

Bio-Minimalmengen- Kühlschmierung

Entwicklung eines
Minimalmengen-Kühlschmiersystems
unter Verwendung von Emulsion auf
Basis nachwachsender Rohstoffe

G. Bauer, B. Riss et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

23/2006

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>
oder bei:

Projektfabrik Waldhör
Währingerstraße 121/3
1180 Wien

Bio-Minimalmengen-Kühlschmierung

Entwicklung eines
Minimalmengen-Kühlschmiersystems
unter Verwendung von Emulsion auf
Basis nachwachsender Rohstoffe

B. Riss, S Herzer, L. Simlinger, J. Merkinger
Profactor Produktionsforschung GmbH

G. Bauer
Agatex Feinchemie GmbH

J. Breinesberger
Agrar Plus GmbH

G. Margreiter
TPS Technische Produkte Service u. Handels GmbH

W. Windhager
Josef Haidmair Werkzeugbau

H. Mittermayr
Voest-Alpine Mechatronics GmbH

P. Spiegl
Protan Produktionstechnik GmbH & Co KG

Steyr, August 2005

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die **Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret"** soll dies gewährleistet werden.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung (1 Seite).....	3
Summary (1 page).....	5
Kurzfassung (5 Seiten).....	7
Summary (5 pages).....	10
1 Einleitung.....	13
2 Ziel des Projektes	14
3 Verwendete Methode und Daten (Vorgehensweise).....	15
4 Ergebnisse.....	16
4.1 Anforderungsprofil und Marktpotenzial.....	16
4.2 Konzeption und Formulierung des Kühlschmierstoffes	17
4.2.1 Erstformulierung	18
4.2.2 Weiterentwicklung.....	19
4.3 Die heimische Rohstoffbasis	19
4.4 Das Pumpen-/Düsensystem.....	21
4.4.1 Uni-Microspray von Hennlich mit Kühlschmierdüse.....	21
4.4.2 Multifog	22
4.4.3 Microjet Type MKS-G 260	22
4.5 Strahlcharakterisierung.....	23
4.6 Bearbeitungsversuche im Zerspanungslabor	24
4.6.1 Verwendete Geräte für die Zerspanung	24
4.6.2 Messmethode und Auswertung	25
4.6.3 Versuchsdurchführung.....	28
4.7 Implementierung und Praxistests	43
4.7.1 Firma Haidlmair	43
4.7.2 Firma Protan	47
5 Detailangaben zu den Zielen der Fabrik der Zukunft	55
6 Schlussfolgerungen	55
7 Ausblick und Empfehlungen.....	56
8 Literaturverzeichnis	57

Kurzfassung (1 Seite)

Kühlschmierstoffe werden in der Metall bearbeitenden Industrie in großen Mengen als Produktionshilfsstoff zur Kühlung und Schmierung der Bearbeitungsstelle eingesetzt. Schätzungen gehen davon aus, dass in Österreich jährlich ca. 7.000 Tonnen Öle und Emulsionskonzentrate eingesetzt werden. Der überwiegende Anteil der derzeit eingesetzten Kühlschmierstoffe basiert auf Mineralölfractionen, nachwachsende Rohstoffe werden kaum eingesetzt. In jüngster Vergangenheit wurden Anstrengungen unternommen, den Einsatz an KSS entscheidend zu reduzieren. Ein viel versprechender Ansatz ist die Minimalmengen-Kühlschmierung, bei der so wenig KSS auf die Bearbeitungsstelle aufgebracht wird, dass dieser direkt verbraucht wird und keine Rückleitung notwendig ist („Verlustschmierung“). Aufwändige Rückleitungen, Reinigung, Pumpen und Wartungsmaßnahmen können vermieden werden. Wassergemischte Emulsionen werden bei der Minimalmengen-Kühlschmierung jedoch nicht eingesetzt.

Das abgeschlossene Projekt „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur Berücksichtigung von Aspekten des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes bei der Gestaltung von Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsprozessen“ der ersten Ausschreibung der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ zeigt, dass die Bearbeitung zum Beispiel von Aluminium mit MMKS auf Emulsionsbasis sowohl aus fertigungstechnologischer Sicht als auch bezüglich Arbeits- und Umweltschutz gute Ergebnisse liefert. Derzeit sind jedoch keine Pumpen/Düsen-Systeme verfügbar, die derart geringe Emulsionsmengen sicher und kontinuierlich aufbringen können.

Ziel des vorgeschlagenen Projekts ist es daher, ein Minimalmengen-Kühlschmiersystem zu entwickeln, das aus einer Pumpen/Düsen-Einheit besteht, die mit einer Öl-in-Wasser-Emulsion auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird.

Die Inhalte des Projekts sind die Entwicklung des Systems, das den zuvor aufgestellten Anforderungen der Fertigung, des Umwelt- und Arbeitsschutzes entspricht. Im Labor werden die Sprühcharakteristik sowie die Eignung für relevante Fertigungsprozesse und Werkstoffe untersucht. Nach Durchführung der erforderlichen Adaptierungen wird das System in einem Unternehmen der Metallbearbeitung an ausgewählten Prozessen auf seine Praxistauglichkeit überprüft.

Projektablauf:

- Erstellung des Anforderungsprofils
- Entwicklung einer additivarmen KSS-Emulsion auf Basis nachwachsender Rohstoffe
- Studie zur heimischen Rohstoffbasis und ihrer Verfügbarkeit
- Auswahl und Adaptierung Aufbringungssystems
- Klärung der Sprühcharakteristik
- Abgrenzung des Einsatzbereiches
- Überprüfung der Praxistauglichkeit beim Anwender und arbeitsmedizinische Begleitung.

Die erwarteten Ergebnisse des Projekts sind die Bereitstellung eines Prototypen des entwickelten Minimalmengen-Kühlschmier-Systems für den Anwender, die Abgrenzung des Einsatzbereiches wie geeignete Bearbeitungsverfahren, Werkstoffe und Schnittparameter; der Nachweis der Praxisrelevanz in der Fertigung, die Klärung der Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung des KSS und Untersuchung der Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit der Arbeitnehmer.

Summary (1 page)

Metal working fluids (MWF, cooling lubricants) are widely used in the metal machining industry with the purpose to cool and lubricate the working surfaces. In Austria the consumption of neat oils and emulsion concentrates is estimated at 7.000 tons per year. The predominant share of MWF is based on mineral oil otherwise renewable primary products are rarely in use. Until now efforts were performed to reduce the consumption of MWF drastically. A promising approach to achieve this aim is Minimum Quantity Lubrication (MQL), where small quantities of MWF are deposited to the surface of tool and machined part, so that the entire fluid is consumed directly during processing. Loss lubrication is enabled; therefore recirculation is no longer required. Expensive conduits of pipes, cleaning efforts, pumps and maintenance can be avoided. The utilisation of easily degradable substances is essential for the environmental friendly use of MQL.

So far, water mixed emulsion is not used in MQL. The results of the completed project "Development of a comprehensive procedure within the design of high-speed-cutting processes in consideration of environmental protection and occupational health aspects" shows, that machining of aluminium with MQL and emulsion is possible under certain conditions. Appropriate pump-jet-systems for delivering such small quantities of emulsion under guaranteed stable process conditions are not available yet.

The objective of the project is the development of a system of Minimum Quantity Lubrication, which is consisting of a pump/jet-unit, working with oil-in-water emulsion based on renewable primary products.

The content of the project is the development of the system, which meets to the requirements regarding

- i) machining conditions,
- ii) environmental friendliness and
- iii) workers safety and health

that are defined jointly with end-users, developers and distributors. In laboratory tests, characteristics of generated aerosol and geometry of spray are determined as well as the suitability for relevant cutting processes and materials. Subsequently three different end-users will test the new MQL-System under their specific conditions.

Tasks

- Formulation of requirements
- Development of an MWF-Emulsion based on renewable primary products containing as few as possible additional agents
- Study on quality and availability of raw materials
- Investigation, selection and adaptation of the deposit system
- Analysis of spray characteristic and aerosol generation
- Detection of the fields of use
- Tests under field conditions

Kurzfassung (5 Seiten)

Kühlschmierstoffe werden in der metallbearbeitenden Industrie in großen Mengen als Produktionshilfsstoff zur Kühlung und Schmierung der Bearbeitungsstelle eingesetzt. Schätzungen gehen davon aus, dass in Österreich jährlich ca. 7.000 Tonnen Öle und Emulsionskonzentrate eingesetzt werden. Der überwiegende Anteil der derzeit eingesetzten Kühlschmierstoffe basiert auf Mineralölfraktionen, nachwachsende Rohstoffe werden kaum eingesetzt. In jüngster Vergangenheit wurden Anstrengungen unternommen, den Einsatz an KSS entscheidend zu reduzieren. Ein viel versprechender Ansatz ist die Minimalmengen-Kühlschmierung (MMKS), bei der so wenig KSS auf die Bearbeitungsstelle aufgebracht wird, dass dieser direkt verbraucht wird und keine Rückleitung notwendig ist („Verlustschmierung“). Aufwändige Installationen für Rückleitung, Pumpen, KSS-Reinigung und Speicherung, sowie KSS Monitoring und Pflege können vermieden werden. Wassergemischte Emulsionen wurden bei der Minimalmengen-Kühlschmierung bisher jedoch nicht eingesetzt.

Das abgeschlossene Projekt „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur Berücksichtigung von Aspekten des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes bei der Gestaltung von Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsprozessen“ der ersten Ausschreibung der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ zeigt, dass die Bearbeitung zum Beispiel von Aluminium mit MMKS auf Emulsionsbasis sowohl aus fertigungstechnologischer Sicht als auch bezüglich Arbeits- und Umweltschutz gute Ergebnisse liefert. Derzeit sind jedoch keine Pumpen/Düsen-Systeme verfügbar, die derart geringe Emulsionsmengen sicher und kontinuierlich aufbringen können.

Ziel des vorliegenden Projekts ist es daher, ein Minimalmengen-Kühlschmiersystem zu entwickeln, das aus einer Pumpen/Düsen-Einheit besteht, die mit einer Öl-in-Wasser-Emulsion auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird.

Die Inhalte des Projekts sind die Entwicklung des Systems, das den zuvor aufgestellten Anforderungen der Fertigung, des Umwelt- und Arbeitsschutzes entspricht. Im Labor werden die Sprühcharakteristik sowie die Eignung für relevante Fertigungsprozesse und Werkstoffe untersucht. Nach Durchführung der erforderlichen Adaptierungen wird das System in einem Unternehmen der Metallbearbeitung an ausgewählten Prozessen auf seine Praxistauglichkeit überprüft.

Die folgenden Arbeiten wurden durchgeführt:

- Erstellung des Anforderungsprofils:

Im Startworkshop und weiterführenden Diskussionen erstellten alle Projektteilnehmer, ihrer jeweiligen Rolle im Projekt – „Anwendung“, „Entwicklung“ und „Forschung“ – entsprechend, das Anforderungsprofil für das zu entwickelnde Kühlschmiersystem. Hierbei wurden die konkreten und mögliche zusätzliche Bearbeitungsverfahren und zu zerspanendes Material sowie spezifische Zusatzanforderungen wie Spänetransport berücksichtigt. Aus der Sicht des Arbeits- und Umweltschutzes wurden

die Anforderungen an den KSS und das Aufbringungssystem konkretisiert. Bei allen Anforderungen kann unterschieden werden zwischen notwendige („musts“) und optionale („nice-to-have“); es wird daher bei der Umsetzung zu Kompromissen kommen.

- Entwicklung einer additivarmen KSS-Emulsion auf Basis nachwachsender Rohstoffe:

Vom Kühlschmierstoff-Entwickler Agatex wurden 20 Emulgator-/Schmierstoff-Kombinationen entwickelt und deren Eigenschaften untersucht. Zwei Versuchsprodukte wurden ausgewählt und für die Praxis-Versuche am Pumpe-Düse-System zur Verfügung gestellt. Bei der Auswahl der Rohstoff-Komponenten wurde großer Wert auf deren humantoxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften gelegt. Sämtliche Komponenten der Zubereitungen sind vollständig und leicht biologisch abbaubar. Im Zuge der Erfahrungen aus den Zerspanungsversuchen im Labor und der Implementierung in den Betrieben wurden die Produkte nochmals modifiziert und weiterentwickelt.

- Studie zur heimischen Rohstoffbasis und ihrer Verfügbarkeit:

In dieser Studie wurde die Rohstoffbasis für Ölpflanzenkulturen in Österreich und ihr Flächen- und Ertragspotenzial anhand von Raps, Sonnenblume, Soja, Ölkürbis, Öllein, Mariendistel, Leindotter und Saflor (Färberdistel) sowie mögliche Anbaupotenziale auf Stilllegungsflächen erhoben. Als Potenzial für zusätzliche Anbauflächen stehen ca. 100.000 ha rotierende Stilllegungsflächen zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der Kulturfolge können 25% davon für zukünftige Ölpflanzenkulturen herangezogen werden, was einen Ertrag von in etwa 62.000 t Öl ergibt. Zusätzlich wurden Produktionskapazität, Auslastung und technologischen Voraussetzungen österreichischer Ölmühlen erhoben.

- Auswahl und Adaptierung der Aufbringungssysteme

Für drei Aufbringungssysteme wurde die Einsetzbarkeit anhand der geforderten Spezifikationen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass nur ein handelsübliches System gute Ergebnisse liefert. Das gewählte Sprühgerät wurde noch in Hinblick auf hohe Flexibilität und optimaler Einstellbarkeit adaptiert.

- Abgrenzung des Einsatzbereiches in Labortests

In den Labortests wurden die Anwendungen der Projektpartner möglichst genau abgebildet und optimierte Zerspanungs- und Kühlschmierparameter gesucht. Zielgrößen waren technologische und wirtschaftliche Aspekte einerseits als auch Verbrauch und Emissionsmenge sowie –qualität (Größenspektrum). Es zeigt sich, dass das vorgeschlagene System gegenüber konventioneller Überflutungsschmierung als

auch gegenüber der Minimalmengenschmierung mit Öl geringere Emissionen erzeugt; Werkzeugverschleiss, Oberflächenqualität der Werkstücke, Maßhaltigkeit und Schnittgrößen mit den anderen Systemen konkurrenzieren können. Werkzeugstandzeiten konnten im Labortest nicht ermittelt werden.

- Überprüfung der Praxistauglichkeit beim Anwender

Bei der Firma Haidlmair und Protan wurde das System in deren Produktion implementiert. Es sollten „harte“ Anwendungen gefunden werden, die auch die Grenzen des Systems aufzeigen. So wurde in tiefen Kavitäten bearbeitet um den Spänetransport und die Zufuhr von KSS an ungünstigen Stellen zu untersuchen. Schwächen traten bei der erhöhten Korrosionsneigung von benetzten Oberflächen auf. Ursprüngliche Standzeiten konnten nicht immer erreicht werden.

Die Projektergebnisse befähigen die Technologieentwickler, das System „Bio-Minimum-Lubrication“ zu einem marktfähigen Produkt weiterzuentwickeln, wenn die Lösung aufgetretenen Anfangsschwierigkeiten konsequent weiter betrieben wird. Für die Sprühsystemoptimierung sollten Düsenentwickler gewonnen werden.

Summary (5 pages)

Metal working fluids (MWF, cooling lubricants) are widely used in the metal machining industry with the purpose to cool and lubricate the working surfaces. In Austria the consumption of neat oils and emulsion concentrates is estimated at 7.000 tons per year. The predominant share of MWF is based on mineral oil otherwise renewable primary products are rarely in use. Until now efforts were performed to reduce the consumption of MWF drastically. A promising approach to achieve this aim is Minimum Quantity Lubrication (MQL), where small quantities of MWF are deposited to the surface of tool and machined part, so that the entire fluid is consumed directly during processing. Loss lubrication is enabled; therefore recirculation is no longer required. Expensive conduits of pipes, cleaning efforts, pumps and maintenance can be avoided. The utilisation of easily degradable substances is essential for the environmental friendly use of MQL.

So far, water mixed emulsion is not used in MQL. The results of the completed project "Development of a comprehensive procedure within the design of high-speed-cutting processes in consideration of environmental protection and occupational health aspects" shows, that machining of aluminium with MQL and emulsion is possible under certain conditions. Appropriate pump-jet-device for delivering such small quantities of emulsion under guaranteed stable process conditions are not available yet.

The finished project "Development of a holistic model under consideration of aspects of safety and environmental protection for the configuration of a high-speed-cutting process" worked out during the 1st call of the "factory-of-the-future" programme proved that cutting of aluminium with MQL under with the use of water-mixed emulsions is possible regarding to process conditions and safety and environmental protection as well. Up to now, there are now pump/jet-device available, which are able to deliver such little amounts of emulsions in a safe and failure-free manner.

The objective of the project is the development of a system of Minimum Quantity Lubrication, which is consisting of a pump/jet-unit, working with oil-in-water emulsion based on renewable primary products.

The content of the project is the development of the device, which meets to the requirements regarding

- i) machining conditions,
- ii) environmental friendliness and
- iii) workers safety and health

that were defined jointly with end-users, developers and distributors. In laboratory tests, characteristics of generated aerosol and geometry of spray were determined as well as the suitability for relevant cutting processes and materials. Subsequently different end-users tested the new MQL-device under their specific conditions.

The following described tasks were worked out

- Formulation of requirements

At the kick-off-meeting of the project and in further discussions all partners defined the requirements to the new lubrication system. Each partner played “his” role like end user, developer or researcher to cover all aspects of the objectives. The requirements consider the actual process application of the end user as well as further cutting operations and materials. Additional requirements were f. e. chip removal. Aspects of safety and environmental protection were put in concrete terms. All requirements may be grouped in indispensable (“musts”) and optional (“nice to have”) one’s.

- Development of an MWF-Emulsion based on renewable primary products containing as few as possible additional agents

The MWF developer Agatex formulated twenty combinations of emulsifier and lubricant and investigated their properties. Two products were selected and delivered for testing at the cutting-lab. The selection of raw material components took place under consideration of human- and eco-toxicological properties. All components of the formulations are complete biological degradable. Modifications of the recipe were performed with the experiences of testing in lab and implementation in field conditions.

- Study on quality and availability of raw materials in Austria

In this study the situation of raw materials for vegetable oil plants cultivations were investigated, as well as potential areas and yield. Rape-seed, sunflower, soy, pumpkin and linseed were regarded. Potential cultivation areas and shut down areas were elicited. A theoretical surplus yield of 62.000 tons per year detected.

- Investigation, selection and adaptation of the deposit system

Three devices for the delivering MWF were investigated with purpose of postulated requirements. One was chosen regarding flexibility and process stability.

- Analysis of spray characteristic and aerosol generation

With in the lab testing end user applications were imitated and cutting as well as lubrication parameters were optimised. Objective criterions were technological, economical aspects as well as quantity of usage and emission values. We found out that the proposed system generates fewer emissions than the conventional lubrication. tool wearout; quality of surface, tolerances and cutting parameters were similar to other systems. Live time of cutting tools could not determined under lab conditions

- Tests under field conditions

Two end user implemented the the MQL-system in their processes. “Rough” application should be selected, to find out limit of application. Deep concave shapes were processed, where chip removal is not simply. Many results of lab tests could be confirmed. Weak points of application were corrosions of surfaces. Original life times could not be reached.

The results enable the technology provider to develop further “Bio-minimum-lubrication” coming to a marketable product, if elimination of week points of the beginning phase will be set on. For jet optimization nozzle developer should be integrated.

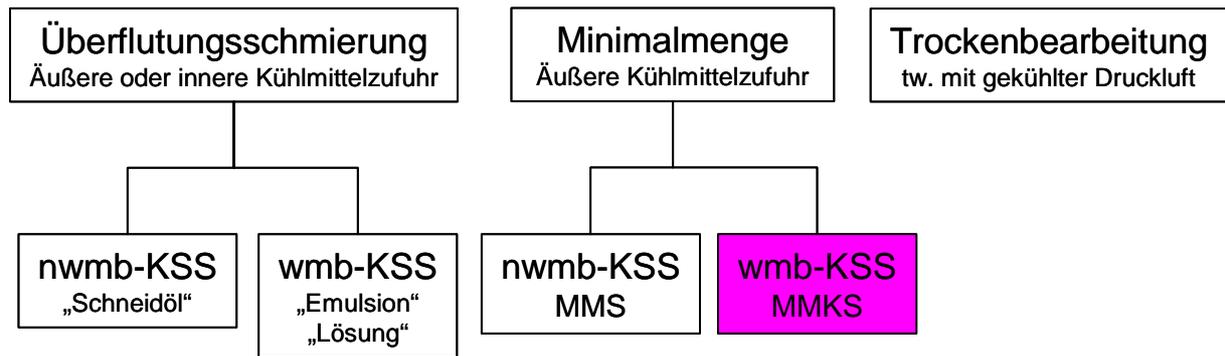
1 Einleitung

Kühlschmierstoffe werden in der metallbearbeitenden Industrie in großen Mengen als Produktionshilfsstoff zur Kühlung und Schmierung von Werkstück und Werkzeug-schneide eingesetzt. Schätzungen gehen davon aus, dass in Österreich jährlich ca. 7.000 Tonnen Öle und Emulsionskonzentrate eingesetzt werden./1/ Der überwiegende Anteil der derzeit eingesetzten Kühlschmierstoffe basiert auf Mineralölfractionen, Basisöle aus nachwachsenden Rohstoffen werden selten eingesetzt./2/ In jüngster Vergangenheit wurden aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen Anstrengungen unternommen, den Einsatz an KSS entscheidend zu reduzieren. Im Gegensatz zur konventionellen Überflutungs- oder Vollstrahlschmierung ist die Minimalmengenschmierung (MMS) ein viel versprechender Ansatz, bei der so geringe Mengen KSS auf die Bearbeitungsstelle aufgebracht werden, dass dieser direkt verbraucht wird und keine Rückleitung notwendig ist. Geringe Mengen bleiben an den Werkstücken haften oder werden an die umgebende Luft abgegeben. Aufwändige Rückleitungen, Reinigungseinheiten, Pumpen und Wartungsmaßnahmen können somit vermieden werden. Um dieser Definition zu entsprechen, ergibt sich ein Verbrauch von ca. 10 bis 100 ml Öl pro Stunde und Bearbeitungsprozess.

Die Minimalmengenschmierung ist somit im Gegensatz zur konventionellen Überflutungs- oder Vollstrahlkühlschmierung definiert als Verlustschmierung, d.h. die aufgebrauchte KSS-Menge wird zur Gänze bei der Bearbeitung verbraucht. Sowohl die MMS als auch die Trockenbearbeitung, die gänzlich ohne Kühlschmierung auskommt, kommen derzeit nur in Ausnahmefällen zum Einsatz.

Wassergemischte Emulsionen wurden bei der Minimalmengen-Kühlschmierung (MMKS) bisher jedoch nicht eingesetzt./3/

Einen Überblick über die unterschiedlichen Kühlschmierstrategien in der zerspanenden Metallbearbeitung gibt Abbildung 1.



Abkürzungen:

wmb	wassermischbar
nwmb	nicht wassermischbar
MMS	Minimalmengenschmierung
MMKS	Minimalmengenkühl schmierung

Abb. 1: Schema der Kühlschmierkonzepte in der Metallzerspanung

Die Auswirkung der feinen Zerstäubung der MMS auf die Nebelbelastung im Arbeitsraum der Maschinenbediener wurde bisher kaum untersucht. Studien von Profactor zeigen, dass nur bei sehr sorgfältiger Einstellung der MMS mit nwmb-KSS die Emission von Aerosolen in den Arbeitsraum niedriger ist wie bei Überflutungsschmierung. Außerdem ist beim Zerspanungsprozess darauf zu achten, dass keine Rauchbildung aufgrund von Pyrolyseprozessen auftritt. /4/

Das abgeschlossene Projekt „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur Berücksichtigung von Aspekten des ArbeitnehmerInnen- und Umweltschutzes bei der Gestaltung von Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsprozessen“ der ersten Ausschreibung der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ zeigt, dass die Bearbeitung zum Beispiel von Aluminium mit MMKS auf Emulsionsbasis sowohl aus fertigungstechnologischer Sicht als auch bezüglich Arbeits- und Umweltschutz viel versprechende Ergebnisse liefert. Derzeit sind jedoch keine Pumpen/Düsen-Systeme verfügbar, die derart geringe Emulsionsmengen sicher und kontinuierlich aufbringen können. /5/ /6/

2 Ziel des Projektes

Ziel des Projekts war es daher, ein Minimalmengen-Kühlschmiersystem zu entwickeln, das aus einer Pumpen/Düsen-Einheit besteht, in der eine Öl-in-Wasser-Emulsion auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt wird.

Die Inhalte des Projekts sind die Entwicklung des Systems, das den zuvor aufgestellten Anforderungen der Fertigung, des Umwelt- und Arbeitsschutzes entspricht. Im Labor werden die Sprühcharakteristik sowie die Eignung für relevante Fertigungsprozesse und Werkstoffe untersucht. Nach Durchführung der erforderlichen Adaptierun-

gen wird das System in einem Unternehmen der Metallbearbeitung an ausgewählten Prozessen auf seine Praxistauglichkeit überprüft.

Die folgenden Arbeiten werden im Zuge des Projektes behandelt:

- Erstellung des Anforderungsprofils
- Entwicklung einer additivarmen KSS-Emulsion auf Basis nachwachsender Rohstoffe
- Studie zur heimischen Rohstoffbasis und ihrer Verfügbarkeit
- Auswahl und Adaptierung Aufbringungssystems
- Klärung der Sprühcharakteristik
- Abgrenzung des Einsatzbereiches
- Überprüfung der Praxistauglichkeit beim Anwender.

Die Ergebnisse des Projekts sind die Bereitstellung eines Prototypen des entwickelten Minimalmengen-Kühlschmier-Systems für den Anwender, die Abgrenzung des Einsatzbereiches wie geeignete Bearbeitungsverfahren, Werkstoffe und Schnittparameter; der Nachweis der Praxisrelevanz in der Fertigung, die Klärung der Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung des KSS und Untersuchung der Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit der Arbeitnehmer.

3 Verwendete Methode und Daten (Vorgehensweise)

Der Projektablauf gliedert sich gemäß dem genehmigten Antrag in die folgenden Arbeitspakete:

- I.1 Entwicklung des Anforderungsprofils an das neue Kühlschmier-System
- II.1 Entwicklung der Rezeptur für den KSS
- II.2 Untersuchung über die heimische Rohstoffbasis und deren Verfügbarkeit, Kostenstruktur
- II.3 Auswahl und Bereitstellung des Pumpen/Düsensystems
- III.1 Charakterisierung der Sprüheigenschaften des Systems
- III.2 Bearbeitungsversuche im Labor zur Abgrenzung der potenziellen Einsatzmöglichkeiten
- IV.1 Labortests für die Einsetzbarkeit anhand konkreter Einsatzfälle bei den Anwendern.
- IV.2 Praxistest in der Metallbearbeitung bei den drei Anwenderpartnern
- V.5 Projektkoordination, Dokumentation der Ergebnisse

4 Ergebnisse

4.1 Anforderungsprofil und Marktpotenzial

Das Anforderungsprofil für das zu entwickelnde Kühlschmier-System wurde von den Projektpartnern in gemeinsamer Diskussion erarbeitet. Dabei wurden einerseits die konkreten Bearbeitungsfälle der Partnerunternehmen als auch zusätzliche marktrelevante Anwendungen berücksichtigt. Das Anforderungsprofil umfasst unter anderem Aspekte der Fertigungstechnologie, der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Kühlschmierstoffes, der Dosierung und Aufbringung, des Arbeits- und Umweltschutzes und der Verfügbarkeit der Rohstoffe.

Gewünschte Bearbeitungsverfahren sind Fräsen mit Schwerpunkt HSC, Drehen; Gewindeschneiden, Reiben; Bohren (Tiefe bis max. 3x Durchmesser); Sägen und in weiterer Folge auch Stanzen und Ziehen. Als zu bearbeitende Werkstoffe wurden Buntmetalle (Kupfer, Bronze), (rostfreier) Stahl, Verbundmaterialien (z.B. Kupfer & Stahl), Sintermetalle, Kunststoffe und Aluminium genannt. Weitere Anforderungen der Anwendung sind spezifische Geometrien der Werkstücke, wie z.B. Kavitäten, ausreichender Spänetransport, Anhaften von Spänen an Werkstücken sowie die Möglichkeit der inneren Kühlmittelzufuhr. Es wurde von allen Projektpartnern anerkannt, dass nicht alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt werden können, bestimmte möglicherweise mit dem vorgeschlagenen System überhaupt nicht erfüllt werden können.

Die Anforderungen an den Kühlschmierstoff sind:

- Basisöl aus nachwachsenden Rohstoffen (mineralölfrei),
- möglichst einfache Rezeptur der Additivierung: Emulgator, Korrosionsschutz; Schaumbremser, EP-Zusätze. Auf die Verwendung von Bioziden oder Biostatika kann wegen der Verlustschmierung verzichtet werden;
- Verzicht auf Silikonzusatz wegen den Forderungen der Automobilindustrie (Lackunverträglichkeit)
- Verträglichkeit mit Werkstoff und Schneidwerkzeug
- Emulsionseigenschaften wie Stabilität und Tröpfchengröße
- Verträglichkeit mit Dichtungsmaterialien
- Möglichst rückstandsfreie Verdunstung
- Gute Hafteigenschaften und Benetzbarkeit auf Oberflächen
- Temperaturstabilität
- Wassergefährdungsklasse ≤ 1
- Hohe Umweltverträglichkeit
- Hautverträglichkeit, Humantoxikologie und Geruch

- Übereinstimmung mit rechtliche und technische Regelungen wie Chemikaliengesetz und VKIS-VSI-IGM Stoffliste für KSS /7/
- Rohstoffbasis: kurze Transportwege, technische Eignung, Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit

Die Anforderungen an das Aufbringungssystem wurden wie folgt festgelegt:

- Erreichbarkeit der Wirkstelle in tiefen Kavitäten
- Mengenregelung von 100 bis unter 10 ml/h
- Möglichkeit von Sprühen bzw. Vernebeln bis zu „Tropfenbeschuss“
- aus arbeitsmedizinischen Gründen keine zu feine Vernebelung (Tropfendurchmesser > 10 µm)
- sichere und konstante Aufbringung ohne „Aussetzer“
- Gewichtung zwischen Kühlung, Schmierung und Spänetransport
- Ausrichtbarkeit der Düse: Flexibilität in Bezug auf Geometrie von Werkzeug und Werkstück
- Düsenform – Sprühbild
Reichweite: min. 100 mm opt. 200 mm
Sprühkegelöffnung: möglichst kleiner Winkel (Minimierung des Oversprays)
- (Mögliche Vorwärmung im Vorratsbehälter bei pastösen tierischen Fetten)
- Emulgierung vor oder nach der Düse → zwei Vorratsbehälter, günstig für die Haltbarkeit
- Geeignete Werkzeugauswahl in Bezug auf Grundmaterial, Beschichtung und Schneidengeometrie

Die Möglichkeit des Einsatzes von tierischen Fetten und von aufbereiteten Altspeiseölen wurde diskutiert, aber wieder verworfen, da hohe Hygienisierungsanforderungen bestehen und die Akzeptanz der Anwender unter Umständen gering ist.

In weiterer Folge wurde das Marktpotenzial für Minimalmengenschmiersysteme abgeschätzt. Dabei konnte ein theoretisches Nachrüstpotenzial für bestehende Werkzeugmaschinen von 40.000 bis 50.000 in Österreich ermittelt werden. In einer Produktionsinnovationserhebung aus dem Jahr 2001 für Deutschland wurde von 30% der befragten produzierenden Unternehmen angegeben, dass diese entweder die Einführung von Trockenbearbeitung oder Minimalmengenschmierung (MMKS) planen, oder wegen fehlender technischen/wirtschaftlichen Lösungen davon absehen. Für Österreich ergibt sich damit ein Potenzial von 10.000 -15.000 nachzurüstenden Maschinen oder einen Schmierstoffbedarf von 200 - 300 Jahrestonnen. /8/ /9/

4.2 Konzeption und Formulierung des Kühlschmierstoffes

Ausgangsbasis für Grundlage für die Entwicklung eines Minimalmengen Kühlschmierstoffes (MM-KSS) ist die bei AGATEX vorhandene Erfahrung und das Know-

how über Schneid- und Bohröle sowie Schmierstoffe auf Esterölbasis. Bestehende Schmierstoffe auf Esterölbasis sind wasserfrei, dennoch mit Wasser mischbar. Die dabei entstehenden Emulsionen sind jedoch nicht stabil genug und daher nicht für den Einsatz als wassergemischte MM-KSS geeignet. Als Emulgator- und als Schmiermittel-Komponenten sollten nur solche Stoffe in Betracht kommen, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren.

4.2.1 Erstformulierung

Ausgehend von den Spezifikationen im Anforderungsprofil wurden bei der Fa. Agatex über zwanzig Emulgator-/Schmierstoff-Kombinationen im Labor entwickelt und deren Eigenschaften untersucht. In einer Vorauswahl wurden zwei Versuchsprodukte ausgewählt und davon jeweils zehn Liter Muster für nachfolgende Versuche im Zerspannungslabor zur Verfügung gestellt:

AGALUBE 299:

Chemische Charakterisierung: wässrige Zubereitung aus Alkylestern, Polyglycolestern, Triglyceriden und Alkanolamiden von Fettsäuren auf reiner NAWARO-Basis. Bei Agalube 299 wurde als Gleitmittel ein Rapsöl-Vollraffinat sowie n-Butylstearat gewählt.

Die dafür notwendige Emulgatorkombination besteht aus Kokosfettsäure-diethanolamid und Stearinfettsäure-polyglykolester. Alle Komponenten sind auf Basis nachwachsender pflanzlicher Rohstoffe und leicht und vollständig biologisch abbaubar.

AGALUBE 301:

Chemische Charakterisierung: Wässrige Zubereitung aus Fettsäureestern, Polyglykolen und Emulgatoren auf Fettsäure-Basis aus nachwachsenden Rohstoffen.

Bei der ersten Probe sind sämtliche Rohstoffe der Zubereitung rein auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Bei der 2. Probe sind die zusätzlich verarbeiteten Fettsäuren pflanzlichen Ursprungs und auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Bei AGALUBE 301 wurde als Gleitkomponenten ursprünglich eine Kombination aus Rapsmethylester und einem sehr gut gleitenden Polyethylen-/Propylenglykol ausgewählt. Als Emulgator wurde wieder ein Fettsäurepolyglycolester verwendet.

Bei der Auswahl der Rohstoff-Komponenten wurde großer Wert auf deren humantoxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften gelegt. Sämtliche Komponenten der Zubereitungen sind als Lebensmittel-Zusatzstoff zumindest unter einem der Paragraphen 21CFR177.3910 "*surface lubricants used in the manufacture of metallic articles*", 21CFR178.3130 "*antistatic agents in food packing materials*" oder 21CFR184.1555 "*direct food substances affirmed as generally recognized as safe*" bei der US-Federal Drug Administration (FDA) gelistet.

Auf Zusätze wie Korrosionsschutzmittel, Biozide als Gebinde-Konservierungsmittel, o.ä. wurde bei den Versuchsprodukten bewusst verzichtet.

Sollte sich in der weiteren Erprobung herausstellen, dass über die keim- und korrosions-hemmende Wirkung, die der Zubereitung bereits innewohnt, noch zusätzlich Aditivierung erforderlich werden sollte, so können diese in späteren Formulierungen zugemischt werden.

4.2.2 Weiterentwicklung

Aufgrund der Anforderungen des Pumpe-Düse-Systems, aus den Ergebnissen der Zerspanungsversuche im Labor und der Praxistests bei den Projektpartnern sind die dabei gemachten Erfahrungen in die Weiterentwicklung des Kühlschmierstoffes eingeflossen:

- Viskosität: Durch Anpassung der Aktivsubstanz konnte die Viskosität von A-GALUBE 299 von 1000 mPas auf ca. 50 mPas gesenkt werden.
- Korrosionsschutz: In ersten Reaktionen wurde bei Verwendern die mangelnde Korrosions-Verhinderung beanstandet, die jedoch durch Zugabe eines Korrosionsschutzmittels und Anhebung des pH-Wertes in nachfolgenden Bemusterungen korrigiert wurde. Je nach dem zu bearbeitenden Material könnte noch eine genauere Anpassung des Korrosionsschutzes erforderlich werden.
- Emulsionsstabilität: Durch die Konzentration der Rohstoffbasis auf NAWAROS erwies es sich als schwierig eine ausreichende Emulsionsstabilität zu erzielen. Bei Ausweitung der Rohstoff-Basis ist unschwer eine Verbesserung möglich.

4.3 Die heimische Rohstoffbasis

In Österreich werden unterschiedliche Ölpflanzen kultiviert. Die Wichtigste ist mit einer Anbaufläche von durchschnittlich 55.000 Hektar jährlich und einem Ertrag von durchschnittlich 134.000 Tonnen der Raps. Neben dem Raps hat die Ölsonnenblume mit einer Anbaufläche von durchschnittlich 22.000 Hektar und einem Ertrag von 55.000 Tonnen und die Sojabohne mit 16.500 Hektar und 39.000 Tonnen Ertrag die größte Bedeutung für die Ölpflanzenproduktion. Darüber hinaus hat der Ölkürbis in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. In den letzten Jahren wurden durchschnittlich 12.500 Hektar an Ölkürbiskulturen in Österreich angepflanzt. Neben diesen vier großflächig angebauten Ölpflanzenkulturen gibt es noch den Öllein (2002 - 3900 Hektar) und die Mariendistel (1190-2002 Hektar) die regelmäßig angebaut werden.

Als zukünftige zusätzliche Flächenpotentiale können die Anbauflächen ausgeweitet werden. In Summe stehen durchschnittlich 103.000 Hektar an rotierenden Stilllegungsflächen zu Verfügung. Unter Berücksichtigung der Kulturfolge können 25% davon für zukünftige Ölpflanzenkulturen herangezogen werden. Auf diesen zusätzlichen 25.750 Hektar können, entsprechend der derzeitigen Flächenverteilung, rund 37.625 Tonnen Raps, rund 14.452 Tonnen Ölsonnenblume, rund 8.830 Tonne Soja-

bohne, rund 1.048 Tonnen Öllein und rund 224 Tonnen Mariendistel produziert werden.

In Summe ergibt sich ein Rapskornpotential von 150.261 Tonnen, ein Ölsonnenblumenpotential von 71.196 Tonnen, und ein Sojabohnenpotential von 54.186 Tonnen.

Diese Angaben müssen aber immer unter dem Blickpunkt der 10%igen Stilllegungsverpflichtung, die durch die EU geregelt ist, gesehen werden. Demgemäß sollen die rotierenden Stilllegungsflächen bis einschließlich des Jahres 2007 entsprechend GAP-Vertrag beibehalten werden. Das tatsächliche Anbaupotential für Ölpflanzen ist aber nicht durch die Stilllegungsflächen limitiert, sondern immer durch die Marktsituation geprägt. Der landwirtschaftliche Unternehmer wird immer jene Pflanzenkulturen anbauen und vermarkten, die für sein Unternehmen den größten Nutzen haben.

Vergleicht man nun das Ölpflanzenpotential mit dem Verbrauch der Industrie (siehe Tabelle 1), so ist ersichtlich, dass obwohl die Produktion der Ölpflanzen in den letzten Jahren in etwa gleich geblieben ist, der Verbrauch seitens der Industrie stark zurückgegangen ist. Zwischen 2000/01 und 2001/02 rund 39%. /10/

Bilanzposten	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	Veränderung gg. Vorjahr
Erzeugung	82.904	69.558	117.771	118.627	125.845	116.916	-7%
Industrie NAWAROs	50.006	53.307	40.529	35.145	36.489	22.221	-39%

Tabelle 1 Versorgungsbilanz für pflanzliche Öle (Reinfett in Tonnen) in der Industrie (Quelle Statistik Austria)

Daraus ist ersichtlich, dass die Ölpflanzenproduktion in den letzten Jahren relativ stabil geblieben ist, hingegen der Einsatz von Ölpflanzen in der technischen und chemischen Industrie stark zurückging. Bezüglich der Anbauflächen kann davon ausgegangen werden, dass nach wie vor Flächen für die Produktion von Ölpflanzen zu Verfügung stehen, die in der technischen und chemischen Industrie verwertet werden können. Der Anbau aber, wie oben beschrieben, nur dann erfolgt, wenn die Fruchtfolgemöglichkeit besteht und ein Deckungsbeitrag für die Feldfrucht erwirtschaftet werden kann der von betriebswirtschaftlichen Interesse für den landwirtschaftlichen Betreiber ist.

Zur Verarbeitung der Samen gibt es in Österreich 2 größere Mühlen sowie 6 Mittel- und Kleinmühlen. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von Kleinmühlen, rund 70, die zumeist durch Selbstvermarkter betrieben werden. Die Ölgewinnung erfolgt hauptsächlich durch Kaltpressung. Nur in Bruck/Leitha erfolgt eine Extraktion. Die Qualitäten die produziert werden, sind hauptsächlich gefilterte Pflanzenöle. Ausnahmen bilden die Ölpresse in Aschach und in Bruck/Leitha. In Aschach wird für die Spei-

seölproduktion ein Raffinat erzeugt und in Bruck/Leitha wird das Pflanzenöl je nach Bedarf gefiltert, entschlämmt oder raffiniert.

Der Pflanzenölpreis orientiert sich bei den Großanlagen am Rotterdamer Markt und erfährt je nach Abnahmemenge Zuschläge. Bei Kleinanlagen ergibt sich ein differenzierteres Bild für die Preisgestaltung. Neben dem Rotterdamer Markt sind auch lokale Treibstoffpreise für die Preisgestaltung verantwortlich.

Die FAME-Produktion (Fettsäure-Methylether) hat seit fast 20 Jahren in Österreich Tradition. Laut Angaben der unterschiedlichen Produktionsstätten in Österreich für FAME werden rund 59.500 Tonnen Altspisefette und -öle umgeestert.

Bei der Umesterung von Pflanzenölen sowie Altspisefetten und -ölen fällt rund 10-11% Glycerin an. Dies bedeutet rund 9.900 Tonnen bei der Umesterung von Pflanzenölen sowie 5.950 Tonnen durch die Umesterung von Altspisefetten und -ölen. Darüber hinaus könnten durch die Anpflanzung von Öfrüchten auf Stilllegungsflächen weitere 2.100 Tonnen Glycerin anfallen.

4.4 Das Pumpen-/Düsensystem

Die sichere, störungsfreie und konstante Förderung des 2-phasigen Gemisches Öl-in-Wasser-Emulsion mit exakt einstellbaren Volumenströme zwischen 10 und 100 ml/h und der im Kap. 4.2 angegebenen Viskosität sind wesentliche Voraussetzung für einen Einsatz unter industriellen Bedingungen. Es wurden drei Sprühsysteme getestet:

4.4.1 Uni-Microspray von Hennlich mit Kühlschmierdüse Typ AV-1MM.022.30.01.00.0



Abb. 2: Der Uni-Microspray von Hennlich

Der Uni-Microspray (vgl. Abb. 2) besteht aus einer Hubkolbenpumpe, die den KSS fördert und einer Drucklufteinheit, die eine Versprühung der Flüssigkeit in der Zweistoffdüse übernimmt. Die Flüssigkeitsmenge kann über den Kolbenhub und die Kolbenfrequenz geregelt werden. Die Austrittsgeschwindigkeit und Vernebelung wird durch das Druckminderungsventil eingestellt. Charakteristisch für Kolbenpumpen sind der gepulste und diskontinuierliche Strahl. Beim Betrieb mit Emulsion, bei geringer Druckluftbeaufschlagung und niedrigen Flüssigkeitsstrom hat sich gezeigt, dass die Förderung ungleichmäßig ist und sich größere Tropfenansammlungen an der Austrittsöffnung bilden.

4.4.2 Multifog

Multifog-Nebelanlagen werden in der Luftbefeuchtung und als Bewässerungsanlagen eingesetzt. Aber auch in der Industrie Gewährleistung von konstanter Produktfeuchte während des Herstellungsprozesses. Multifog-Düsen werden mit unterschiedlicher Durchsatzleistung angeboten. Die kleinste Düse liefert bei 70 bar angelegten Druck 1,2 l/h. Sowohl der bereitzustellende Überdruck als auch die erreichbare Literleistung entspricht nicht den Anforderungen an MMKS-System. Diese Düsenart wurde daher für weitere Betrachtungen ausgeschieden.

4.4.3 Microjet Type MKS-G 260

Das System besteht aus einem Flüssigkeitsvorratsbehälter und einem Düsen-schlauchpaket mit zwei Zweistoffdüsen. Die gewünschte minimale Flüssigkeitsmenge wird über den Behälterdruck eingestellt, wodurch der Verbrauch an Kühlschmierstoff geregelt werden kann. Unabhängig von der Flüssigkeit kann die Druckluftmenge ebenfalls über ein Drosselventil gesteuert werden.

Die Funktionsweise des Dosiergerätes lässt sich folgendermaßen beschreiben: Die Flüssigkeit wird durch den Überdruck im Vorratsbehälter durch einen dünnen Kapillarschlauch geleitet, der in die Mischkammer der Zweistoffdüse führt. Die Vermischung erfolgt erst in der Mischkammer mit der separat zugeführten Druckluft. Gleichzeitig strömt Druckluft in einem Ringkanal coaxial zur Mischkammer und bildet beim Austritt aus dem Düsenmund einen Luftmantel, der das Vernebeln verringert und dem Gemischstrahl gleichzeitig eine stabile Richtung gibt (vgl. Abb. 3). /11/

Das Microjet-Gerät hat sich als das stabilste und am besten regelbare System herausgestellt und wurde für die weiteren Untersuchungen verwendet.

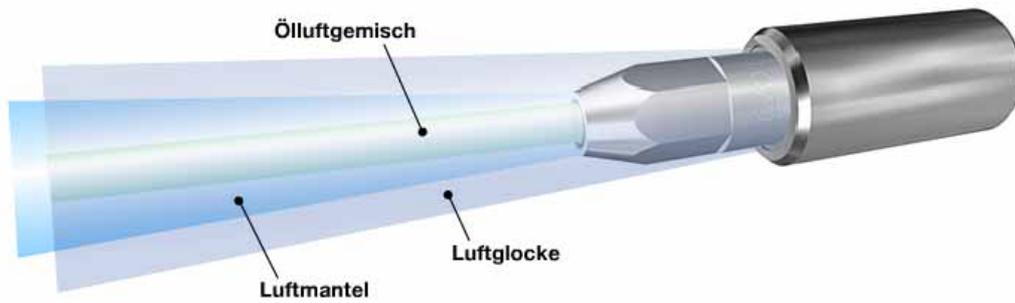


Abb. 3: Zweistoffdüse /11/

4.5 Strahlcharakterisierung

Die makroskopische Charakterisierung (Öffnungswinkel, Reichweite, Verhalten beim Auftreffen auf Hindernissen) erfolgt mittels Analogfotografie mit Langzeitbelichtung in abgedunkelter Umgebung und mit Blitzlicht. (vgl. Abb. 4 und 5)



Abb. 4: Versuchsaufbau für Uni-Microspray bei Tageslicht (rechts); Beispiel für makroskopische Strahlcharakterisierung in abgedunkelter Umgebung (links)



Abb. 5: Versuchsaufbau für Microjet (links) und Strahl(rechts)

Der Strahlvergleich zeigt für den Microjet einen klarer abgegrenzten Öffnungswinkel. Der Öffnungswinkel beträgt ca. 20° die Reichweite in etwa 200 mm bevor die Partikel durch den Luftwiderstand abgebremst werden. Der Strahl des Uni-Microsprays hat ähnliche Dimension ist aber am Strahlkegelrand etwas verschwommener und die Kegelachse nicht gerade.

Für die Praxis der MMS ist es wichtig, dass die Tröpfchen genügend kinetischer Energie aufweisen, sei es über die Tropfengröße oder die Anfangsgeschwindigkeit, um den Luftpolster des rotierenden Werkstückes oder Werkzeuges zu durchstoßen und an die Bearbeitungsoberfläche zu gelangen.

4.6 Bearbeitungsversuche im Zerspanungslabor

Die Ziele der Bearbeitungsversuche sind es, die Emissionseigenschaften und die Eignung relevanter Fertigungsprozesse durch Verwendung von Minimalmengen Kühlschmierung mit Öl-in-Wasser-Emulsionen zu untersuchen. Dafür werden die in diesem Projekt entwickelten Emulsionsproben verwendet, um anschließend mit herkömmlicher MMS Anwendung mit Öl verglichen zu werden.

4.6.1 Verwendete Geräte für die Zerspanung

4.6.1.1 Fräsmaschine

Die Fräsversuche wurden auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum C40-U von Hermle mit Einhausung und Abluftabsaugung ausgeführt. Die maximale Spindelleistung beträgt 15 kW, die maximale Drehzahl 16.000 U/min (vgl. Abb. 6).



Abb. 6: Die Hermle 5-Achs-Bearbeitungsmaschine im Zerspanungslabor von Profactor

4.6.1.2 Dosiersystem für Minimalmengenkühlschmierung (MMKS)



Abb. 7: Dosiersystem für MMKS

Zur Aufbringung des Kühlschmierstoffes auf die Bearbeitungsstelle wurde das Dosiersystem der Firma Microjet der Type MKS-G 260 (vgl. Abb. 7) verwendet. Die Funktionsweise des MMKS-Systems ist in Kapitel 4.4.3 beschrieben.

4.6.2 Messmethode und Auswertung

Die Erfassung der Emissionen erfolgte isokinetisch im Abluftstrom vor dem Luftfilteraggregat in Anlehnung an VDI Richtlinie 2066 (Abb. 8) /12/. Die Messung der KSS-Tröpfchen wurde mit einem optischen Partikelzähler durchgeführt. Das verwendete

Spektrometer von Grimm¹ ermöglicht die Online-Messung der Partikelanzahl im 6-Sekundenintervall und die Darstellung der massen- oder anzahlbezogenen Verteilungsdichte und -summe in 16 Größenklassen zwischen 0,23 und 20 µm Partikeldurchmesser am angeschlossenen PC.



Abb. 8: Isokinetische Probenahme im rohgasseitigen Abluftkanal und optischer Partikelzähler

Abbildung 9 zeigt den Screenshot eines exemplarischen Messprotokolls der Ausgabesoftware des Partikelzählgerätes. Neben Geräteeinstellungen, Start- und Stoppzeitpunkt werden die Momentanwerte der Größenfraktionen sowie graphisch der zeitliche Verlauf ausgewählter Größenfraktionen dargestellt.

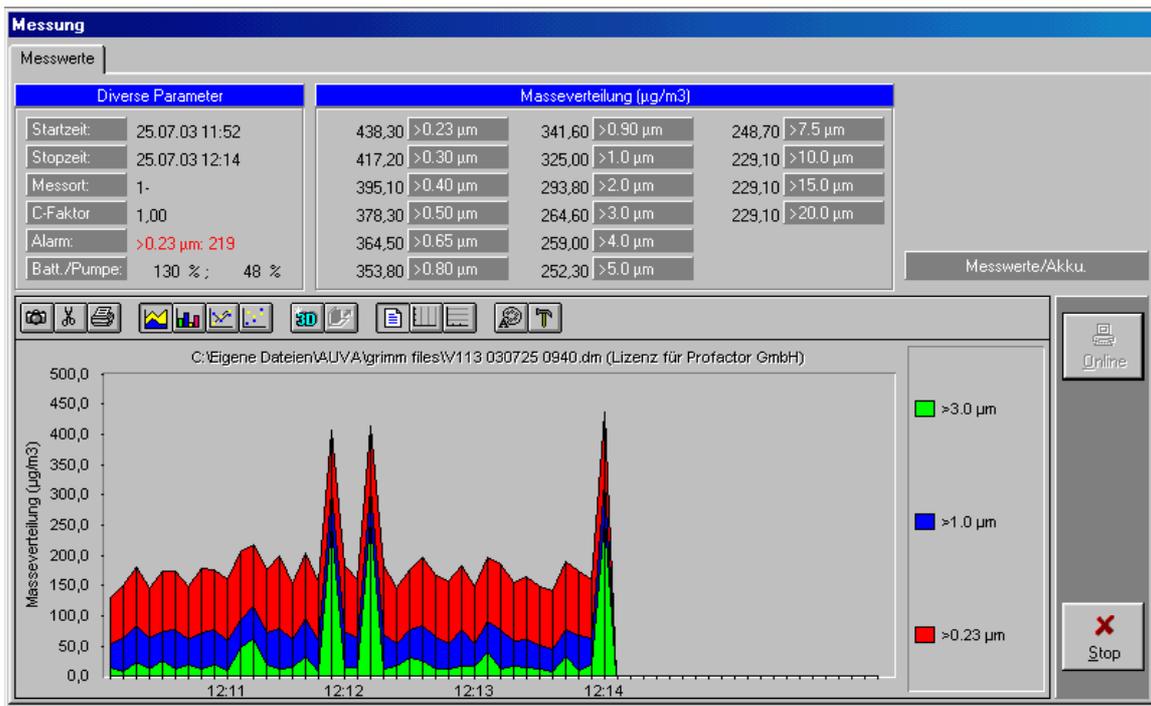


Abb. 9: Screenshot der Ausgabesoftware

¹ Grimm Aerosolspektrometer 1.108

Es hat sich herausgestellt, dass das System Bearbeitung – Maschinenabsaugung – Messgerät ca. 2 bis 3 Minuten benötigt bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hat. Die Auswertung der Versuche erfolgt über zeitliche Mittelwertbildung des konstanten Verlaufes des jeweiligen Versuchsdurchganges. Abbildung 10 zeigt einen exemplarischen Verlauf.

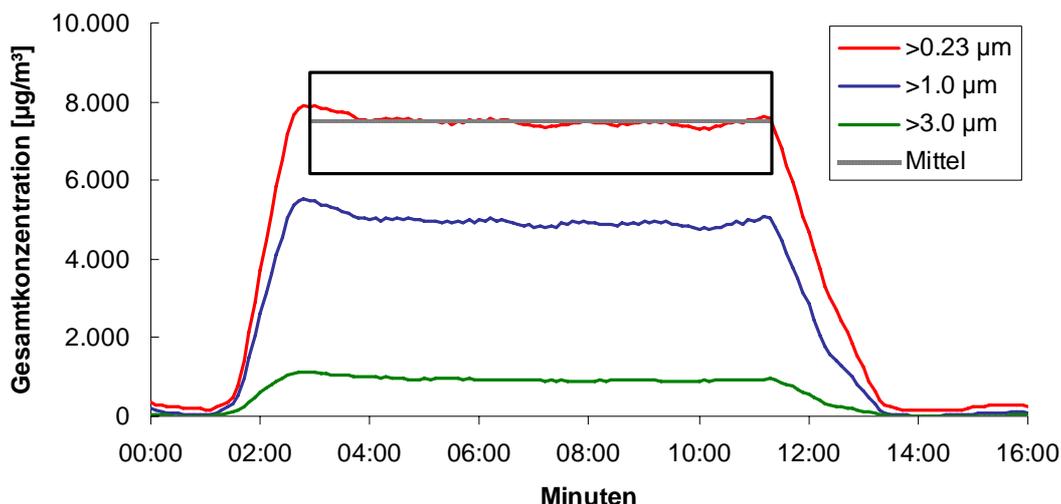


Abb. 10: Auswertung eines Versuchsdurchlaufes mit Mittelwertbildung über den konstanten Verlauf

Gesamtkonzentration: $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Medianwert: $0,99 \mu\text{m}$
 PM1 = 491 PM2,5 = 754 PM10 = 948

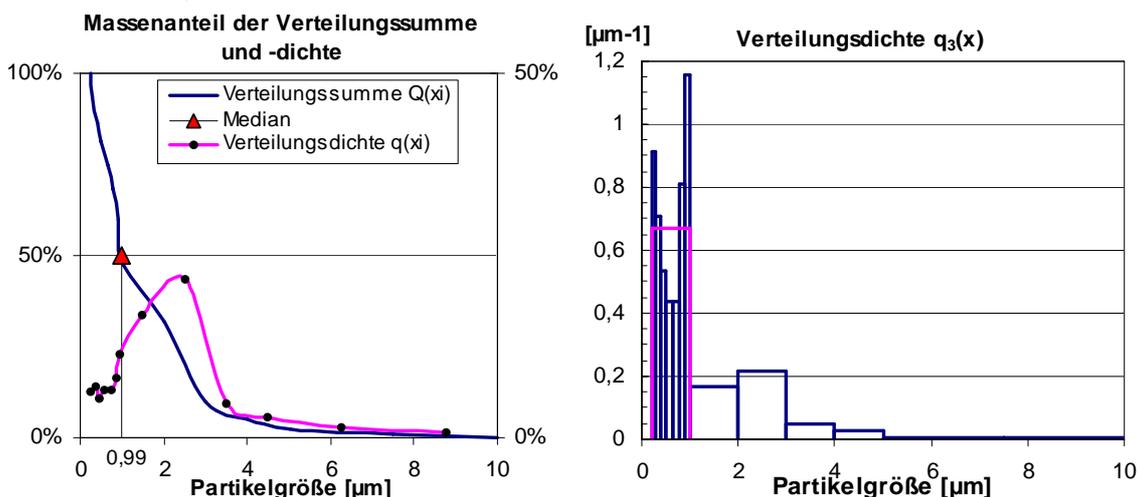


Abb. 11: Ermittlung charakteristischer Größen wie Gesamtkonzentration und Medianwert

Nach der zeitliche Mittelwertbildung kann die Gesamtkonzentration (Partikeldurchmesser $> 0,23 \mu\text{m}$), der Massenanteil der Verteilungssumme und -dichte, sowie die

über die Klassenbreite normierte Verteilungsdichte dargestellt werden. Aus der Verteilungsdichte lässt sich als Kennwert für das Partikelspektrum der Medianwert $x_{50,3}$ ermitteln, der das Spektrum massenbezogen in zwei gleich große Fraktionen teilt. (vgl. Abb. 11)

4.6.3 Versuchsdurchführung

Bei der Planung der Laborversuche wurde das Erfahrungswissen aus der Produktion der Unternehmen Haidmair und Protan als auch aus dem mechanischen Labor bei PROFACTOR berücksichtigt.

4.6.3.1 Sprühversuche

Damit der Materialaufwand für die Fräsversuche trotz der Vielzahl an möglichen Parametervariationen gering gehalten wird, entschied man sich zuerst Sprühversuche mit den einzelnen KSS-Medien abzuwickeln. Es sollten anhand dieser Versuche vorab Parametereinstellungen gefunden werden, die zu geringer Nebelbildung (Emissionen) neigen und einen störungsfreien Fräsversuch garantieren.

Die Versuche wurden innerhalb der Einhausung der Fräsmaschine durchgeführt, wobei die Düsen in einem Abstand von ca. 10 cm gegen das Schutzglas positioniert wurden. Unter verschiedenen Parametereinstellungen konnte nun die KSS-Sprühstrahlcharakteristik studiert werden, um evtl. auftretende Störungen bzw. Beeinflussungen an der Austrittsstelle der Zweistoffdüse zu erkennen. Gleichzeitig zu den Beobachtungen wurden die Emissions- und Verbrauchsmessungen aufgezeichnet. (vgl. Abb. 12)



Abb. 12: Sprühversuch

Als Versuchsmedien wurden die von der Firma Agatex entwickelten Musterproben, Agalube 299 und Agalube 301, verwendet. Beide Proben (299 & 301) wurden als Konzentrat geliefert und mussten vor ihrer Verwendung entsprechend mit Wasser

verdünnt werden. Man entschied sich eine ca. 10%ige bzw. ca. 5%ige wässrige Emulsion zu erzeugen - bei einem fetteren Gemisch > 10% ist die Gefahr einer Verstopfung der Düse zu groß, ein dünneres Gemisch < 5% verringert die Schmierleistung und ist daher für KSS-Emulsionen nicht üblich.

Der Druck der zugeführten Luft bzw. KSS wurde aufgrund von Vorversuchen zwischen 3 und 5 bar aus nachstehenden Gründen gewählt:

- a) bei einem zu geringen Luftdruck ist der Späneabtransport vom Werkstück nicht möglich.
- b) bei zu hohem Luftdruck und zu niedrigem KSS-Zufuhrdruck funktioniert die Zerstäubung bei der Zweistoffdüse nicht ordnungsgemäß. Es kommt zum zeitweiligen Ausfall der KSS-Zufuhr.
- c) bei zu geringem KSS-Zufuhrdruck gelangt nur unzureichend KSS zur Bearbeitungsstelle.
- d) zu hoher KSS-Zufuhrdruck und zu niedriger Luftdruck verursacht KSS-Tröpfchenbildung an der Werkstücksoberfläche und Späne bleiben am Werkstück haften.
- e) der max. Betriebsdruck des Dosiergerätes liegt bei 6 bar.

Die Parametervariationen für die Sprühversuche zusammengefasst:

- Druck der KSS-Zufuhr
- Druck der Luftzufuhr
- KSS-Medium: Emulsion Agalube 299
Emulsion Agalube 301
Öl
- Mischverhältnisse der Emulsionen

4.6.3.2 Ergebnisse der Sprühversuche

Insgesamt wurden mit den angegebenen Parametervariationen 35 Versuche durchgeführt, die sich in fünf Versuchreihen zu je sieben Versuche gliedern. Einen Überblick gibt Tabelle 2.

Versuchsreihe	Medium	Ölgehalt [%]	Zufuhrdruck [Luft:KSS in bar]						
			V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
1	Agalube 301	5	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4	3:4	4:5
2	Agalube 301	10	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4	3:4	4:5
3	Agalube 299	5	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4	3:4	4:5
4	Agalube 299	10	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4	3:4	4:5
5	Öl	100	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4	3:4	4:5

Tabelle 2: Auflistung der Versuchreihen

Die nachstehenden Abbildungen zeigen die ermittelten Ergebnisse von Emissions- und Verbrauchsmessungen. In Abbildung 13 sind die Aerosol-Gesamtkonzentrationen der KSS-Medien in Abhängigkeit des Zufuhrdruckes für Luft und KSS dargestellt. Man kann aus der Grafik gut erkennen, dass für die Aerosol-Gesamtkonzentrationen die Einstellung der Druckluft, die KSS-Zufuhrmenge und die Art des KSS-Mediums die Haupteinflussfaktoren für Emissionen sind. Auch ist auffallend, dass Öl gegenüber den Emulsionen zur größeren Nebelbildung neigt. Am deutlichsten hebt sich der Unterschied (\varnothing 3,4 mg/m³) in den Versuchreihen ab, wo der Luftdruck kleiner eingestellt wurde als der KSS-Zufuhrdruck (Luft:KSS 3:4 und 4:5). Des Weiteren ist zu bemerken, dass jene Emulsionen mit einem Ölgehalt von 10% ein niedrigeres Nebelbildungspotential haben, als die wässrigeren Emulsionen mit einem Ölgehalt von nur 5%. Zurückzuführen ist dies auf die höhere Viskosität (Zäh-

flüssigkeit) der öhaltigeren KSS, weshalb sich eine verringerte Zerstäubung des KSS-Mediums am Düsenaustritt ergibt.

Bei der Bewertung der Emissionen ist auf alle Fälle zu beachten, dass im gewählten Messverfahren mit dem Streulicht Partikelzähler Öl- und Wasseranteile gleichermaßen gemessen werden. Das Verhältnis Wasser zu Öl ist im Aerosol nicht gleich der Ausgangskonzentration, da aufgrund der extrem hohen Oberflächen das Wasser wesentlich rascher verdunstet. Werden zur Bewertung der Emissionen nur die Ölanteile herangezogen, wird der Vorteil der verringerten Emissionsneigung von Emulsionen noch deutlicher.

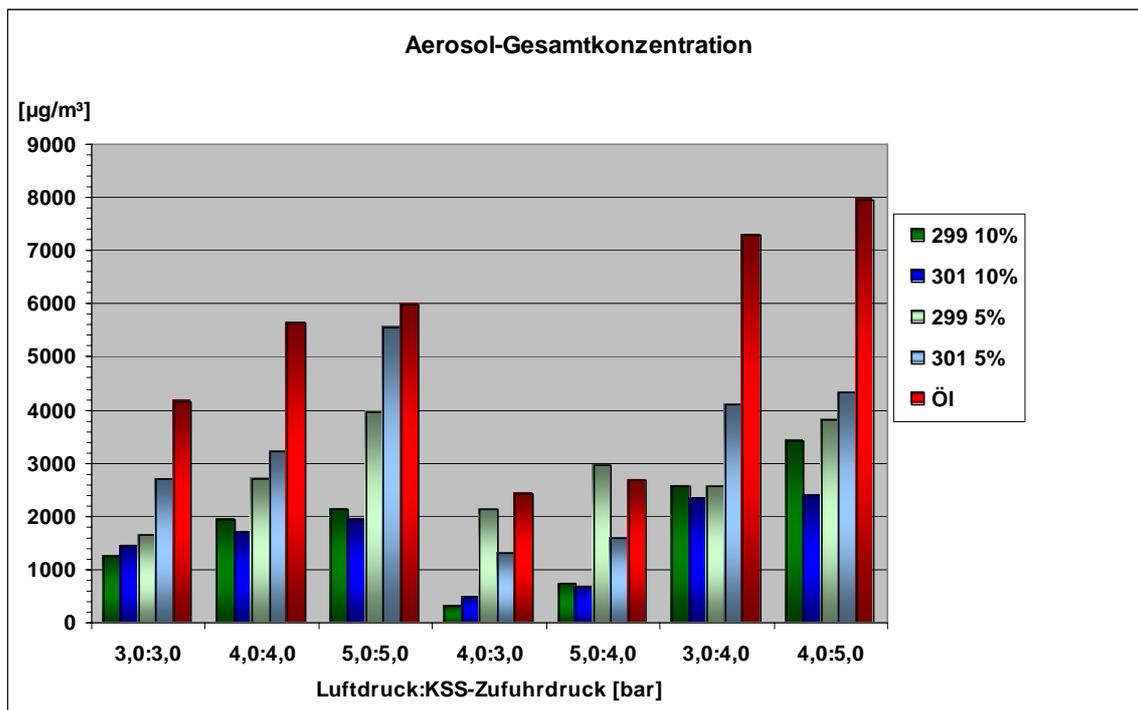


Abb. 13: Aerosol-Gesamtkonzentrationen in µg/m³ beim Sprühversuch

In Abbildung 13 sind die Verbräuche der KSS-Medien in Abhängigkeit des Zufuhrdruckes für Luft und KSS abgebildet. Grundsätzlich kann ausgesagt werden, dass mit steigendem Druck der Verbrauch an KSS und die Aerosol-Gesamtkonzentrationen sich erhöhen. Wenn man die Abbildung 13 und 14 miteinander vergleicht, so sind zwei widersprüchliche Erscheinungen ebenfalls ersichtlich. Trotz der starken Nebelbildungsneigung hat Öl einen äußerst niedrigen Verbrauch. Hingegen ist auffällig, dass die KSS-Emulsion 299 (5%) einen extrem hohen Verbrauch im Vergleich zu den anderen Medien aufweist, obwohl keine außergewöhnlich hohen Aerosol-Konzentrationen festzustellen sind. Auch hier spielt wieder die Viskosität eine große Rolle, da in diesem Fall die Emulsion 299 (5%) eine im Verhältnis niedrige Viskosität besitzt.

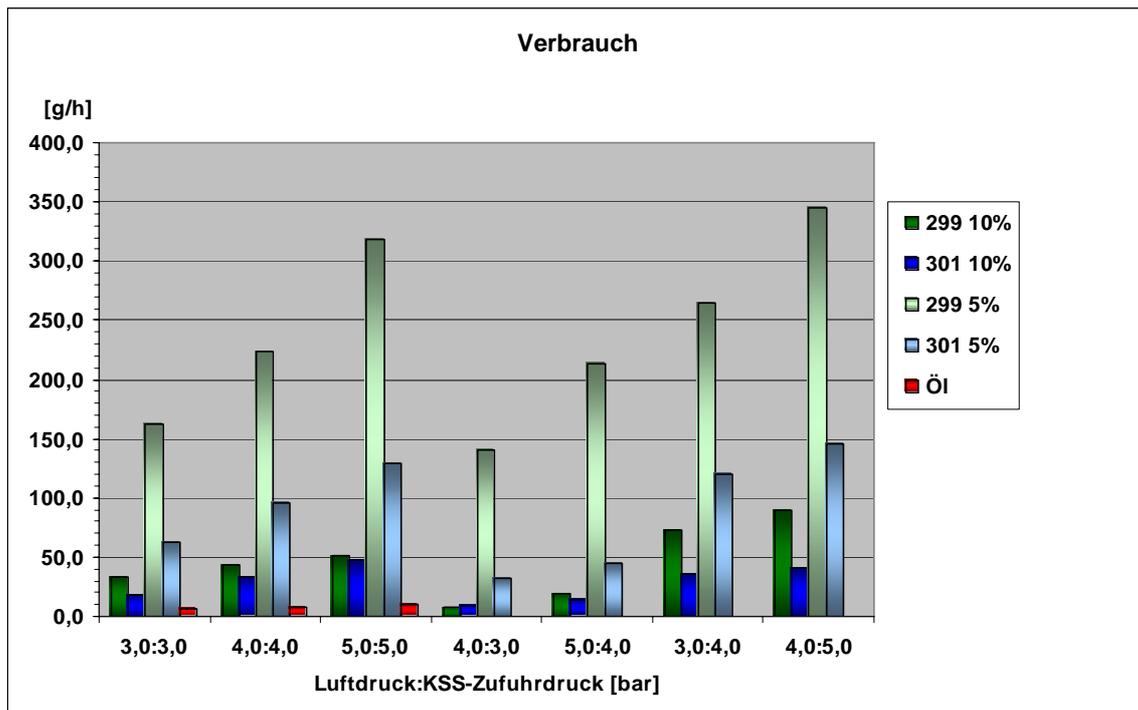


Abb. 14: Verbräuche in g/h beim Sprühversuch

Für die anschließenden Fräsversuche bedeuten die Ergebnisse aus den Sprühversuchen folgendes:

Einstellungen mit einem Zufuhrdruck (Luft:KSS) 3:4 und 4:5 scheiden gänzlich aus. Die Gründe hierfür sind, dass im Vergleich diese Einstellungen einerseits einen sehr hohen Verbrauch aufweisen und andererseits kein wesentlicher Vorteil in Bezug auf verringertes Aerosolbildungsverhalten erkennbar ist.

Ebenfalls werden die Einstellungen (Luft:KSS) 4:3 und 5:4 mit den Emulsionen 299 (10%) und 301 (10%) nicht weiter verwendet, da die KSS-Versorgung an die Bearbeitungsstelle unzureichend wäre. Gleiches gilt auch für Öl.

4.6.3.3 Fräsversuche

In den folgenden Fräsversuchen wurden drei praxisnahe Anwendungen für MMKS mit unterschiedlichen Werkstoffen untersucht. Bei den drei Versuchen handelt es sich um:

1. Messing Fräsen
2. Sinterstahl Gewindeformen
3. C45 Fräsen

Versuch Messing Fräsen

Ziel dieses Versuches ist es, durch den Einsatz von MMKS die entstehenden Emissionen während des Bearbeitungsprozesses zu untersuchen und zu beurteilen. Als Werkstück wurde ein Messingblock verwendet in dem eine Zick-Zack-Nut eingefräst

wurde. Abbildung 15 zeigt die Graphik des Bearbeitungsprogramms für das Fräsen der Nut.

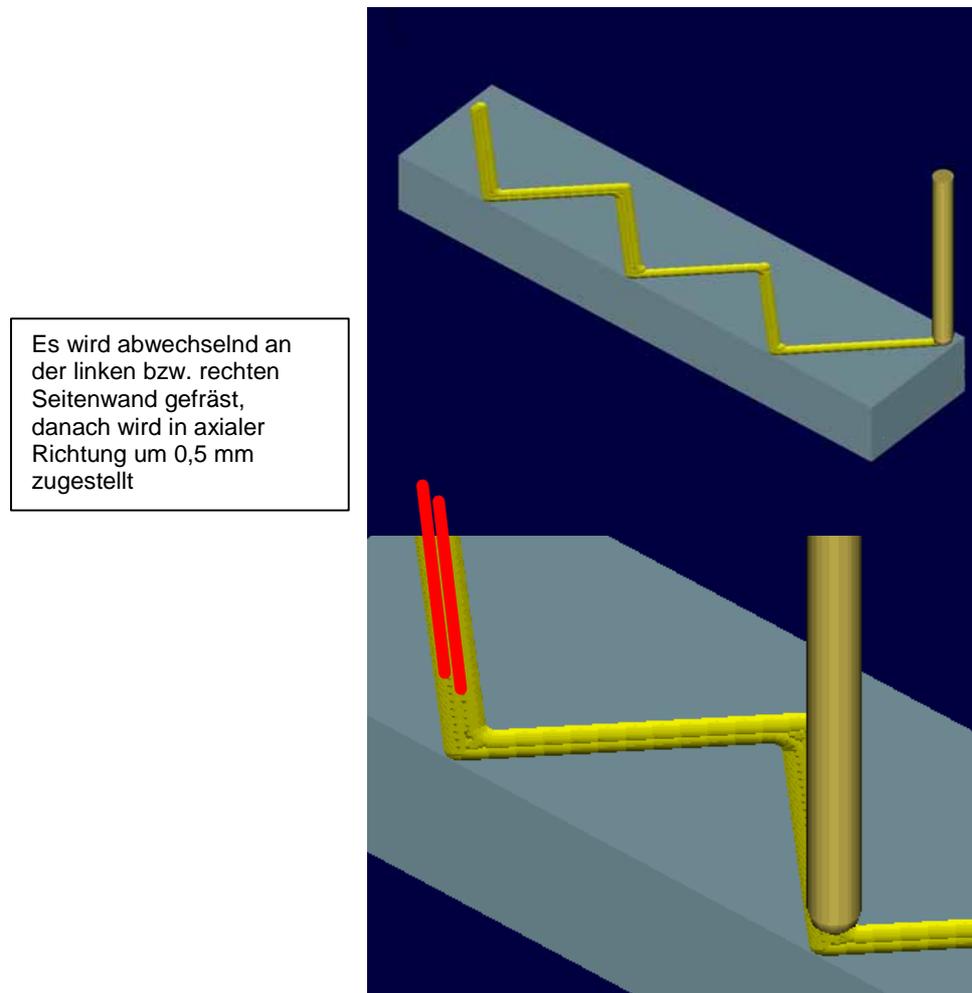


Abb. 15: Messing Fräsen (Nut: Breite Oben 6,0 mm | Unten 5,5mm | Tiefe 10 mm)

Verwendete Werkzeuge und Schnittparameter:

Fräser: Kugelfräser d 5 mm | Z2 VHM beschichtet

- Schnittgeschwindigkeit v_c 250 m/min
- Drehzahl S 16000 1/min
- Zahnvorschub f_z 0,063 mm
- Vorschub F 2000 mm/min
- Zustellung a_p 0,5 mm

Das Fräsen in Kavitäten stellt eine praxisnahe Bearbeitungssituation im Werkzeugbau dar, die hohe Anforderungen an den Späneabtransport stellt.

Tabelle 3 verschafft einen Überblick über die durchgeführten Versuche mit ihren unterschiedlichen Versuchseinstellungen.

Versuchsreihe	Medium	Ölgehalt [%]	Zufuhrdruck [Luft:KSS in bar]				
			V1	V2	V3	V4	V5
1	Agalube 301	5	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4
2	Agalube 301	10	3:3	4:4	5:5	---	---
3	Agalube 299	5	3:3	4:4	5:5	4:3	5:4
4	Agalube 299	10	3:3	4:4	5:5	---	---
5	Öl	100	3:3	4:4	5:5	---	---

Tabelle 3: Versuchseinstellungen im Überblick

Um eine optimale Schmierung zu erreichen wurden die zwei Düsen in einem Winkel von 90° zum Drehpunkt des Bearbeitungswerkzeuges angebracht. Hier sollte während des Bearbeitungsvorgangs ein gleichmäßiger Schmierfilm am Werkstück erzeugt werden um eine ausreichende Schmierung zu gewährleisten.

Um das Ausmaß der Nebelbildung durch den Zerspanungsprozess zu bekommen, wurden vor und während der Zerspanung die entstehenden Emissionen der einzelnen KSS-Medien aufgezeichnet.

Ergebnisse Messing Fräsen

Die Untersuchungen bei Anwendung der MMKS zeigen, dass die Haupteinflussfaktoren für die Nebelbildung die Druckluft, die zugeführte KSS-Menge über den KSS-Zufuhrdruck und die Art des KSS-Mediums entscheidend sind. Je höher die Drücke eingestellt sind, desto größer ist die Aerosolbelastung.

In Abbildung 16 sind die Aerosol-Gesamtkonzentrationen ohne und mit Zerspanung in Abhängigkeit des Zufuhrdruckes für Luft und KSS dargestellt. Während es beim Öl praktisch keinen Unterschied der Emissionen (ohne und mit Zerspanung) gibt, so sind bei den Emulsionen die Aerosolkonzentrationen ohne Zerspanung deutlich höher als mit Zerspanung. Das legt den Schluss nahe, dass beim Fräsen Temperatureffekte, wie die Verdunstung des Wassers, eine starke Rolle spielen und dadurch eine geringere Aerosolbelastung bewirken. Der Zerspanungsvorgang selbst wirkt sich nicht auf die Nebelbildung aus.

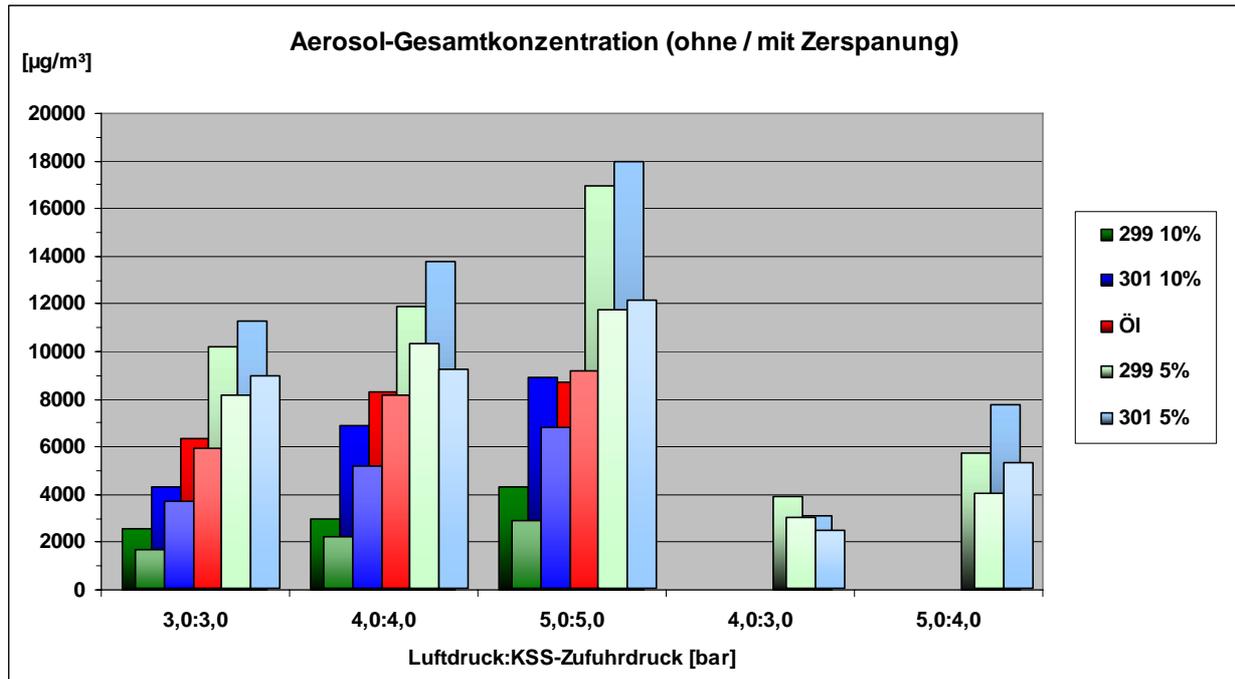


Abb. 16: Aerosol-Gesamtkonzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beim Messing-Fräsversuch (Balken im Hintergrund: Gesamtkonzentration ohne Zerspanung; Balken im Vordergrund: Gesamtkonzentration mit Zerspanung)

Ein Maß für die Feinheit des Partikelspektrums ist der Medianwert $x_{50,3}$ und kann als Maß für die Atembarkeit gesehen werden. Der Medianwert ist jener Partikeldurchmesser, der das gesamte Emissionsspektrum massenbezogen in zwei gleich große Teile trennt. Er kann aus der Verteilungssumme der Partikelgrößenverteilung entnommen werden (siehe Abb. 11 in Kap. 4.6.2). Nachstehend sind die Medianwerte für jede Versuchsreihe vor und während der Bearbeitung aufgelistet.

Für die Einstellungen (Luft:KSS) 3:3, 4:4 und 5:5 lagen die Medianwerte $x_{50,3}$ der Partikeldurchmesser bei:

- | | <i>ohne Zerspanung:</i> | <i>mit Zerspanung:</i> |
|----------------------|--|--|
| • Agalube 299 (5%): | 2,13 - 2,16 μm (\varnothing 2,14 μm) | 1,70 - 1,97 μm (\varnothing 1,82 μm) |
| • Agalube 301 (5%): | 2,04 - 2,09 μm (\varnothing 2,07 μm) | 1,47 - 1,52 μm (\varnothing 1,49 μm) |
| • Agalube 299 (10%): | 2,02 - 2,16 μm (\varnothing 2,09 μm) | 1,36 - 1,57 μm (\varnothing 1,50 μm) |
| • Agalube 301 (10%): | 2,16 - 2,20 μm (\varnothing 2,18 μm) | 1,68 - 1,77 μm (\varnothing 1,73 μm) |
| • Öl | 1,18 - 1,26 μm (\varnothing 1,22 μm) | 0,98 - 0,99 μm (\varnothing 0,98 μm) |

Für die Einstellungen (Luft:KSS) 4:3 und 5:4 lagen die Medianwerte $x_{50,3}$ der Partikeldurchmesser bei:

	<i>ohne Zerspanung:</i>	<i>mit Zerspanung:</i>
• Agalube 299 (5%):	1,86 - 1,96 μm (\varnothing 1,91 μm) 1,18 μm)	1,17 - 1,19 μm (\varnothing
• Agalube 301 (5%):	1,43 - 1,69 μm (\varnothing 1,56 μm) 0,97 μm)	0,94 - 0,99 μm (\varnothing

Bei der MMKS mit Emulsion verdunsten im Bearbeitungsprozess offensichtlich große Mengen des Wasseranteiles (vgl. Abb. 16), weshalb die Medianwerte ohne Zerspannung deutlich höher sind als während der Bearbeitung. Zu bemerken ist ebenfalls, dass der Medianwert für Öl signifikant kleiner ist (\varnothing 1,22 μm bzw. \varnothing 0,98 μm), und somit ein kleineres Aerosolspektrum aufweist gegenüber den Emulsionen.

Dies ist deshalb von Relevanz, da Aerosole mit einem Partikeldurchmesser $< 2,5 \mu\text{m}$ lungengängig sind und aus arbeitsmedizinischer Sicht zu vermeiden sind.

Zwar weisen die Emissionen der Emulsionen bei den Einstellungen (Luft:KSS) 4:3 und 5:4 ebenso einen kleinen Medianwert $x_{50,3}$ auf, jedoch ist zu erwähnen, dass prinzipiell der Einsatz einer MMKS mit Emulsion aufgrund des hohen Gehalts an Wasser (90% bzw. 95%) die geringeren Auswirkungen auf die Umgebung zu erwarten sind.

Versuch Sinterstahl Gewindeformen

Bei dieser Versuchsreihe stand in erster Linie nicht die Untersuchung der Emissionen im Vordergrund, sondern aus technologischer Sicht die Prüfung der Anwendbarkeit von MMKS mit Emulsion beim Bohren bzw. Gewindeformen.

Während beim Fräsen genügend KSS zur Bearbeitungsstelle ungehindert gelangen kann, liegt die Problematik beim Bohren bzw. Gewindeformen generell darin, dass aufgrund der Kavitäten eine unzureichende Versorgung der KSS-Zufuhr entsteht. Die Folgen sind ein erhöhter Werkzeugverschleiß und damit verkürzten Standzeiten.

Da die Anzahl an verfügbaren Werkstücken begrenzt war, einigte man sich darauf, diesen Versuch mit nur einer Parametereinstellung durchzuführen. Es wurde als KSS-Emulsion Agalube 301 (5%) mit den Einstellungen Luftdruck 4 bar und KSS-Zufuhrdruck 3 bar gewählt.

Der Versuch setzte sich aus zwei Bearbeitungsschritten zusammen (vgl. Abb. 17):

1. Tieflochbohren
2. Gewindeformen

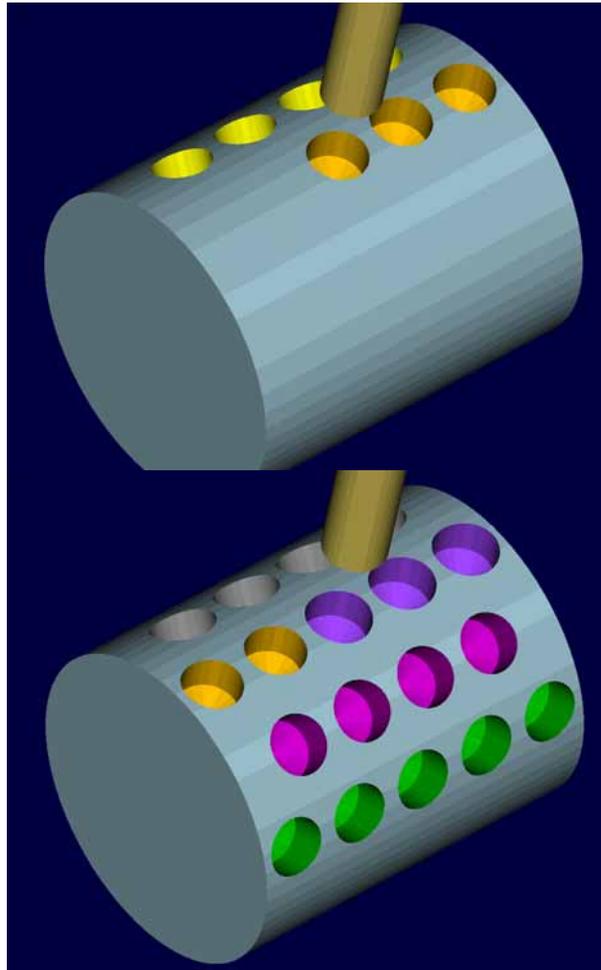


Abb. 17: Bearbeitungsschritte beim Sinterstahl Gewindeformen (oben: im 1. Schritt Tieflochbohren; unten: im 2. Schritt Gewindeformen)

Folgende Werkzeuge und Schnittparameter wurden verwendet:

Bohren: HSS Dm 4,65mm

- v_c 30 m/min
- S 2000 1/min
- f/U 0,08 mm
- F 165 mm/min

Gewindeformer: HSS TiN beschichtet M5

- v_c 15 m/min
- S 950 1/min
- f/U 0,8 mm
- F 760 mm/min

Ergebnisse Gewindeformen

Insgesamt wurden 216 Gewinde in die Werkstücke aus Sinterstahl geformt (vgl. Abb. 18). Obwohl die Parametereinstellungen herausfordernd waren (minimale KSS-

Zufuhrmenge und sehr wässrige Emulsion), war das Resultat ein sehr befriedigendes. Der Gewindeformer zeigte keine Spuren von Abnutzungserscheinungen. Jedoch können für die Anwendung im Feld keine genauen Angaben auf die Standzeiten getroffen werden, da die durchschnittliche Verwendung eines Gewindeformers ca. 20.000 Gewinde beträgt. (vgl. Abb. 19)



Abb. 18: Werkstücke aus Sintermetall nach (links) und vor (rechts) dem Gewindeformen



Abb. 19: Gewindeformer nach 216 Versuchen (keine Abnutzungen ersichtlich)

Versuch Fräsen von Werkzeugstahl C45

Die Aufgabenstellung war folgende, dass es galt unterschiedliche Geometrien aus einem Stahlblock (Werkstoff C45W 1.1730, Rohteilabmessung 276 x 110 x 75 mm) herauszufräsen. Bei der Verwendung von unterschiedlichen KSS wurden das Nebelbildungspotential und die Abnutzung des Fräskopfes untersucht. Da auch hier nur eine beschränkte Anzahl an Werkstücken zur Verfügung standen, entschied man sich für nachstehende Parametereinstellungen, die in Tabelle 4 angeführt sind.

Folgende Bearbeitungsschritte wurden für die Zerspänung des Werkstückblockes angewendet (vgl. Abb. 20):

1. Umfang Fräsen
2. Planfräsen
3. M56 Fräsen
4. Planfräsen
5. Oval Fräsen
6. Nase rechts

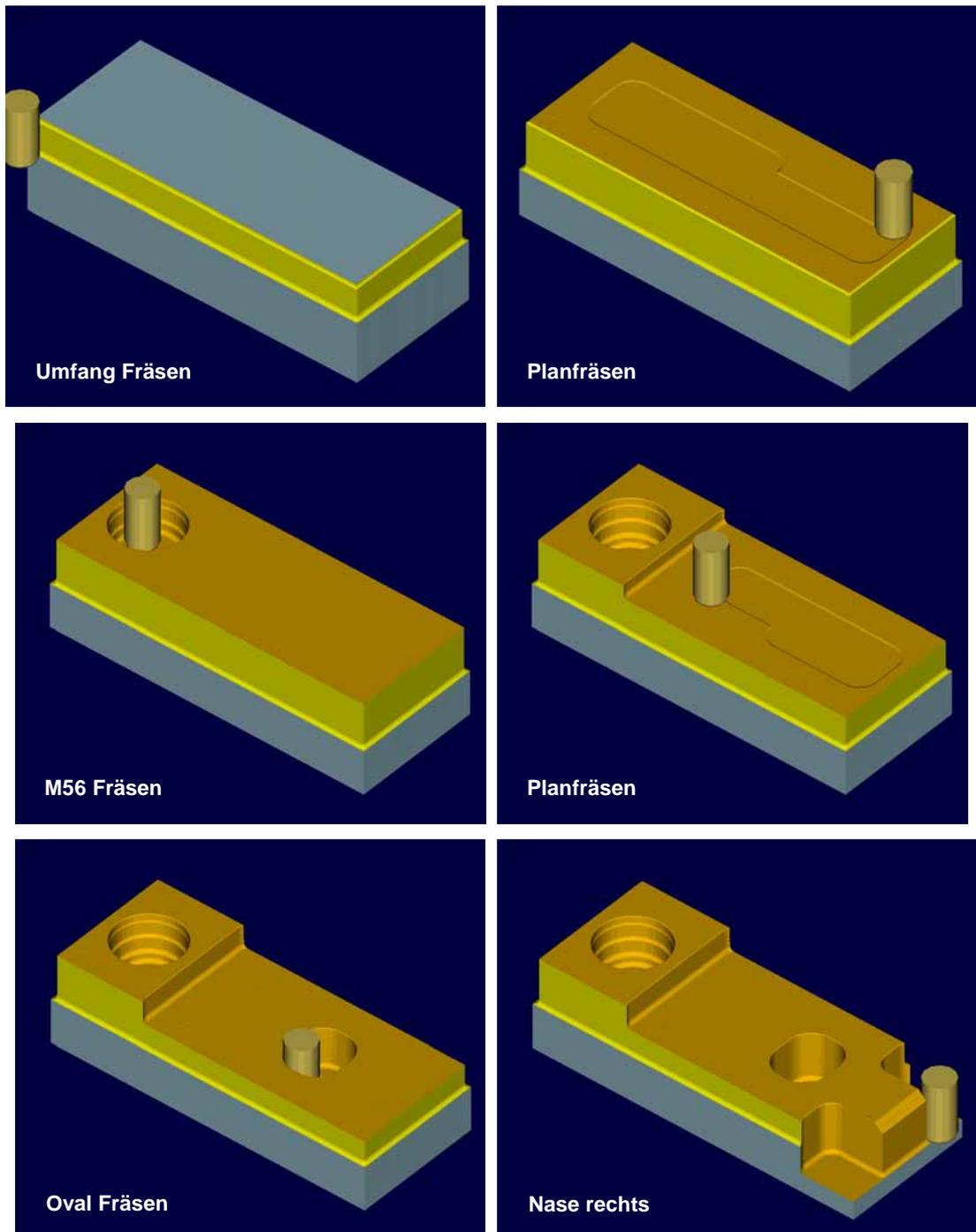


Abb. 20: Bearbeitungsschritte beim C45 Fräsen

Ergebnisse C45 Fräsen

Aerosol-Gesamtkonzentration:

In Abbildung 21 sind die Aerosol-Gesamtkonzentrationen für Emulsion bzw. Öl während der Zerspanung in Abhängigkeit des Zufuhrdruckes für Luft und KSS dargestellt. Die Aerosol-Gesamtkonzentration lag bei der MMKS mit Emulsion im Durchschnitt ca. 2,8 mg/m³ niedriger als die MMS mit Öl und weist somit die mit Abstand geringsten Aerosolemissionen auf. Verstärkt wird dieser Effekt wiederum bei Betrachtung des Ölanteiles.

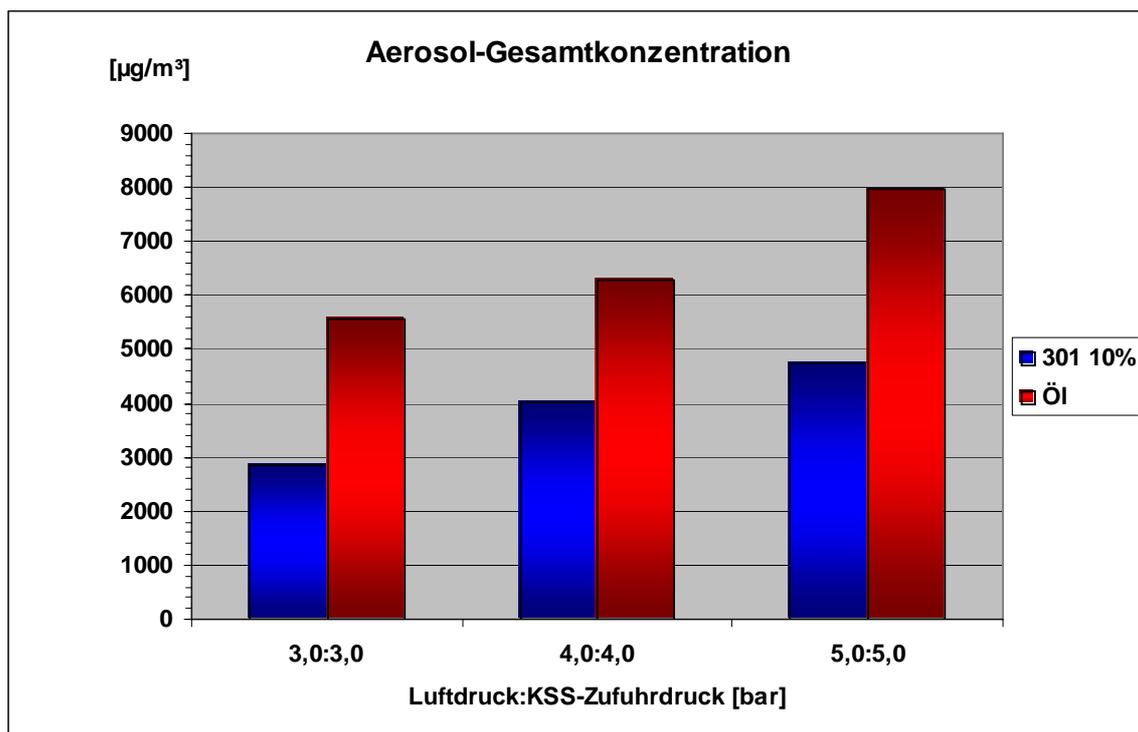


Abb. 21: Aerosol-Gesamtkonzentrationen in µg/m³ beim C45 Fräsen

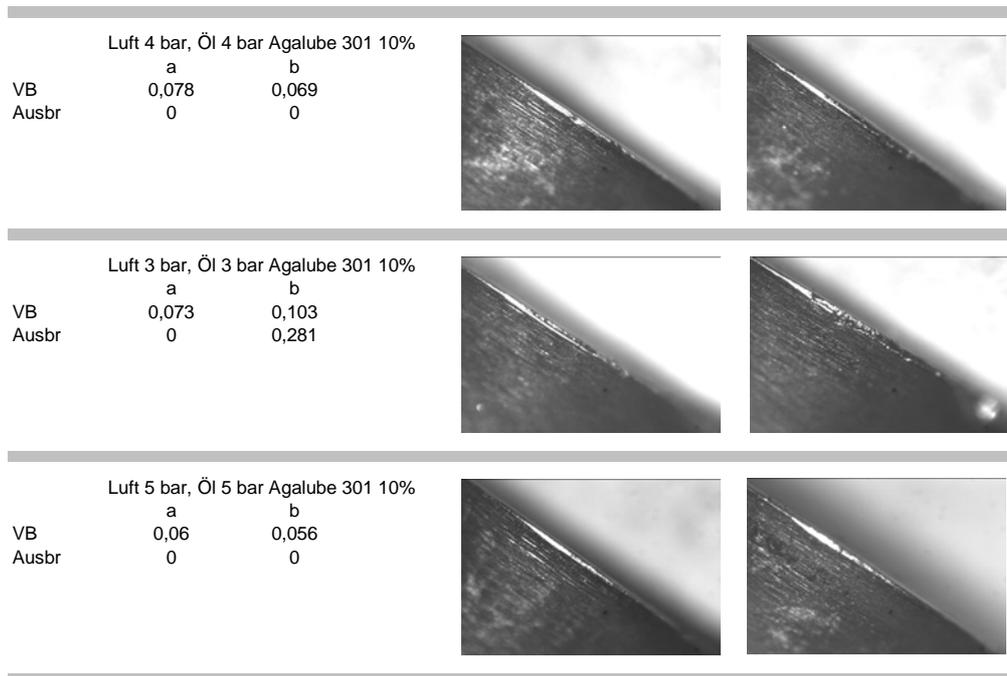
Die Medianwerte $x_{50,3}$ der Partikeldurchmesser betragen bei der MMKS mit Emulsion zwischen 1,58 und 1,71 µm (\varnothing 1,66 µm) und bei MMS mit Öl zwischen 0,95 und 0,98 µm (\varnothing 0,97 µm).

Verschleiß:

Anhand der Bestimmung der Verschleißmarkenbreite VB, wird das Ausmaß des Werkzeugverschleißes ausgedrückt. Dabei wird die Abnützung der Schneidekante nach einem Fräsversuch mit Hilfe eines Lichtmikroskops gemessen. Neben der Verschleißmarkenbreite können auch der Schneidenausbrüche am Werkzeug ermittelt werden. In Abbildung 22 ist der Verschleiß für MMKS mit Emulsion und in Abbildung 23 der Verschleiß für MMS mit Öl abgebildet.

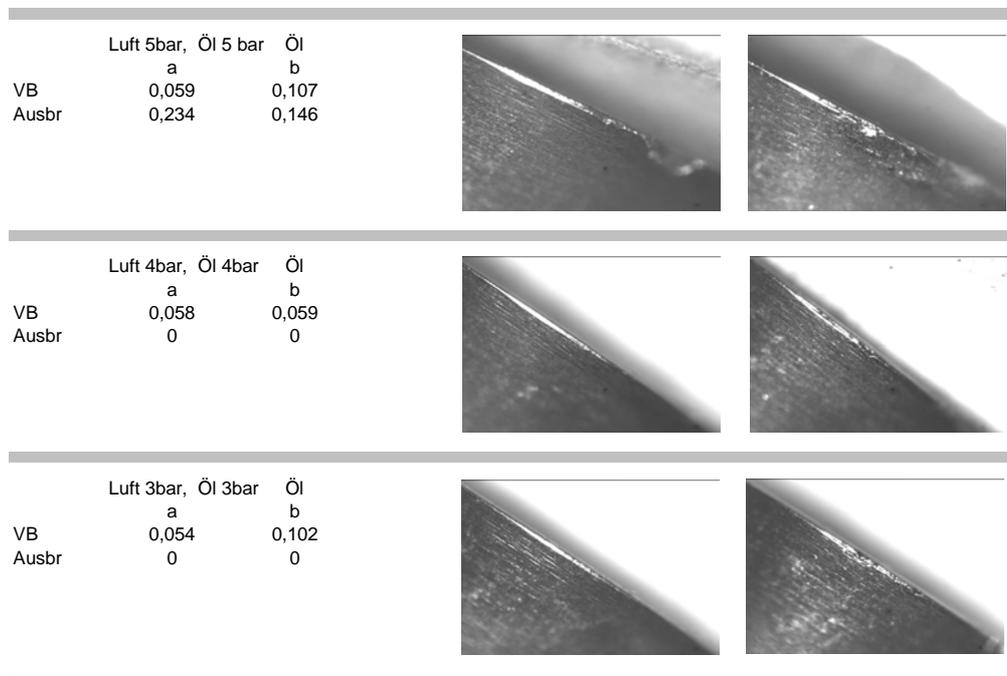
Die Verschleißmarkenbreite betrug bei beiden KSS-Konzepten durchschnittlich 0,073 mm. Im mittleren rechten Bild der Abbildung 22 und oberen linken Bild der Ab-

bildung 23 sind auch kleinere Ausbrüche an der Schneidekante (\varnothing 0,236 mm) erkennbar.



Verschleißmarkenbreite VB \varnothing 0,073 mm

Abb. 22: Verschleiß beim C45 Fräsen mit Emulsion (mittleres rechtes Bild: kleiner Ausbruch erkennbar)



Verschleißmarkenbreite VB \varnothing 0,073 mm

Abb. 23: Verschleiß beim C45 Fräsen mit Öl (oberes linkes Bild: kleiner Ausbruch erkennbar)

Die Versuchsführung hat gezeigt, dass im Hinblick auf die technologische Eignung der Einsatz von Minimalmengenschmierung mit Emulsionen durchaus der Verwendung von Ölen gleichzustellen ist. In beiden Untersuchungen – Bestimmung der Aerosolemissionen und des Werkzeugverschleißes – konnten ausgezeichnete Resultate ermittelt werden. Bei den Emissionen wurden für die MMKS mit Emulsionen deutlich bessere Ergebnisse erzielt als bei der MMS mit Öl.

4.7 Implementierung und Praxistests

Die Implementierung erfolgte in den Unternehmen Haidlmair und Protan. Ziel der Implementierungsversuche war es, den Einsatz von MMKS in der Praxis zu testen. Es wurde neben den Standzeiten der Werkzeuge ebenso die Emissionen untersucht. In den nun folgenden Kapiteln werden die Versuchsdurchführung und die daraus resultierenden Ergebnisse in den einzelnen Unternehmen beschrieben.

4.7.1 Firma Haidlmair

Die Firma Haidlmair ist im Werkzeugbau tätig und stellt Spritzgieß- und Druckgusswerkzeuge für Getränkekästen, Paletten Transport- und Lagerbehälter und v.m. her.

4.7.1.1 Versuchsdurchführung

Als Versuchsmaschine wurde eine HSC- Fräsmaschine der Marke DIGMA gewählt. Auf dieser Maschine werden vorwiegend Schlichtoperationen von Kavitäten durchgeführt. Für die Versuche wurden typische bei Haidlmair produzierte Werkzeugteile ausgewählt. Beim bearbeiteten Werkstück handelt es sich um die Spritzgussform einer Seitenwand einer Klappkiste. (vgl. Abb. 24)



Abb. 24: Bearbeitungszentrum mit aufgespannten Werkzeugteil

Der Grundwerkstoff der Platte ist der Stahl 1.2312 und die Einsätze aus Bronze 2.0966 und 2.0857. Die Bearbeitung wurde mit VHM-Schaftfräsern mit TiAlN Beschichtung durchgeführt. Bereits jetzt werden an dieser Maschine die Werkzeugteile über MMS mit Öl bearbeitet.

Für die Versuchsdurchführung wurde Agalube 299 (10%) gewählt. Die Zuführung der Emulsion zur Bearbeitungsstelle erfolgte über eine Injektordüse die in Abbildung 25 dargestellt ist.



Abb. 25: Im Einsatz befindliche Injektordüse

Zur Erfassung der Emissionen vor und nach der Umstellung auf MMKS mit Emulsion wurde im Abluftrohr die Messsonde des Partikelzählgerätes installiert.

4.7.1.2 Ergebnisse

Die Aerosol-Gesamtkonzentration lag mit MMKS mit Emulsion bei 2,9 mg/m³ und war damit höher als die Gesamtkonzentration mit MMS mit Öl (1,9 mg/m³). Auch hier ist anzumerken, dass die Wasseranteile bei der MMKS für die toxikologische Bewertung nicht heranzuziehen sind.

In Abbildung 26 sind die Aerosolkonzentrationen in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers (PM 1², PM 2,5³ und PM 10⁴) dargestellt. Vor allem die alveolargängigen Feinanteile PM 1 konnten beim Einsatz von MMKS gesenkt werden.

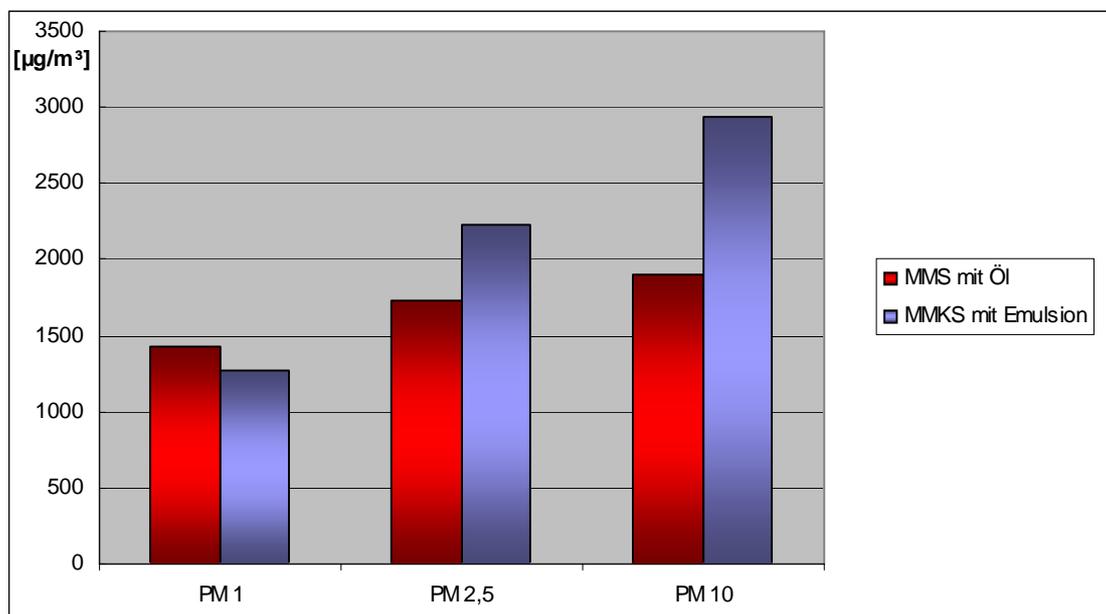


Abb. 26: Aerosolkonzentrationen in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

² PM 1 Particular Matter = Partikelfraktion mit aerodynamischen Durchmesser < 1 µm

³ PM 2,5 Particular Matter = Partikelfraktion mit aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm

⁴ PM 10 Particular Matter = Partikelfraktion mit aerodynamischen Durchmesser < 10 µm

In der Regel liegen die Standzeiten der Fräser bei ca. 4 Stunden. Im Versuch mit den Kühlschmierstoffen von AGATEX wurden jedoch im Schnitt nur 2,5 Stunden Standzeit erreicht. Ursache für die geringere Standzeit kann die Tatsache sein, dass im laufenden Prozess sich die Düse zur Aufbringung der Emulsion zeitweise verschloss. Es zeigte sich, dass das Schmiermittel bei ca. 10% für dieses Minimalmengensystem zu dickflüssig ist. Es wurde festgestellt, dass das Aufbringungssystem für die Emulsion schlecht geeignet ist.

Des Weiteren wurden beim Versuch Korrosionsschäden an der Werkstücks Oberfläche festgestellt, da der Kühlschmierstoff keine Antioxidationsmittel enthielt (vgl. Abb. 27). Dies war jedoch in der Formulierung des KSS bewusst gewählt worden, um eine möglichst additivarme Rezeptur zu gewährleisten, die entsprechend den technologischen Anforderungen adaptiert werden kann.



Abb. 27: Oxidierte Werkstücks Oberfläche

Deshalb wurde der Fa. Haidlmair eine verbesserte Version der Kühlschmierstoffe mit Korrosionsschutz-Additiven zur Verfügung gestellt. Anschließende Versuche mit der Emulsion Agalube 299 (10%) auf einer Stahlplatte 1.2312 zeigten nur mehr leichte Korrosionsspuren. (vgl. Abb. 28)



Abb. 28: Verringerte Oxidation durch Zusatz von Antioxidationsmittel

4.7.1.3 Ausblick

Für die Bearbeitung der Werkzeugstähle und auch zum Schutz der Werkzeugmaschinenbauteile ist es unbedingt notwendig, dass ein Rostschutzmittel im Kühlschmierstoff enthalten ist.

Das Verstopfen der Düse ist ein weiterer Punkt, der einer Verbesserung zugeführt werden muss. Dieses Kriterium kann durch Herstellung dünnflüssigerer Emulsionen (niedrigviskose Flüssigkeiten) bzw. durch den Einsatz geeigneter Sprühgeräte erfüllt werden.

4.7.2 Firma Protan

Die Firma Protan ist in der Lohnfertigung tätig und fertigt Teile aus Stahl, Aluminium, Magnesium, Sinterstahl, Messing und anderen Materialien. Die Losgrößen bewegen sich zwischen 100 und 500.000 Teile pro Jahr.

4.7.2.1 Versuchsdurchführung

Die Anwendbarkeit der Minimalmengenschmierung mit Emulsion wurde bei der Fa. Protan auf Grund des unterschiedlichen Teilespektrums an zwei Produkten aus der Serienproduktion untersucht.

1. Versuchsteil: Dieser Teil ist ein Zahnkranz für ein Schaltgetriebe in der Automobilindustrie. Der Rohling dieses Teils wird im Sinterverfahren aus dem Material Sint D10 hergestellt. Die Fa. Protan fertigt an diesem Werkstück eine Langlochbohrung im Dimensionsbereich Breite 3 mm, Länge 4 mm und Tiefe 4 mm. Diese Langlochbohrung dient als Verdrehsicherung des Zahnkranzes zu den anderen Antriebsrädern. (vgl. Abb. 29)

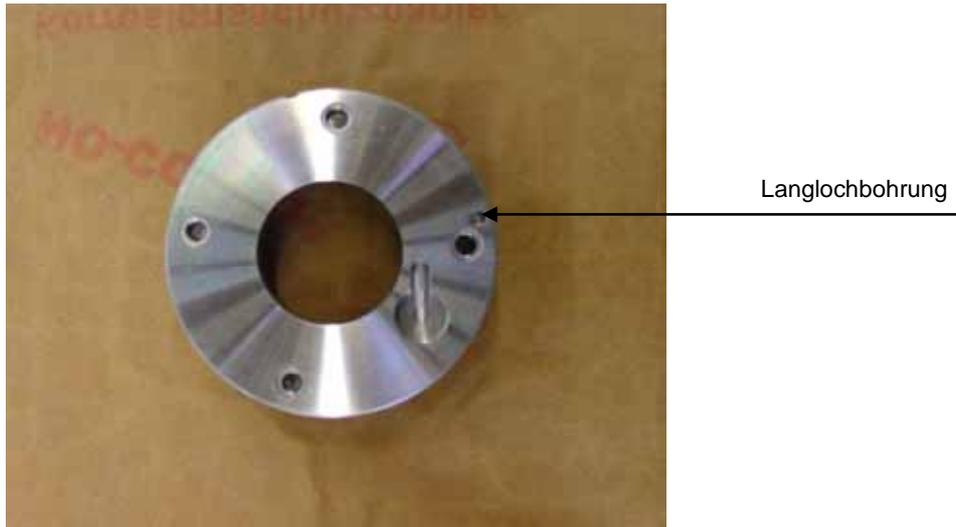


Abb. 29: Zahnkranz mit Langlochbohrung (Versuchteil 1)

Die Zahnkränze werden aktuell auf einem Sonderbearbeitungszentrum der Firma Anger mit Emulsions-Flutungsschmierung bearbeitet.

Um die Schadstoffbelastung für die produzierenden Mitarbeiter zu reduzieren, soll hier versucht werden, mit Minimalmengenschmierung zu arbeiten.

2. Versuchsteil: Als 2. Versuchsteil wurde eine Schalttaste aus Aluminium AlMgSi0,5 definiert. Diese Taste weist eine ovale Form mit hohen Anforderungen an die Oberflächengüte, sowie eine Innenkavität mit einer Tiefe von 10 mm auf.

Seitens der Firma Protan sind der Emissionsgrad von Kühlschmierstofftröpfchen, die Standzeit des jeweiligen Bearbeitungswerkzeuges sowie die Spänefreiheit des Bauteils nach der Bearbeitung relevante Entscheidungskriterien für den Einsatz von MMKS.

Sämtliche Versuche wurden mit externer Zuführung des Schmiernebels durchgeführt. Als Minimalmengenschmiergerät wurde das bereits in den Laborversuchen eingesetzte System Microjet verwendet. Ein Vergleich erfolgte ausschließlich mit der bereits vorhandenen Flutungsschmierung.

1. Versuchsteil:

Der Zahnkranz wird auf einem Sonderbearbeitungszentrum der Fa. Protan in einer starren Mehrspindelausführung bearbeitet. (vgl. Abb. 30)



Abb. 30: Sonderbearbeitungszentrum

Folgende Bearbeitungsschritte sind zur Fertigung der geforderten Langlochbohrung notwendig:

1. Schruppen, mit Werkzeug EMUGE Typ N 1803
2. Schlichten, mit Werkzeug EMUGE Typ N 1803
3. Fasetieren, mit Sonderwerkzeug
4. Kalibrierstanzen, mit Kalibrierwerkzeug

Sämtliche Bearbeitungsgänge wurden bisher ausschließlich mit Emulsionsflutung bearbeitet.

Eine wesentliche Herausforderung stellte das Kalibrierstanzen mit MMKS dar. Es bestand die Gefahr, dass bei dem Einsatz von Minimalmengenschmierung das Kalibrierwerkzeug zu wenig geschmiert wird. Dies hätte eine erhöhte Reibung des Werkzeuges am Werkstück und somit einen frühzeitigen Bruch des kostenintensiven Kalibrierdorns zur Folge.

Um dieses Risiko zu minimieren, wurde die Einstellung von 4,0 bar für KSS-Zufuhrdruck und 3,5 bar Luftdruck gewählt. Die verwendete Emulsion (Agalube 299) wurde in einem Mischungsverhältnis von 1:3 (ca. 8% Ölgehalt) aufbereitet.

Um eine optimale Schmierung zu erreichen wurden zwei MMS-Düsen in einem Winkel von 180° zum Drehpunkt des Bearbeitungswerkzeuges für den Schrupp- und Schlichtvorgang (Fräser Typ EMUGE N1803) angebracht. Hier sollte während des Bearbeitungsvorgangs ein gleichmäßiger Schmierfilm am Werkstück erzeugt werden,

um eine ausreichende Schmierung für das Kalibrierstanzen zu gewährleisten. (vgl. Abb. 31)



Abb. 31: Düseneinstellung

Bereits nach der Bearbeitung weniger Teile stellte sich heraus, dass die Späne während des Bearbeitungsvorganges mit der Emulsion verkleben und das jeweilige Teil nach der Bearbeitung mit Spänen verunreinigt war. (vgl. Abb. 32)



Abb. 32: Verunreinigung der Zahnkränze

Da dieses Kriterium für die Firma Protan aus qualitativer Hinsicht sehr wichtig ist, wurde die Ausbringungsmenge auf 5,0 bar KSS-Zufuhrdruck und 4,5 bar Luftdruck erhöht. Weiters wurde die Anordnung der beiden Schmierdüsen von 180° auf 130° zum Drehzentrum des Bearbeitungswerkzeuges verändert um den Abtransport der erzeugten Späne zu verbessern.

Die mit diesen Parametern gefertigten Teile wiesen kaum Verunreinigungen durch Späne auf und entsprachen der Vorgabe der Fa. Protan.

Diese Parameter wurden zur Ermittlung des Einflusses der MMKS auf die Standzeit des Bearbeitungswerkzeuges verwendet.

Damit für die Zahnkranz-Bearbeitung die Emissionen bei Überflutungsschmierung und bei MMKS mit Emulsion verglichen werden können, wurde das Partikelzählgerät neben dem Bearbeitungszentrum im Aufenthaltsbereich des Maschinenführers positioniert. (vgl. Abb. 33)



Abb. 33: Positionierung des Partikelzählgerätes

2. Versuchsteil:

Der 2. Versuchsteil aus Aluminium AlMgSi0,5 wurde auf einem Bearbeitungszentrum vom Typ Anger HCK ebenfalls in einer starren Mehrspindelausführung gefertigt.

Folgende Arbeitsschritte waren zur Erstellung nötig:

1. Bearbeitung Innenseite mit Werkzeug SPHINX AC2
2. Bearbeitung Außenseite mit Werkzeug SPHINX AC2
3. Gravieren des Kundenlogos mit VHM Stichel 60°

Die wesentlichen Herausforderungen bei diesem Teil bestehen in der geforderten Oberflächengüte der Außenflächen sowie im Abtransport der Späne bei der Innenbearbeitung.

Auch hier bestand der Versuchsaufbau aus zwei Sprühdüsen die in einem Winkel von 130° zum Drehzentrum des SPHINX Werkzeuges positioniert wurde.

Es wurde eine Emulsion (Agalube 299 (5%)) gemischt und mit einem Druck von 5,0 bar ausgebracht. Der Betriebsdruck der Druckluft betrug 4,0 bar.

Mit den genannten Parametern konnte bei der Außenbearbeitung eine ausgezeichnete Oberflächenqualität erreicht werden. Gefordert wurde hier laut Kundenangaben ein Mittenrauheitswert Ra von 1,2, wobei ein realer Wert von Ra 0,7 erreicht wurde.

Bei der Innenbearbeitung konnten jedoch die anfallenden Späne nicht durch den Druck der Minimalmengenschmieranlage aus der Innenkavität entfernt werden. Durch die hohe Zustelltiefe von 10 mm und somit hohen Spangewichts konnten die Späne nicht mit dem verfügbaren Druck des Minimalmengensprühnebels entfernt werden. Dies führt zu Aufklebungen am Werkzeug und somit zu höherem Verschleiß und niedriger Standzeit.

4.7.2.2 Ergebnisse

1. Versuchsteil:

Durch den Einsatz von MMKS mit Emulsion konnte die Aerosol-Gesamtkonzentration von ursprünglich 16,22 mg/m³ bei Überflutungsschmierung auf 1,88 mg/m³ reduziert werden. Dies bedeutet eine Verbesserung der Emissionsbelastung um ca. 90%. Selbst bei Betrachtung der unterschiedlichen Größenfraktionen konnte festgestellt werden, dass trotz der starken Zerstäubung des KSS (selbst in der kleinsten Fraktion PM 1) eine Verringerung der Aerosolkonzentrationen erzielt wurde. In nachstehender Abbildung 32 wird das positive Ergebnis aus der Aerosolkonzentrationenmessung in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers (PM 1, PM 2,5 und PM 10) dargestellt.

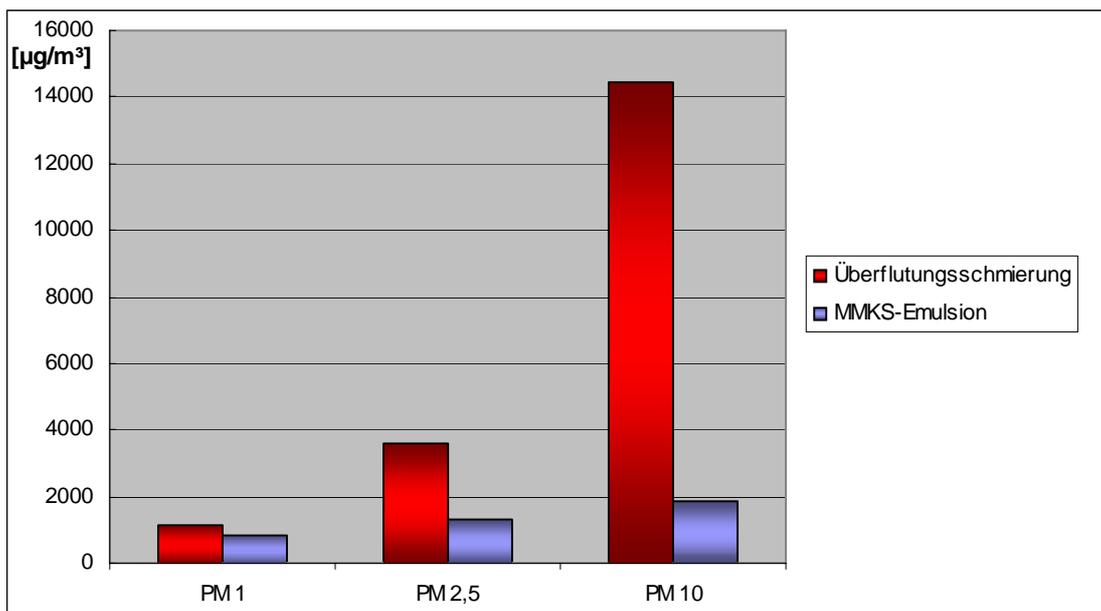


Abb. 32: Aerosolkonzentrationen in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

Die Sauberkeit des Zahnkranzes nach der Bearbeitung wurde seitens der Fa. Protan als ausreichend befunden.

Die Werkzeugstandzeit betrug bei Flutungsschmierung 1.000-1.100 Stück. Bei Minimalmengenschmierung mit Emulsion betrug die Standzeit 627 Stück. Dies bedeutet einen Standzeitverlust von ca. 40%.

Dies ist vor allem auf die bearbeitete Geometrie zurückzuführen. Da diese Langlochbohrung im Verhältnis zur Breite sehr tief ausgeführt ist, erfolgt ab einer Tiefe von ca.

3 mm keine ausreichende Schmierung des Werkzeuges. Der Emulsionsnebel schlägt sich hauptsächlich an der Oberfläche des Bauteils nieder und benetzt kaum mehr die im Eingriff befindlichen Schneiden.

Abhilfe kann hier der Einsatz von Innenminimalmengenschmierung schaffen. Hier wird der Schmiernebel durch Kanäle im Inneren des Bearbeitungswerkzeuges direkt zur Schneide geleitet. Somit entstehen kaum Verluste bei der Bearbeitung tiefer Geometrien.

2. Versuchsteil:

Bei der Bearbeitung des Druckknopfes konnte mit Flutung eine Standzeit des Bearbeitungswerkzeuges von ca. 1800 Stück realisiert werden.

Die Standzeit bei Verwendung von MMKS betrug 340 Stück. Dies sind knapp 20% im Vergleich zur Schmierung mit Emulsionsflutung.

Diese Verschlechterung der Werkzeugstandzeit ist hauptsächlich auf den Umstand zurückzuführen, dass die Späne während der Bearbeitung nicht entfernt werden können. Die Späne führen zu Aufklebungen an den Werkzeugschneiden und in Folge zum Werkzeugbruch.

Um dieses Problem bei der Fertigung des Druckknopfes zu lösen bedarf es einer Änderung des Maschinenkonzeptes, bei dem die Werkzeugspindel unter dem zu bearbeiteten Werkstück liegt und die Späne somit durch ihr Eigengewicht herabfallen können.

4.7.2.3 Ausblick

Die Versuchsführung an den beiden Teilen hat gezeigt, dass der Einsatz von Minimalmengenschmierung mit Emulsionen der Verwendung von Ölen gleichzustellen ist. Die Probleme, die bei der Bearbeitung aufgetreten sind, betreffen den Einsatz von Minimalmengenschmierung generell und sind nicht auf die Verwendung einer Emulsion als Schmiermedium zurückzuführen.

So ist die Bearbeitung von Innenkavitäten mit Minimalmengenschmierung prinzipiell schwierig zu lösen. Im Bereich der Flanken sowie bei tieferen Kavitäten wird das Werkzeug durch das umliegende Material abgeschirmt. Es dringen also kaum Schmiertröpfchen an die Werkzeugschneide was zur Folge hat, dass diese stärker verschleißt.

Diesem Effekt kann man mit dem Einsatz von Innenminimalschmierung entgegenwirken. Hierbei wird der Schmiernebel durch das Innere des Werkzeugs transportiert und direkt an der Schneide ausgestoßen. Dadurch wird das Werkzeug unabhängig von der Bearbeitungstiefe immer optimal geschmiert. Bei dieser Technologie ist jedoch zu bedenken, dass hierfür spezielle und teure Werkzeuge mit Innenbohrung sowie geeigneter Bearbeitungsmaschinen mit Kühlmittelzuleitung durch die Spindel verwendet werden müssen.

Bei der Firma VA-Tech Mechatronic (Vatron) wurden keine weiteren Implementierungen durchgeführt, da nach bei Vatron in erster Linie Drehanwendungen für ein MMKS-System in Frage kommen. Da im Zerspanungs-Labor keine Dreharbeiten zur Vorbereitung durchgeführt werden können, wurde übereingekommen, keine aufwändigen Umbauten vorzunehmen. Die Projektergebnisse stehen Vatron zur Verfügung und werden bei zukünftigen Maschinenneuanschaffungen oder größeren Adaptierungen einfließen.

5 Detailangaben zu den Zielen der Fabrik der Zukunft

Den Leitprinzipien der nachhaltigen Technologieentwicklung wurden im Projekt weitestgehend entsprochen. Mit der Entwicklung des Kühlschmierstoffes auf Basis nachwachsender Rohstoffe wird ein Beitrag zur stofflichen Versorgung mit erneuerbaren Ressourcen geleistet. Dem Effizienzprinzip wird Rechnung getragen, indem im Vergleich zur konventionellen Überflutungsschmierung wesentlich weniger Material für Produktionshilfsstoffe eingesetzt werden muss. Auch der Vergleich mit reiner Öl-Minimalmengenschmierung zeigt durch den Wasseranteil wesentliche Einsparungen. Der Einsatz von leicht und vollständig abbaubaren Rohstoffen rechtfertigt die „Verlustschmierung“. Sie erhöht vielmehr die Nutzenorientierung durch den Wegfall von aufwändigen Aufbereitungsmaßnahmen, Pump- und Speichersystemen. Werkstück- und Maschinenoberflächen verschmutzen wesentlich weniger als bei anderen Kühlschmierkonzepten, sodass der Aufwand für Reinigung sinkt.

Die positive Auswirkung auf die Qualität der Arbeitsluft, der minimierte Hautkontakt mit problematischen Stoffen erhöht die Arbeitssicherheit und verringert das Risiko von Berufserkrankungen. Die Arbeitszufriedenheit und Lebensqualität der betroffenen Mitarbeiter steigt. Durch den Einsatz von öko- und humantoxikologisch unproblematischen Stoffen besteht hohe Fehlertoleranz bei möglichen Störfällen gegenüber der Umwelt.

6 Schlussfolgerungen

Im Sinne der umfassenden Betrachtungsweise der Technologieentwicklung wurde versucht, alle wesentlichen Aspekte, seien es ökonomische, technologische, ökologische oder Belange des Arbeitsschutzes im Rahmen des Projektes zu berücksichtigen. Selbstverständlich kommt es dabei zu Zielkonflikten und scheinbar widersprechenden Ergebnissen. Insgesamt kann gesagt werden, dass „Bio-Minimum-Lubrication“ – Minimalmengen Kühlschmierung mit Emulsion auf Basis von Navaros hohes Entwicklungspotenzial verspricht. Wie bei den meisten neuen Systemen müssen Unsicherheiten im Einsatz und der Handhabung durch fundiertes Know-How und Berücksichtigung der spezifischen Anwendung beseitigt werden.

Im Technikums- und Labormaßstab konnten sehr Erfolg versprechende Ergebnisse gefunden werden. Bei der Umsetzung in die Praxis traten jedoch oftmals Probleme auf, die nicht sofort oder im Rahmen des Projektes gelöst werden konnten.

Die Hauptprobleme können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die chemischen, physikalischen und technologischen Eigenschaften der Kühlschmierstoffe müssen durch sorgfältige Additivierung auf die Prozesse eingestellt werden.
- Die Düsensysteme sind entweder für die vorliegenden Anforderungen nicht oder nur schlecht geeignet oder im anderen Falle technisch relativ komplex und teuer.
- Prinzipielle Schwachstellen der Minimalmengenschmierung wie der schlechte Spänetransport konnten nicht ausgeräumt werden. Hier müssen andere Lösungskonzepte erarbeitet werden.

7 Ausblick und Empfehlungen

Die Entwicklungspartner Agatex und TPS wurden im Rahmen des Projektes und mit Hilfe der Projektergebnisse in die Lage versetzt, die Entwicklung von Bio-Minimum-Lubrication weiter zu verfolgen. Wichtig erscheint es, dass für die Weiterentwicklung zum marktfähigen Produkt Düsenhersteller und/oder -entwickler eingebunden werden sollten. Somit kann auch die Pumpen- und Düseneinheit den Eigenschaften des KSS angepasst werden. Wichtig erscheint es jedoch, die „Zerstäubung“ hin zu geringeren Over-Spray, bessere Dosierung, gröberes Partikelspektrum und höhere Reichweite zu optimieren.

Die Formulierung und Additivierung des KSS muss noch besser auf spezifische oder allgemeine Anwendungen hin optimiert werden, um für potentielle Kunden voraus-sagbare Ergebnisse garantieren zu können.

Auch innen gekühlte MMKS-Systeme erscheinen eine viel versprechende Alternative zu sein.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ AUVA Merkblatt M 368-1097, Kühlschmierstoffe, Unfallverhütungsdienst der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt, Wien, 1997.
- /2/ Breuer D. et. al.: BIA-Report 5/99: Messen, Beurteilen und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit komplexen kohlenwasserstoffhaltigen Gemischen; Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften; St. Augustin; 1999.
- /3/ Weinert K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengen Kühlschmierung; Springer Verlag; Berlin – Heidelberg; 1999.
- /4/ Riss B., Merkinger J.: Kühlschmierstoffe – Nebelbildung durch verschiedene Bearbeitungsverfahren (Vortrag); Forum Prävention, 11.-13. Mai 2004, Graz
- /5/ Riss B. et. al.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Optimierung von HSC-Prozessen aus ganzheitlicher Sicht; XVIth World Congress on Safety and Health at Work (proceedings) 26. – 31. 5. 2002; Wien.
- /6/ Riss B. et. al.: Projekt „Fabrik der Zukunft“ – Strategie zur Reduktion von Kühlschmierstoffen bei HSC-Prozessen mit einem Ausblick auf Schleifanwendungen; 3. Steyrer Schleiftagung (proceedings); 18./19. 4. 2002; Steyr.
- /7/ VKIS – VSI – IGM – Stoffliste Kühlschmierstoffe (KSS) nach DIN 51 385 für die Metallbearbeitung, Stand 26. 3. 2002. (VKIS = Verbraucherkreis Kühlschmierstoffe, VSI = Verband der Schmierstoff-Industrie, IGM = Industriegewerkschaft Metall)
- /8/ Schirrmeister E. et. al.: Techniken im Trend - Stand und Dynamik der Einführung innovativer Produktionstechniken; Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 31; Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI); 2003.
- /9/ „Wie geschmiert?“ AMB 2000 in Message Messe Stuttgart – Mitten im Markt 3/2000: <http://www.messe-stuttgart.de/dev/a300/thema5.htm>
- /10/ Grüner Bericht 2002, Bundesministerium für Land u.- Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abterilung II 5, 2003
- /11/ MICROJET – TECHNOLOGIE. Online im WWW unter URL: <http://www.microjet.de/>
- /12/ VDI 2066 Blatt1: Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen (1975)