrauheit verschlechtern. Dieser Effekt kann, wie hier beschrieben, durch eine geeignete Kühlschmiermittelwahl positiv beeinflusst werden. Jedoch nimmt dieser mit immer kleiner werdenden Fräserdurchmessern ($d < 0,3\text{mm}$) noch deutlicher zu.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß beim Mikrofräsen mit Kühlschmierung Oberflächenrauheiten in bester Qualität [4] erreicht werden können. Als am besten geeignetes Kühlschmierverfahren stellte sich die Tauchkühlschmierung heraus, wobei mit kleinen Abstrichen auch die Minimalmengen-Kühlschmierung eingesetzt werden kann. Im Weiteren konnte neben dem Einsatz von handelsüblichen Kühlschmiermitteln ebenfalls der Einsatz von alternativen Fluiden, beispielsweise dem Rapsöl, als Kühlschmiermittel für die Tauchkühlschmierung nachgewiesen werden.

Literatur

- [1] *Brudek, G.; Wulfsberg, J.P.*: Erfassung und Optimierung der Einstell- und Prozesskenngrößen in der Mikrozerspanung. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 19.-23. September 2005
- [2] *Weinert, K.*: Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung: Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik. Springer Verlag, Berlin, 1999
- [3] *Loichinger, A.*: Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoff-Versorgung von rotierenden Werkzeugen. Vulkan Verlag Essen, Universität Dortmund, 2004
- [4] *Schunk GmbH & Co. KG*: Vollgas bei 80.000min⁻¹. Erschien in: Mikroproduktion 3/2005, Hanser Verlag, S.19