



Willi Bärhausen GmbH & Co.KG  
Rimloser Str. 67  
36341 Lauterbach

**Entwicklung einer energie- und ressourcensparenden Kühlmitteldüse für den Einsatz bei Flach- und Profilschleifverfahren - EcoDüse**

**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben**

**DBU AZ 31087, gefördert von der**



Vorgelegt von:

Herr Maximilian Riedesel Freiherr zu Eisenbach,  
Geschäftsführer Willi Bärhausen GmbH & Co.KG

Prof. Dr.-Ing. Bahman Azarhoushang,  
Hochschule Furtwangen, KSF

Januar 2016

## I. *Inhaltsverzeichnis*

1 Zusammenfassung .....	1
2 Einleitung.....	2
3 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden .....	4
3.1 Konstruktion der verstellbaren Ringspaltdüse .....	4
3.2 Konzept und Konstruktion der V-Düse mit anpassbaren Leitblechelementen an Profilen (Eco-Düse) .....	8
3.3 Konzept der Automatisierung der Eco-Düse .....	15
4 Ergebnisse der Experimente mit Eco-Düse und Diskussion .....	16
4.1 Tiefschleif- und Flachsleif-Versuche .....	18
4.2 Langzeitversuche.....	23
4.3 Versuche in Bezug auf die Schleiftemperatur.....	26
5 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation.....	27
5.1 Veröffentlichungen .....	27
5.2 Präsentationen.....	28
6 Fazit.....	28
7 Literaturverzeichnis .....	29

## II. *Abbildungsverzeichnis*

<b>Abb. 1:</b> Details der Ringspaltdüse.....	5
<b>Abb. 2:</b> Wenn man den Druck an der Ringspalte und den Volumenstrom kennt, kann man mit diesem Diagramm die Austrittsgeschwindigkeit bestimmen .....	6
<b>Abb. 3:</b> Pneumatik-Schaltplan, für die Automatisierte Steuerung der Ringspaltendüse. ....	7
<b>Abb. 4:</b> Simulation der Ringspaltdüse zur Festlegung eines optimalen Designs in den Bereichen Strömungsturbulenzen und Linearität des Fluidstrahls. ....	7
<b>Abb. 5:</b> Die am KSF gefertigte Ringspaltdüse. ....	8
<b>Abb. 6:</b> Strahlverlauf der Ringspaltdüse.....	8
<b>Abb. 7:</b> Das Schema der Eco-Düse.....	9
<b>Abb. 8:</b> Querschnitt durch die Eco-Düse.....	10
<b>Abb. 9:</b> Die Düsenelemente bewegen sich auf der Schiene und halten gleichzeitig ihre vertikale Position. ....	11
<b>Abb. 10:</b> Durch Drücken der Düsenelemente auf die Schleifscheibe nehmen die Düsenelemente die Form der Schleifscheibe an. ....	12
<b>Abb.11:</b> Durch Drücken der Düsenelemente auf die Schleifscheibe nehmen die Düsenelemente die Form der Schleifscheibe an. Fixiert werden die Düsenelemente durch Flügelschrauben.....	12
<b>Abb. 12:</b> Der Abstand zwischen der Schleifscheibe und den Düsenelementen nach dem Fixieren der Düsenelemente. ....	13
<b>Abb. 13:</b> Unteres Düsenelement mit integriertem Leitblech. ....	14
<b>Abb. 14:</b> a) Düsenvorkammer ohne Moosgummi, b) Kunststoffmasse (Moosgummi) in Düse. ....	14
<b>Abb. 15:</b> Detailansicht der automatischen Bedieneinheit der Eco-Düse. ....	15
<b>Abb. 16:</b> Detailansicht der automatischen Bedieneinheit der Eco-Düse. ....	16
<b>Abb. 17:</b> Testdurchlauf der "Eco-Düse".....	17
<b>Abb. 18:</b> Testdurchlauf der "Eco-Düse" mit Schleifscheibe.....	17
<b>Abb. 19:</b> das Profil der Schleifscheibe (links) und Versuchsaufbau (rechts).....	18
<b>Abb. 20:</b> Vergleich der Schleifergebnisse mit der Eco-Düse mit 6 l/min und der Keildüse mit 6, 30, und 80 l/min. ....	20
<b>Abb. 21:</b> Oberflächen der Versuchsteile nach dem Tiefschleifen mit den verschiedenen Düsen.....	21
<b>Abb. 22:</b> Oberflächen der Versuchsteile nach dem Tiefschleifen mit den verschiedenen Düsen. Die geschliffene Oberfläche, welche mit der Keildüse mit 6 l/min flachgeschliffen wurde, ist etwas schlechter als die mit der Keildüse mit 80 l/min oder der Eco-Düse mit 6 l/min geschliffene Oberfläche. ....	22
<b>Abb. 23:</b> Verschleiß der Schleifscheibe mit Eco-Düse und Keildüse bei Langzeitversuchen. ....	23
<b>Abb. 24:</b> Rauheit der Werkstücke mit Eco-Düse und Keildüse in Langzeitversuchen. ....	24
<b>Abb. 25:</b> Topographie der Schleifscheibe nach Langzeitversuchen für Eco- und Keildüse. ....	25
<b>Abb. 26:</b> Die geschliffene Oberfläche mit Schleifbränden während die Keildüse mit 6 l/min im Einsatz war und die geschliffene Oberfläche ohne Schleifbrand während die Eco-Düse eingesetzt wurde. ....	26
<b>Abb. 27:</b> Der Verschleiß der Schleifscheibe reduzierte sich von 110 auf 80 µm durch Einsatz der Eco-Düse anstelle der Keildüse im Tiefschleifen mit 1 mm Zustellung. ....	27

## III. *Tabellenverzeichnis*

Tabelle 1: Liste der ausgeführten versuche zum Vergleich der Eco-Düse mit der Keildüse..	18
--	----

#### IV. *Abkürzungen*

MMKS	Minimalmengenkühlschmierung
KSS	Kühlschmierstoff
$p_1$	Druck des Kühlmittels vor Austritt aus der Düse
$p_2$	Druck des Kühlmittels nach Austritt aus der Düse
$\rho$	Die Dichte des Kühlschmierstoffes
$c_1$	Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels vor Austritt aus der Düse
$c_2$	Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels nach Austritt aus der Düse
$c$	Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels
A	Die Querschnittfläche
Q	Volumenstrom

## **1 Zusammenfassung**

Beim Schleifen wird, aufgrund der hohen Wärmeentwicklung in der Kontaktzone, eine sehr hohe Menge an KSS verwendet. Folglich ist der hohe Verbrauch an KSS sehr kostspielig, die verwendeten Motoren für das Versorgungssystem brauchen jede Menge an Energie für die notwendigen Volumenströme und eine Gesundheitsgefährdung des Bedieners und eine Umweltbelastung ist nicht auszuschließen. Somit ist die Verringerung des Kühlmittelverbrauchs beim Schleifen ohne Beschädigung der Werkstückqualität ein vernünftiger Ansatz, um einen umweltfreundlichen Prozess zu erreichen. Daher wurde in diesem Projekt eine neue innovative Düse, die sogenannte "Eco-Düse" entwickelt, um den Kühlmittelverbrauch zu reduzieren. Durch diese Düse kann eine ordnungsgemäße Kühlfunktion des Kühlmittels durch Verwendung von weniger als 10% der Kühlmittelmenge, die üblicherweise mit einer Keildüse verwendet wird, realisiert werden. Darüber hinaus ist die Flexibilität der Eco-Düse, die verschiedenen Profile der Schleifscheiben anzunehmen ein weiterer großer Vorteil. Durch eine einzige Düse besteht die Möglichkeit verschiedene Schleifscheiben oder Schleifscheibenprofile zu verwenden ohne die Düse zu wechseln. Des Weiteren wurde ein System, für die automatische Anpassung an den Schleifscheibenverschleiß nach dem Abrichten konstruiert. Die Schleifversuche wurden durchgeführt, um die Effizienz der Eco-Düse mit der Keildüse zu vergleichen. Die Eco Düse wurde mit einem geringen Volumenstrom (6 l/min) getestet und deren Effizienz mit einer Keildüse mit verschiedenen Volumenströmen, von 6 – 80 l/min verglichen.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Keildüse, die i.d.R. mit einem hohen Volumenstrom von bis zu 80 l/min betrieben wird, durch die Eco-Düse mit viel geringerem Durchfluss von lediglich 6 l/min ersetzt werden kann. Ebenso konnte gezeigt werden, dass sich durch den Einsatz der Eco-Düse der Schleifscheibenverschleiß wesentlich reduziert. Diese Vorteile resultieren aus der effektiveren Zufuhr des Kühlschmiermittels mittels der Schleifscheibe in die Kontaktzone. Die Ergebnisse aus Versuchen zum Tiefschleifen mit einer Zustellung von 1 mm zeigen, dass bei Verwendung der Eco-Düse mit ihrem niedrigen Volumenstrom, im Gegensatz zu einer Keildüse mit gleichem Durchfluss, Schleifbrand verhindert werden konnte.

Die Austrittsgeschwindigkeit des Kühlmittels das mit der Schleifscheibe im Kontakt kommt hat eine große Auswirkung auf die Kühlungseffizienz bei der Verwendung der Keildüse. Dies bedeutet, dass die Austrittsgeschwindigkeit des Kühlmittels sich gleicht mit der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe. Dieser Parameter hängt dann wiederum ab von der Austrittsfläche der Düse. Eine Ringspaltdüse wurde in diesem Projekt ebenfalls entworfen und hergestellt. Die Austrittsfläche dieser Düse kann durch eine konstruierte pneumatische Steuereinheit geändert werden. Ein Testdurchlauf der Düse hat gezeigt, dass durch diese Düse ein laminarer Strahl des Kühlmittels bis zu 130 mm erreicht werden kann. Jedoch muss diese künftig optimiert werden.

## **2 Einleitung**

Das Schleifen zeichnet sich durch jeweils große Kontaktlängen zwischen Werkzeug und Werkstück aus. Dies führt beim Zerspanprozess zu einer erschwerten Zuführung des Kühlschmierstoffs in die Kontaktzone und verursacht neben einem negativen Spanwinkel eine höhere Wärmeentwicklung [Tawa02]. Abhängig von der Temperatur ändert sich die Mikrostruktur des Werkstücks. Es können Eigenspannungen auftreten, welche die Festigkeit des Werkstücks vermindern [Iran05, Tawa93]. Um dem entgegenwirken zu können, muss die Kontaktzone sowohl gut gekühlt als auch gut geschmiert werden, weshalb dem Kühlschmierstoff und dessen Zuführung eine wichtige Rolle zukommt. Die Abfuhr der beim Schleifen entstehenden Wärme aus der Kontaktzone und Verringerung der Reibung zwischen Schleifkörnern und Werkstück zählen zu den Hauptaufgaben des Kühlschmierstoffs. Darüber hinaus ist es auch essentiell, die Schleifspäne durch Kühlschmierstoffe abzutransportieren. Durch die prozessgeeignete Kühlschmierung werden die Werkstückqualität und die Schleifscheibentopographie positiv beeinflusst und demzufolge der Werkzeugverschleiß vermindert. Meist werden Kühlmittelsysteme vom Hersteller mit der Maschine ausgeliefert. Dabei berücksichtigt dieser oft die Wünsche des Kunden und fertigt spezifische, für den Kunden angepasste Varianten. Die Kühlmitteldüse wird an den jeweiligen Einsatzzweck angepasst, wobei meist Serienbauteile wie flexible Gliederschläuche mit Standard-Düsen eingesetzt werden. Ebenfalls verfügbar sind Systeme zur automatischen Verschleißkorrektur [DBU14]. Herkömmlicherweise wird beim Kühlschmierstoffeinsatz ein Mehrfaches des Volumens zugeführt, als das was von der Kontaktzone aufgenommen werden kann, um ein vollständiges Füllen der Kontaktzone sicherzustellen. Höhere Kühlschmierstoffvolumenströme bewirken aber auch steigende Kräfte zwischen Werkzeug und Werkstück, als auch eine Erhöhung der notwendigen Spindelleistung [Töns04]. Weiter wächst der Platzbedarf für die Maschine durch die Kühlmittelanlage und die benötigten leistungsstarken Pumpen. Neben Überflutungsdüsen, sog. Schwalldüsen, sind heutzutage auch Düsen, die eine Minimalmengenkühschmierung (MMKS) mit drastisch reduzierten Kühlschmierstoff-Volumenströmen gewährleisten sollen als auch Systeme zur gemischten Kühlung mit Fluiden und gekühlten Gasen Gegenstand der Forschung [Albe11]. Aufgrund der Senkung der Kühlschmierstoffmenge werden die Kühlschmierstoffbeschaffungs-, Einsatz und Entsorgungskosten reduziert. Darüber hinaus werden Behälter-, bzw. KSS-Anlagengrößen dementsprechend verkleinert und die Kühlschmierstoffstandzeit erhöht. Aus diesem Grund befassen sich diverse Forschungsprojekte mit einer prozessgeeigneten, wirtschaftlichen und umweltbewussten Kühlschmierung. Um eine effektive Kühlschmierung zu erreichen, wurden Düsen entwickelt, die eine MMKS oder zumindest eine Reduzierung des KSS-Verbrauchs ermöglichen. Beim Einsatz einer sog. Schuhdüse, eine der am häufigsten genutzten Kammerdüsen, kann zwar der Kühlschmierstoffstrom im Vergleich zu überflutenden Düsen reduziert werden, dies ist aber mit hohem Einrichtungsaufwand verbunden. Eine

maßgebliche Verbesserung der Oberflächen des Werkstücks lässt sich bei Schuhdüsen laut Klocke [Kloc00] feststellen. Die Düsen müssen aber wegen des Verschleißes und nach Abrichten der Schleifscheibe entsprechend nachgeführt werden. Webster [Webs02] kommt deshalb zu dem Schluss, dass Schuhdüsen bei großem Scheibenverschleiß nicht effektiv einsetzbar sind. Darüber hinaus lässt sich die Größe der Schuhdüse nicht an alle Schleifeinrichtungen und an alle Schleifscheibenprofile anpassen, deshalb muss die Schuhdüse ausgewechselt werden. Zudem kann es zur Verwirbelung und Erwärmung des Kühlschmierstoffs in der Druckkammer kommen. KSS-Zuführsysteme gehören zu den Maßnahmen, die den Schleifprozess maßgeblich beeinflussen können. Zur Beherrschung des Kühlschmierstoffeinsatzes beim Schleifen gehört folglich in erster Linie die bedarfsorientierte Versorgung des Schleifspalts mit Kühlschmierstoff, bei optimaler Positionierung der Düse und dem notwendigen Druck. Zu den einfach umsetzenden Methoden zählen Düsenposition oder Düsenart [Brin08]. Diesbezüglich hat z.B. Ebbrel [Ebbr00] festgestellt, dass der seitliche Abfluss von Kühlschmierstoff durch tangentiale Kühlschmierstoffzuführung deutlich zunimmt. Furutani [Furu02] empfiehlt eine abgewinkelte Zuführung, um durch die Kontaktzone transportierten Kühlschmierstoff vermehren zu können, wobei Suzuki [Suzu05] die Anwendung einer flexiblen Folie zur verbesserten KSS-Zuführung vorschlägt. Nach ersten Versuchen wurde eine Düse entwickelt, die es ermöglicht, mit einer Kühlschmierstoffersparnis von bis zu 75% effektiv zu kühlen. Gemeint ist die Vesali-Düse, kurz V-Düse, bei der die Schleifkräfte durch den geringeren KSS-Einsatz deutlich reduziert werden und im Vergleich zur konventionellen Freistrahldüse eine feinere Oberfläche erreicht wird [TAWA10]. Das größte Manko ist die beschränkte Einsatzmöglichkeit, der fehlenden Verstellbarkeitsfunktion der Düse geschuldet. Eine optimale Kühlung mit der V-Düse ist somit nur an einer geraden Schleifscheibe ohne Profil möglich. Die Vorteile der Eco-Düse liegen in der erhöhten Schmier- und Kühlleistung, was bei einer insgesamt niedrigeren Spindelleistung zu einer verbesserten Oberfläche führt. Starke Verschmutzung der Schleifmaschine durch Staub und das Auftreten von Aerosolen soll durch den Luftabweiser und dem Leitblech verhindert werden.

Das Projekt beabsichtigt die Realisierung einer Düse, welche folgende Anforderungen erfüllt:

- Signifikante Kühlschmierstoff Ersparnis
- eine Düse, die mit Schleifprofilen kompatibel ist
- automatische Neupositionierung der Düse bei Verschleiß der Schleifscheibe
- optimaler Zustrom von Kühlmittel in die Kontaktzone Werkstück-Schleifscheibe

### **3 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

In diesem Projekt wurden zwei Düsen konstruiert, zum einen die verstellbare Ringspaldüse und zum anderen die V-Düse mit Leitblechelementen, die an das Schleifscheibenprofil anpassbar sind, auch genannt „Eco-Düse“.

Die Ringspaldüse ist in der Lage die Geschwindigkeit des Kühlmittels der Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe anzupassen. Hierdurch wird das Kühlmittel optimal von der Schleifscheibe mitgenommen, was die Kühlung optimiert. Die Düse wurde designt und hergestellt und es wurden Testdurchläufe ausgeführt. Somit war eine automatisierte Steuereinheit konstruiert.

Die Eco-Düse wurde mit dem Ziel konstruiert, den Kühlmittelverbrauch des Prozesses zu reduzieren. Die Düse kann verschiedene Schleifscheibenprofilformen annehmen. Das bedeutet, dass man mit einer Düse verschiedene Schleifscheibenprofile kühlen kann, ohne die Düse wechseln zu müssen. Diese Düse wurde ebenfalls konstruiert und hergestellt und es wurden Testdurchläufe ausgeführt. Im Folgenden werden die beiden Düsen im Detail erklärt.

#### **3.1 Konstruktion der verstellbaren Ringspaldüse**

Für die optimale Kühlung des Schleifprozesses spielt die Geschwindigkeit, mit der das Kühlmittel die Düse verlässt, eine wichtige Rolle. Wenn die Geschwindigkeit, mit der das Kühlmittel ausgestrahlt wird, viel niedriger als die Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe ist, kann das Kühlmittel die Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe nicht erreichen. Für die optimale Funktionalität des Kühlmittels muss dessen lineare Geschwindigkeit mindestens 80% von der Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe betragen. Eine Düse mit einer fest definierten Austrittsfläche sollte also nicht zum Schleifen mit verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten benutzt werden. Sollte z.B. die Schnittgeschwindigkeit von 30m/s auf 90m/s erhöht werden, so muss die Austrittsfläche der Düse sich so anpassen, dass bei einer gleichbleibenden Pumpgeschwindigkeit die Geschwindigkeit des ausgestrahlten Kühlmittels um das 3-fache erhöht wird.

In diesem Projekt wurde eine variable Düse designt, bei der sich die Austrittsfläche, sowie auch eventuell die lineare Geschwindigkeit des Kühlmittels, automatisch einstellen lässt.

**Abb. 1** zeigt den schematischen Aufbau der Düse mit all ihren Komponenten. Die Düse besteht aus einem Gehäuse, einer Nadel und einer Hülse. Die Austrittsfläche, an der der Kühlschmierstoff ausgestrahlt wird, kann durch axiales Verschieben der Nadel verändert werden. Die Austrittsfläche der Düse ist von zylindrischer Form (C-2 in **Abb. 1**), und wird durch Verschiebung der Nadel, in linker Richtung, größer. Durch das M20 Gewinde, das in **Abb. 1** (b- 3) zu sehen ist, kann die Nadel auf der Kolbenführung bewegt werden. Dieses Gewinde wird durch einen pneumatischen Motor angetrieben. Der Motor wird über die Befehle eines Drucksensors, welcher in der Sensoraufnahme c-1 in **Abb. 1** sitzt, gesteuert. Der



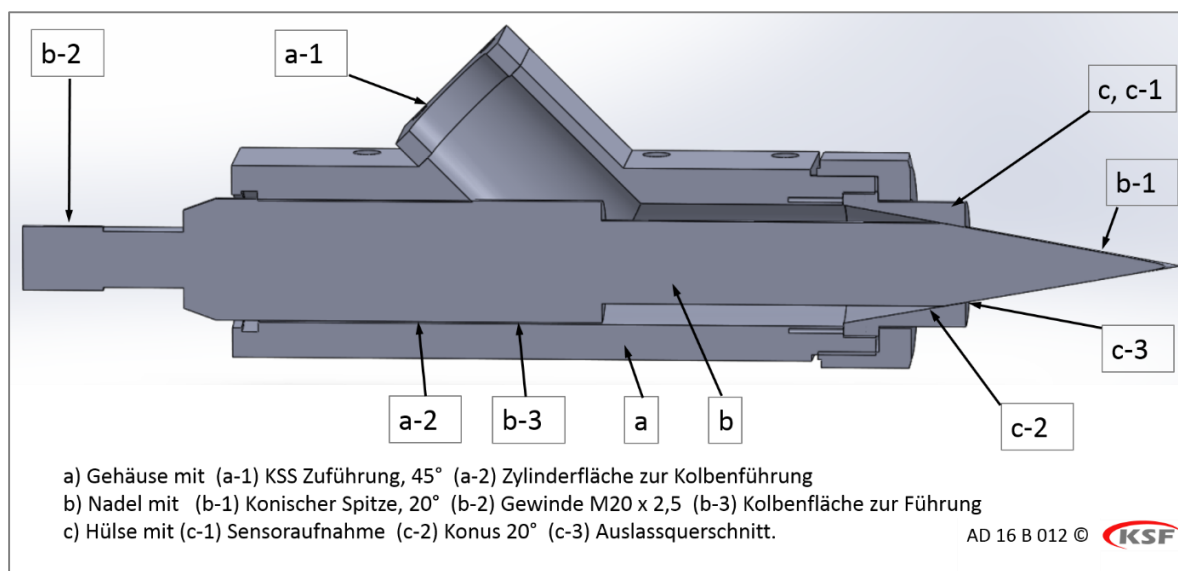
Sensor misst am Austritt den Druck des Kühlmittels. Mit der Formel (1) wird die Geschwindigkeit des Kühlmittels nach dem Austritt aus der Düse wie folgt berechnet:

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2} \quad (1)$$

Die Variablen  $p_1$  und  $p_2$  beschreiben den Druck des Kühlmittels vor bzw. nach Austritt aus der Düse.  $p_1$  wird durch den Drucksensor erfasst.  $p_2$  ist der Luftdruck der Erdoberfläche (1bar). Die Dichte des Kühlschmierstoffes wird als " $\rho$ " bezeichnet und kann über die Hersteller-Daten herausgefunden werden. Die Variablen  $c_1$  und  $c_2$  beschreiben die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels vor bzw. nach Austritt aus der Düse. „ $c_1$ “ wird über die folgende Gleichung des Volumenstrom „ $Q$ “ berechnet:

$$Q = A \cdot c \quad (2),$$

wobei A die Querschnittfläche und c die Strömungsgeschwindigkeit sind.

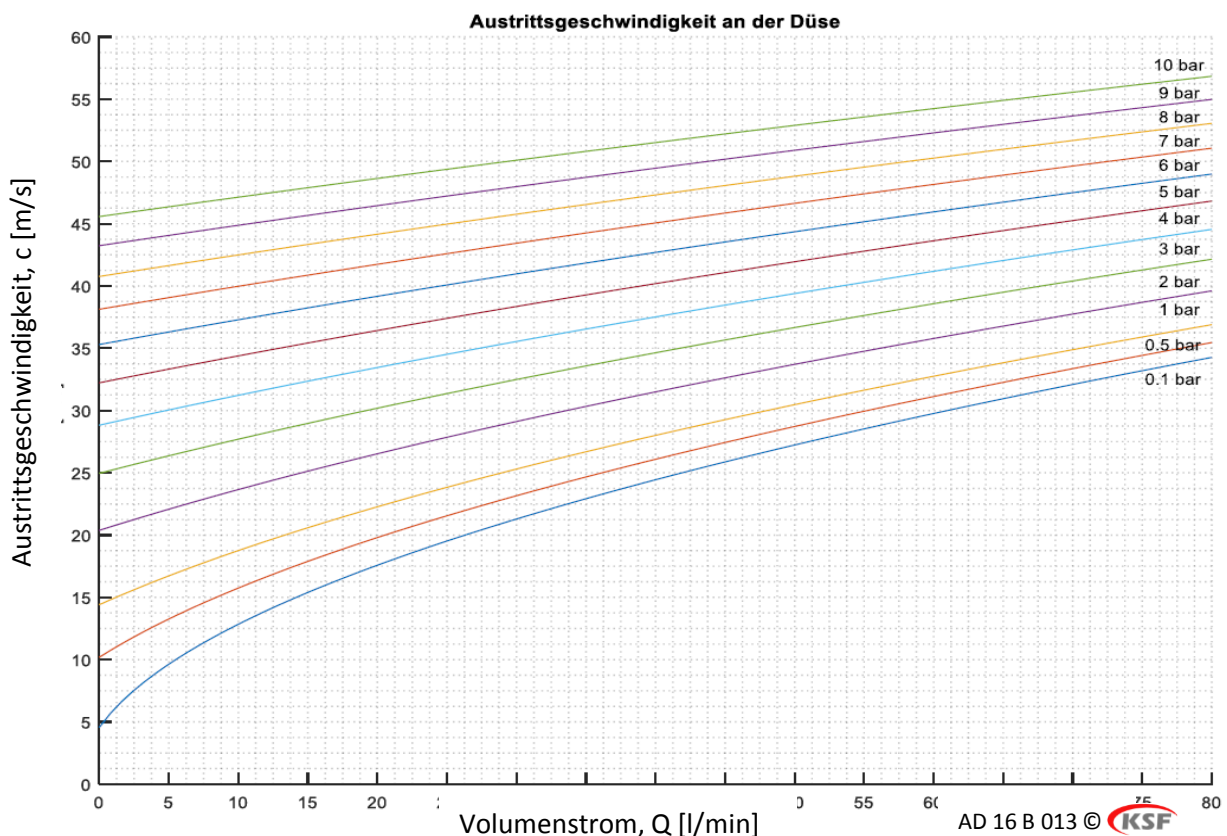


**Abb. 1:** Details der Ringspaldüse.

Da sich der Volumenstrom durch unterschiedliche Austrittsflächen und sich ändernden Druck verändert, muss das Verhältnis zwischen Volumenstrom und Druck für die verwendete Kühlmittelpumpe an der Maschine gefunden werden. Bestimmt werden kann dieses Verhältnis durch die Messung des Volumenstromes mit Hilfe des Volumenstrom- und Drucksensors, welcher hinter der Kühlschmierstoffpumpe sitzt sowie durch Messung des Druckes durch den Drucksensor, der am Austritt der Düse sitzt. Die Strömungsgeschwindigkeit am Austritt der Düse, also  $c_1$  aus Gleichung 1, kann aus Gleichung 2 berechnet werden, indem man die Querschnittsfläche kennt. Die Austrittsfläche ist aus dem Design bekannt, je nachdem wie die Nadelposition eingestellt ist. Die Strömungsgeschwindigkeit nach dem Austritt der Düse kann durch Gleichung 1 berechnet werden, nachdem man nach der weiter oben erklärten Methode  $c_1$  gefunden hat.

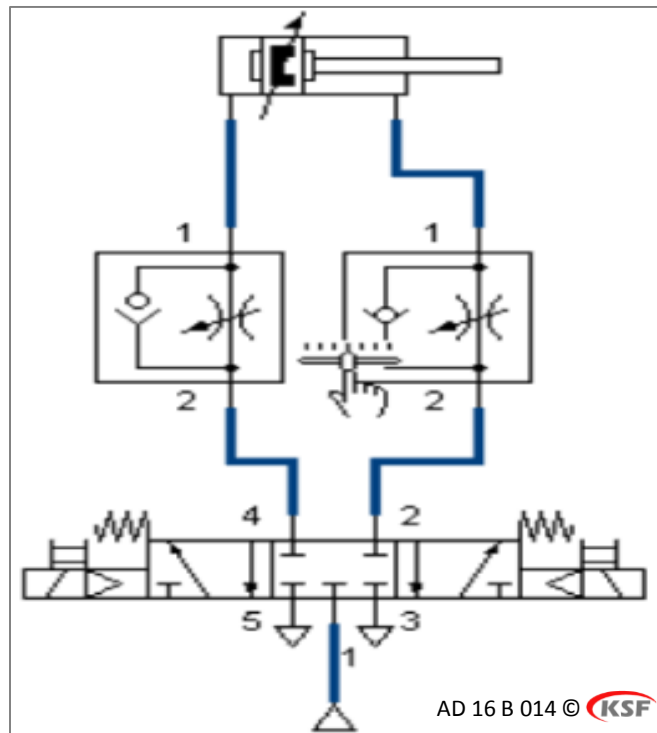
In anderen Worten: Die Strömungsgeschwindigkeit kann durch Verändern der Austrittsfläche variieren, was wiederum durch Bewegung der Nadel mit Hilfe der pneumatischen Antriebe ermöglicht wird. Der Drucksensor und die weiter oben genannten Berechnungen ermitteln, wie viel und in welche Richtung die Nadel sich bewegen muss.

**Abb. 2** zeigt ein Diagramm in welchem die Austrittsgeschwindigkeit an der Düse dargestellt wurde. Gemessen und berechnet wurde es an der Maschine ELB im KSF Labor. Wenn man den von den Sensoren gemessenen Druck und den Volumenstrom kennt, kann mit diesem Diagramm die Austrittsgeschwindigkeit bestimmt werden.



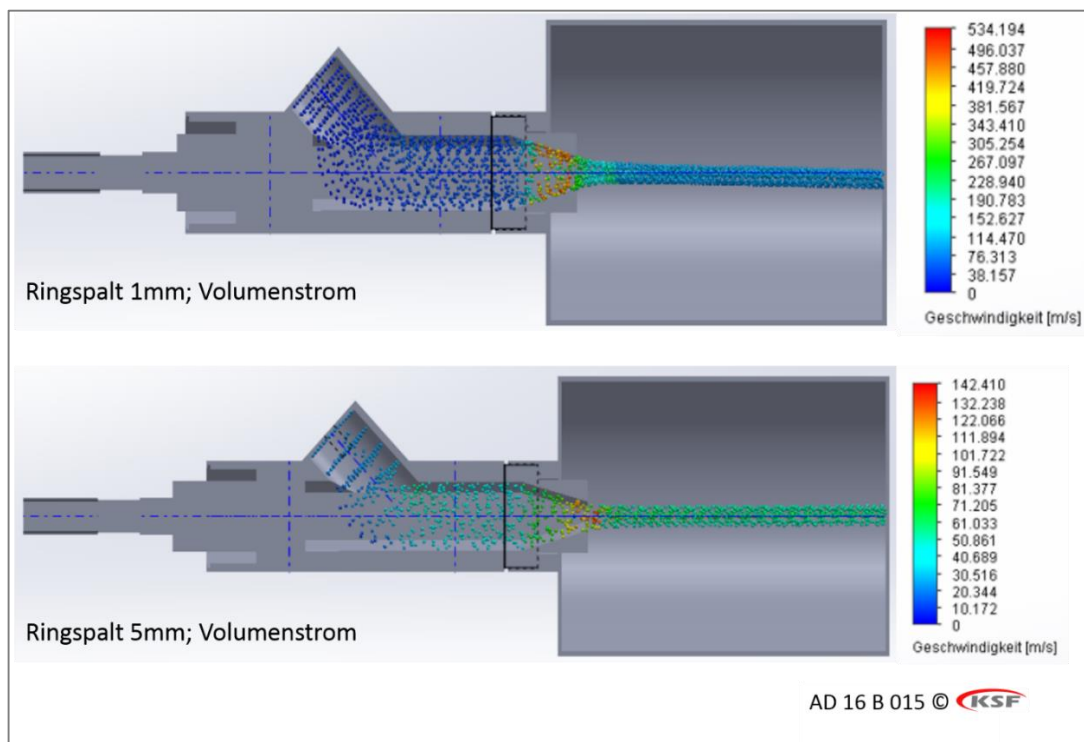
**Abb. 2:** Wenn man den Druck an der Ringspalte und den Volumenstrom kennt, kann man mit diesem Diagramm die Austrittsgeschwindigkeit bestimmen

Um die „Nadel“ zu verstellen, wird ein Pneumatikzylinder verwendet. Dieser kann mittels eines 5/3-Wegeventils positioniert werden. Das Ventil wird über zwei Spulen angesteuert, die von einer Steuerplatine angesteuert werden. Das Ventil ermöglicht es, den Zylinder aus- und einzufahren sowie in seiner Stellung zu sperren. Für eine Feineinstellung der Stellgeschwindigkeit des Zylinders kommen zwei Drosselrückschlagventile zum Einsatz. Diese ermöglichen eine Abluftdrosselung, welche ebenfalls einen Stick-Slip-Effekt und ein Überschwingen des Zylinders bei der Positionierung verhindert. In **Abb. 3** ist der Pneumatik-Schaltplan für die automatisierte Steuerung der Düse zu sehen.



**Abb. 3:** Pneumatik-Schaltplan, für die Automatisierte Steuerung der Ringspaltendüse.

Mit der Software Solidworks wurde der Kühlmittelfluss der Düse simuliert. Durch die Simulation wurde das optimale Design zur Minimierung der Strömungsturbulenzen bestimmt. Die Linearität des ausgestrahlten Kühlmittels wurde ebenfalls simuliert. **Abb. 4** zeigt zwei Beispiel-Simulationen mit zwei unterschiedlichen Ringspalten von 1 und 5 mm.

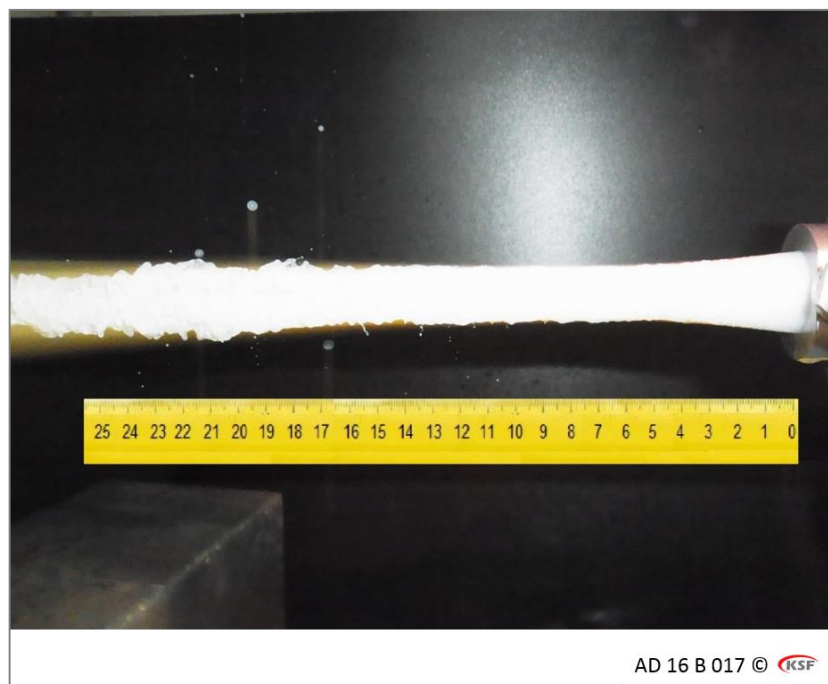


**Abb. 4:** Simulation der Ringspaltndüse zur Festlegung eines optimalen Designs in den Bereichen Strömungsturbulenzen und Linearität des Fluidstrahls.

**Abb.5** und **6** zeigen die Ringspaltdüse und deren Testdurchläufe. Durch die konische Düsennadel wird in Versuchen ein homogener KSS-Strahl mit laminarem Strömungsverhalten bis maximal ca. 130 mm erreicht. Danach ist, wie auf der Aufnahme zu erkennen, eine extreme Erhöhung der Verwirbelung zu sehen.



**Abb. 5:** Die am KSF gefertigte Ringspaltdüse.



**Abb. 6:** Strahlverlauf der Ringspaltdüse.

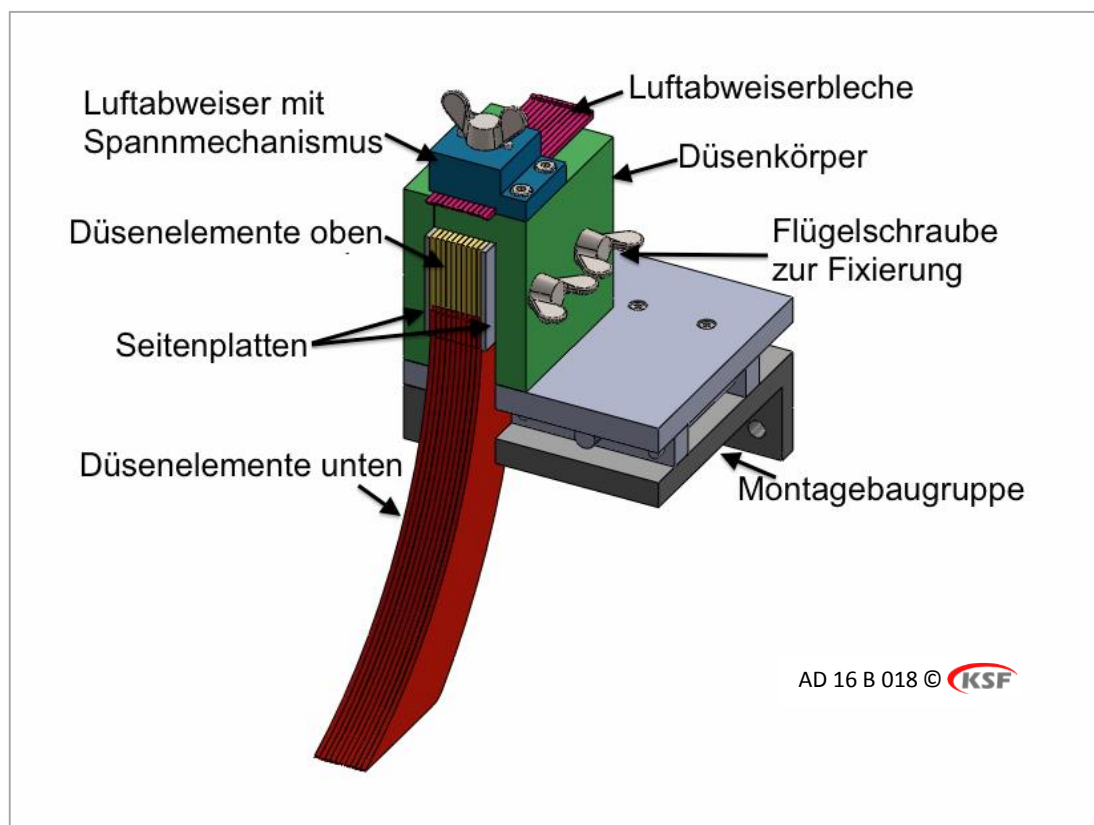
### 3.2 Konzept und Konstruktion der V-Düse mit anpassbaren Leitblechelementen an Profile (Eco-Düse)

Zur Optimierung des Kühlschmierstoffverbrauches wird eine Düse, basierend auf dem Konzept der V-Düse [TAWA10] konstruiert. Zusätzlich wird die Düse einstellbar, so dass sie

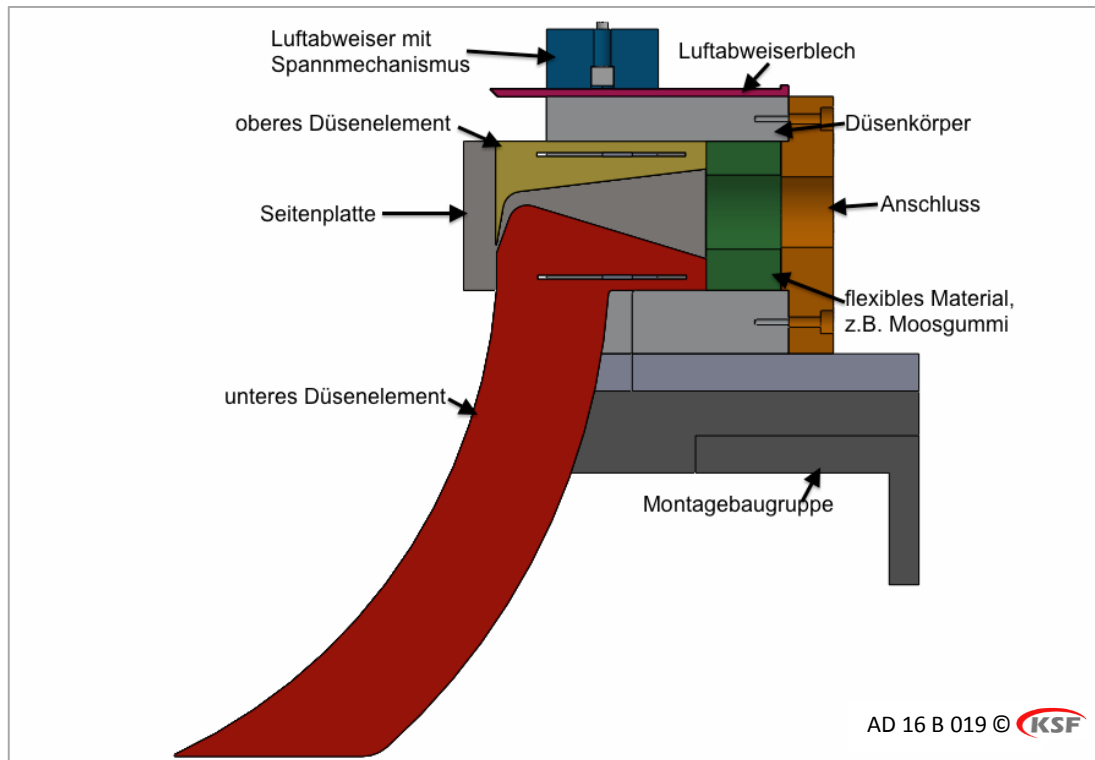
sich, beim Schleifen von relativ tiefen Profilen, der Form der Schleifscheibe angleicht. In diesem Design wird das Kühlmittel nahe der Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe zugeführt. Dadurch gelangt das Kühlmittel, durch Hilfe der Rotationsgeschwindigkeit der Schleifscheibe, leichter in die Kontaktzone.

Das Hauptziel ist die Reduktion des Kühlschmierstoffverbrauches in Schleifprozessen dank der höheren Portion des Kühlmittels, welches in die Kontaktzone zugeführt wird. Die Kühlung bzw. Benetzung des gesamten Schleifscheibenprofils wird durch die variable Form der Düse realisiert.

**Abb. 7** stellt das Schema der Eco-Düse dar. Das Design der Düse besteht aus den Düsenelementen oben und unten, welche den Kühlmittelaustritt und das Gegenprofil der Schleifscheibe bilden, einem Luftabweiser und dem Düsenkörper. **Abb. 8** zeigt den Querschnitt der Düse und dessen innere Bauteile. Die oberen und unteren Düsenelemente sind dünne Plättchen, welche nebeneinander zwischen den Seitenplatten positioniert und im Düsenkörper fixiert sind. Sie formen den Kühlmittelaustritt.



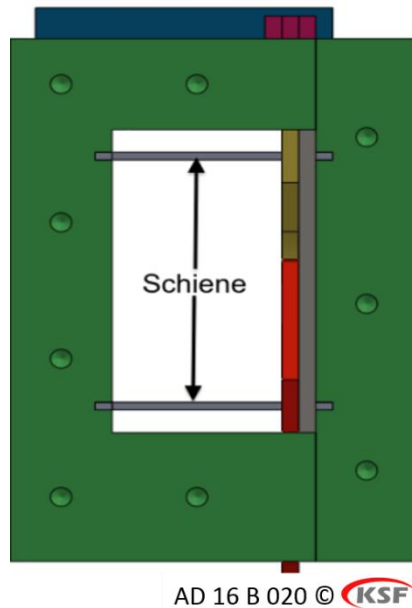
**Abb. 7:** Das Schema der Eco-Düse.



**Abb. 8:** Querschnitt durch die Eco-Düse.

Des Weiteren wurde an dem unteren und oberen Düsenelement eine Nut eingefügt, um mithilfe einer Führungsschiene die Verschiebung der Düsenelemente in axialer Richtung zu ermöglichen. Zu sehen sind in **Abb.9** die Schienen, auf denen die Nuten der Düsenelemente positioniert werden. Insgesamt vereinfachte sich das Anpassen der Düse an verschiedene Schleifscheibenformen mit der Führung der Düsenelemente und der neuen Fixierung durch die Gewindebohrungen stark. Nach Ausblenden des Anschlusses sind in **Abb. 9** die Fugen an den Innenseiten der Düse zu sehen. Diese dienen der Schiene als Führung und Fixierung. Zur besseren Übersicht wurde darauf verzichtet, den vollständigen Aufbau zu zeigen, sodass im Bild nur ein Düsenelementpaar, eine Seitenplatte und drei Luftabweiserbleche zu sehen sind.

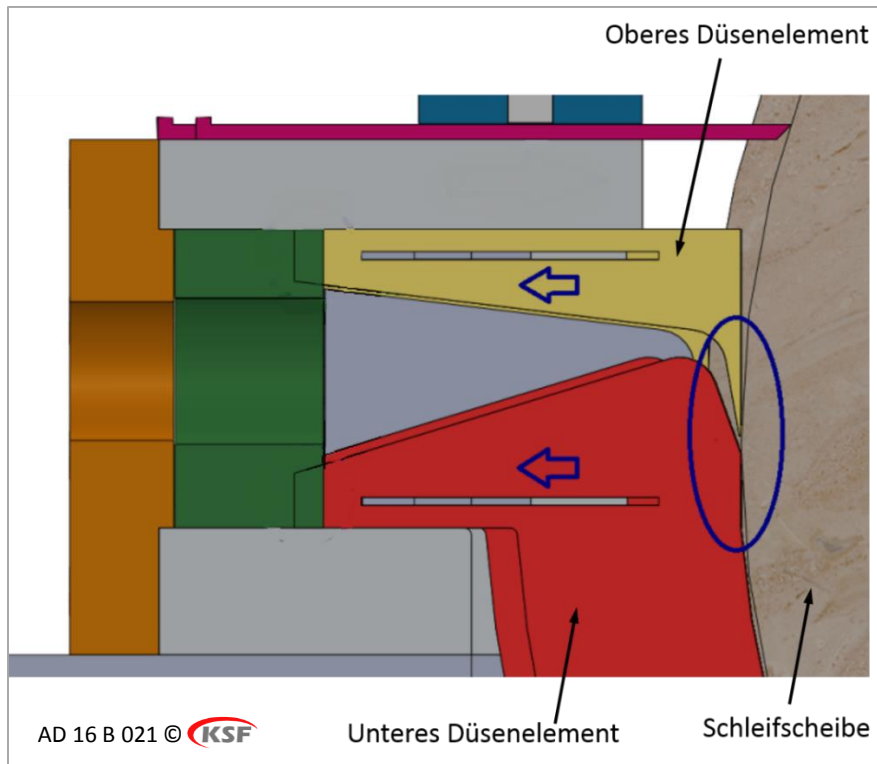
Die Führungsschiene ist nach hinten geöffnet, damit die Düsenelemente eingeführt werden können. Um der Düse zu ermöglichen, sich an verschiedene Schleifscheibenprofile anpassen zu können, wird in die Düse und zwischen Anschluss und den Düsenelementen (**Abb. 8**) ein flexibler Werkstoff eingeplant, der genügend Druck auf die Düsenelemente aufbringen und durch seine Elastizität die Form der Schleifscheibe annehmen kann. Als geeigneter Werkstoff kam hier Moosgummi in Frage, da dieser die gewünschten Anforderungen erfüllte und den KSS nur geringfügig aufsaugte. Vereinfacht veranschaulicht ist das Prinzip in **Abb. 10** dargestellt. Da die dünnen Plättchen relativ lose sind, werden die oberen und unteren Düsenelemente durch Drücken der Düse auf die Schleifscheibe dem Schleifscheibenprofil angeglichen. Dies wird von einem automatischen Düsen-Controller ausgeführt, welcher im nächsten Abschnitt erklärt wird.



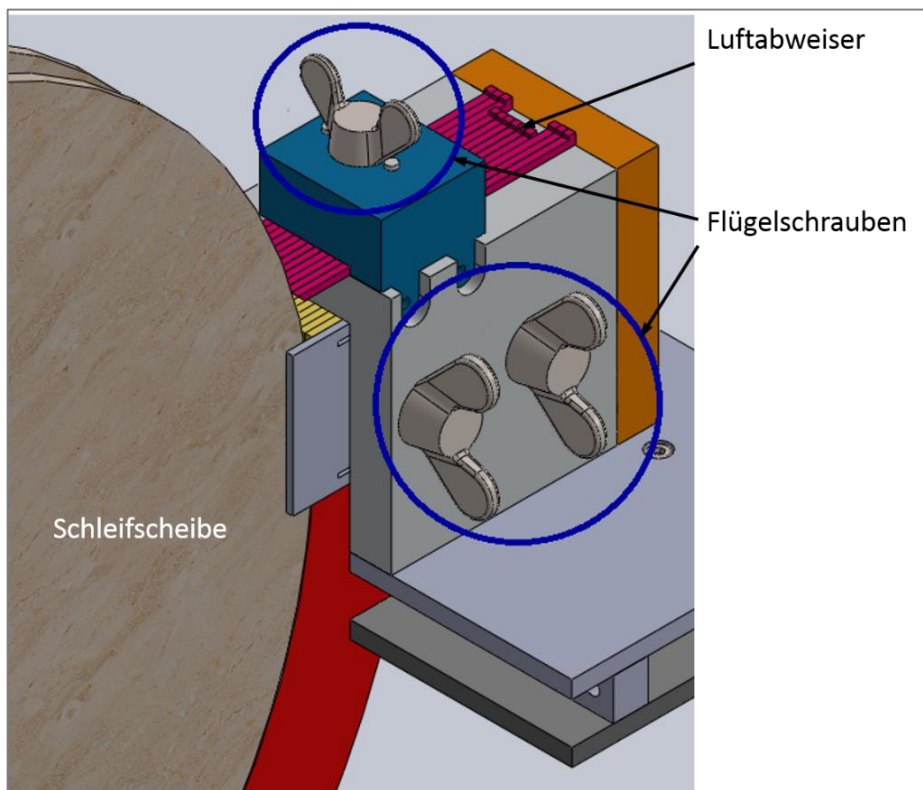
**Abb. 9:** Die Düsenelemente bewegen sich auf der Schiene und halten gleichzeitig ihre vertikale Position.

Die Verstellung der Düsenelemente geht wie folgt vor sich: Die Schleifscheibe steht beim Anpassen still. Die Fixierungen der Düse sind offen, so dass sich die Luftabweiserbleche und die Düsenelemente frei bewegen lassen. Die komplette Düse wird nun, wie in **Abb. 10** zu sehen, mithilfe der Schlitteneinheit Richtung Schleifscheibe geschoben. Sobald die Düsenelemente Kontakt mit der Schleifscheibe aufnehmen, wird mit leichtem Druck weiter geschoben. Die Düsenelemente drücken sich gegen den flexiblen Werkstoff, der nun die Form des Schleifscheibenprofils annehmen kann.

Aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeit der Schleifscheibe formt sich ein Luftpolster um die Scheibe herum. Dadurch kann verhindert werden, dass das Kühlmittel die Schleifscheibenoberfläche erreicht bzw. sich auf der Scheibenoberfläche ausbreitet. Um dieser Luftpolster-Bildung vorzubeugen, wurde ein Luftabweiser in das Design integriert. Dieser Luftabweiser kann sich in derselben Art und Weise wie die oberen und unteren Düsenelemente der Schleifscheibenform anpassen. Die Luftabweiserbleche werden nach demselben Prinzip an die Schleifscheibenform angepasst, mit dem Unterschied, dass dies direkt per Hand mit einem Hilfswerkzeug geschieht. Die Nasen auf dem Luftabweiserblech hinten dienen nicht nur als Stopper, sondern auch als Hilfe bei der Verstellung. Haben die Düsenelemente und die Luftabweiserbleche die Form der Schleifscheibe angenommen, werden diese mithilfe der drei Flügelschrauben in **Abb. 11** fixiert.



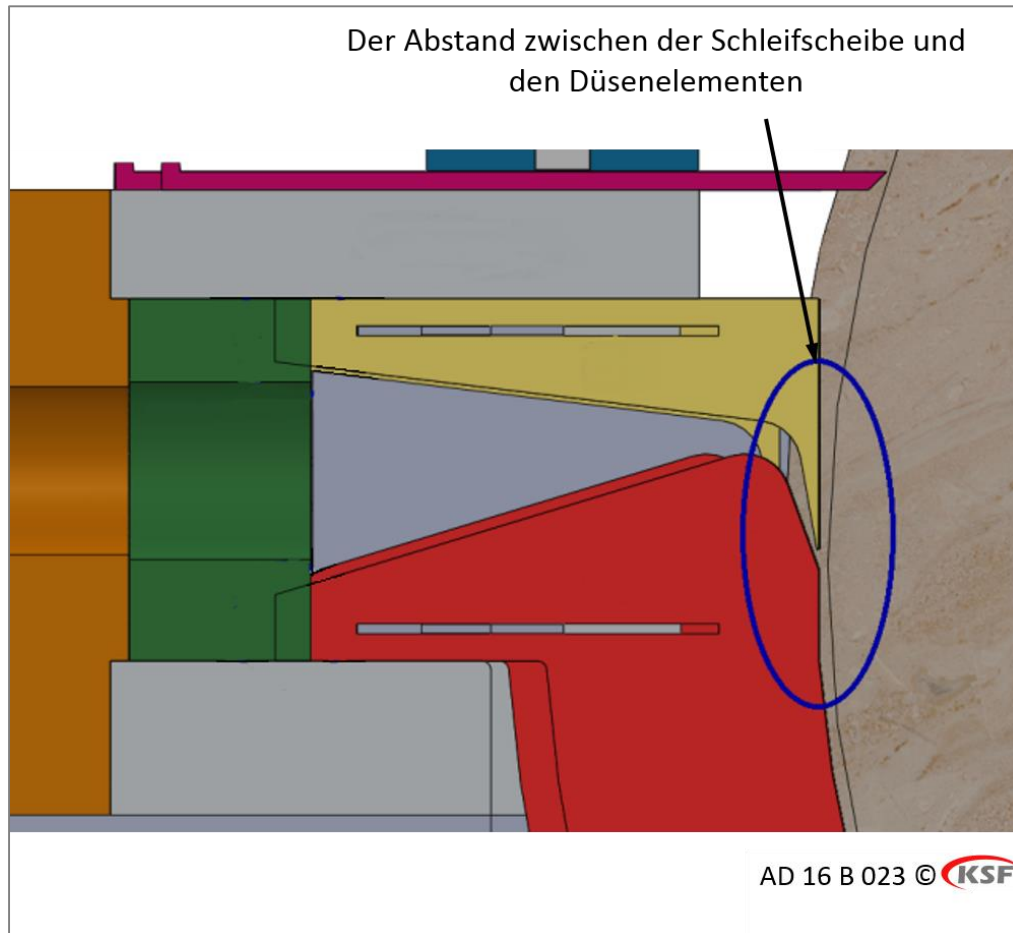
**Abb. 10:** Durch Drücken der Düsenelemente auf die Schleifscheibe nehmen die Düsenelemente die Form der Schleifscheibe an.



**Abb.11:** Durch Drücken der Düsenelemente auf die Schleifscheibe nehmen die Düsenelemente die Form der Schleifscheibe an. Fixiert werden die Düsenelemente durch Flügelschrauben.



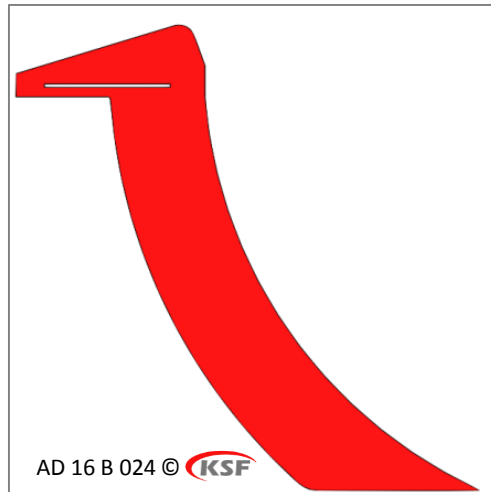
Nun wird die komplette Düse wie in **Abb. 12** zu sehen ist, minimal zurückgefahren, um ein späteres Abschleifen der Düsenelemente zu verhindern. Im Bild 6 ist zu sehen, dass die Düsenelemente einen Abstand zur Schleifscheibe aufweisen. Durch die Fixierung in **Abb. 11** wird die angepasste Position gehalten. Das flexible Material drückt weiter gegen die Düsenelemente.



**Abb. 12:** Der Abstand zwischen der Schleifscheibe und den Düsenelementen nach dem Fixieren der Düsenelemente.

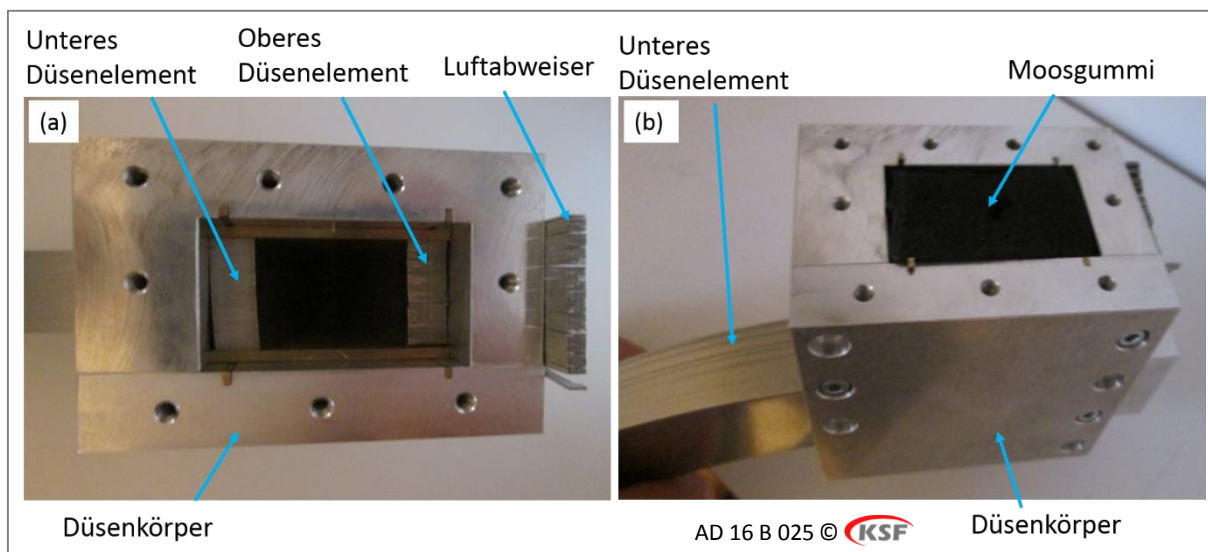
Das Leitblech soll sich wie die Düsenelemente an die Schleifscheibenform anpassen und den aus der Düse laminar austretenden KSS möglichst lange an der Schleifscheibe entlang leiten. Dies ermöglicht eine noch effektivere Kühl- und Schmierleistung und ein besseres Ausspülen der Späne aus den Poren der Schleifscheibe.

Wie in **Abb. 13** zu sehen, wird bei dieser Variante das Leitblech als integriertes Teil der Düsenelemente vorgesehen. Auch aufgrund von Platzgründen zwischen Gehäuse und Schleifscheibe wurde zunächst auf Basis einer Schleifscheibe geplant, die einen Durchmesser von  $d = 300$  mm aufweist.



**Abb. 13:** Unteres Düsenelement mit integriertem Leitblech.

Um die Konstruktion während des Kühlmittelflusses in der Düse abzudichten, wurde ein elastisches Bauteil aus Moosgummi direkt am Kühlmittelleingang der Düse angebracht. Wie in **Abb. 8** zu sehen ist, tritt das Kühlmittel durch den Anschluss ein und fließt durch die Öffnung im Moosgummi in die Düse. Die zugeschnittene Kunststoffmasse wurde wie in **Abb. 14** durch die hintere Öffnung der Düsenkammer eingesteckt, während alle anderen Komponenten und Düsen Teile schon befestigt waren.



**Abb. 14:** a) Düsenvorkammer ohne Moosgummi, b) Kunststoffmasse (Moosgummi) in Düse.

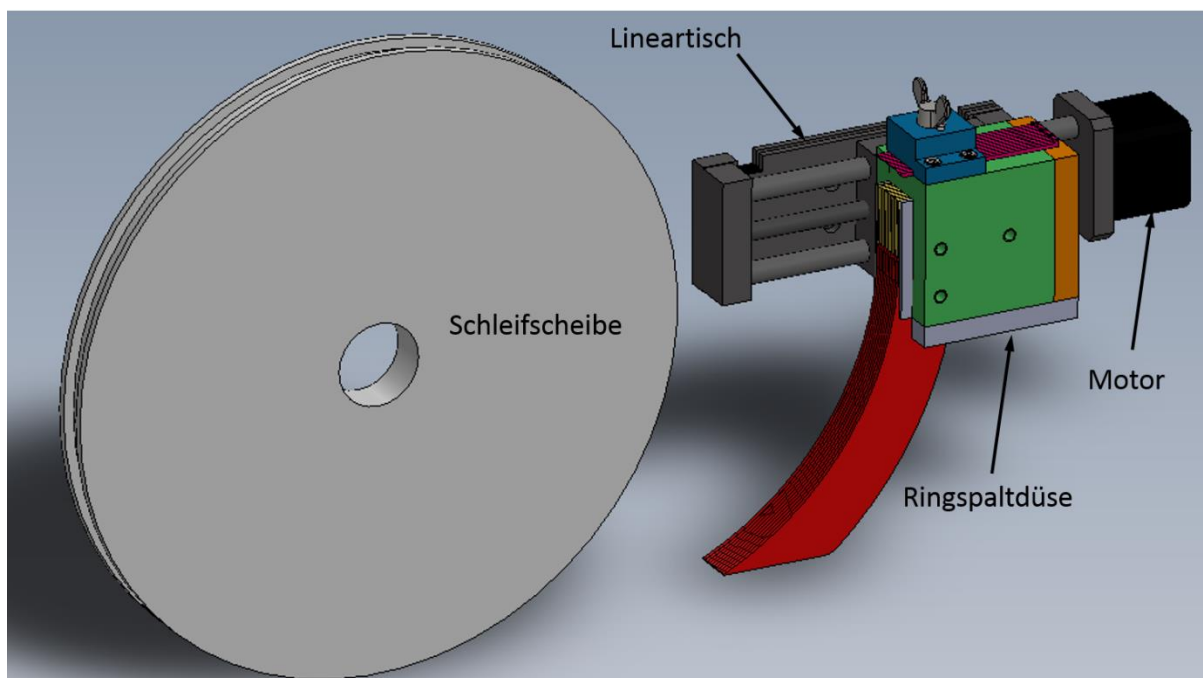
Beim ersten Design waren die oberen und unteren Elemente der Düse aufgrund der Stabilität des Materials unter dem Kühlmitteldruck aus Stahl. Während dem ersten Testdurchlauf zeigte sich jedoch, dass durch das Gewicht der Stahlbleche Probleme auftreten. Die unteren Elemente blieben selbst bei angezogenen Befestigungsschrauben nicht in gewünschter Position. Die Länge der Schiene, welche zur Führung der Stahlplättchen diente, war zu kurz, um die schweren Stahlplatten zu halten. Aufgrund des Hebels rutschten die Platten nach

unten. Dies veränderte die Ausgangsposition des Kühlmittels. Somit wurde als Material der oberen und unteren Düsenelemente Kunststoff eingesetzt. Die Kunststoffplättchen wurden mit einer Dicke von 0.7 mm mit einem 3D-Drucker hergestellt. Dadurch wurden die Probleme der zu schweren Düsenelemente gelöst.

### 3.3 Konzept der Automatisierung der Eco-Düse

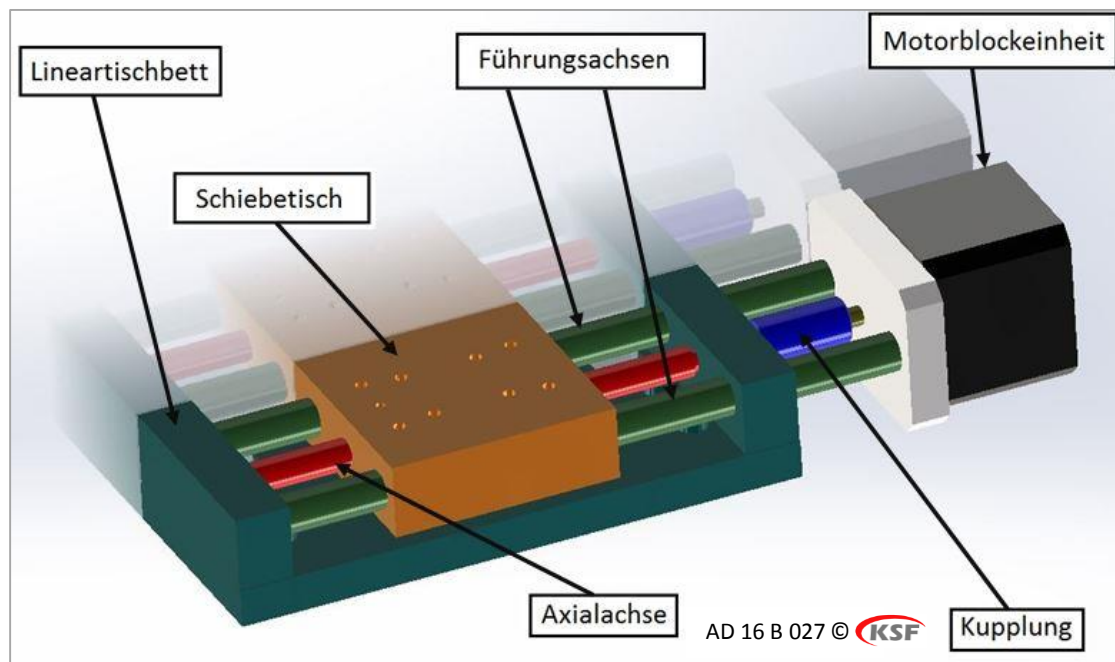
Die Effizienz der Eco-Düse ist in einem gewissen Ausmaß abhängig von dem Abstand des unteren Düsenelementes zur Oberfläche der Schleifscheibe. Das bedeutet, dass Kühlmittel auf die Kontaktzone gelangt, wenn der Abstand des Düsenaustritts zur Oberfläche der Schleifscheibe auf einen bestimmten Bereich eingestellt wird. Weitergehend muss das System in der Lage sein, die Eco-Düse proportional zu der Abnahme des Schleifscheibendurchmessers durch das stetige Abrichten der Schleifscheibe in Richtung der Schleifscheibe zu bewegen. Hierfür wurde ein automatisches System konstruiert, welches die Düsenbewegung automatisiert. Wie in **Abb. 15** zu sehen ist, wurde die Düse auf einem Lineartisch, der durch einen Motor gesteuert wurde, installiert. Der Motor wurde über ein Getriebe an den Lineartisch gekoppelt.

Die Bestandteile des Lineartisches sind in **Abb. 16** dargestellt. Durch die Kenntnis der Abrichtwerte wird die Düse um denselben Wert an die Schleifscheibenoberfläche angenähert. Somit wird der Abstand zwischen der Düse und der Schleifscheibe über den gesamten Schleifprozess konstant gehalten.



AD 16 B 026 © 

**Abb. 15:** Detailansicht der automatischen Bedieneinheit der Eco-Düse.

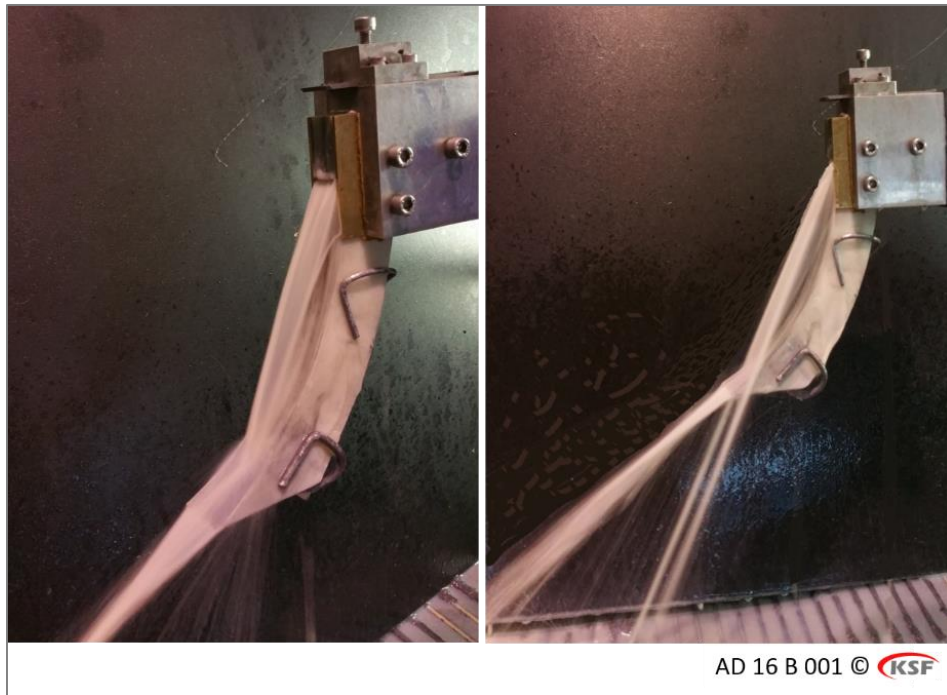


**Abb. 16:**Detailansicht der automatischen Bedieneinheit der Eco-Düse.

#### **4 Ergebnisse der Experimente mit Eco-Düse und Diskussion**

Um die Leistung der Eco-Düse festzustellen, wurden auf einer Hochleistungs-Schleifmaschine (CNC ELB Mikrocut mit 85KW Spindelleistung) Schleifversuche an 100Cr6 Stahl (44 HRC) mit der Keil- und der Eco-Düse durchgeführt. Die Keildüse wird in der Regel als Standarddüse mit der Maschine geliefert und ist von Seiten des Maschinenherstellers optimiert und gefertigt. Die Kühlmittelvolumenraten von 6, 30 und 80 l/min werden beim Schleifen zugeführt. Das Ziel dieser Versuche war es, festzustellen, ob mit Hilfe der Eco-Düse anstelle der häufig verwendeten Keildüse die Kühlmittelzufuhr, ohne Schaden am Werkstück zu erzeugen, reduziert werden kann. Zuvor wurde die Eco-Düse ohne Schleifen von Bauteilen getestet.

**Abbildung 16** zeigt die Kohärenz des Kühlmittelstrahls. Es veranschaulicht die Funktionsweise und Art bei einer Kühlmittelvolumenstromrate von 6 l/min. Dabei verläuft der Kühlmittelstrahl entlang der Leitbleche, die mit Hilfe von Drahtfederelementen zusammengedrückt werden.



**Abb. 17:** Testdurchlauf der "Eco-Düse".

**Abbildung 17** zeigt den Strahlverlauf des KSS während einer Schleifscheibengeschwindigkeit von 20 m/s bei einem KSS-Volumenstrom von 10 l/min und 6 l/min. Der Strahl wird in Endposition, fast anliegend an die Schleifscheibe, durch die Schleifscheibe optimal mitgenommen und mit der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe weitergeführt.



**Abb. 18:** Testdurchlauf der "Eco-Düse" mit Schleifscheibe.

Es ist zu sehen, dass das Kühlmittel bis zu einer Position von 8 Uhr von der Schleifscheibe mitgenommen bzw. mitgetragen wird. Dies wird durch ein Aufsaugen des KSS durch die Schleifscheibe gewährleistet, welche mit ihrer hohen Geschwindigkeit das KSS mitreißt. Mit diesem System wurde eine Reduktion der KSS-Verbrauchsmenge erreicht, während eine gleichbleibende Kühlleistung erhalten geblieben ist.

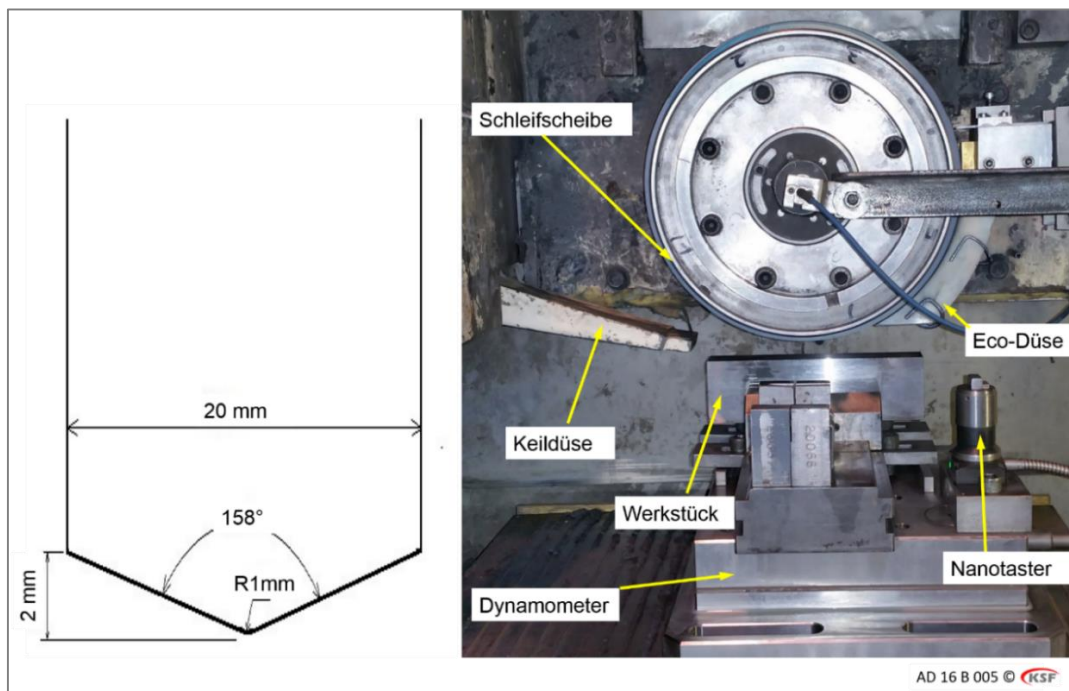
#### 4.1 Tiefschleif- und Flachsleif-Versuche

Um die Leistung der Eco-Düse und der Keildüse in demselben Schleifprozess zu vergleichen, wurden die Versuche aus Tabelle 1 bei konventionellen (Zustellung=0,03 mm) Schleifbedingungen und alternativ bei tieferer Zustellung (Zustellung=0,3 mm) mit konstantem Abtrag ausgeführt.

Tabelle 1: Liste der ausgeführten versuche zum Vergleich der Eco-Düse mit der Keildüse.

Werkstück	Schleifscheibe	Schleifparameter			Abrichtparameter				KSS
		$a_e$ [mm]	$v_{ft}$ [mm/min]	$v_c$ [m/s]	$a_{ed}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$U_d$	$q_d$	Abrichter	
100 Cr6 (44HRC)	Korund A120F8V601P	0,03	10000	20	5x10	2	+0,8	Diamant- formroller r0,2 mm	Emulsion 5% mit 6, 30 und 80 l/min
		und 0,3	und 1000						

Das Profilscheiben wurde mit der V-förmig abgerichteten Schleifscheibe, wie in **Abb.19** (links) zu sehen ist, durchgeführt. Das Werkstück-Material Stahl 100 Cr6 (44 HRC) wurde gewählt. Der Verschleiß der Schleifscheibe, die Schleifkräfte und die Oberflächenrauheit wurden während und nach dem Prozess gemessen. Die Schleifkräfte wurden von einem Kistler Piezodynamometer „Kistler 9255B“ ermittelt. Die Messung der Oberflächenrauheit wurde mit einem portablen Rauheitsmessgerät „Hommel Tester T800“ ausgeführt. **Abb. 19** (rechts) zeigt den Versuchsaufbau. Zwei Methoden wurden zur Messung des Schleifscheibenverschleißes benutzt. Der Verschleiß der Schleifscheibe wurde über das Tasten 5 verschiedener Punkte mit dem Nanotaster erfasst. Zusätzlich wurde der Verschleiß mit dem Abfahren der Messuhr über die geschliffene Oberfläche ermittelt.



**Abb. 19:** das Profil der Schleifscheibe (links) und Versuchsaufbau (rechts).

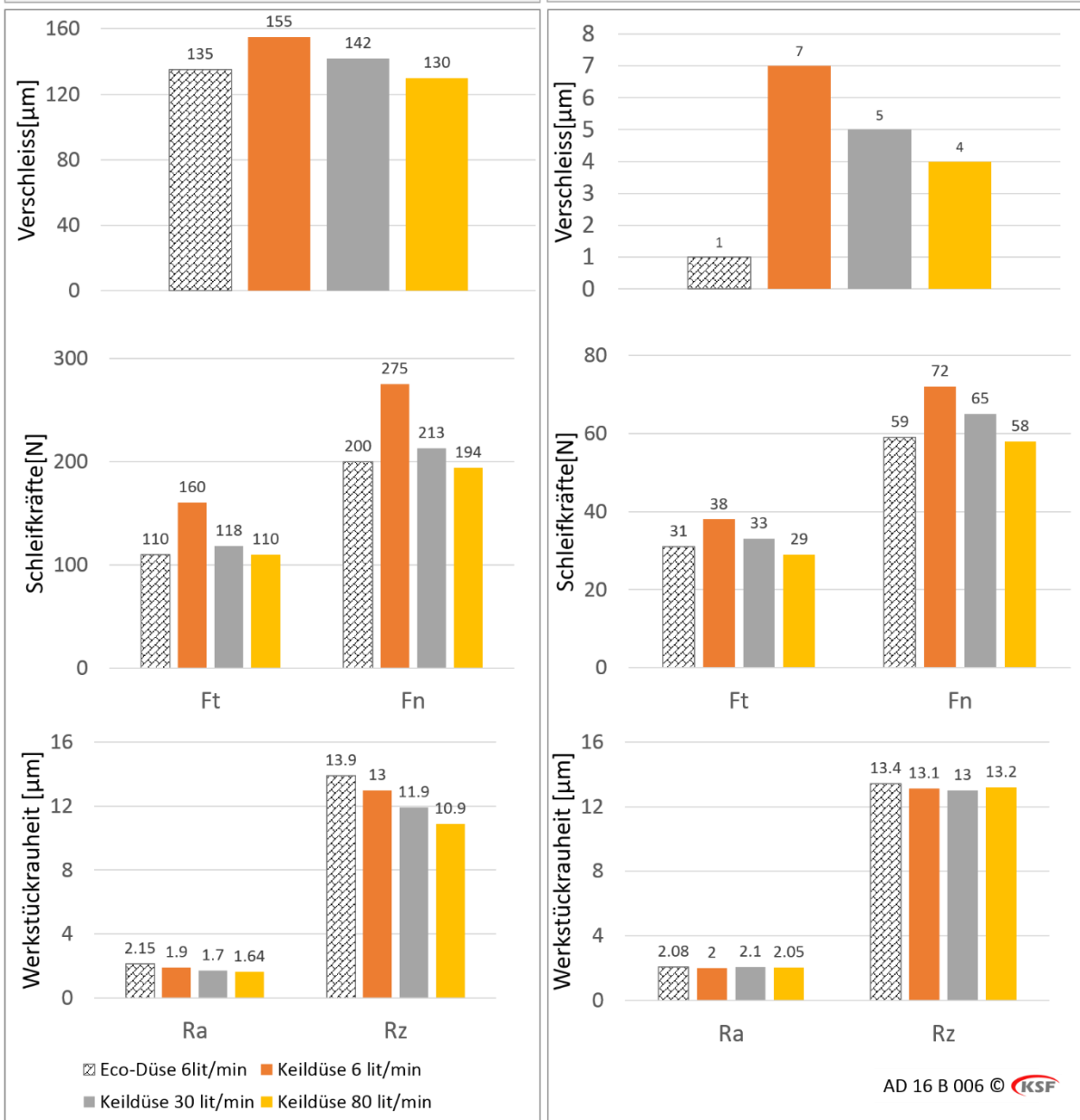
**Abb. 20** zeigt die Ergebnisse der Schleifversuche, bei zwei unterschiedlichen Schleifparametern, mit der Eco-Düse und der Keildüse. Die Versuche mit der Eco-Düse wurden nur mit einer konstanten Kühlmengemenge von 6 l/min durchgeführt. Dagegen wurden die Versuche mit der Keildüse mit 3 verschiedenen Mengen; nämlich 6, 30 und 80 l/min, durchgeführt. Zu sehen ist, dass beim Einsatz der Keildüse der Schleifscheibenverschleiß mit der Zustellung von 0,3 mm, von 155 µm zu 110 µm sinkt, wenn die zugeführte Kühlmittel-Rate von 6 l/min auf 80 l/min erhöht wird. Beim Einsatz der Eco-Düse mit den gleichen Schleifparametern wurde selbst bei der Kühlmittelzufuhr von nur 6 l/min ein Verschleiß von 130 µm festgestellt.

In **Abb. 21** ist die Struktur der geschliffenen Oberflächen beim Einsatz von der Eco-Düse mit niedriger Kühlmittelzufuhr (6 l/min) und der Keildüse mit Kühlmittelzufuhr von 80 und 6 l/min und bei einer tiefen Zustellung von 0,3 mm dargestellt. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den geschliffenen Oberflächen, die mit der Keildüse bei einer Zufuhr von 6 l/min, und mit der Eco-Düse mit 6 l/min bzw. der Keildüse mit 80 l/min erzeugt sind, erkennbar. Es ist festzustellen, dass die Kontaktzone nicht richtig und genug mit Kühlschmierstoff versorgt werden kann, wenn die Keildüse nur eine Zufuhr von 6 l/min hat. Daher ist das Kühlmittel nicht in der Lage, die Kontaktzone richtig zu kühlen, was zu einer Oberflächenstruktur führte, die Gemeinsamkeiten mit der beim Trockenschleifen aufwies. Der Einsatz der Eco-Düse mit einer niedrigen Zufuhr von 6 l/min bzw. der Keildüse mit hoher Zufuhr von 80 l/min im Gegensatz verbesserte die Kühlung und die Oberfläche wurde gleichmäßiger. Aus diesem Grund sind in **Abb. 19** (links) deutlich weniger Verschleiß und Schleifkräfte, bei Nutzung der Eco-Düse mit niedriger Kühlmittelzufuhr (6 l/min) oder der Keildüse mit hoher Kühlmittelzufuhr (80 l/min), erkennbar. **Abb. 20** (links unten) zeigt die Oberflächenrauheit bei einer Zustellung von 0,3 mm. Zu sehen ist, dass die Oberflächenrauheit durch Kühlen mit der Keildüse abnimmt, sobald man die Kühlmittelzufuhr erhöht.

Beim Flachsleifen mit 0,03 mm Zustellung sind die Resultate anders als beim Tiefschleifen festgestellt wurde. Wie in **Abb. 20** (rechts) für das Flachsleifen zu sehen ist, ist der Verschleiß bei einer höheren Kühlmittelzufuhr mit der Keildüse reduziert. Das Interessante ist der deutlich geringere Verschleiß der Schleifscheibe, wenn die Keildüse durch die Eco-Düse (6 l/min) ersetzt wurde. Der Verschleiß wurde von 7 µm mit der Keildüse bei einer Zufuhr von 6 l/min und 4 µm mit Keildüse bei einer Zufuhr von 80 l/min auf 1 µm mit der Eco-Düse bei einer Zufuhr von 6 l/min reduziert. Das lässt auf die Tatsache schließen, dass durch den Einsatz der Eco-Düse beim Flachsleifen die Kühlmittelzufuhr deutlich verbessert wurde. Der Vergleich der Verschleißdiagramme in **Abb. 20** zeigt, dass die Eco-Düse effektiver beim Flachsleifen als beim Tiefschleifen war.

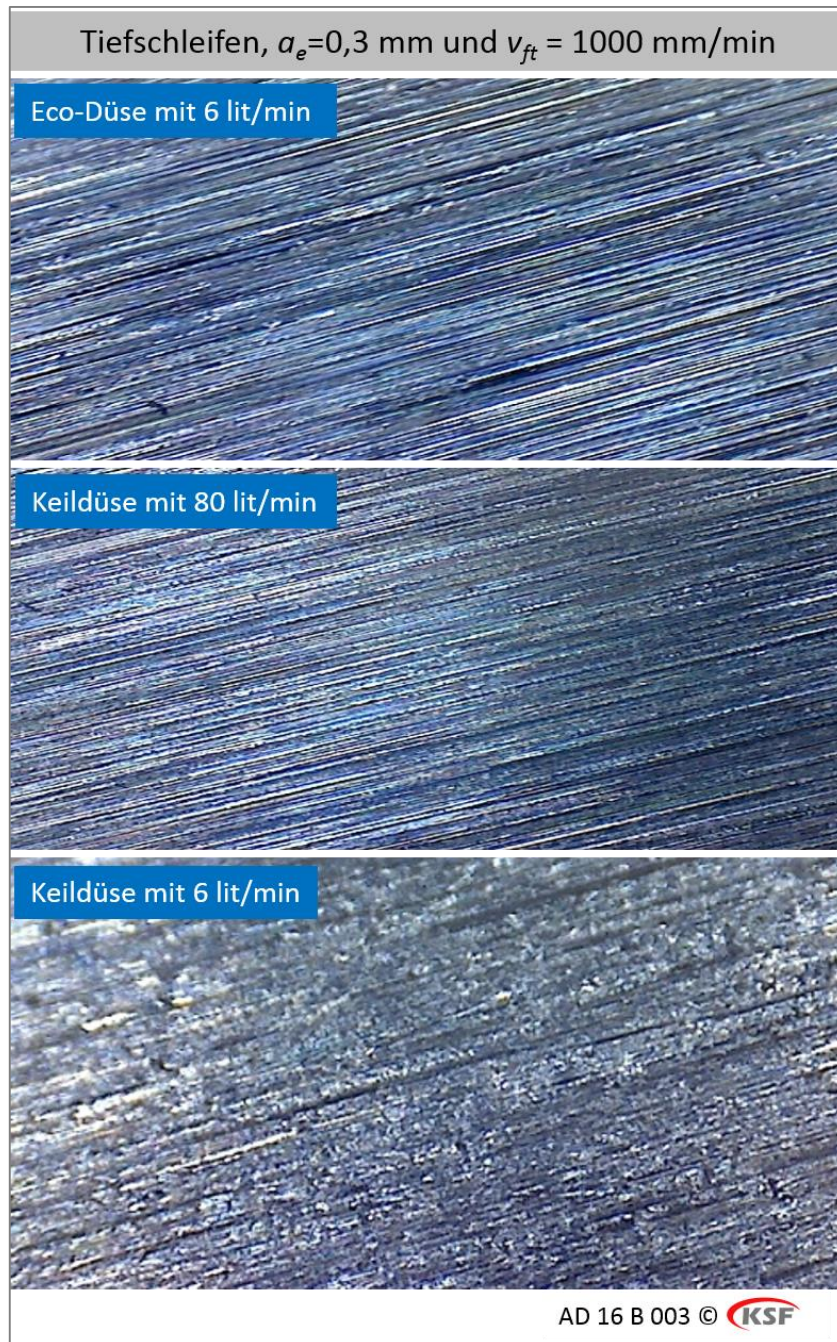
<b>Schleifscheibe</b> ▪ Korundscheibe 93A120F8V601P <b>Schleifparameter</b> ▪ $v_c = 30$ m/s ▪ $Q_w = 5$ mm <sup>3</sup> /mm.s	<b>Abrietzwerkzeug</b> ▪ Diamantformrolle ▪ Radius 0,2 mm <b>Abrietzparameter</b> ▪ $q_d = +0.8$ ▪ $a_{ed} = 5 \times 10$ μm ▪ $U_d = 2$	<b>Werkstoff</b> ▪ 100Cr6 (44 HRC) <b>Kühlschmierstoff</b> ▪ Emulsion, Lösung (5%-ig) ▪ 6 bis 80 l/min
--	--	--

Tiefschleifen, $a_e = 0,3$ mm, $v_{ft} = 1000$ mm/min	Flachschleifen, $a_e = 0,03$ mm, $v_{ft} = 10000$ mm/min
---	--



**Abb. 20:** Vergleich der Schleifergebnisse mit der Eco-Düse mit 6 l/min und der Keildüse mit 6, 30, und 80 l/min.





**Abb. 21:** Oberflächen der Versuchsteile nach dem Tiefschleifen mit den verschiedenen Düsen.

**Abb. 21** zeigt, dass die geschliffene Oberfläche, welche mit der Keildüse mit 6 l/min tiefgeschliffen wurde, dem Schliffbild ähnlich ist, das man häufig nach dem Trockenschleifen erhält. Dies belegt, dass durch Einsatz der Eco-Düse die geschliffene Oberfläche eine höhere Qualität aufweist. Das Kühlmittel gelangt leichter auf die Schleifscheibenoberfläche und somit besser in die Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe.



**Abb. 22:** Oberflächen der Versuchsteile nach dem Tiefschleifen mit den verschiedenen Düsen. Die geschliffene Oberfläche, welche mit der Keildüse mit 6 l/min flachgeschliffen wurde, ist etwas schlechter als die mit der Keildüse mit 80 l/min oder der Eco-Düse mit 6 l/min geschliffene Oberfläche.

Beim Flachschleifen mit 0,03 mm Zustellung wurden die Schleifkräfte geringer, wenn man die Eco-Düse mit 6 l/min einsetzt, als mit der Keildüse bei gleich hoher Kühlmittelzufuhr (**Abb. 20** rechts Mitte). Durch das Erhöhen der Kühlmittelzufuhr auf 80 l/min bei der Keildüse wurden die Schleifkräfte vergleichbar gering wie mit der Eco-Düse, wie es in **Abb. 20** (rechts Mitte) zu sehen ist. Keine signifikanten Änderungen der Oberflächenrauheit konnten durch das

Wechseln der Düse oder durch Erhöhen der Kühlmittelzufuhr-Rate festgestellt werden. (Abb. 20 rechts unten).

In Abb. 22 sind die geschliffenen Oberflächen, welche durch den Einsatz der Eco- und Keildüse bei hoher und niedriger Kühlmittelzufuhr (80 und 6 l/min) und bei einer Zustellung von 0,03 mm erreicht wurden, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Topografie der geschliffenen Oberfläche mit der Eco-Düse mit 6 l/min bzw. der Keildüse mit 80 l/min identisch sind und sie sich unterscheiden von der geschliffenen Oberfläche mit der Keildüse bei einer Zufuhr von 6 l/min.

#### 4.2 Langzeitversuche

Um den Schleifscheibenverschleiß beim Schleifen mit der Eco-Düse mit dem Scheibenverschleiß beim Einsatz der bisher gängigen Keildüse zu vergleichen, wurden Kurzzeitversuche sowie auch Langzeitversuche mit einem Zerspanungsvolumen bis zu 8 mm<sup>3</sup>/mm durchgeführt. Wie in Abb. 23 zu sehen ist, hat die Eco-Düse mit einer Kühlmittelzufuhr von 6 l/min den niedrigsten Verschleiß an der Schleifscheibe hervorgerufen, hingegen hat die Keildüse mit derselben Menge an Kühlmittelzufuhr einen nahezu doppelt so hohen Verschleiß an der Schleifscheibe ergeben.

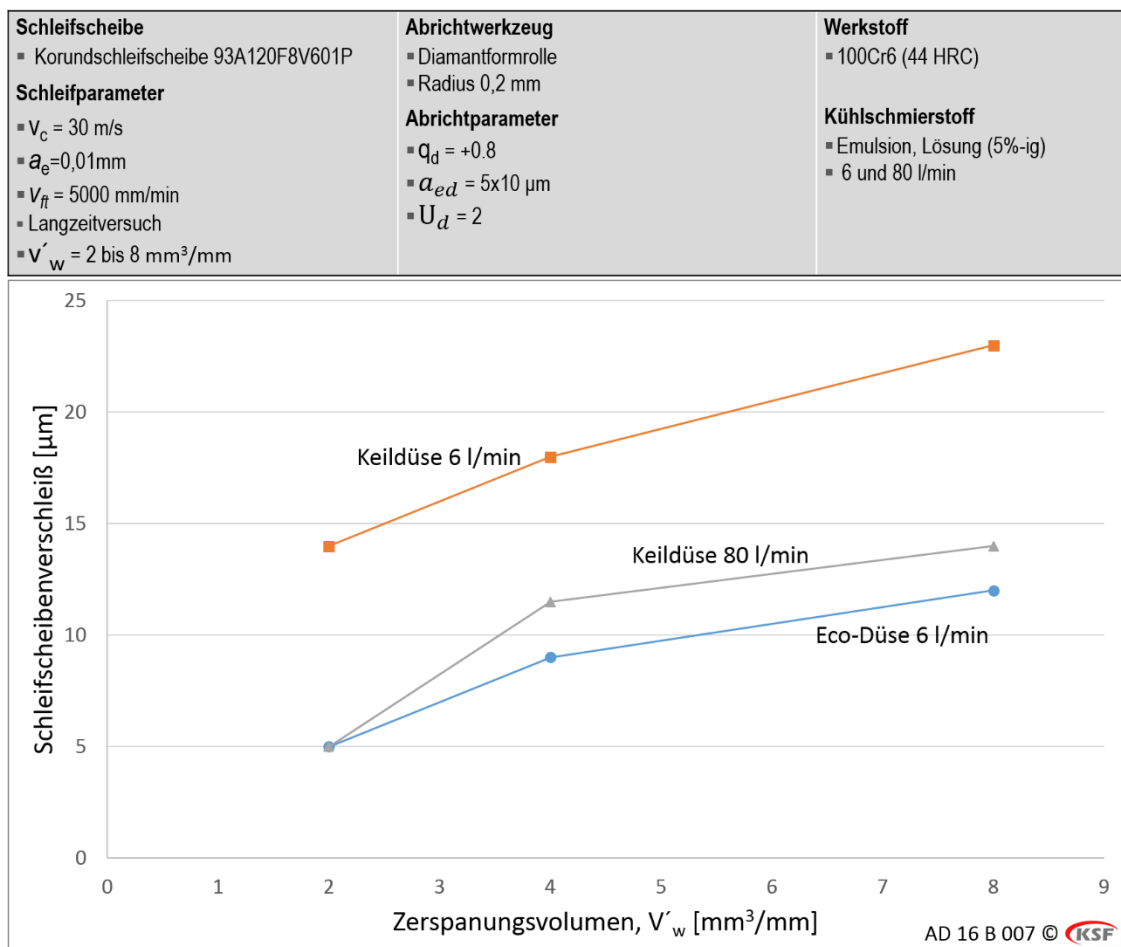
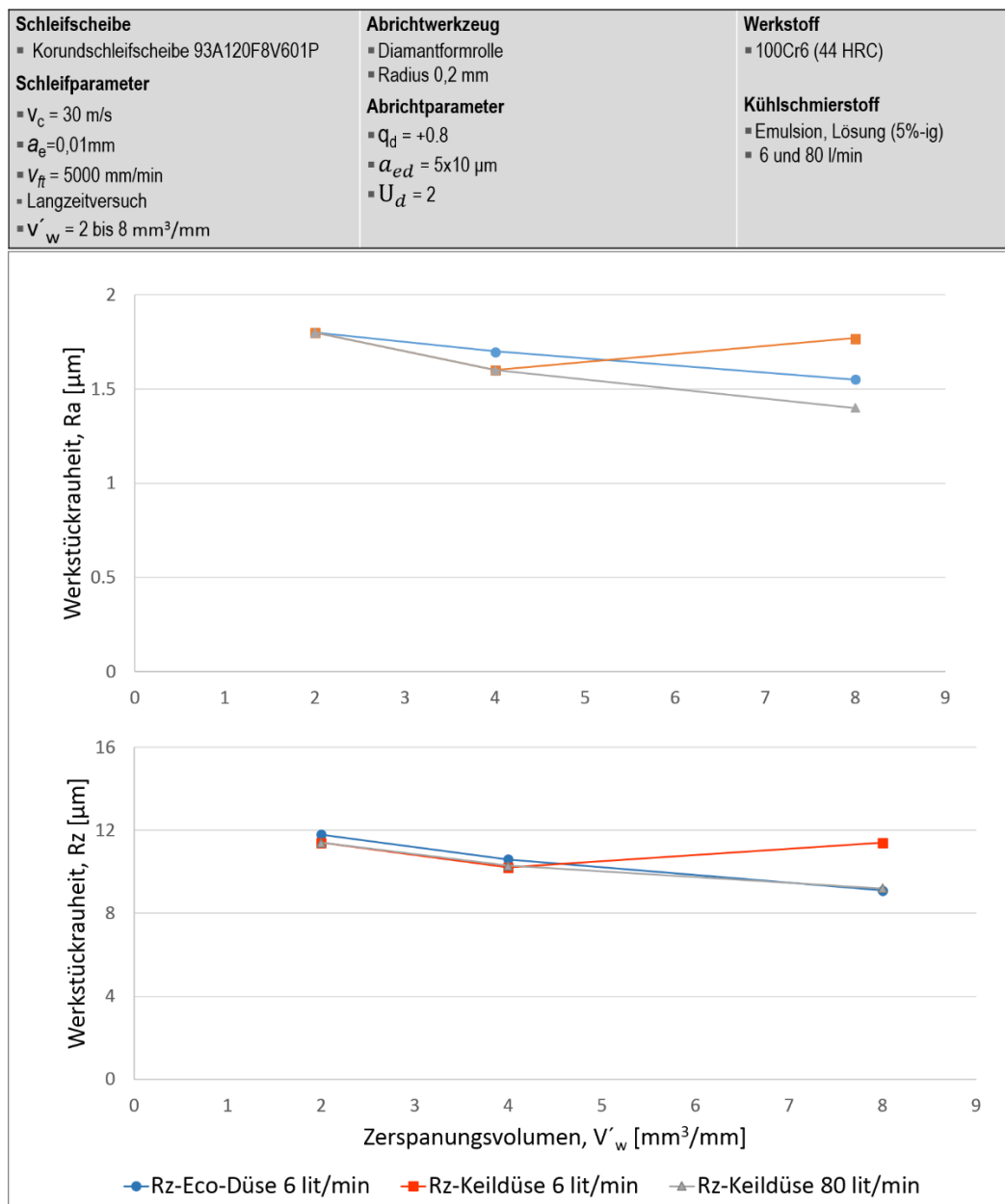


Abb. 23: Verschleiß der Schleifscheibe mit Eco-Düse und Keildüse bei Langzeitversuchen.

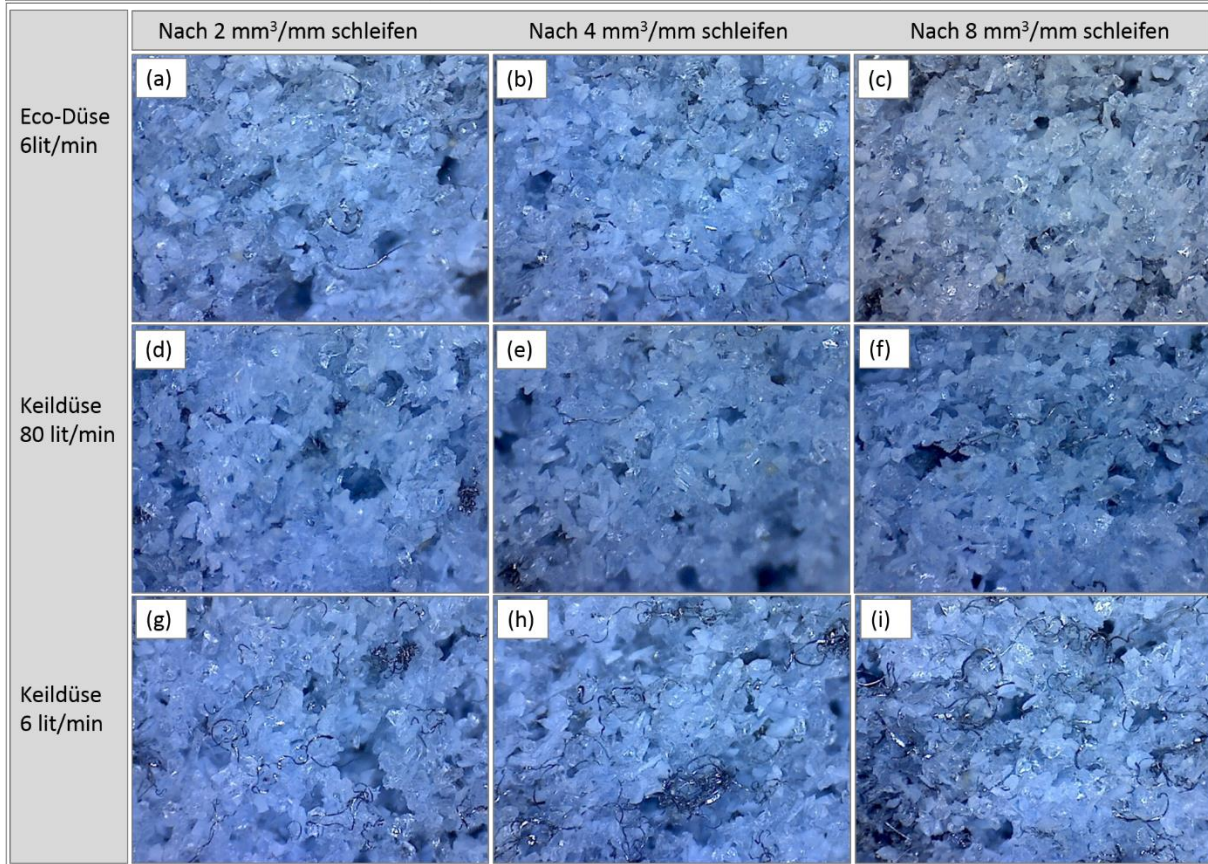
**Abb. 24** zeigt die gemessene Oberflächenrauheit eines geschliffenen Werkstückes bei einem Zerspanungsvolumen von  $8 \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Es ist zu sehen, dass bei einem Zerspanungsvolumen von 2 und  $4 \text{ mm}^3/\text{mm}$  beim Einsatz der Eco-Düse eine rauere Oberfläche als durch Einsatz der Keildüse entsteht. Jedoch wird nach  $8 \text{ mm}^3/\text{mm}$  die Oberflächenrauheit der mit der Keildüse (6 l/min) geschliffenen Oberfläche höher als in den anderen beiden Fällen. Ein Grund dafür kann die Zusetzung der Schleifscheibe beim Einsatz der Keildüse mit 6 l/min sein. **Abb. 25** zeigt die Topografie der Schleifscheiben nach einem Zerspanungsvolumen von 2, 4 und  $8 \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Die erhöhte Zusetzung der Schleifscheibe, wenn die Keildüse mit 6 l/min im Einsatz war, ist deutlich erkennbar.



AD 16 B 008 © KSF

**Abb. 24:** Rauheit der Werkstücke mit Eco-Düse und Keildüse in Langzeitversuchen.

<b>Schleifscheibe</b> ▪ Korundschleifscheibe 93A120F8V601P <b>Schleifparameter</b> ▪ $V_c = 30$ m/s ▪ $a_e = 0,01$ mm ▪ $V_{ft} = 5000$ mm/min ▪ Langzeitversuch ▪ $v'_w = 2$ bis $8$ mm <sup>3</sup> /mm	<b>Abrichtwerkzeug</b> ▪ Diamantformrolle ▪ Radius 0,2 mm <b>Abrichtparameter</b> ▪ $q_d = +0.8$ ▪ $a_{ed} = 5 \times 10$ µm ▪ $U_d = 2$	<b>Werkstoff</b> ▪ 100Cr6 (44 HRC) <b>Kühlschmierstoff</b> ▪ Emulsion, Lösung (5%-ig) ▪ 6 und 80 l/min
--	--	--



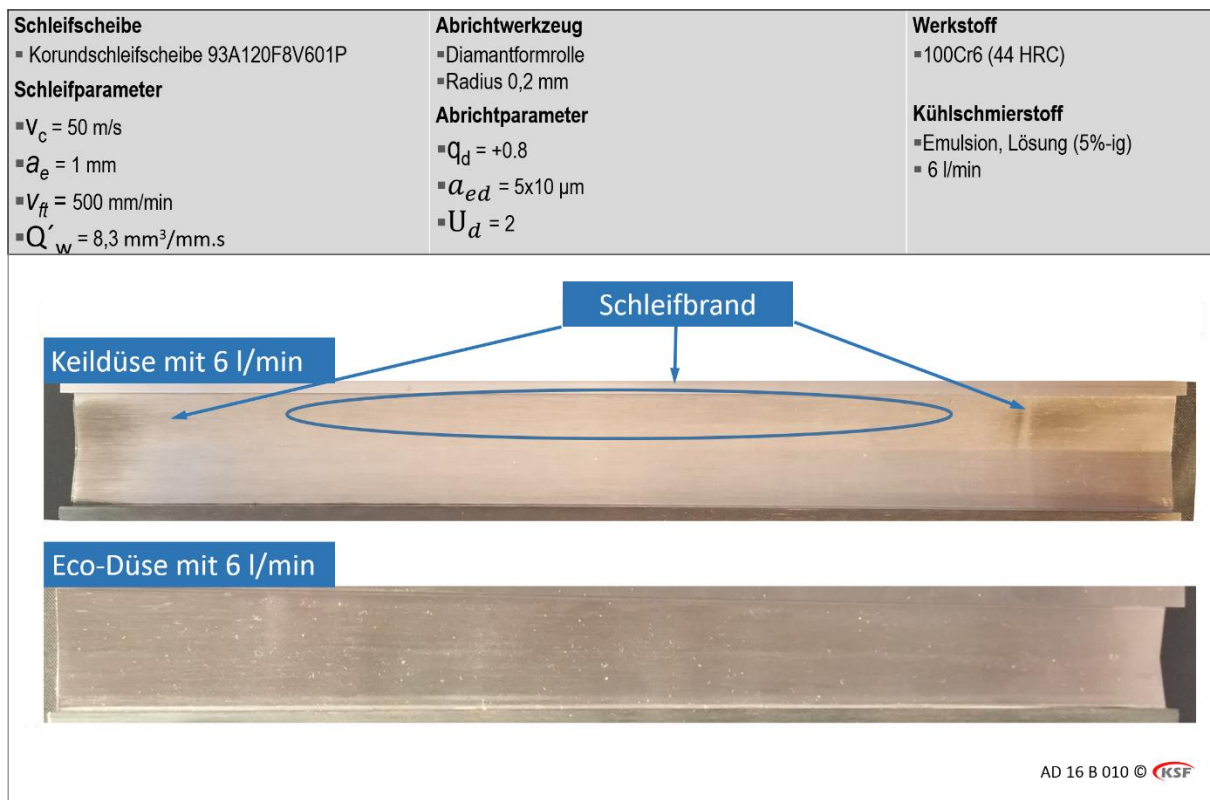
AD 16 B 009 © KSF

**Abb. 25:** Topographie der Schleifscheibe nach Langzeitversuchen für Eco- und Keildüse.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Eco-Düse mit einer Kühlmittelzufuhr von 6 l/min die Zufuhr des Kühlmittels in die Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe erheblich verbessert. Auf Basis der Tatsache, dass die Eco-Düse die Kühlmittelzufuhr in die Kontaktzone verbessert, kann vermutet werden, dass die thermische und mechanische Belastung der einzelnen Schleifkörner durch den Einsatz der Eco-Düse und durch die Verbesserung der Kühlung und Schmierung in der Kontaktzone reduziert wird. Daher finden während des Schleifprozesses kaum Kornausbrüche statt. In Folge verbessert sich die Oberflächengüte mit der Erhöhung des Materialabtrags.

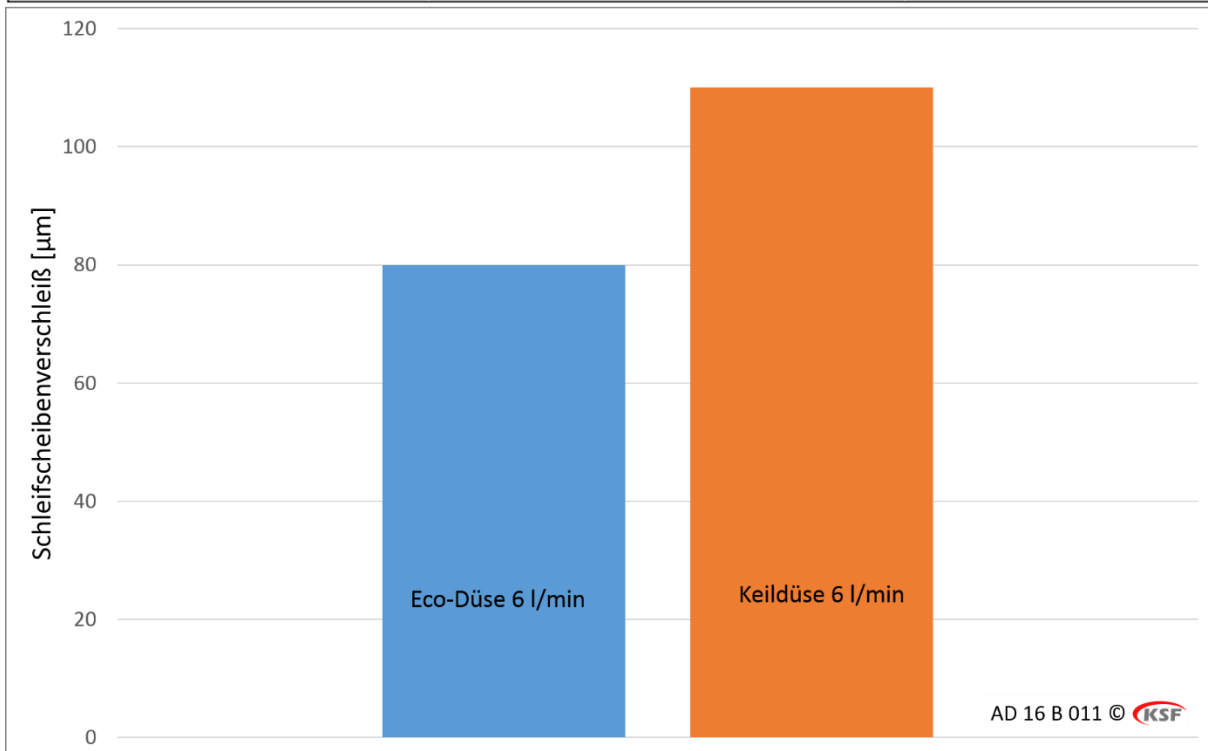
### 4.3 Versuche in Bezug auf die Schleiftemperatur

Zusätzlich wurden zwei Versuche im Tiefschleifen mit einem konstanten Schleifparameter (Zustellung von 1 mm und einem Vorschub von 500 mm/min und  $v_c=50$  m/s) durchgeführt, um die Leistung der Eco-Düse bei sehr hohen Temperaturen zu testen und mit der Keildüse zu vergleichen. Die **Abbildung 26** oben zeigt die geschliffene Oberfläche nach einem Schleifvorgang mit der Keildüse mit 6 l/min KSS Volumenstrom. Wie aus der Abbildung erkennbar ist, weist die Oberfläche Brandmarken auf. Dagegen ist unter Anwendung der Eco-Düse eine geschliffene Oberfläche ohne Brandspuren festzustellen, wie in **Abb. 26** unten zu sehen. Dies legt nahe, dass die Eco-Düse einen wesentlichen positiven Einfluss auf den Schleifprozess hat, während die KSS-Menge im Verbrauch deutlich verringert ist. Diese Untersuchungen belegen die Vermutung, dass durch den Einsatz der Eco-Düse die Kühlung und Schmierung in der Kontaktzone deutlich verbessert wird. Dadurch verbessert sich die Oberflächengüte, die KSS-Menge kann reduziert und Schleifbrand verhindert werden.



**Abb. 26:** Die geschliffene Oberfläche mit Schleifbränden während die Keildüse mit 6 l/min im Einsatz war und die geschliffene Oberfläche ohne Schleifbrand während die Eco-Düse eingesetzt wurde.

<b>Schleifscheibe</b> ■ Korundscheibe 93A120F8V601P <b>Schleifparameter</b> ■ $V_c = 50$ m/s ■ $a_e = 1$ mm ■ $v_{\#} = 500$ mm/min ■ $Q'_w = 8,3$ mm <sup>3</sup> /mm.s	<b>Abrichtwerkzeug</b> ■ Diamantformrolle ■ Radius 0,2 mm <b>Abrichtparameter</b> ■ $q_d = +0.8$ ■ $a_{ed} = 5 \times 10$ μm ■ $U_d = 2$	<b>Werkstoff</b> ■ 100Cr6 (44 HRC) <b>Kühlschmierstoff</b> ■ Emulsion, Lösung (5%-ig) ■ 6 l/min
--	--	---



**Abb. 27:** Der Verschleiß der Schleifscheibe reduzierte sich von 110 auf 80 μm durch Einsatz der Eco-Düse anstelle der Keildüse im Tiefschleifen mit 1 mm Zustellung.

Der Verschleiß der Schleifscheibe ist in dieser Untersuchung (Tiefschleifen) durch den Einsatz der „Eco-Düse“ von 110 (Bei Keildüse) auf 80 μm reduziert worden, wie im Diagramm veranschaulicht (**Abb. 27**). Dies resultiert aus der reduzierten Prozesstemperatur, der geringeren Kraft und der verbesserten Kühlleistung in der Kontaktzone zwischen Schleifscheibe und Werkstück.

## 5 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

### 5.1 Veröffentlichungen

Die Vorhabensergebnisse werden in einschlägigen Fachzeitschriften mit Peer Review publiziert werden. Daneben werden sie in Zeitschriften mit Werbecharakter („Schleifen und Polieren“, „Forum“, „Diamond Business“) veröffentlicht, da so eine Verbreitung in die Industrie hinein schneller erreichbar ist.

## 5.2 Präsentationen

Die Firma Bärhausen wird die Ergebnisse auf Messen und Ausstellungen präsentieren, das KSF auf einschlägigen Konferenzen und Seminaren.

## 6 Fazit

Die Schleifversuche wurden durchgeführt, um die Effizienz der Eco-Düse mit der Keildüse zu vergleichen. Die Eco Düse wurde mit einem geringen Volumenstrom (6 l/min) getestet und deren Effizienz mit einer Keildüse mit verschiedenen Volumenströmen, von 6 – 80 l/min verglichen.

Beim Flachsleifen mit der Keildüse wurde mit einer Zustellung von 0,03 mm und mit geringem Kühlmittelvolumenstrom (Keildüse, 6 l/min) ein Schleifscheibenverschleiß von 7 µm gemessen. Dieser Wert konnte auf 4 µm verringert werden mit der Erhöhung des Volumenstromes auf 80 l/min. Das überraschende Ergebnis ist die enorme Verringerung des Scheibenverschleißes auf 1 µm bei der Verwendung der Eco-Düse mit nur 6 l/min Volumenstrom. Dies wird durch die effektivere Mitnahme des Kühlmittels durch die Schleifscheibe in die Schleifscheibe-Werkstück-Kontaktzone erklärbar, wobei wiederum für jedes Schleifkorn eine effizientere Spanbildung und geringere Kraft bewirkt werden. Die Reduzierung des Verschleißes beim Flachsleifen mit der Eco-Düse wurde auch durch Langzeitversuche (0,01mm Zustellung) festgestellt. Das Ergebnis ist, dass durch die Verwendung der Eco-Düse anstatt der Keildüse der Schleifscheibenverschleiß verringert werden konnte, obwohl der Volumenstrom der Eco-Düse um ein vielfaches kleiner ist als der der Keildüse mit 80 l/min. Beim Flachsleifen sind die Schleifkräfte mit der Eco-Düse vergleichbar mit der Keildüse (bei 80 l/min) aber geringer als die Kräfte mit der Keildüse (bei 6-30 l/min). Jedoch konnten keine großen Unterschiede bei den Oberflächenrauheiten durch die Änderung der Volumenströme oder den Typ der Düse beim Flachsleifen mit 0,03 mm Zustellung festgestellt werden.

Beim Tiefschleifen mit einer Zustellung von 0,3 mm und Verwendung der Keildüse (6 l/min) wurde ein Scheibenverschleiß von 155 µm gemessen. Der Verschleiß reduzierte sich auf 130 µm bei der Erhöhung des Volumenstromes auf 80 l/min. Bei der Verwendung der Eco-Düse (6 l/min) wurde ein Verschleiß von 135 µm gemessen. Es zeigte sich, dass die Eco-Düse beim Tiefschleifen nicht so eine große Verringerung des Verschleißes aufweist wie beim Flachsleifen. Die Schleifkräfte bezüglich der Eco-Düse mit 6 l/min sind signifikant kleiner als die Kräfte mit der Keildüse bei demselben Volumenstrom, aber vergleichbar mit der Keildüse bei einem Volumenstrom von 80 l/min. Die Fotos der geschliffenen Oberflächen im **Abb. 21** zeigen, dass beim Tiefschleifen mit der Eco-Düse (6 l/min) eine gezielte Kühlung der Schleifscheiben-Werkstückkontaktzone eine glattere Oberfläche ergibt, während mit der Keildüse die Oberfläche aussieht wie normalerweise beim Trockenschleifen. Diese Schlussfolgerung kann durch die Ergebnisse der Versuche mit 1 mm Zustellung bestätigt



werden. Bei den Versuchen sind die Brandmarken bei der Verwendung der Keildüse mit 6 l/min Volumenstrom zu sehen, während bei der Eco-Düse mit demselben Volumenstrom keine Brandmarken zu sehen sind (**Abb. 26**). Dies zeigt, dass mit Hilfe der Eco-Düse die Kühlfunktion der Düse deutlich verbessert wurde.

***Durch den Einsatz der Eco-Düse wurde der KSS-Verbrauch um 90% reduziert, ohne Schleifbrand zur Folge zu haben. Darüber hinaus weist die Schleifscheibe kaum Zusetzungen auf. Der Schleifscheibenverschleiß und die Schleifkräfte reduzieren sich, während die Oberflächengüte weitgehend konstant bleibt.***

Eine Ringspaltdüse wurde in diesem Projekt entworfen und hergestellt. Die Austrittsfläche dieser Düse kann durch eine konstruierte pneumatische Steuereinheit geändert werden. Damit besteht keine Notwendigkeit, die Düse zu wechseln, wenn die Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe z.B. von 20 zu 80 m/s geändert wird. Ein Testdurchlauf der Düse hat gezeigt, dass durch diese Düse ein laminarer Strahl des Kühlmittels bis zu 130 mm erreicht werden kann. Dies kann jedoch zukünftig noch optimiert werden.

## **7 Literaturverzeichnis**

[Albe11] Alberdi, R; Sanchez, J.A.; Pombo, I.; Ortega, N.; Izquierdo, B.; Plaza S.; Barrenetxea, D.: Strategies for optimal use of fluids in grinding International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011) 491–499

[Brin08] Brinksmeier, E.; Bohling, A.: Beherrschung des Kühlmittelstoffeinsatz beim Schleifen, 7. Seminar „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung“, Hrsg. T. Tawakoli, Stuttgart, 2008

[DBU14] Projektbeschreibung Entwicklung, Konstruktion, Erprobung und prototypische Fertigung einer flexibel einsetzbaren energiesparenden Kühlmitteldüse.

[Ebb00] Ebbrell, S.; Woolley, N.H.; Tridimas, Y.D.; Allanson, D.R.; Rowe, W.B.; The Effects of Cutting Fluid Application Methods on the Grinding Process, International Journal of Machine Tools and Manufacture. 40(2) (2000), 209-223.

[Furu02] K. Furutani, N. Ohguro, N. Trong Hieu & T. Nakamura, 2002, In Process Measurement Topography Change of Grinding Wheel by Using Hydrodynamic Pressure, Int'l. J. Machine Tools & Manufacture, 42 (2002):c1447-1453.

[Iran05] Irani, R.A.; Bauer, R.J.; Warkentin, A.; A review of cutting fluid application in the grinding process, Int. Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1969-1705

[Kloc00] Klocke, F.; Baus, A.; Beck, T.: Coolant Induced Forces in CBN High Speed Grinding with Shoe Nozzles, Annals of the CIRP, Vol. 49/1/2000:. 241-244

- [Suzu05] Suzuki, K.; Ninomiya, S.; Lwai, M.; Shishido, Y; Uematsu, T: A New Coolant Supply Method using a Coolant Flow Guided Flexible Sheet Attracted to a Wheel Surface, Key Engineering Materials, Vols. 291-292 (August 2005) pp. 227-232
- [Tawa02] Tawakoli, T.: Minimalmengen-Kühlschmierung beim Schleifen, T-Tool-Profil, 4. Seminar „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung“, Hrsg. T. Tawakoli, Stuttgart, 14. Mai 2002
- [Tawa93] Tawakoli, T.: High Efficiency Deep Grinding, Technology, process, planning and application, Mechanical Engineering Publication, London, 1993
- [Tawa10] Tawakoli, T.; Vesali, A.: V-Düse: Effiziente Kühlschmierung beim Schleifprozess, FORUM Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik, Ausgabe Nr. 3, September 2010, ZKZ 19748, S. 60-66
- [Töns04] Tönshoff, T; Denkena, B.: Spanen Grundlagen, 2. Auflage, Springer Verlag, 2004
- [Webs02] Webster, J.; Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Wittmann, M.; Thoens, K.: Assesment of Grinding Fluid effectiveness in Continuous-Dress Creep Feed Grinding, Annals CIRP, v5 1/1/2002