



# 1 Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen an geschlossenen Werkzeugmaschinen – Einführung <sup>1</sup>

Wolfgang Pfeiffer,  
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, Sankt Augustin

## 1.1 Einleitung

Kühlschmierstoffe (KSS) enthalten eine Vielzahl von Inhaltsstoffen. Darüber hinaus verändert sich ihre Zusammensetzung während des Gebrauchs u. a. durch die Bildung neuer Stoffe oder den Eintrag weiterer Stoffe von außen. Im Wesentlichen werden KSS in Werkzeugmaschinen eingesetzt; dabei entstehen Emissionen, die zu Atemwegserkrankungen führen können. Unter gewissen Bedingungen können sogar krebs-erzeugende und toxische Gefahrstoffe freigesetzt werden. Trotz vieler Versuche, sie zu ersetzen, ist der Einsatz von KSS in den meisten Fällen immer noch unverzichtbar.

Zur Begrenzung der Exposition gegenüber KSS-Emissionen ist ein umfangreiches Maßnahmenpaket erforderlich. Neben der Kontrolle, Wartung und Pflege der KSS sind umfangreiche technische Schutzmaßnahmen, wie die Erfassung und Abscheidung der Emissionen sowie eine effektive Raumlüftung, unumgänglich.

Zahlreiche messtechnische Untersuchungen der Berufsgenossenschaften und des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BGIA haben jedoch ergeben, dass die abgesaugte Luft in den verschiedensten Abscheidesystemen bis auf wenige Ausnahmen nicht ausreichend gereinigt wird und zu hohe Massenströme zurück in den Arbeitsraum gelangen.

Im Rahmen eines aus Forschungsmitteln des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) geförderten Forschungsvorhabens sollen nun Grundlagen geschaffen werden, um Erfassungseinrichtungen für KSS-Emissionen und deren Abscheidung nach höchsten Sicherheitsanforderungen gestalten zu können. Ziel des

---

<sup>1</sup> Nachdruck aus: Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 407-410, Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Springer VDI Verlags, Düsseldorf

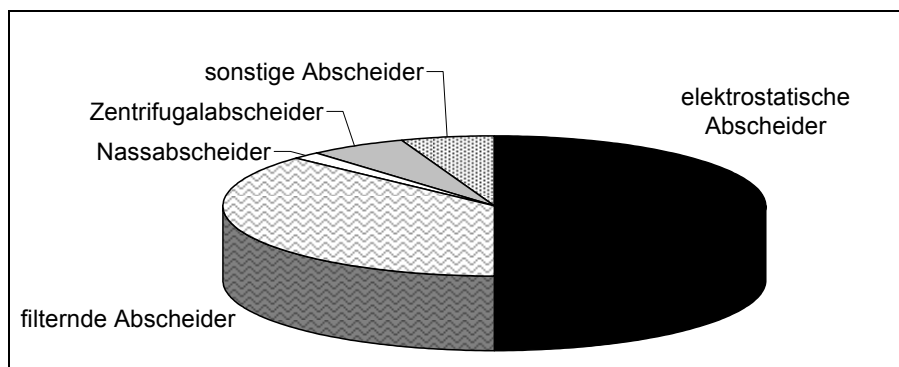


Projektes ist es, Grundlagen für die optimale Gestaltung von Erfassungseinrichtungen zu erarbeiten, die Abscheideleistung zu verbessern und hinreichenden Schutz vor Bränden und Explosionen zu gewährleisten.

## 1.2 Rückblick

Eine Befragung von etwa 550 Mitgliedsbetrieben der Metall-Berufsgenossenschaften im Jahr 1991 [1] zeigte, dass ungefähr 50 % der in der Praxis eingesetzten Abscheider elektrostatische Abscheider verschiedenster Bauweisen waren (Abbildung 1). Filternde Abscheider wiesen einen Anteil von ungefähr 37 %, Nassabscheider einen Anteil von etwa 1,5 % und Zentrifugalabscheider einen Anteil von circa 6,0 % auf. Es ist davon auszugehen, dass die damaligen Ergebnisse auch die aktuellen Verhältnisse widerspiegeln.

Abbildung 1:  
Verteilung der in der Praxis eingesetzten Abscheiderarten



Der Abluftstrom lag in den meisten Fällen bei 1 000 bis 2 000 m<sup>3</sup>/h. Die Abscheideleistungen wurden zwar häufig als gut bewertet, diese Bewertungen basierten jedoch hauptsächlich auf persönlichen Einschätzungen, ohne dass sie durch Messungen bestätigt wurden.

Dies wurde zum Anlass genommen, verschiedene Abscheidesysteme in der Praxis messtechnisch zu bewerten. Dabei wurde festgestellt, dass die Abscheidegrade für die Summe aus Dämpfen und Aerosolen teilweise unter 50 % lagen. Im Weiteren führten



die Untersuchungen zu der allgemeinen Beurteilung, dass alle Abscheider mit Ausnahme von Nassabscheidern, sogenannte Wäscher, keine Dämpfe abscheiden und dass filternde Abscheider und Wäscher ein relativ gutes Abscheideverhalten für Aerosole zeigen.

Elektrostatische Abscheider wiesen beim Einsatz von nicht wassergemischten KSS ebenfalls gute, teilweise auch bessere Abscheidegrade als die anderen Systeme auf. Zentrifugalabscheider dagegen führten zu sehr schlechten Ergebnissen, z. T. sogar mit negativen Abscheidegraden, durch die erneute Emission bereits abgeschiedener Substanzen.

Die im BIA-Report 7/96 [2] veröffentlichten Ergebnisse wurden in der Fachwelt eingehend diskutiert. Als Folge wurden im Wettbewerb z. T. praxisfremde Angaben über die Leistungsfähigkeit der auf dem Markt befindlichen Produkte gemacht. Dies verunsicherte die Mitgliedsbetriebe der Berufsgenossenschaften. Ende der 1990er-Jahre wurden daher Gespräche mit Anlagenherstellern und -vertreibern gesucht. Zu ersten Sondierungsgesprächen bot sich der Kontakt zu einer beim Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) etablierten Arbeitsgruppe an, die sich vornehmlich mit Problemen bei der Abscheidung von Schweißrauch beschäftigt. Einige Arbeitsgruppenmitglieder wiesen darüber hinaus auch Anlagen zur Abscheidung von KSS-Emissionen in ihrem Sortiment auf.

Nach mehreren Gesprächen wurde erreicht, dass sich eine neue Arbeitsgruppe bildete, die sich speziell mit der Problematik der Abscheidung von KSS-Emissionen beschäftigte. Es zeigte sich sehr schnell, dass Lösungen zur Verbesserung der Abscheidung von KSS-Emissionen im Sinne des Arbeits- und Gesundheitsschutzes nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Anlagen- und Maschinenherstellern, Betreibern und Berufsgenossenschaften möglich ist. Diese enge Zusammenarbeit findet bis heute statt. Inzwischen wurden mehrere Unterarbeitsgruppen gebildet, die sich intensiver mit speziellen Fragen auseinandersetzen.



### **1.3 Probleme bei der Erfassung und Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen**

Einhausungen an Werkzeugmaschinen sollen zunächst verhindern, dass KSS in die Umgebung verspritzt werden oder dass abgeschleuderte Bruchstücke oder Späne zu Verletzungen führen können. Darüber hinaus helfen sie, Lärm zu mindern.

Aufgrund von Thermikströmen, Rotationsbewegungen von Werkzeugen oder Werkstücken und durch das Einströmen von KSS entstehen innerhalb der Einhausungen uneinheitliche Strömungs- und Druckverhältnisse. Damit in Überdruckbereichen keine KSS-Emissionen während des Arbeitsprozesses austreten und in den Arbeitsbereich des Bedienpersonals gelangen können, sind Absaugsysteme einzusetzen, die im Innenraum der Einhausung einen ständigen Unterdruck erzeugen. Die abgesaugte Luft wird in Abscheidern gereinigt, die in der Regel einzelnen Werkzeugmaschinen zugeordnet sind.

Frühere Untersuchungen zeigten, dass sowohl die Erfassung der Emissionen innerhalb der Werkzeugmaschinen (Absaugung) als auch deren Abscheidung verbesserungsbedürftig sind [3]. So zeigte sich, dass

- die Erfassungseinrichtungen innerhalb der Maschine häufig ungünstig angeordnet sind,
- häufig ein zu hoher Erfassungsluftstrom gewählt wird und
- die Absaugleitungen falsch konzipiert sind.

Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

Oft sind die Absaugstellen für die Emissionserfassung zu dicht an der Bearbeitungsstelle angeordnet (Abbildung 2, Seite 13). Die Folge ist, dass verspritzte KSS erfasst werden, die das Absaugsystem ungünstig belasten und die Erfassungsluft unnötig überfrachten.



Abbildung 2:  
Beispiele für Erfassungseinrichtungen, die zu dicht  
an der Bearbeitungsstelle angeordnet sind



Mit der Stärke des gewählten Erfassungsluftstroms steigt auch der Massenstrom an KSS-Emissionen in der Erfassungsluft: Eine Verdoppelung des Luftstroms entspricht dabei einer Verdoppelung des Massenstroms an KSS-Emissionen. Dies kann zu einer Überlastung des gesamten Abluftsystems und teilweise auch zu Ablagerungen im Absaugsystem und somit zur Versottung der Rohrleitungen führen (Abbildung 3).



Abbildung 3:  
Beispiel für die Anreicherung von  
KSS-Emissionen an ungünstigen  
Absaugstellen

In manchen Werkzeugmaschinen sind die Absaugstellen so ungünstig angeordnet und gestaltet, dass Späne den Erfassungsquerschnitt zusetzen können und dadurch der



erforderliche Unterdruck innerhalb der Einhausung nicht aufrechterhalten werden kann (Abbildung 4). Dies wird besonders deutlich, wenn Leckstellen an der Einhausung bestehen (siehe Abbildung 5).



Abbildung 4:  
Beispiel für eine durch Späne  
zugesetzte Erfassungseinrichtung

Abbildung 5:  
Beispiele für Undichtigkeiten am Maschinengehäuse



Ein weiteres Problem sind entweichende Emissionen bei geöffneter Fronttür der Einhausung. In der Regel ist dann zwar die KSS-Zufuhr unterbrochen, dennoch können erhebliche Emissionsmassenströme in den Arbeitsraum entweichen. Eine kurzzeitige Erhöhung des Erfassungsluftstroms bei geöffneter Fronttür kann diese Problematik aus verschiedenen Gründen nicht lösen.

Auch die Vermeidung von Emissionsquellen im Arbeitsbereich darf nicht außer Acht gelassen werden. Im unmittelbaren Maschinenbereich entstehende Emissionen strömen zur Maschine hin, die wegen der Erfassung in der Maschine als Strömungssenke zu betrachten ist. Vielfach liegen hierin die Ursachen für zu hohe Expositionskonzentrationen.



Im Rahmen eines umfassenden Schutzmaßnahmenkonzeptes sind daher zunächst alle KSS-Emissionsquellen zu ermitteln, z. B. in Form eines Emissionskatasters. Anschließend sollte unbedingt geklärt werden, ob nicht ein Teil der Emissionsquellen vermieden werden oder die Emissionsquellstärken auf ein Mindestmaß reduziert werden können. In ein Erfassungskonzept sind alle Emissionsquellen einzubeziehen. Neben dem Bearbeitungsbereich sind dies vor allem die Austragsstellen für Werkstücke oder Werkzeuge und Späne, Späne- und KSS-Vorratsbehälter, Zwischenlager für Werkstücke oder Halbzeuge, Ablaufrinnen usw. [4].

#### **1.4 Verbesserung der Erfassung und Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen**

Einhausungen an Werkzeugmaschinen lassen sich nur dann verbessern und anwendungsgerecht konzipieren, wenn das Zusammenwirken von Erfassungsströmung, Stoffausbreitungsvorgängen und Störluftbewegungen geschlossen betrachtet und beschrieben werden kann. Um Grundlagen sowohl für die Verbesserung der Emissionserfassung als auch des Abscheideverhaltens zu erarbeiten, fehlten bisher jedoch Hinweise zur Partikelgrößenverteilung und zur Emissionshöhe innerhalb der Werkzeugmaschinen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes sollen daher sowohl experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Werkzeugmaschinen als auch numerische Strömungssimulationen durchgeführt werden. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen (siehe Beitrag auf Seite 19) sollen als Vergleichsdaten für die numerischen Strömungssimulationen dienen, die am Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik der Universität Stuttgart durchgeführt werden.

Die Simulationsmodelle werden gegebenenfalls angepasst, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung zu erzielen. Die auf diese Weise kalibrierte bzw. validierte numerische Simulation wird anschließend für Parameterstudien eingesetzt, die experimentell nicht mit vertretbarem Aufwand realisiert werden können. Ausgewählte Varianten sollen – sofern dies unter den gegebenen



Randbedingungen möglich ist – im WZL umgesetzt und ihre Wirksamkeit soll experimentell untersucht werden. Das Simulationsverfahren wird auf Seite 91 in diesem Report detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse sollen eine erste Grundlage für die Auslegung und Anordnung von Erfassungseinrichtungen und somit die Voraussetzungen für eine Optimierung der Emissionserfassung an Werkzeugmaschinen liefern. Aus vielen Fachgesprächen in Expertenkreisen und aus den Ergebnissen weiterer Untersuchungen konnten darüber hinaus bereits folgende Lösungsansätze abgeleitet werden:

- ❑ Die Abscheideleistung für Aerosole hängt ganz wesentlich von der Befrachtung der Abscheider ab. Um eine Überfrachtung zu vermeiden, muss die Beladung der Absaugluft mit Aerosolen möglichst auf ein Mindestmaß beschränkt werden.
- ❑ Der Absaugvolumenstrom hat einen großen Einfluss auf die Abscheideleistung. Zu hohe Abluftvolumenströme überfrachten die Abscheider dadurch, dass ein zu hoher Emissionsmassenstrom erfasst und bei gleichzeitig konstantem Abscheidegrad ggf. ein zu hoher Reingasmassenstrom erreicht wird.
- ❑ Durch zu hohe Abluftströme werden Absaugsysteme und Abscheider überdimensioniert, was unweigerlich zu überhöhten Investitions- und Betriebskosten führt.

Oft wird in der betrieblichen Praxis nach der Devise „Viel Luft hilft viel“ verfahren. Richtig wäre es aber, die Aussage „Wenig Luft hilft viel“ zugrunde zu legen. Denn bei gleicher Abscheideleistung sinkt der Massenstrom an KSS-Emissionen proportional mit dem Erfassungsluftstrom. Das bedeutet, dass die Reinluftkonzentration bereits durch die Reduzierung des Erfassungsluftstromes gesenkt wird. Bei gleichzeitiger Verbesserung der Abscheideleistung wird es somit möglich, den in der Reinluft enthaltenen Restmassenstrom an KSS-Emissionen deutlich zu senken.

## 1.5 Ausblick

Vielfach entsprechen Maschinen ohne Erfassungssysteme nicht dem Stand der Technik. Abscheidesysteme, die beim Kauf der Maschine bereits integriert sind, nachträglich





eingesetzt oder für einen bestehenden Maschinenpark beschafft werden, müssen eine ausreichende Abscheideleistung aufweisen. Der Nachweis kann beispielsweise durch eine Leistungsprüfung im Rahmen einer Baumusterprüfung erfolgen.

Eine Überprüfung der Abscheideleistung einzelner Abscheider erst nach Inbetriebnahme ist jedoch unpraktikabel und sehr aufwändig. Sollte dabei auch noch eine unzureichende Abscheideleistung festgestellt werden, lassen sich meistens keine zufriedenstellenden Lösungen finden.

Nachrüstungen müssen vom Betreiber der Maschinen oder durch Fachfirmen durchgeführt werden. Die Nachrüster müssen aufgrund eigener Erfahrungen oder nach Rücksprache mit dem Maschinenhersteller solche Erfassungseinrichtungen planen und ausführen. Dies ist gegenüber einer integrierten Erfassung oft mit höheren Zusatzkosten verbunden. Leider fehlen den Maschinenherstellern aber Grundlagen für die Konzeption von Erfassungseinrichtungen. So kommt es oft zu Planungsfehlern, die dazu führen, dass erhöhte Anteile an KSS-Emissionen erfasst und bei unzureichender Abscheidung zu hohe Anteile an Emissionsmassenströmen in den Arbeitsraum zurückgeführt werden. Ursachen hierfür sind in erster Linie die Überfrachtung der Abscheidesysteme durch unsachgemäße Anordnungen und Ausführungen der Erfassungseinrichtungen und zu hoch gewählte Erfassungsluftströme.

Angaben zu den erforderlichen Volumenströmen und zum Druckverlust sind von großer Bedeutung. Bei nachträglich einzurichtenden Absaugsystemen sind beide Größen für die Auslegung und Funktion im Dauerbetrieb wichtig.

Die genannten Punkte sprechen dafür, dass zukünftig Absaug- und Abscheidesysteme von den Herstellern der Werkzeugmaschinen integriert und bezogen auf den Einsatzbereich, z. B. die Art und Verwendung des KSS, zu optimieren sind. Jedoch fehlten bisher Grundlagen für die Auslegung und Gestaltung solcher Erfassungssysteme. Sowohl die Maschinen- als auch die Anlagenhersteller benötigen diese Grundlagen, um Absaugsysteme zu planen und in Praxistests zu optimieren. Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes sollen Leitlinien erarbeitet werden, die für Maschinenkonstrukteure, Anlagenbauer und -planer, Betreiber sowie weiteres Fachpersonal



Informationen für die sachgerechte Gestaltung von Erfassungseinrichtungen und letztlich auch für die Gestaltung von Absauganlagen enthalten.

Der Unternehmer soll zukünftig die Gewissheit haben, dass die von ihm beschaffte Werkzeugmaschine Einrichtungen enthält, die eine optimale Entsorgung von KSS-Emissionen aus der Werkzeugmaschine sicherstellt, und dass er sie somit entsprechend den gesetzlichen Forderungen betreiben kann.

## 1.6 Literatur

- [1] *Pfeiffer, W.; Stockmann, R.; Sonnenschein, G.; Breuer, D.; Blome, H.; Deininger, C.*: Kühlschmierstoffe – Umgang, Messung, Beurteilung, Schutzmaßnahmen. BIA-Report 3/91. 2. Aufl. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1993
- [2] *Pfeiffer, W.; Breuer, D.; Blome, H.; Deininger, C.; Hahn, J. U.; Kleine, H.; Nies, E.; Stockmann, R.; Willert, G.; Sonnenschein, G.*: Kühlschmierstoffe. BIA-Report 7/96. 2. Aufl. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1996
- [3] Kühlschmierstoffe und andere komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische – Sicherer Umgang, Expositionsbeurteilung, Schutzmaßnahmen, betriebliche Organisation. Kühlschmierstoff-Informationssystem auf CD-ROM. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA. 2. Aufl. Storck, Hamburg 2003
- [4] *Stockmann, R.; Böckler, M.; Michels, P.; Bannert, P.; Tigler, A.; Sefrin, H.; Wüstefeld, B.; Krutisch, I.; Kleine, H.*: BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen – Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der spanenden Metallbearbeitung. BIA-Report 4/04. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2004. [www.hvbg.de/bgia](http://www.hvbg.de/bgia), Webcode: 941742



## **2 Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Versuchsplanung und Durchführung**

Fritz Klocke, Klaus Gerschwiler, Bastian Maier,  
Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen  
Technischen Hochschule (RWTH) Aachen

Zielsetzung eines Forschungsvorhabens zur Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen aus Werkzeugmaschinen sind Untersuchungen zur Wirksamkeit und zur Verbesserung unterschiedlicher Systeme. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Teilprojekt gemeinsam vom Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BGIA, vom Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart und vom Laboratorium für Werkzeugmaschinen (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen durchgeführt. Schwerpunkt des Teilprojektes war die Ermittlung des Standes der Technik verschiedener Abscheidesysteme zur Emissionserfassung an Werkzeugmaschinen unter realen Zerspanbedingungen.

Dazu wurden Zerspanversuche unter praxisüblichen Schnittbedingungen mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffen (KSS) und Abscheidesystemen beim Drehen, Fräsen und Schleifen durchgeführt. Dem WZL oblag die Planung und Durchführung der Versuche; das BGIA entwickelte die Messstrecke, erfasste die Messwerte und wertete diese aus (siehe Beitrag auf Seite 41 ff.). Im Folgenden wird über die versuchstechnische Durchführung des Projektes berichtet.

### **2.1 Einleitung**

Bei der Realisierung technischer Hochleistungsprozesse kommt den KSS eine herausragende Bedeutung zu. Ihre primären Aufgaben sind, die Zerspanstelle zu kühlen, zu schmieren und die Späne abzutransportieren. Man unterscheidet zwischen wassergemischten (Emulsionen) und nicht wassermischbaren KSS (Ölen). Die Emulsionen haben hierbei bislang die größte technische Bedeutung. Sie zeichnen sich vor allem durch eine gute Kühlwirkung aus. Gleichzeitig stellen sie jedoch ein Gefährdungspotenzial für die Umwelt und für die Gesundheit der mit KSS umgehenden Menschen dar [1; 2].



In den letzten Jahren hat vor allem die Erkenntnis, dass Emulsionen hohe Kosten für Pflege und Entsorgung verursachen, zur Suche und Entwicklung von Alternativen zum Einsatz wassergemischter KSS geführt. Im Wesentlichen kann hierbei zwischen zwei Entwicklungsrichtungen unterschieden werden: Dies sind zum einen die Trockenbearbeitung und die Minimalmengenschmiertechnik [1; 3 bis 6] und zum anderen der Einsatz von Ölen anstelle von Emulsionen [1; 7].

Die Substitution von Emulsionen durch Öle ist vor allem bei den Zerspanoperationen von Bedeutung, die trocken oder unter Einsatz einer Minimalmengenschmierung technologisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll durchführbar sind. Bei den meisten Bearbeitungsaufgaben, die unter Öl durchgeführt werden, finden heute vorwiegend Mineralöle Verwendung. Der Anteil synthetischer Ester ist im Vergleich hierzu noch gering.

Allen KSS-Medien ist gemeinsam, dass bei ihrem Einsatz in Werkzeugmaschinen Emissionen entstehen [2; 8 bis 10], die zu Atemwegserkrankungen führen können. Um die Belastung der Maschinenbediener durch KSS-Emissionen in Form von Aerosolen und Dämpfen zu verringern, werden Werkzeugmaschinen in der Regel eingehaust und abgesaugt. Die aus dem Arbeitsraum der Werkzeugmaschine abgesaugte Luft wird üblicherweise mithilfe von Abscheidesystemen gereinigt. Dabei unterscheidet man zwischen filternden, elektrostatischen und Zentrifugalabscheidern [11].

In filternden Abscheidern wird die zu reinigende Abluft durch spezielle Glasfaservliese geleitet, in denen die dispergierten Aerosolpartikeln aufgrund von Trägheits-, Sperr- und Diffusionseffekten abgeschieden werden. Die abgeschiedenen Aerosolpartikeln fließen der Schwerkraft folgend nach unten wieder aus dem Vlies heraus [12].

Die Wirkungsweise elektrostatischer Abscheider beruht auf dem physikalischen Prinzip der Ablenkung von elektrisch geladenen Partikeln im elektrischen Feld. Der Luftstrom wird zunächst durch eine sogenannte Ionisationszone geführt. Dort erhalten die abzuscheidenden Teilchen eine elektrische Aufladung durch Anlagerung von Ionen. In der anschließenden Abscheidezone strömt die abgesaugte Luft durch eine Anzahl von plattenförmigen Niederschlagselektroden, die entgegen der Teilchenladung



gepolt sind. Durch elektrische Kraftwirkung wandern die Teilchen zu den Abscheideelektroden und werden dort niedergeschlagen.

Bei Zentrifugal-, Fliehkraft- bzw. Massenkraftabscheidern wird ausgenutzt, dass massenproportionale Feldkräfte wie Schwerkraft, Fliehkraft oder Trägheitskraft auf die Partikeln und Aerosole wirken. Der abgesaugte Luftvolumenstrom wird durch einen rotierenden Innenkörper geführt, der die KSS-Tröpfchen beschleunigt und auf die Innenwand des feststehenden Gehäuses schleudert. Dort läuft der niedergeschlagene Flüssigkeitsfilm durch Schwerkraft nach unten und wird aus dem Gerät ausgeschleust.

Durch Vorfilter werden aus den in den Abscheider eintretenden Aerosolen üblicherweise zunächst die größeren Tröpfchen abgeschieden. Die Vorfilter bzw. Prallabscheider bestehen aus Metallgestrieken oder geschlitzten Blechen. Als Fasermaterial für die Gestricke finden feine Aluminium- oder Edelstahlfasern Verwendung [11 bis 13].

Zahlreiche messtechnische Untersuchungen der Berufsgenossenschaften und des BGIA haben ergeben, dass die Absaugluft in den verschiedenen Abscheidesystemen bis auf wenige Ausnahmen nicht ausreichend gereinigt wird bzw. zu hohe Massenströme zurück in den Arbeitsraum gelangen. Die Ursachen hierfür sind darin zu sehen, dass der Absaugvolumenstrom nicht optimiert oder die Abscheideleistung zu gering ist. Dieses Erkenntnis war Anlass, unter reproduzierbaren Bedingungen den Stand der Technik verschiedener Abscheidesysteme hinsichtlich ihrer Abscheideleistung in Abhängigkeit von KSS und Bearbeitungsverfahren systematisch zu untersuchen.

## **2.2 Vorgehensweise**

Die Versuche wurden beim Drehen, Fräsen und Schleifen unter praxisüblichen Schnittbedingungen durchgeführt. Als KSS kamen eine Emulsion, ein Mineralöl, ein emissionsarmer synthetischer Ester sowie eine Minimalmengenschmierung (MMS) zum Einsatz. Die Abscheidung der KSS-Emissionen erfolgte mit einem filternden, einem elektrostatischen und einem Zentrifugalabscheider (siehe Tabelle 1, Seite 22).



Tabelle 1:  
Versuchsmatrix

Abscheider	Kühlschmierstoff	Dreh- maschine	Fräs- maschine	Schleif- maschine
<b>Filternder Abscheider</b>	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	
<b>Elektrostatisher Abscheider</b>	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	
<b>Zentrifugal- abscheider</b>	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	

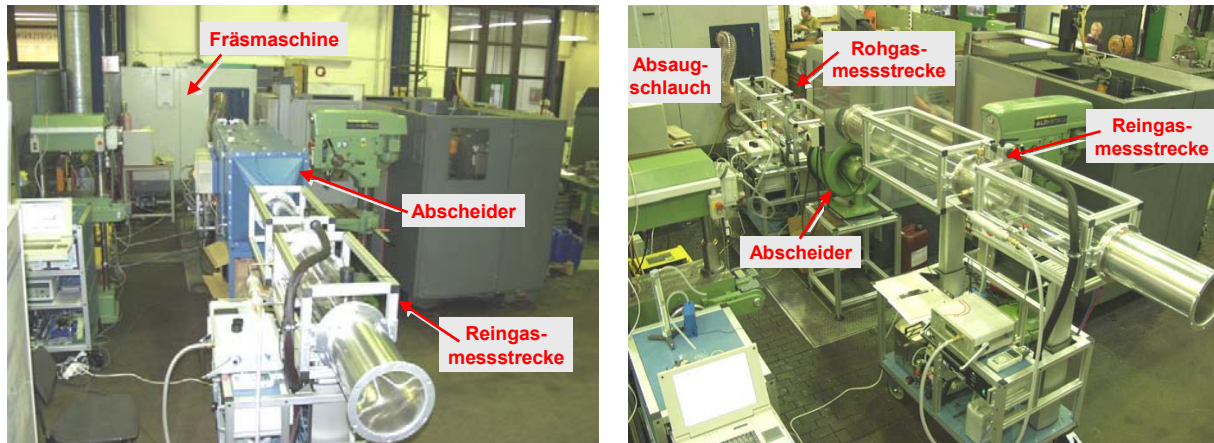
Vor und hinter dem jeweiligen Abscheider wurden in speziellen vom BGIA gefertigten und bedienten Prüfgasstrecken mithilfe eines isokinetischen Probenahmesystems die partikel- und dampfförmigen KSS-Emissionen erfasst. Zur Bestimmung der Konzentration organischer Substanzen wurde ein Flammenionisationsdetektor (FID) und zur Bestimmung von Partikelgröße und -menge ein Streulichtfotometer eingesetzt (siehe Abbildung 1, Seite 23).

Die Messzeiten betragen für jeden Versuch etwa zwei Stunden. Während der gesamten Messzeit wurde kontinuierlich zerspannt. Die Versuchsdurchführung war beim Drehen und Fräsen so ausgelegt, dass die Maschinentür während der gesamten Messdauer nicht geöffnet werden musste. Erreicht wurde dies durch ausreichend große Werkstücke und eine entsprechend große Anzahl an Werkzeugen. Beim Schleifen wurde



das Werkstück von Hand gewechselt; hierfür musste die Maschinentür für wenige Sekunden geöffnet werden.

Abbildung 1:  
Messaufbau beim Fräsen mit filterndem oder elektrostatischem Abscheider (links) und Zentrifugalabscheider (rechts)



### 2.3 Schnittbedingungen

Beim Drehen und Fräsen erfolgte die Bearbeitung abwechselnd unter Schrupp- und Schlichtbedingungen. Wegen starker Rauchbildung musste die Schnittgeschwindigkeit beim Zerspanen mit den beiden Ölen gegenüber den Versuchen mit Emulsion und MMS deutlich reduziert werden.

Die beim Fräsen und Drehen eingestellten Schnittparameter sind in den Tabellen 2 und 3 (siehe Seite 24) dargestellt. Beim Schleifen betragen die Schnittparameter generell:

Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe $v_c$	=	120 m/s
Vorschubgeschwindigkeit $v_{fa}$	=	80 mm/min
Aufmaß $z$	=	0,2 mm
Geschwindigkeitsverhältnis $q$	=	- 50



Tabelle 2:  
Schnittparameter beim Fräsen

Bearbeitungsverfahren		Schnittgeschwindigkeit $v_c$ in m/min	Vorschub pro Schneide $f_z$ in mm	Schnitttiefe $a_p$ in mm	Eingriffsbreite $a_e$ in mm
Fräsen mit Emulsion oder Minimalmengenschmierung (Messerkopfstirnfräsen im Gleich- und Gegenlauf)	Schruppen	300	0,25	2	39
	Schlichten	310	0,15	1	39
Fräsen mit Ester oder Mineralöl (Messerkopfstirnfräsen im Gleichlauf)	Schruppen	100	0,25	2	39
	Schlichten	100	0,15	1	39

Tabelle 3:  
Schnittparameter beim Drehen

Bearbeitungsverfahren		Schnittgeschwindigkeit $v_c$ in m/min	Vorschub $f$ in mm	Schnitttiefe $a_p$ in mm
Drehen mit Emulsion oder Minimalmengenschmierung (Außenlängsdrehen)	Schruppen	280	0,18/0,35	2,5
	Schlichten	400	0,2	1
Drehen mit Ester oder Mineralöl (Außenlängsdrehen)	Schruppen	140	0,18	2
	Schlichten	200	0,18	1

Für die Versuche standen vier KSS zur Verfügung:

- Emulsion 5 % – Konzentrat VP 6230256
- Mineralöl – K11036
- Synthetischer Ester – esterbasierter verdampfungsarmer KSS
- MMS – esterbasierter Minimalmengenschmierstoff

Die Versuchsmedien sowie die für die Reinigung der Maschinen erforderlichen Systemreiniger und Spülmedien wurden von der Fa. Fuchs Europa Schmierstoffe zur Verfügung gestellt.





Die KSS-Zufuhr der Emulsion erfolgte beim Drehen und Fräsen über die maschinen-eigene Pumpe. Für die Kühlung mit Ester und Mineralöl kamen beim Drehen und Fräsen separate Pumpen mit einem größeren Volumenstrom zum Einsatz. Für die Versorgung mit der MMS standen entsprechende Geräte zur Verfügung. Beim Schleifen wurden alle drei Medien dem Werkzeug über die Maschinenpumpe zugeführt. Vor der Befüllung der Maschinen mit dem ersten Versuchsmedium und beim Wechsel des Versuchsmediums wurden sie gründlich gereinigt und mit einem Systemreiniger gespült.

Als Werkstoff kamen zum Einsatz

- beim Fräsen: blankes Vierkantmaterial ( $75 \times 75 \times 450 \text{ mm}^3$ ) aus dem Vergütungsstahl C45+C,
- beim Drehen: Wellen (Ausgangsdurchmesser 245 mm, Länge 500 mm) aus C45 im normal geglühten Zustand (+N) und
- beim Schleifen: Wälzlagerstahl 51CrV4 mit einer Härte von 61 HRC

Als Werkzeuge wurden beim Drehen und Fräsen beschichtete Hartmetalle und beim Schleifen eine keramisch gebundene CBN-Scheibe (CBN, cubic boron nitride; kubisches Bornitrid) verwendet.

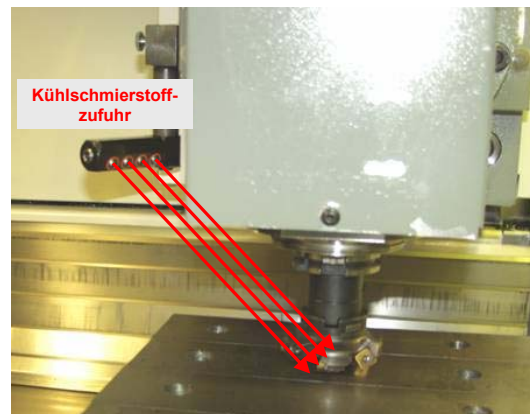
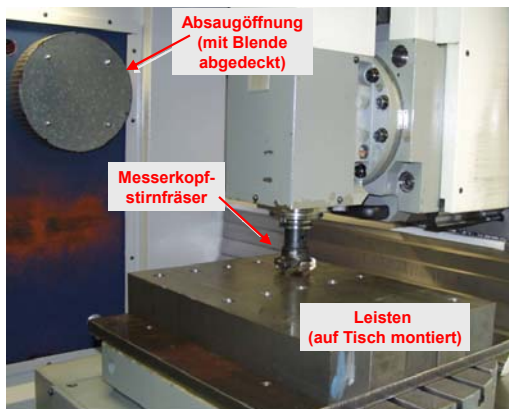
## 2.4 Durchführung der Versuche

### 2.4.1 Fräsen mit Emulsion und Minimalmengeschmierung

Für die Versuche beim Fräsen kam eine CNC-Universalfräsmaschine der Fa. Deckel Maho mit der Bezeichnung DMU 60T zum Einsatz (Abbildung 2, Seite 26). Die Werkzeugmaschine verfügt über eine maximale Spindeldrehzahl von  $6\,300 \text{ min}^{-1}$  und eine Antriebsleistung von 10 kW. Da die Maschine nicht mit einer Absaugeinrichtung ausgestattet ist, wurde das Seitenfenster herausgenommen und durch ein Blech ersetzt, in das eine Öffnung eingebracht und ein Flansch für das Anschließen des Absaug-schlauches angeschweißt worden war. Zum Arbeitsraum hin wurde vor der Absaug-öffnung eine Blende mit einem Lochblech angebracht, um zu verhindern, dass Späne in die Messstrecke gelangen.



Abbildung 2:  
Arbeitsraum der Universalfräsmaschine



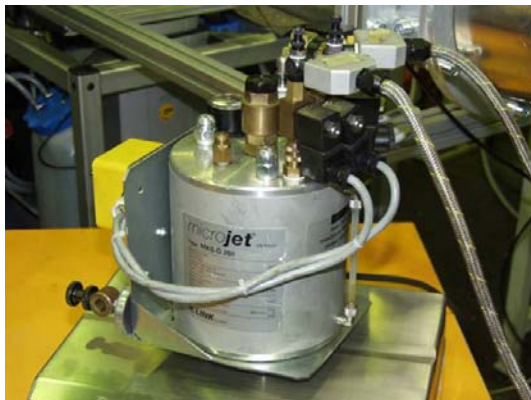
Als Verfahren wurde das Messerkopfstirnfräsen ausgewählt. Zum Einsatz kam ein fünf-schneidiger mit beschichteten Wendeschneidplatten aus Hartmetall bestückter Fräser (Messerkopfstirnfräser R245-063Q22-12M der Fa. Sandvik mit fünf Schneiden, einem Durchmesser von 63 mm und einem Einstellwinkel von 45°; Wendeschneidplatten R245-12T3M-PM der Sorte GC 4030 der Fa. Sandvik). Die auf dem Maschinentisch montierten fünf Leisten mit den Abmessungen 75 x 75 x 450 mm<sup>3</sup> wurden im Gleich- und Gegenlaufräsen bearbeitet. Dabei wurde jeweils eine Ebene unter Schrupp- und die nächste unter Schlichtbedingungen abgefräst. Der Werkzeugwechsel erfolgte programmgesteuert nach jeweils drei durch Schruppen und Schlichten abgefrästen Ebenen, die Zufuhr der Emulsion über einen links neben der Spindel positionierten Düsenblock.



Für die Versuche mit MMS kam ein Gerät der Fa. Link mit der Bezeichnung Mikrojet MKS-G 260 zum Einsatz (Abbildung 3). Hierbei handelt es sich um ein zweikanaliges MMS-Gerät, bei dem das Öl im Behälter mit Druckluft (3 bar) beaufschlagt und den Düsen über Schläuche zugeführt wird. Zweikanalig bedeutet, dass Öl und Luft in zwei ineinander liegenden Schläuchen der Düse getrennt zugeführt werden und das MMS-Aerosol erst in der Düse erzeugt wird. Die Benetzung des Fräsers mit MMS-Medium erfolgte über zwei Düsen mit ungefähr 9 g Medium pro Minute.

Abbildung 3:

Gerät für die Minimalmengenschmierung beim Fräsen;  
links: zweikanaliges äußeres MMS-System; rechts: MMS-Zuführung mit zwei Düsen



#### 2.4.2 Drehen mit Emulsion und Minimalmengeschmierung

Für die Versuche beim Drehen stand eine CNC-Drehmaschine der Fa. Monforts vom Typ RNC 400 plus zur Verfügung, die über eine Antriebsleistung von 30 kW und eine maximale Spindeldrehzahl von  $4\ 00\ \text{min}^{-1}$  verfügt. Das Volumen des KSS-Beckens beträgt ungefähr 300 Liter. Bereits vom Werk aus ist die Drehmaschine mit einer Absaugeinrichtung und einem Minimalmengenschmiergerät ausgerüstet. Die vorhandene Absaugöffnung wurde für den Anschluss der Messstrecke genutzt.

Bearbeitungsverfahren war das Außenlängsdrehen. Zerspant wurden Wellen mit einem Ausgangsdurchmesser von 250 mm und einer Länge von 500 mm. Als Schneidstoffe kamen beschichtete Wendeschneidplatten der Fa. Sandvik zum Einsatz. Beim Schruppen handelte es sich um Platten der Sorte GC 4025 mit der Geometrie-



bezeichnung CNMG120408 PM und beim Schlichten um Platten der Sorte GC 4015 mit der Geometriebezeichnung CNMG120408 FM (Abbildung 4).



Abbildung 4:  
Arbeitsraum der Drehmaschine mit  
Welle und Zerspanwerkzeugen

Die Schnittparameter wurden für eine Standzeit von 15 Minuten je Werkzeugschneide ausgelegt. Um die geforderte Messzeit von ungefähr zwei Stunden zu gewährleisten, musste daher der Werkzeugrevolver mit acht Werkzeugen – jeweils vier für das Schrappen und das Schlichtdrehen – bestückt werden (Abbildung 4). Analog zur Vorgehensweise beim Fräsen erfolgte auch beim Drehen die Bearbeitung abwechselnd unter Schrapp- und Schlichtbedingungen. Auf einer Länge von 120 mm musste beim Schrappen der Vorschub im Bereich des Reitstockes auf 0,18 mm reduziert werden, um Ratterschwingungen zu vermeiden. Danach wurde die Bearbeitung mit einem Vorschub von  $f = 0,35$  mm fortgesetzt.

Bei dem Minimalmengenschmiergerät handelt es sich um ein zweikanaliges System der Fa. Steidle mit der Bezeichnung Toolmat T70a (Abbildung 5, siehe Seite 29). Das Gerät besitzt drei Kolbenpumpen, mit denen die Fördermenge genau eingestellt werden kann. Luft und Medium werden separat bis zum Werkzeugrevolver geleitet und dort in einer Düse gemischt. Das MMS-Aerosol wurde wie bei der Kühlung mit Emulsion durch den Werkzeugrevolver und dann über ein am Werkzeughalter angebrachtes Kupferröhrchen dem Werkzeug gezielt zugeführt.



Abbildung 5:  
Drehmaschine mit Gerät für die  
Minimalmengenschmierung

### 2.4.3 Fräsen und Drehen unter Einsatz von Öl als Kühlschmierstoff

Als Öle kamen ein konventionelles Mineralöl sowie ein verdampfungsarmer esterbasierter KSS zum Einsatz. Im Vergleich zu Mineralölen werden synthetische Ester bislang noch relativ selten als KSS in der Zerspantechnik eingesetzt. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die bislang noch höheren Preise für diese Produkte. Demgegenüber steht jedoch eine Reihe von Vorteilen, durch die sich synthetische Ester gegenüber Mineralölen auszeichnen:

- geringere Verdampfungsneigung,
- höherer Flammpunkt (esterbasierter KSS: 220 °C; Mineralöl: 155 °C),
- günstigere Schmiereigenschaften,
- bessere Hautverträglichkeit und
- bessere biologische Abbaubarkeit [7; 14].

Aufgrund der in den letzten Jahren stark gestiegenen und immer noch steigenden Preise für Mineralölprodukte wird der Preisunterschied zwischen synthetischen Estern und Mineralölen immer geringer. Damit gewinnen auch synthetische Öle nicht nur als umweltverträgliche Alternative zu Emulsionen, sondern auch als kostengünstige Alternative zu Mineralölen eine zunehmende Bedeutung. Gegenüber Emulsionen weisen Öle eine bessere Schmierwirkung, eine geringere Kühlwirkung und eine höhere Viskosität auf (Tabelle 4, Seite 30).



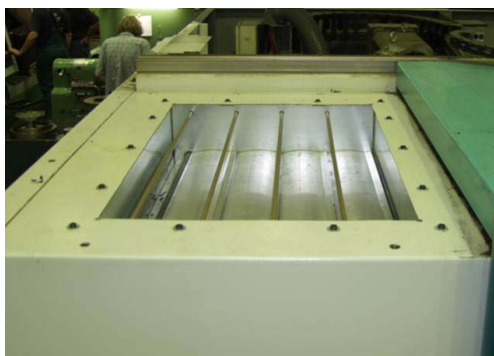
Medium	Viskosität in mm <sup>2</sup> /s
Wasser	1
Mineralöl	9,4
Esterbasierter KSS	9,8

Tabelle 4:  
Viskositäten verschiedener Medien

Für den Einsatz als KSS bedeutet die geringere Kühlwirkung, dass im Vergleich zu einer Emulsion dem Zerspanprozess eine größere Ölmenge zugeführt werden muss und in Verbindung mit der höheren Viskosität, dass die KSS-Pumpen eine entsprechend große Leistung aufweisen müssen [3].

Da sowohl die Dreh- als auch die Fräsmaschine ausschließlich für den Betrieb mit Emulsionen ausgelegt sind, mussten vor Beginn der Zerspanversuche mit den beiden Ölen zwei Probleme gelöst werden. Diese betrafen zum einen den Schutz gegen Brand und Explosion während der Versuchsdurchführung und zum anderen die Zuführung einer ausreichend großen Ölmenge zur Zerspanstelle. Da beim Zerspanen mit Ölen die Möglichkeit einer Entzündung und Verpuffung des Öl-Luft-Gemisches im Arbeitsraum der Maschine nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, wurden an beiden Werkzeugmaschinen Druckentlastungskappen sowie eine Löscheinrichtung installiert (Abbildung 6). Außerdem wurden die Mitarbeiter an beiden Maschinen über die Bedienung und Funktion der Löschanlage, über die Gefährdung beim Einsatz von Löschgasen und über sekundäre Maßnahmen beim Brand (Notruf, Feuerwehr) unterrichtet.

Abbildung 6:  
Druckentlastungskappen (links) und Löscheinrichtung mit 30 Liter Löschgas (rechts)





Der Umstand, dass beide Werkzeugmaschinen hinsichtlich der Leistung der KSS-Pumpen und der Größe der KSS-Behälter auf den Betrieb mit Emulsionen ausgelegt sind, machte die Nachrüstung einer separaten Ölversorgung erforderlich. Dazu wurde von der Fa. Fuchs ein 1 000 l fassender Ölcontainer zur Verfügung gestellt. Aus diesem Behälter wurden der Zerspanstelle mithilfe einer entsprechenden Pumpe 100 l Öl pro Minute zugeführt. Da die KSS-Behälter an der Fräsmaschine nur 150 l und an der Drehmaschine nur 300 l Flüssigkeit fassen, musste mit einer weiteren Pumpe das sich im KSS-Becken sammelnde Öl in kurzen Zeitabständen wieder in den Ölcontainer zurückgepumpt werden (Abbildung 7).

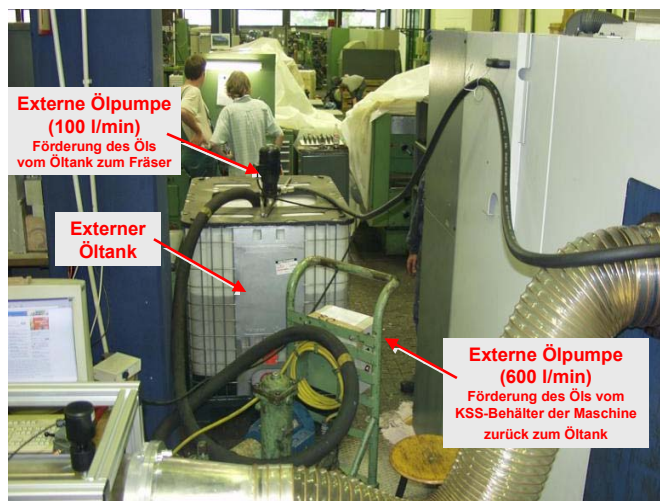


Abbildung 7:  
Nachrüstung einer separaten  
Kühlschmierstoffversorgung an  
der Fräsmaschine

In der Fräsmaschine wurden um den Messerkopfstirnfräser vier Düsen angeordnet, aus denen sich das Öl schwallartig über das Werkzeug ergoss (Abbildung 8, Seite 32). Die auf diese Weise zugeführte Ölmenge von ungefähr 100 l/min reichte jedoch nicht aus, um den Fräsprozess unter den bei der Bearbeitung mit Emulsion und MMS gewählten Schnittbedingungen durchzuführen. Nach nur wenigen Sekunden war der Arbeitsraum der Maschine vollständig mit Rauch von verbranntem Öl gefüllt. Verursacht wurde die Rauchbildung durch die mit hoher Geschwindigkeit von der Zerspanstelle wegfliegenden heißen Spänen. Das an ihnen anhaftende Öl verbrannte aufgrund der hohen Temperatur bereits während des Spänefluges im Arbeitsraum, wie an den durch die Späne erzeugten Rauchfahnen zu erkennen war. Dort, wo sich die Späne im Arbeitsraum sammelten, verbrannte weiteres Öl. Zur Lösung des Problems



musste gegenüber den Versuchen mit Emulsion die Schnittgeschwindigkeit beim Fräsen von 300 m/min auf 100 m/min reduziert werden.



Abbildung 8:  
Blick in den Arbeitsraum beim Fräsen  
mit Öl als Kühlschmierstoff

Beim Drehen kam dieselbe separate Ölversorgung zum Einsatz wie beim Fräsen. Über ein in der Maschine verlegtes Rohr wurde die Zerspanstelle mit ca. 100 l Öl pro Minute überflutet (Abbildung 9). Vorversuche zeigten auch hier, dass gegenüber der Bearbeitung mit Emulsion die Schnittwerte deutlich verringert werden mussten.



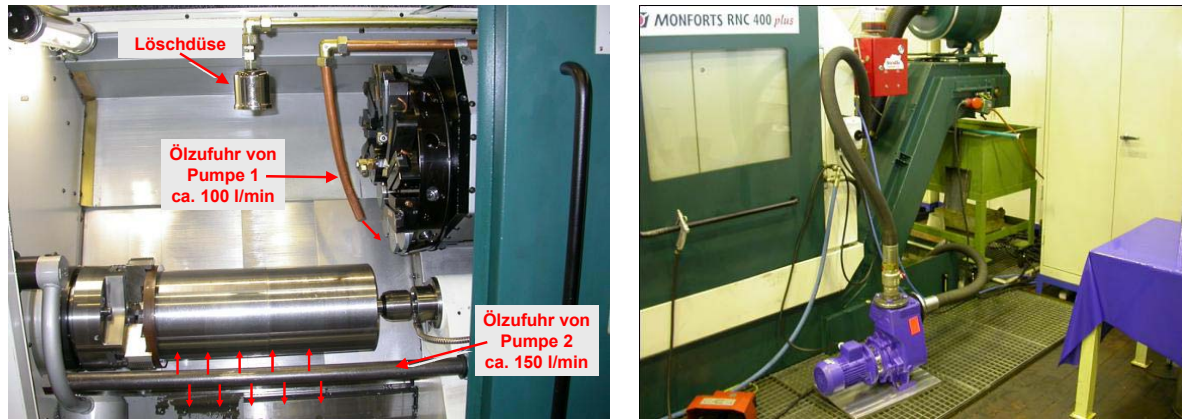
Abbildung 9:  
Blick in den Arbeitsraum beim Drehen  
mit Öl als Kühlschmierstoff

Trotz einer Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit um den Faktor zwei reichte die zugeführte Ölmenge nicht aus, um eine Rauchbildung in der Maschine zu verhindern. Insbesondere im Bereich des Späneförderers kam es weiterhin zu einer starken Rauchentwicklung. Zur Lösung dieses Problems wurde eine zweite von der Fa. KSB zur Verfügung gestellte Pumpe installiert. Mithilfe dieser Pumpe wurde der Maschinenarbeitsraum einschließlich des Späneförderers über ein weiteres Rohr, in das eine Vielzahl kleiner Löcher gebohrt worden war, fontänenartig mit ungefähr 150 l Öl pro Minute überflutet (Abbildung 10, Seite 33).





Abbildung 10:  
Kühlschmierstoffzufuhr über eine zweite zusätzliche Pumpe beim Drehen;  
rechts: erweiterte Kühlschmierstoffzufuhr, links: zweite Kühlschmierstoffpumpe



Mithilfe der zusätzlich getroffenen Maßnahmen konnten die Versuche sowohl beim Fräsen als auch beim Drehen prozesssicher durchgeführt werden. Infolge der reduzierten Schnittwerte und der intensiven Ölzuführung war nur noch eine geringe, die Messungen nicht beeinflussende Rauchbildung zu verzeichnen.

#### 2.4.4 Verschleißausbildung an den eingesetzten Schneidplatten

An den beim Drehen und Fräsen eingesetzten Wendeschneidplatten wurde nach Versuchsende der Verschleiß an der Freifläche ausgemessen; die Ergebnisse sind in für das Fräsen in Abbildung 11 und für das Drehen in Abbildung 12 (siehe Seite 34) zusammengestellt. Aufgetragen sind die Verschleißmarkenbreite VB als Maß für den sich an der Freifläche ausbildenden Verschleiß, die Anzahl benötigter Schneiden und das Zerspanvolumen pro Schneide. Vergleicht man beim Fräsen mit Emulsion die Anzahl benötigter Schneiden mit der beim Fräsen mit MMS, fällt ein eklatanter Unterschied auf: Obwohl in beiden Fällen das gleiche Werkstoffvolumen zerspant wurde, wurden beim Fräsen unter Emulsion 60 Schneiden und damit mehr als doppelt soviel wie beim Fräsen mit MMS benötigt (Abbildung 11). Primäre Ursache hierfür ist die schroffe Abkühlung der aus dem Werkstoff austretenden heißen Schneide durch die eingesetzte Emulsion. Beim Fräsen unter Emulsion unterliegen die Schneiden aufgrund der guten Kühlwirkung des KSS-Mediums einer sehr starken thermischen Wechselbelastung. Als Folge bilden sich in den Kontaktzonen an Span- und Freifläche Kammrisse



aus, die den Verschleißzuwachs an der Freifläche beschleunigen und zum Bruch der Wendeschneidplatte führen können.

Abbildung 11:  
Einfluss des Kühlschmiermediums auf die Verschleißausbildung beim Fräsen; links: Freiflächenverschleiß, Mitte: Anzahl eingesetzter Schneiden, rechts: Zerspanvolumen

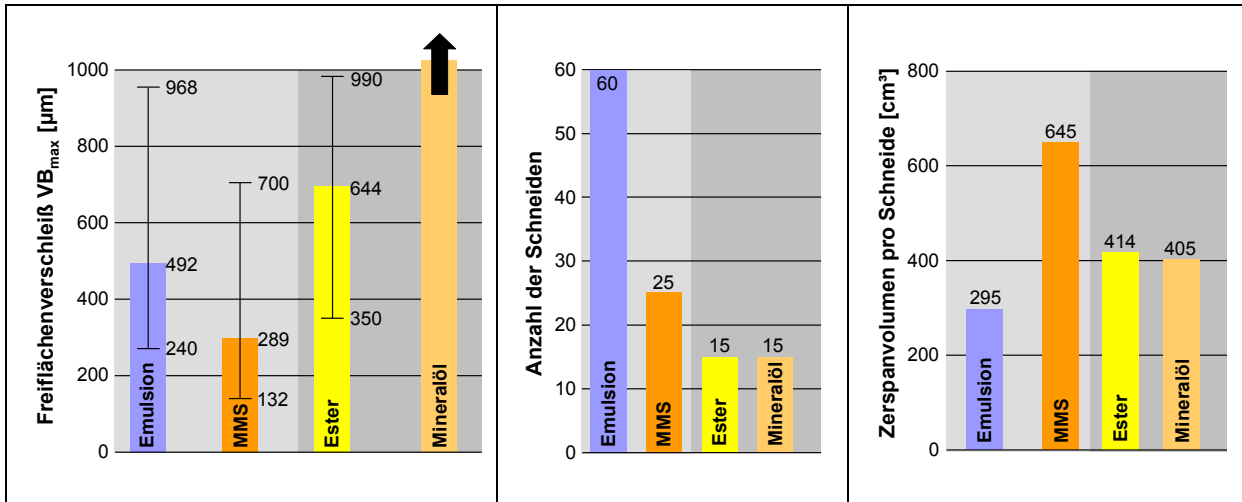
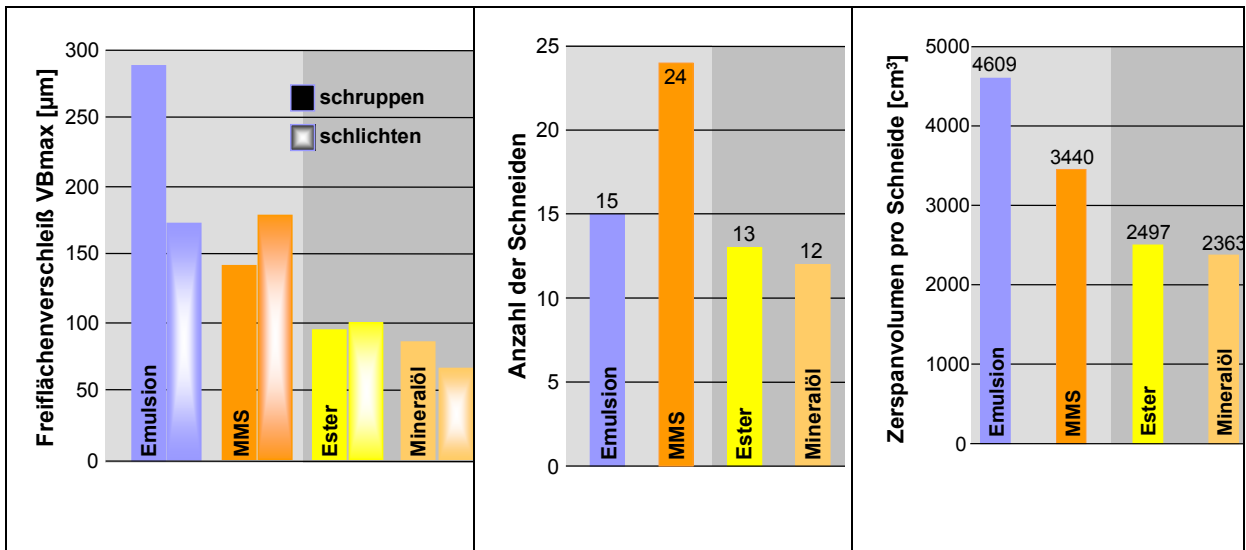


Abbildung 12:  
Einfluss des Kühlschmiermediums auf die Verschleißausbildung beim Drehen, links: Freiflächenverschleiß, Mitte: Anzahl eingesetzter Schneiden, rechts: Zerspanvolumen



Beim Fräsen unter Einsatz einer MMS wie auch bei der Trockenbearbeitung sind die thermische Wechselbelastung und damit die Anzahl der sich ausbildenden Kammrisse



wesentlich geringer. Der Verschleißzuwachs an der Freifläche erfolgt langsamer, woraus wesentlich längere Werkzeugstandzeiten resultieren. Dieses Ergebnis deckt sich mit zahlreichen Untersuchungen, die gezeigt haben, dass die Werkzeugleistungen beim Fräsen im Trockenschnitt wesentlich größer sind als mit der Nassbearbeitung. Aufgrund der längeren Werkzeugstandzeiten sollten daher Fräsoperationen, bei denen die Schneiden einer hohen thermischen Belastung unterliegen, möglichst trocken oder unter Einsatz einer MMS durchgeführt werden.

Auch bei den beiden Ölen ist ein deutlicher Einfluss des Mediums auf den Werkzeugverschleiß erkennbar. Gegenüber den Versuchen mit Emulsion bzw. mit MMS wurden nur 15 Schneiden benötigt. Der Grund ist in der mit  $v_c = 100$  m/min gegenüber  $v_c = 300$  bzw. 310 m/min deutlich niedrigeren Schnittgeschwindigkeit zu sehen, mit denen die Platten beim Fräsen unter Öl zum Einsatz gekommen sind. Die niedrigere Schnittgeschwindigkeit führte dazu, dass zum einen während der Messzeit von ungefähr zwei Stunden weniger Werkstoff zerspant wurde und zum anderen, dass die Schneiden einer geringeren thermischen Wechselbelastung unterlagen. Dennoch zeigt sich ein deutlicher Einfluss des verwendeten Öls auf den Werkzeugverschleiß. Im Vergleich zum Fräsen unter Ester weisen die unter Mineralöl eingesetzten Schneiden einen wesentlich stärkeren Freiflächenverschleiß auf. Als mögliche Ursache kann die bessere Schmierwirkung des Esteröls gegenüber dem Mineralöl angesehen werden.

Im Vergleich zum Fräsen kehren sich beim Drehen die Verhältnisse bezüglich des Einflusses von Emulsion und Minimalmengenschmiermedium auf die Verschleißausbildung und damit auf die Zerspanleistung der eingesetzten Werkzeuge um (siehe Abbildung 12). Beim Drehen mit MMS wurden 24 Schneiden und damit im Vergleich zur Bearbeitung unter Emulsion fast 50 % mehr Werkzeuge benötigt. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass die Wellen mit einer Länge von 500 mm und einem Ausgangsdurchmesser von 245 mm in einem Schnitt überdreht wurden.

Während die Emulsion die Schneide während der gesamten Bearbeitungszeit intensiv kühlt, unterliegen die Werkzeuge beim Drehen mit MMS aufgrund des langen Schnittweges und der außerordentlich geringen Kühlwirkung des Minimalmengen-



schmiermediums einer sehr hohen thermischen und mechanischen Belastung. Als Folge der über eine relativ lange Schnittzeit auf den Schneidstoff einwirkenden hohen thermisch-mechanischen Belastung kommt es zur plastischen Verformung der Schneidenecke und damit zu einem starken Anstieg des Werkzeugverschleißes, der bis hin zum plötzlichen Erliegen der Platten durch Schneidenbruch führen kann. Gegenüber den unter Emulsion eingesetzten Werkzeugen mussten die Schneidplatten daher beim Drehen mit MMS wesentlich früher aus dem Schnitt genommen werden.

Im Gegensatz zum Fräsen zeigen die beim Drehen unter Mineralöl bzw. Esteröl eingesetzten Schneidplatten ein weitgehend vergleichbares Verschleißverhalten. Die Ursache ist darin zu sehen, dass beim Fräsen das KSS-Medium die Schneide nach jedem Schnitt benetzt und damit immer wieder Verschleiß mindernd wirksam werden kann. Beim Drehen erfolgt dagegen die Benetzung der Werkzeugschneide nur zu Schnittbeginn. Aufgrund der hohen Flächenpressung in den Kontaktzonen auf Span- und Freifläche und der hohen Geschwindigkeit, mit der Span und Werkstück über die Kontaktzonen gleiten, wird das an der Schneide haftende Schmiermedium sehr schnell verbraucht. Gemessen an dem langen abgewickelten Schnittweg, wie er sich unter den gewählten Bedingungen ergab, ist die Schnittlänge, über die das Schmiermedium zu Schnittbeginn Verschleiß reduzierend wirksam werden kann, vernachlässigbar gering. Daher ist ein Einfluss der unterschiedlichen Schmierwirkungen von Mineralöl und Esteröl beim Drehen auf den Werkzeugverschleiß nicht nachweisbar.

#### **2.4.5 Schleifen**

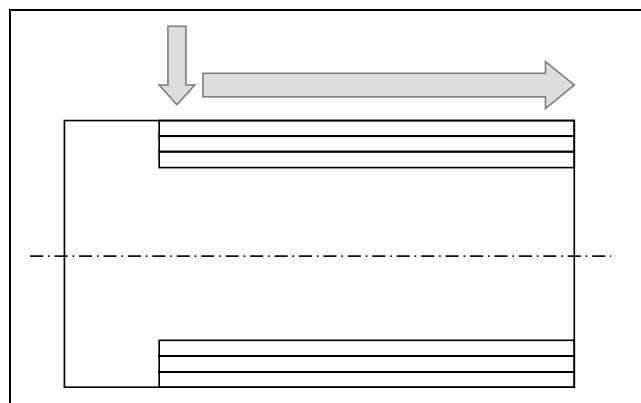
Die Schleifversuche bereiteten keine größeren Probleme. Die eingesetzte Schleifmaschine ist sowohl für wassergemischte als auch nicht wassermischbare Medien als KSS ausgelegt. Sie verfügt über KSS-Pumpen mit einer auch für Öle ausreichenden Förderleistung und darüber hinaus über die für das Schleifen unter Öl erforderlichen Sicheereinrichtungseinrichtungen in Form von Druckentlastungsklappen und einer Löschanlage.

Die Schleifversuche wurden auf einer Maschine vom Typ Tacchella Crossflex mit einer maximalen Spindeldrehzahl von  $7\,000\text{ min}^{-1}$  und einer Nennleistung von 37 kW beim



Hochleistungs-Außenrundlängsschleifen mit keramisch gebundener CBN-Scheibe durchgeführt. Werkstück war eine Welle aus dem Wälzlagerstahl 51CrV4 mit einer Härte von 61HRC. Die Welle wurde zunächst bis zu einer Tiefe von 0,2 mm radial eingestochen und dann mit einer axialen Vorschubgeschwindigkeit von 80 mm/min am Umfang überschleift (Abbildung 13).

Abbildung 13:  
Blick in den Arbeitsraum der Schleifmaschine



Zum Werkstückwechsel musste die Maschinentür für wenige Sekunden geöffnet werden. Auf die Erfassung der Messwerte wirkte sich dies jedoch nicht nachteilig aus.

Da die Schleifmaschine mit einem Mineralöl befüllt war, wurde Mineralöl als erstes, Esteröl als zweites und Emulsion als drittes Versuchsmedium gewählt. Vor Beginn



der Versuche wurde die Maschine zunächst gründlich gereinigt, mit dem jeweiligen Versuchsöl gespült und dann befüllt. Vor den Versuchen mit der Emulsion wurden Maschine und KSS-Einrichtung zusätzlich mit einem Systemreiniger gespült.

## 2.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden ein filternder, ein elektrostatischer und ein Zentrifugalabscheider auf ihre Abscheiderleistung untersucht. Dazu wurden Zerspanversuche beim Drehen, Fräsen und Schleifen unter Einsatz einer Emulsion, einer MMS, eines Mineralöls und eines verdampfungsarmen Esters durchgeführt. Bearbeitet wurden Vergütungsstahl C45 (Drehen und Fräsen) und Wälzlagerstahl 51CrV4 (Schleifen) unter praxisüblichen Schnittbedingungen.

Die Messzeiten pro Abscheider betragen zwischen 1,5 und 2 h. Der Zerspanprozess mit Werkzeuganzahl (Drehen) und Werkzeugwechseln (Fräsen) wurde so ausgelegt, dass während der gesamten Messzeit ein kontinuierlicher Zerspanvorgang gewährleistet war.

Vor Beginn der Versuche mit Öl als KSS wurden sowohl die Fräs- als auch die Drehmaschine mit Druckentlastungsklappen und einer Löscheinrichtung nachgerüstet. Beim Zerspanen mit Öl als KSS mussten wegen starker Rauch- und Nebelbildung die zugeführte Ölmenge erhöht und die Schnittwerte gegenüber der Bearbeitung mit Emulsion deutlich reduziert werden.

Unter den gewählten Bedingungen konnten alle Versuche zur Erfassung der KSS-Emissionen beim Drehen, Fräsen und Schleifen mit unterschiedlichen KSS-Medien und Abscheidesystemen prozesssicher durchgeführt werden.

## 2.6 Literatur

- [1] *Klocke, F.; Schulz, A.; Gerschwiler, K.*: Saubere Fertigungstechnologien – Ein Wettbewerbsvorteil von morgen? In: Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996



- [2] *Bannert, P.; Michels, P. E.*: Lufttechnische Maßnahmen bei Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen. Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE), Köln 2005
- [3] *Eisenblätter, G.*: Trockenbohren mit Vollhartmetallwerkzeugen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen 2000
- [4] *Klocke, F.; Gerschwiler, K.*: Minimalmengenschmierung und ökonomische Aspekte der Trockenbearbeitung. VDI-Vertiefungsseminar: Leistungsfähige spanende Fertigung – wirtschaftlich und umweltverträglich durch Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung. Stuttgart, März 2004
- [5] *Weinert, K.; Thamke, D.*: Wirtschaftlichkeit der Trockenbearbeitung – Ermittlung der Kosten für unterschiedliche Kühlschmierstoffkonzepte. wt Werkstattstechnik, 88 (1998), Nr. 9/10, S. 393-396
- [6] *Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J. W.; Wakabayashi, T.*: Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals 53 (2004), Nr. 2, S. 511-537
- [7] *Mang, T.; Dresel, W.*: Lubricants and Lubrification. Wiley-VCH, Weinheim 2001
- [8] *Stockmann, R.; Böckler, M.; Michels, P.; Bannert, P.; Tigler, A.; Sefrin, H.; Wüstefeld, B.; Krutisch, I.; Kleine, H.*: BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen – Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der spanenden Metallbearbeitung. BIA-Report 4/04. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2004. [www.hvbg.de/bgia](http://www.hvbg.de/bgia), Webcode: 941742
- [9] Emissionsarme Bearbeitung mit Minimalmengenschmierung. Informationsblatt 006. Hrsg.: Fachausschuss Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau, Juli 2005
- [10] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen (BGR 143). Carl Heymanns, Köln 2006



- [11] Kühlschmierstoffe – Frische Luft am Arbeitsplatz. Ein Leitfaden für die Praxis.  
Hrsg.: VDMA – Arbeitsgruppe Aerosole, Frankfurt am Main 2002
  
- [12] Funktionsprinzip von Tiefenfiltern. Homepage der Fa. Gea Delbag,  
[www.delbag.com](http://www.delbag.com)
  
- [13] *Baur, H.*: Absaugung und Abscheidung von Emissionen an Werkzeugmaschinen. In: *von Hahn, N.*: Lufttechnik in Industriehallen. BGIA-Report 5/2005. S. 67-80. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2004. [www.hvbg.de/bgia](http://www.hvbg.de/bgia), Webcode: 1757825
  
- [14] *Freiler, C.*: Ökologische und ökonomische Aspekte beim Einsatz von Esterölen. In: Kühlschmierstoffe und Zerspanung. Hrsg.: *W. J. Bartz*. Expert, Renningen-Malmsheim 2000





### **3 Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Messungen und Ergebnisse <sup>1</sup>**

Reinhard Stockmann,  
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin

#### **3.1 Einleitung**

Als Teil des Verbundprojektes „Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen aus Werkzeugmaschinen“ wurden im Zeitraum von April bis Oktober 2005 insgesamt 33 Versuche im Werkzeuglabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen durchgeführt. Dabei wurden die Emissionen unter unterschiedlichen Randbedingungen, wie Bearbeitungsverfahren oder eingesetzter Kühlschmierstoff (KSS) in der Absaugung der Werkzeugmaschine gemessen. Mit den unten beschriebenen Messverfahren wurden die Emissionen charakterisiert, sodass der Dosierer im zu entwickelnden Prüfstand so ausgelegt werden kann, dass praxisnahe KSS-Emissionen produziert werden, mit denen dann KSS-Abscheider bewertet werden können.

Dem WZL oblag im Rahmen des Teilprojektes die Planung und Durchführung der Versuche (siehe Beitrag auf Seite 19). Das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitsschutz – BGIA entwickelte die Messstrecke, erfasste die Messwerte und wertete diese aus. Im Folgenden wird über die Durchführung der Messungen und die Auswertung der Ergebnisse berichtet.

#### **3.2 Entwicklung der Messstrecke sowie Auswahl der Messgrößen**

Werkzeugmaschinen werden in der Regel abgesaugt und die abgesaugte Luft wird einem Abscheider zugeführt. Um Emissionen messtechnisch ermitteln zu können, muss

---

<sup>1</sup> Auszugsweise veröffentlicht in Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 411-416, Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Springer VDI Verlags



die Messtechnik auf Messungen in strömenden Gasen ausgerichtet werden. Im Rahmen des Projektes wurde ein Prüfstand entwickelt, der aus drei Teilen besteht:

- höhenverstellbare Rohgasmesstrecke (Abbildung 1),
- höhenverstellbare Reingasmesstrecke (Abbildung 2) und
- zentrale Datenerfassungseinheit.

Abbildung 1:  
Schematische Darstellung der  
Rohgasmesstrecke

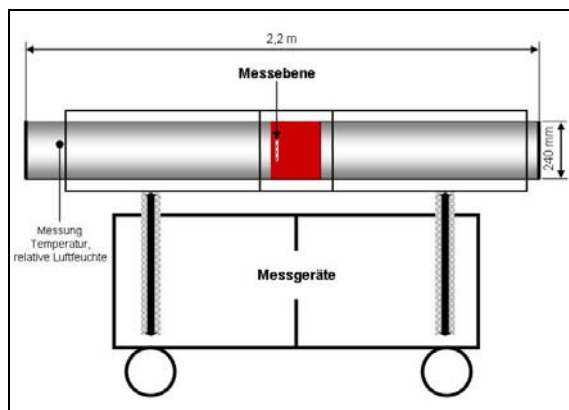
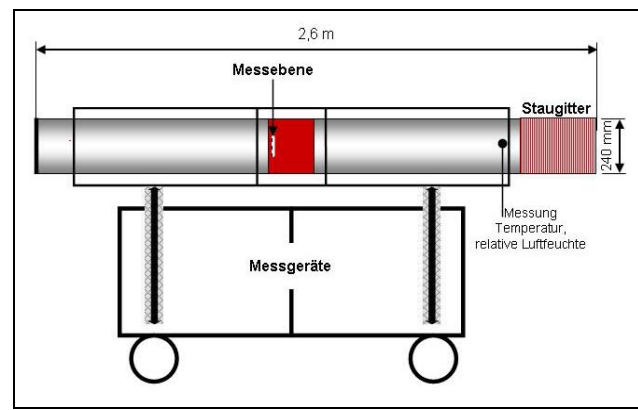


Abbildung 2:  
Schematische Darstellung der  
Reingasmesstrecke



Zwischen der Roh- und der Reingasmesstrecke wird der jeweilige KSS-Abscheider - platziert (Abbildungen 3 und 4, Seite 43).

Die Anbindung an die Werkzeugmaschine erfolgt über einen flexiblen Spiralschlauch (Durchmesser: 200 mm; Länge: 1,5 m). Durch die Länge der Gesamtmessstrecke und die Position der Absaugstelle in der Werkzeugmaschine ist eine geradlinige Anbindung an die Werkzeugmaschine nicht immer möglich; teilweise musste der Spiralschlauch um mehr als 90° gebogen werden. Bedingt durch die Ansaugöffnung an der jeweiligen Werkzeugmaschine mussten Spiralschläuche unterschiedlicher Durchmesser verwendet werden (Abbildungen 5 bis 8, Seite 43 ff.).



Abbildung 3:  
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit  
elektrostatischem oder filterndem Abscheider

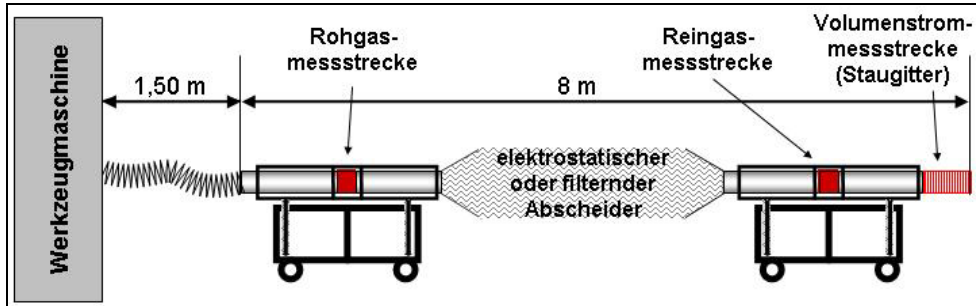


Abbildung 4:  
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einem Zentrifugalabscheider

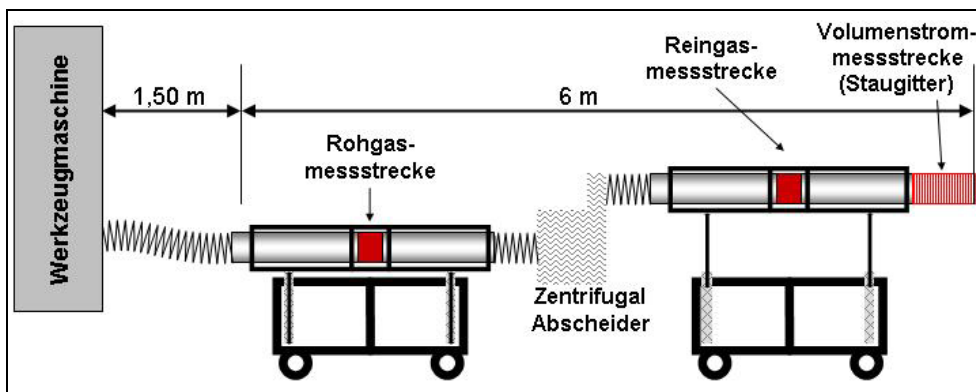


Abbildung 5:  
Gesamtansicht des Prüfstandes mit einer Fräsmaschine der Fa. Deckel-Maho





Abbildung 6:  
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einer Fräsmaschine  
der Fa. Deckel-Maho; links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht

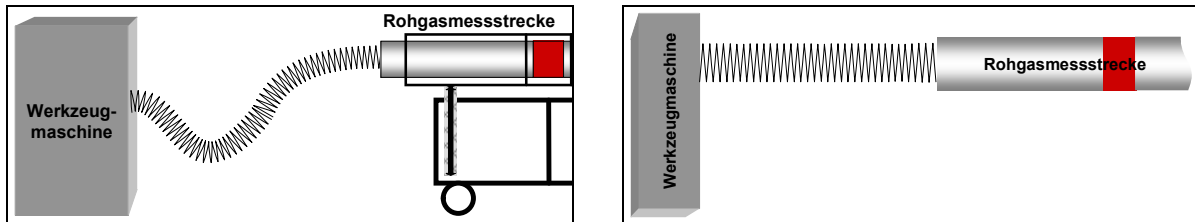


Abbildung 7:  
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einer Schleifmaschine  
der Fa. Tacchella Crossflex; links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht

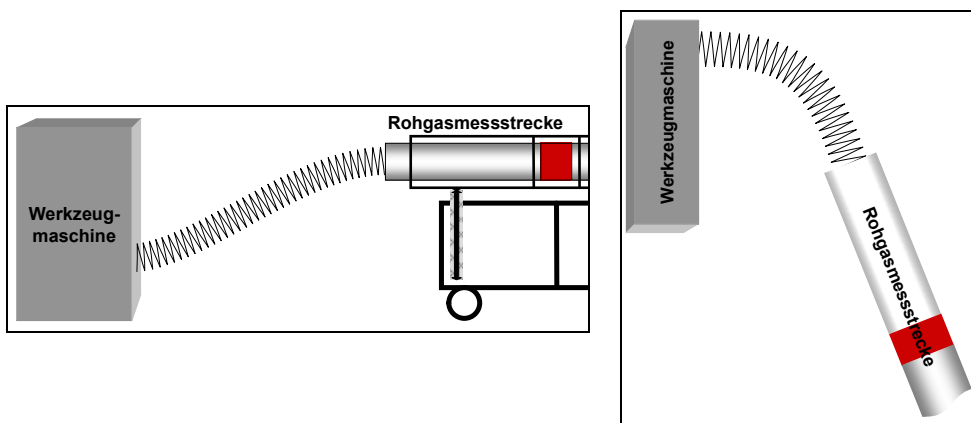
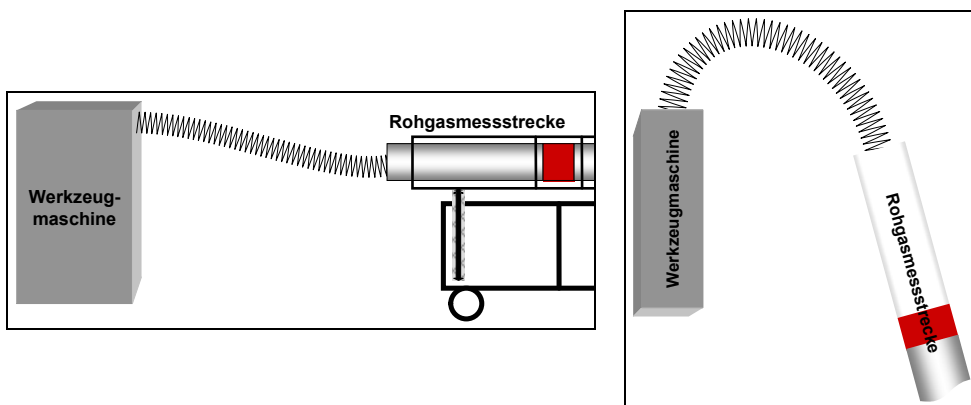


Abbildung 8:  
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einer Drehmaschine  
der Fa. Monforts; links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht



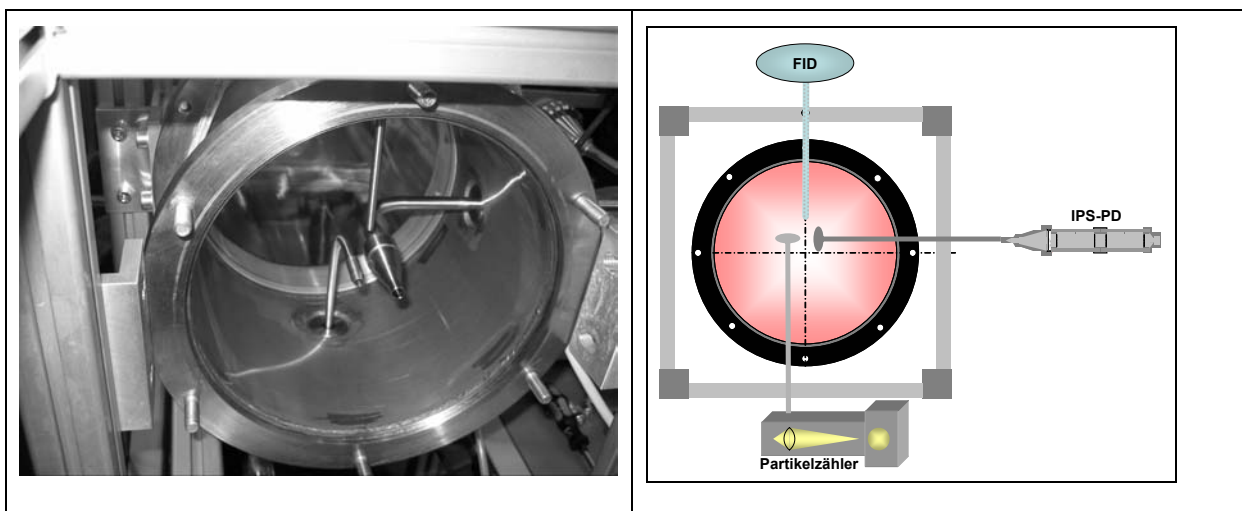


Sowohl in die Roh- als auch in die Reingasmessstrecke sind folgende Messsysteme eingebaut:

- Flammenionisationsdetektor (FID) zur Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffes,
- Isokinetisches Probenahmesystem Partikel-Dampf (IPS-PD) zur Bestimmung der KSS-Konzentration,
- Partikelanalysator zur Bestimmung der Partikelgröße und -anzahl,
- Temperatur- und Feuchtefühler im Rohgaseingang und Reingasausgang zur Bestimmung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte sowie
- Staugitter am Ende der Reingasmessstrecke zur Bestimmung des Absaugvolumenstroms.

Die Ansaugöffnungen für den FID, das IPS-PD und den Partikelanalysator sind im Messrohr innerhalb einer Ebene angeordnet (Abbildung 9).

Abbildung 9:  
Anordnung der Ansaugöffnungen für den FID, das IPS-PD und den Partikelanalysator innerhalb des Messrohrs





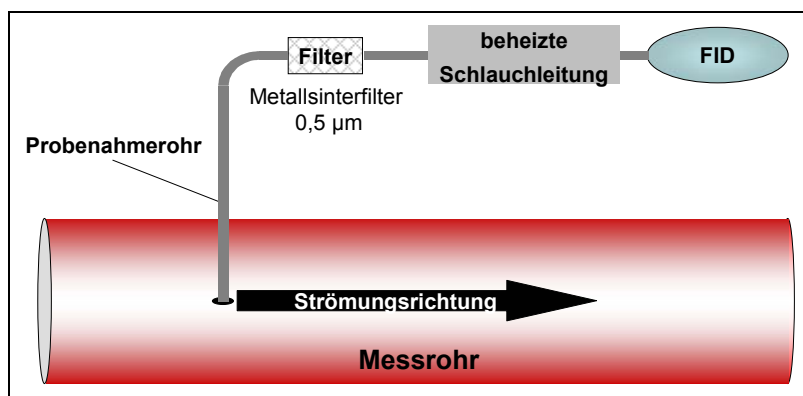
Mit Ausnahme des integrierenden Messverfahren IPS-PD werden alle Messgrößen kontinuierlich erfasst und auf Datenträger gespeichert. Im Folgenden werden die einzelnen Messsysteme und ihre Anordnung in der Messstrecke ausführlich dargestellt.

### 3.2.1 Messsysteme

#### Flammenionisationsdetektor (FID)

Als FID werden reingasseitig der Typ Bernarth-Atomic BA 3006 und rohgasseitig der Typ Bernarth-Atomic 3005 eingesetzt. Der Absaugvolumenstrom beträgt für beide Geräte 1 l/min. Die Geräte sind mit Propan in einer Konzentration von 81 ppm kalibriert. Die Probenahmeluft wird dem FID über einen Metallsinterfilter mit einer Porenweite von  $0,5 \mu\text{m}$  und eine auf  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  beheizte Leitung zugeführt (Abbildung 10).

Abbildung 10:  
Schematische Darstellung der Probenahme mit dem FID

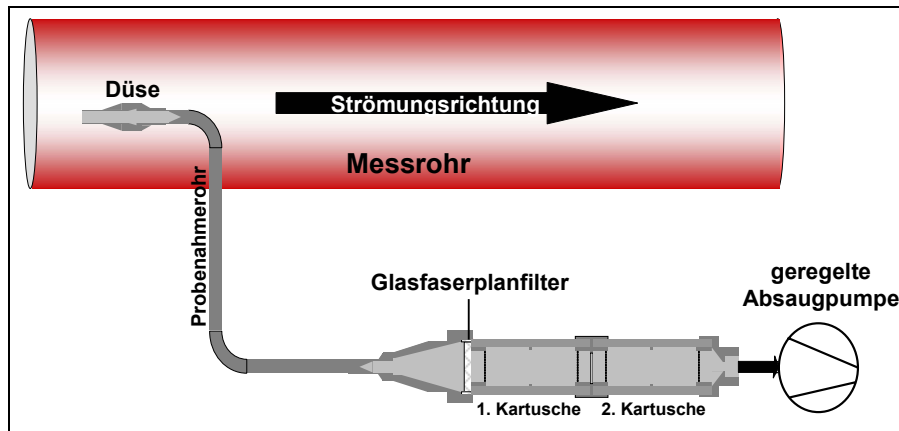


#### Isokinetisches Probenahmesystem Partikel-Dampf (IPS-PD)

Das IPS wird in der BGIA-Arbeitsmappe unter der Kennziffer 3110 beschrieben [1]. Das Verfahren basiert auf dem seit mehreren Jahren eingesetzten Messverfahren für KSS an Arbeitsplätzen [2]. Dieses wurde im Hinblick für eine isokinetische Probenahme entsprechend den Anforderungen der VDI-Richtlinienreihe 2066 [3; 4] modifiziert und somit auf eine größere Proben- und Adsorbermenge angepasst. Zur Absicherung werden bei den Messungen zwei hintereinander geschaltete Adsorberkartuschen eingesetzt, um einen möglichen Durchbruch von KSS erkennen zu können (Abbildung 11, Seite 47).



Abbildung 11:  
Schematische Darstellung der Probenahme mit dem IPS-PD-System



### Partikelanalysator

Die in Tabelle 1 (siehe Seite 48) angegebenen Messbereiche für die Partikelanalysatoren beziehen sich auf Latexpartikeln mit einem Brechungsindex von 1,53. Durch eine Nachkalibration wurden die Messwerte auf die verwendeten KSS angepasst. Für den wassergemischten KSS (wg-KSS) wurde ein Brechungsindex von 1,33 und für den nicht wassermischbaren KSS (nw-KSS) von 1,47 verwendet. Durch die Nachkalibration verschieben sich die Messbereichsgrenzen, sodass die untere Messbereichsgrenze beim Einsatz von nw-KSS bei  $0,22 \mu\text{m}$  und beim Einsatz von wg-KSS bei  $0,4 \mu\text{m}$  liegt. Die Verschiebung der oberen Messbereichsgrenze hat keine Auswirkungen auf die Messergebnisse, da in der Regel keine Partikeln  $> 9 \mu\text{m}$  gemessen werden.

Da bei den ersten Versuchen in der Reingasmesstrecke der Partikelzähler Welas 1100 LC Koinzidenz<sup>2</sup> anzeigte, wurden bei den weiteren Versuchen sowohl roh- als auch reingasseitig Verdünnungssysteme des Typs VKL-10 der Fa. Palas mit den in Tabelle 2 (siehe Seite 48) zusammengestellten Einstellparametern eingesetzt (Abbildung 12, Seite 49). Der Verdünnungsfaktor betrug 10.

<sup>2</sup> Der Koinzidenzfehler tritt auf, wenn zwei oder mehr Partikeln gleichzeitig in das Messvolumen des Partikelzählers gelangen. Dadurch wird das Partikel zu groß und die Konzentration zu niedrig gemessen.



Die Messungen mit den Partikelzählern erfolgen kontinuierlich über 60 s. Nach einer 30-sekündigen Pause erfolgt die nächste Messequenz über eine Dauer von 60 s usw. Bei einer durchschnittlichen Gesamtmesszeit von 1,5 h pro Messung werden somit 60 Partikelmessungen im Rohgas und 60 Messungen im Reingas durchgeführt.

Tabelle 1:  
Daten zu den eingesetzten optischen Partikelzählern

		<b>Rohgasmessstrecke</b>	<b>Reingasmessstrecke</b>
<b>Typ</b>		Welas 1100 HC	Welas 1100 LC
<b>Hersteller</b>		Palas	Palas
<b>Absaugvolumenstrom in l<sub>n</sub>/min</b>		5	5
<b>Optisches Messvolumen in μm<sup>3</sup></b>		90 x 90 x 90	200 x 200 x 200
<b>Messprinzip (Weißlicht)</b>		90°-Streulichtdetektion	90°-Streulichtdetektion
<b>Auflösung in Klassen pro Dekade</b>		32	32
<b>Mess- bereiche in μm</b>	<b>1</b>	0,18 bis 9	0,18 bis 9
	<b>2</b>	0,25 bis 17	0,25 bis 17
	<b>3</b>	0,6 bis 40	0,6 bis 40
<b>Maximalkonzentration für 10 % Koinzidenzfehler in Partikel/cm<sup>3</sup></b>		10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>

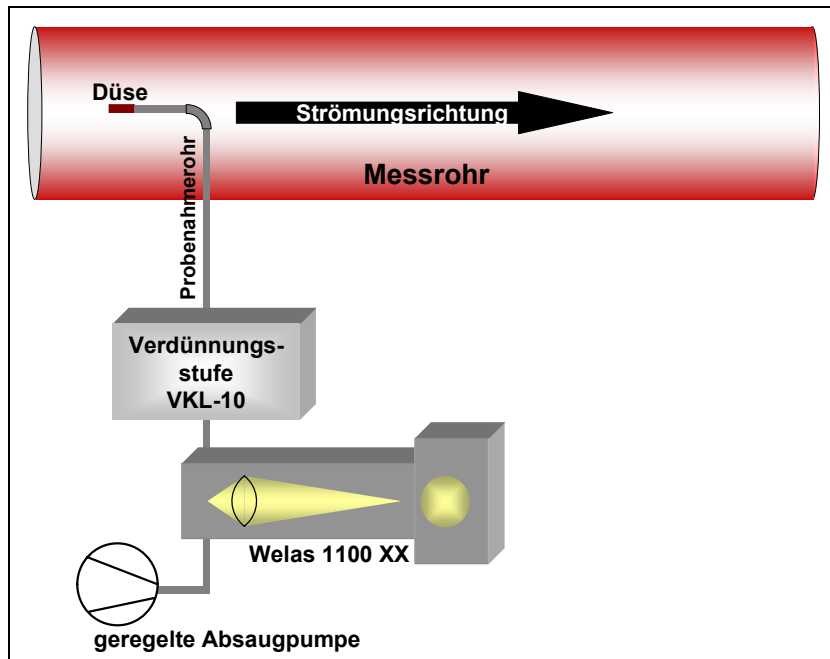
Tabelle 2:  
Einstellparameter der eingesetzten Verdünnungssysteme

Parameter	Wert
Vordruck	2,0 bar
Ansaugvolumenstrom	4,26 l <sub>n</sub> /min
Verdünnungsvolumenstrom	38,3 l <sub>n</sub> /min
Absaugvolumenstrom	5 l <sub>n</sub> /min





Abbildung 12:  
Schematische Darstellung der Probenahme mit dem Partikelanalysator



### Temperatur und relative Luftfeuchte

Auf der Eingangsseite des Roh- und auf der Ausgangsseite des Reingases werden kapazitive Temperatur-Feuchte-Fühler der Fa. Ahlborn eingesetzt (siehe Abbildungen 1 und 2, Seite 42). Die Daten werden mittels Datenlogger aufgezeichnet. Zum besseren Schutz wurden die Fühler mit Teflon-Sinterkappen ausgestattet, die regelmäßig gereinigt werden.

### Staugitter

Zur Bestimmung des Absaugvolumenstroms wurde ein 500 mm langes Staugitter der Fa. Airflow in die Messstrecke eingebaut. Dessen Durchmesser entspricht demjenigen der Messstrecke. Aus dem aufgezeichneten Differenzdruck kann mithilfe einer mitgelieferten Kalibriergeraden der Absaugvolumenstrom bestimmt werden.



### 3.2.2 Untersuchte Abscheider

Um den notwendigen Absaugvolumenstrom zu erzeugen und erste Erfahrungen mit dem Abscheideverhalten von Abscheidern zu sammeln, wurden drei unterschiedliche Typen eingesetzt. Sie waren zu Beginn der Untersuchungen neuwertig und die Filterelemente wurden im Verlauf der Untersuchungen weder ausgetauscht noch intensiv gereinigt.

#### ☐ Elektrostatischer Abscheider

Der elektrostatische Abscheider (Abbildungen 13 und 14) wurde mit einem Absaugvolumenstrom von 600 bis 650 m<sup>3</sup>/h betrieben. Die Durchströmungsgeschwindigkeit im Abscheider betrug ungefähr 0,5 m/s. Die Ionisationsspannung betrug 12 kV, die Kollektorspannung 6 kV.

Abbildung 13:  
Schematische Darstellung des elektrostatischen Abscheiders

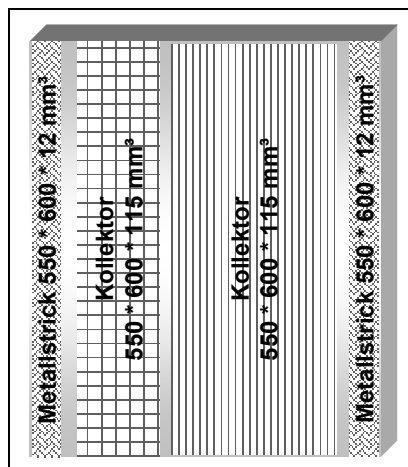
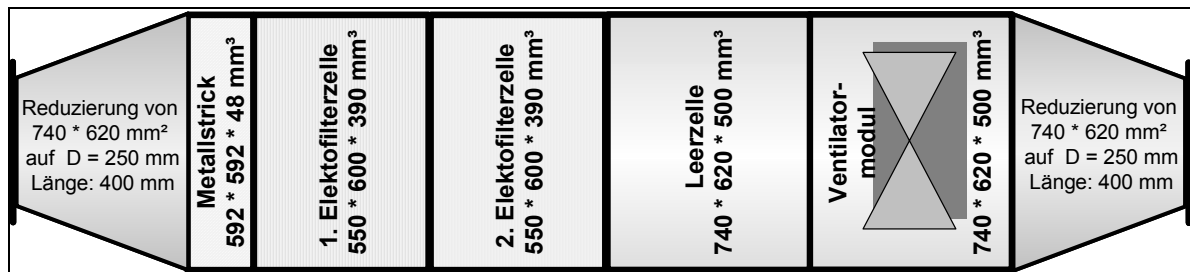


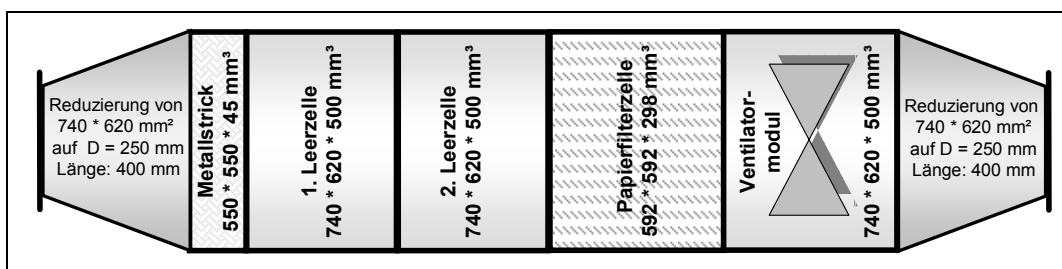
Abbildung 14:  
Schematische Darstellung der Elektrofilterzelle



### □ Filternder Abscheider

Ebenso wie der elektrostatische wurde auch der filternde Abscheider (Abbildung 15) mit einem Absaugvolumenstrom von 600 bis 650 m<sup>3</sup>/h betrieben. Als Filterstufe wurden Glasfaserfilter, die nach DIN EN 779 [5] in Klasse 8 eingestuft sind, verwendet. Die Filterfläche betrug 18 m<sup>2</sup> und die Filteranströmgeschwindigkeit etwa 0,01 m/s.

Abbildung 15:  
Schematische Darstellung des filternden Abscheiders



### □ Zentrifugalabscheider

Der Zentrifugalabscheider (Abbildung 16) konnte hinsichtlich des Absaugvolumenstroms nicht eingestellt werden. Die Absaugleistung variierte je nach angeschlossenem Maschinentyp zwischen 600 und 900 m<sup>3</sup>/h. Die im Abscheider installierten Nadelfilter waren zweilagig ausgeführt und hatten eine Filterfläche von ungefähr 0,31 m<sup>2</sup>.

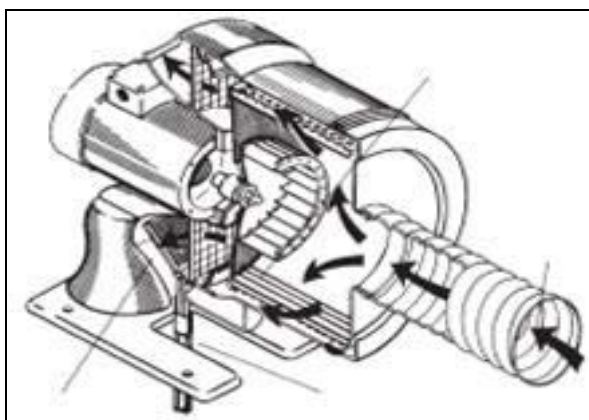


Abbildung 16:  
Schematische Darstellung  
des Zentrifugalabscheiders



### 3.3 Ablauf der Untersuchungen

Der zeitliche Ablauf der Versuche ist in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3:  
Übersicht über den zeitlichen Ablauf der Versuche

Messung	Datum	Uhrzeit	Bearbeitungs- verfahren	Kühlschmierstoff <sup>*)</sup>	Abscheider <sup>**)</sup>
1	05.04.2005	09:31 bis 10:49	Messerkopfstirnfräsen	wg-KSS	eA
2	05.04.2005	11:57 bis 13:03 14:40 bis 15:46	Messerkopfstirnfräsen	wg-KSS	fA
3	05.04.2005	17:19 bis 18:33	Messerkopfstirnfräsen	wg-KSS	ZA
4	07.04.2005	10:15 bis 11:44	Messerkopfstirnfräsen	MMS (Esteröl)	ZA
5	07.04.2005	13:07 bis 14:36	Messerkopfstirnfräsen	MMS (Esteröl)	fA
6	07.04.2005	15:11 bis 16:40	Messerkopfstirnfräsen	MMS (Esteröl)	eA
7	20.04.2005	09:53 bis 10:59	Außenlängsdrehen	wg-KSS	eA
8	20.04.2005	12:44 bis 13:28 13:58 bis 14:42	Außenlängsdrehen	wg-KSS	fA
9	20.04.2005	16:07 bis 17:35	Außenlängsdrehen	wg-KSS	ZA
10	28.04.2005	08:44 bis 10:13	Außenrundscheifen	nw-KSS (konv. Öl)	fA
11	28.04.2005	10:42 bis 12:11	Außenrundscheifen	nw-KSS (konv. Öl)	eA
12	02.05.2005	10:22 bis 11:50	Außenrundscheifen	nw-KSS (konv. Öl)	ZA
13	09.05.2005	10:44 bis 12:13	Außenrundscheifen	nw-KSS (Esteröl)	eA
14	10.05.2005	09:10 bis 10:38	Außenrundscheifen	nw-KSS (Esteröl)	fA
15	10.05.2005	11:33 bis 13:01	Außenrundscheifen	nw-KSS (Esteröl)	ZA
16	23.05.2005	11:17 bis 12:45	Außenrundscheifen	wg-KSS	ZA
17	23.05.2005	13:58 bis 15:26	Außenrundscheifen	wg-KSS	fA
18	23.05.2005	16:06 bis 17:35	Außenrundscheifen	wg-KSS	eA
19	20.06.2005	10:56 bis 12:25	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (Esteröl)	eA
20	21.06.2005	13:27 bis 14:56	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (Esteröl)	fA
21	21.06.2005	09:05 bis 10:34	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (Esteröl)	ZA
22	21.06.2005	13:19 bis 14:48	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (konv. Öl)	ZA
23	22.06.2005	09:16 bis 10:44	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (konv. Öl)	eA
24	22.06.2005	13:11 bis 14:39	Messerkopfstirnfräsen	nw-KSS (konv. Öl)	fA
25	21.09.2005	9:52 bis 11:21	Außenlängsdrehen	MMS (Esteröl)	fA



Tabelle 3: Fortsetzung

Messung	Datum	Uhrzeit	Bearbeitungs- verfahren	Kühlschmierstoff <sup>*)</sup>	Abscheider <sup>**)</sup>
26	21.09.2005	13:45 bis 15:14	Außenlängsdrehen	MMS (Esteröl)	eA
27	22.09.2005	12:43 bis 14:19	Außenlängsdrehen	MMS (Esteröl)	ZA
28	06.10.2005	16:51 bis 18:19	Außenlängsdrehen	nw-KSS (Esteröl)	ZA
29	07.10.2005	09:56 bis 11:25	Außenlängsdrehen	nw-KSS (Esteröl)	eA
30	07.10.2005	13:04 bis 14:32	Außenlängsdrehen	nw-KSS (Esteröl)	fA
31	17.10.2005	10:45 bis 12:14	Außenlängsdrehen	nw-KSS (konv. Öl)	fA
32	17.10.2005	13:57 bis 14:34 14:57 bis 15:33	Außenlängsdrehen	nw-KSS (konv. Öl)	eA
33	18.10.2005	12:52 bis 14:21	Außenlängsdrehen	nw-KSS (konv. Öl)	ZA

<sup>\*)</sup> wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;  
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

<sup>\*\*)</sup> eA = elektrostatischer Abscheider; fA = filternder Abscheider; ZA = Zentrifugalabscheider

Ziel dieser Untersuchungen war es nicht, Abscheider auf ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen, vielmehr sollten Kenndaten zur Entwicklung des Prüfstandes erhalten werden.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen wurden mit dem FID geringe Konzentrationen im Reingas nachgewiesen. Als Ursache wird vermutet, dass aus den Oberflächenbeschichtungen der Abscheider Lösungsmittel ausdampfen. Nach zwei bis drei Versuchen sanken die Konzentrationen.

Zwischen den Versuchen 12 und 13 (siehe Tabelle 3) wurde eine Pause eingelegt, da die Ergebnisse in Versuch 13 durch abgeschiedene nw-KSS (konv. Öl) verfälscht wurden. Erst nach längerer Laufzeit des Abscheiders mit unbelasteter Hallenluft sowie einer gründlichen Reinigung der Messsysteme wurden die Versuche fortgeführt.

### 3.4 Ergebnisse der Untersuchungen

Da der Schwerpunkt der Untersuchungen im WZL auf der Bestimmung von Emissionswerten lag, werden im Folgenden hauptsächlich die Rohgaswerte betrachtet.



### 3.4.1 Gesamtemission bezogen auf die Masse

Untersucht wurden die drei beispielhaften Tätigkeiten Stirnkopffräsen, Außenlängsdrehen und Außenrundscheifen. In Tabelle 4 sind die Messergebnisse für das Rohgas jeweils als Mittelwerte aus den Messungen mit den drei verschiedenen Abscheidern dargestellt.

Tabelle 4:  
Übersicht über die Messergebnisse im Rohgas

Bearbeitungsverfahren	Kühlschmierstoff <sup>*)</sup>	IPS-PD			FID in mg C/m <sup>3</sup>	Partikelmessung (Pallas)	
		Gesamt in mg/m <sup>3</sup>	Aerosol in mg/m <sup>3</sup>	Dampf in mg/m <sup>3</sup>		Anzahl in P/cm <sup>3</sup>	Masse in mg/m <sup>3</sup>
Stirnkopffräsen	MMS	15,5	10,0	5,5	1,3	86 110	4,3
	wg-KSS	6,6	2,5	4,1	3,5	20 167	8,9
	nw-KSS (konv. Öl)	51,6	27,1	24,4	14,2	78 563	20,8
	nw-KSS (Esteröl)	22,6	11,7	10,9	8,2	85 052	9,0
Außenlängsdrehen	MMS	5,7	3,7	2,0	1,9	13 937	0,7
	wg-KSS	13,9	3,5	10,4	3,1	22 916	12,6
	nw-KSS (konv. Öl)	81,3	60,8	20,5	17,6	103 742	46,6
	nw-KSS (Esteröl)	26,6	14,3	12,4	7,7	94 677	11,3
Außenrundscheifen	wg-KSS	48,4	31,1	17,4	4,6	42 559	97,1
	nw-KSS (konv. Öl)	221,3	191,3	30,0	24,4	280 461	126,5
	nw-KSS (Esteröl)	163,3	146,7	16,6	10,0	132 109	85,6

<sup>\*)</sup> wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;  
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

In den Abbildungen 17 und 18 (siehe Seite 55) sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Bezogen auf die verschiedenen Bearbeitungsverfahren wurden die höchsten Konzentrationen sowohl für die „Aerosolphase“ als auch für die „Dampfphase“ beim Einsatz nicht wassermischbarer konventioneller KSS gefunden. Die niedrigsten Konzentrationen wurden bei der Verwendung wassergemischter KSS bzw. bei der Minimalmengenschmierung (MMS) gemessen, obwohl dort die Bearbeitung mit stärker emissionsfördernden Parametern durchgeführt wurde (vgl. [1]).



Abbildung 17:  
Konzentration an Kühlschmierstoffaerosolen versus Partikelmasse

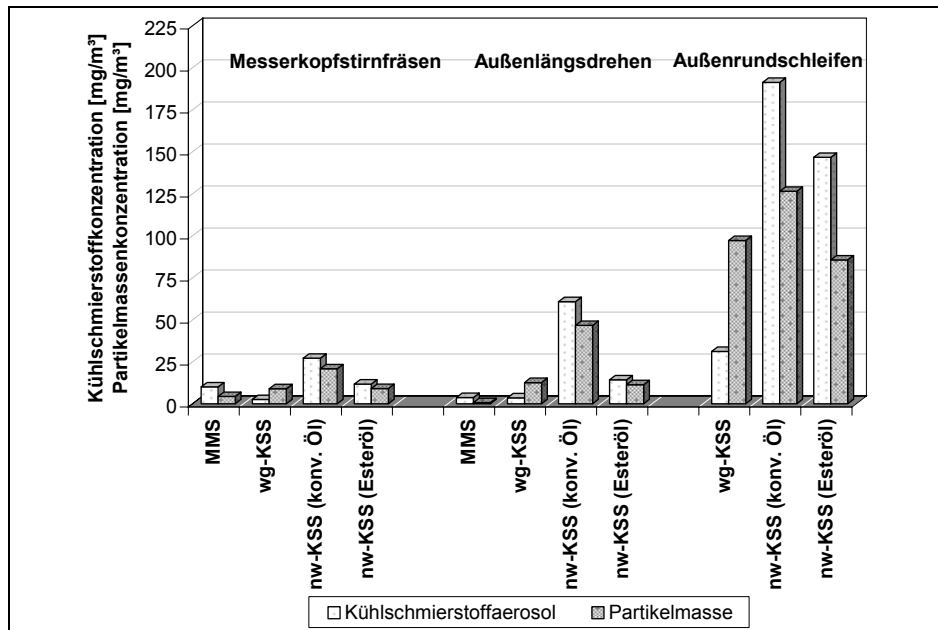
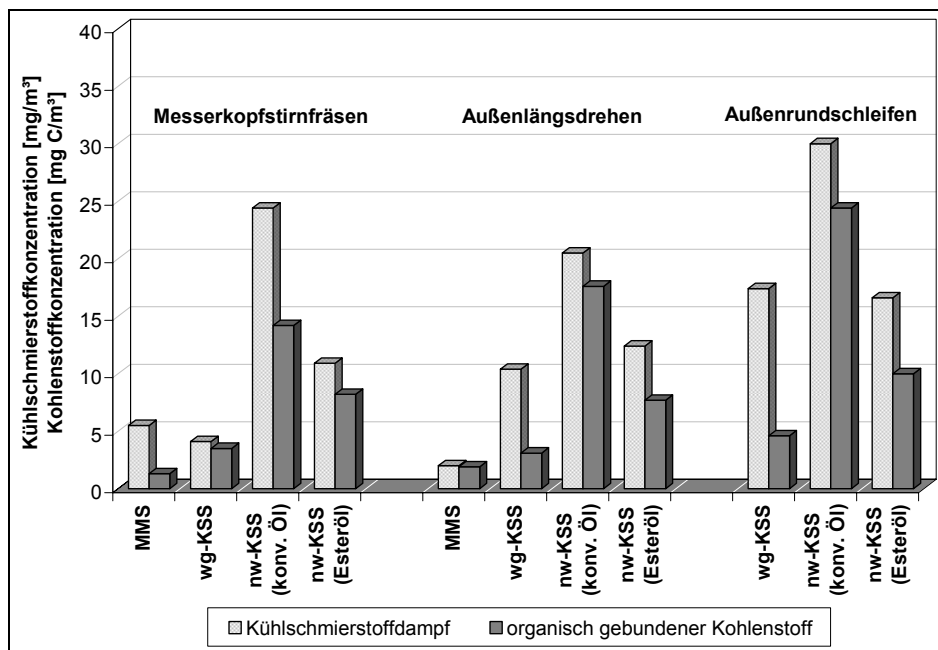


Abbildung 18:  
Konzentration an Kühlschmierstoffdampf versus Masse an organischem Kohlenstoff



Beim Vergleich der Abbildungen 17 und 18 erkennt man, dass bei höheren Gesamtemissionen der Aerosolanteil gegenüber dem Dampfanteil überproportional ansteigt.



Die mit dem IPS-PD-System ermittelten Konzentrationen sind im Vergleich zu den übrigen Messverfahren durchweg am höchsten. Eine Ausnahme bildet lediglich die Partikelmassenkonzentration beim Einsatz wassergemischter KSS (siehe Abbildung 17). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Partikelmessung nicht zwischen Wasseraerosolen und KSS-Aerosolen unterschieden werden kann. Aus den Gesamtemissionen und dem Absaugvolumenstrom kann die Emissionsrate pro Prozess und eingesetztem KSS berechnet werden (siehe Abbildungen 19 bis 21).

Vergleicht man die Emissionsraten beim Messerkopfstirnfräsen und beim Außenrundschleifen – jeweils bei zwei verschiedenen Absaugvolumenstrombereichen –, kann festgestellt werden, dass die Erhöhung des Absaugvolumenstroms keine Erhöhung der Emissionsrate zur Folge hat. Beim Außenlängsdrehen war die Differenz der Absaugvolumenströme zwischen den Messungen so gering, dass eine Differenzierung nicht sinnvoll ist.

Abbildung 19:  
Kühlschmierstoffemissionsrate beim Messerkopfstirnfräsen

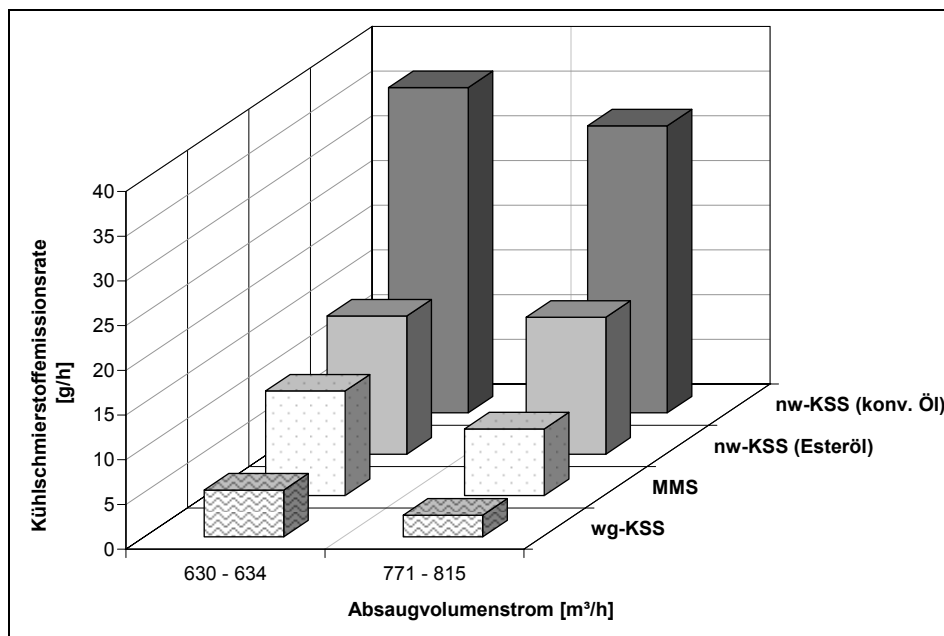






Abbildung 20:  
Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenlängsdrehen

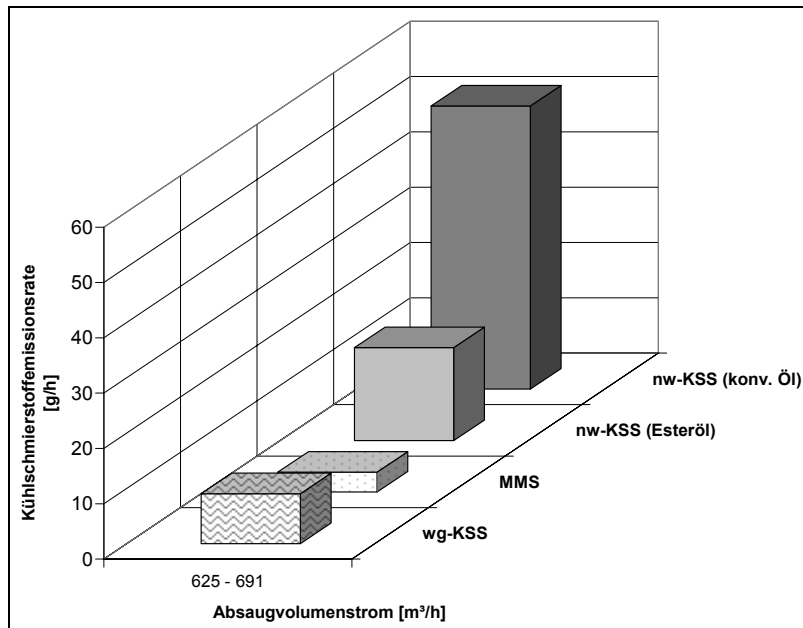
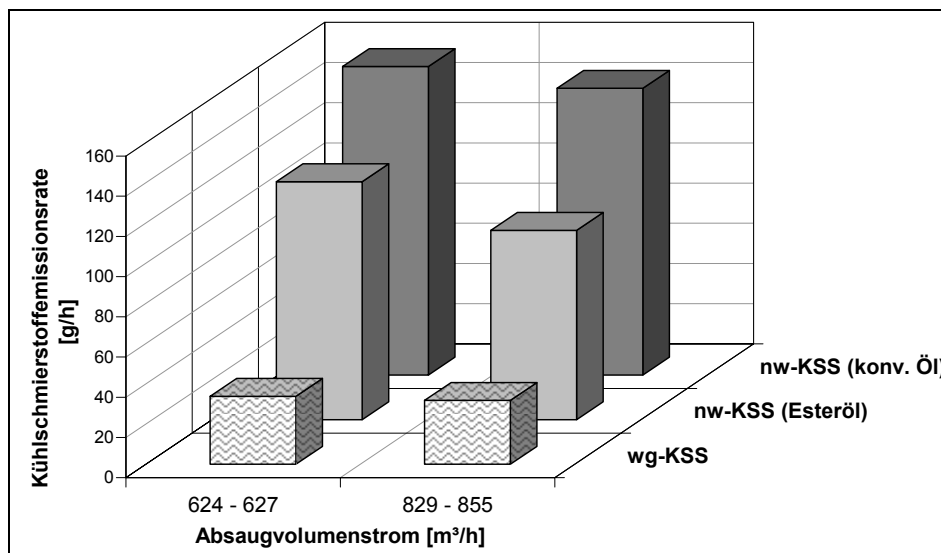


Abbildung 21:  
Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenrundspleifen



### 3.4.2 Partikelverteilung

In den Tabellen 5 und 6 (siehe Seite 58) sind die Partikelverteilungen im Rohgas bezogen auf deren Anzahl und bezogen auf die Masse zusammengestellt.



Tabelle 5:  
Partikelverteilung bezogen auf die Partikelanzahl

Tätigkeit	Kühlschmierstoff <sup>*)</sup>	Partikelkonzentration in P/cm <sup>3</sup>	Perzentile der Partikeldurchmesser in µm				
			10.	16.	50.	84.	90.
Stirnkopf- fräsen	MMS	86 110	0,24	0,25	0,30	0,42	0,51
	wg-KSS	20 167	0,47	0,54	1,17	3,27	4,04
	nw-KSS (konv. Öl)	78 563	0,26	0,28	0,40	0,74	0,89
	nw-KSS (Esteröl)	85 052	0,25	0,26	0,35	0,60	0,71
Außenlängs- drehen	MMS	13 937	0,24	0,25	0,29	0,42	0,50
	wg-KSS	22 916	0,42	0,44	0,52	0,79	1,00
	nw-KSS (konv. Öl)	103 742	0,28	0,30	0,51	0,95	1,16
	nw-KSS (Esteröl)	94 677	0,25	0,26	0,33	0,60	0,72
Außenrund- schleifen	wg-KSS	42 559	0,45	0,47	0,62	1,31	1,63
	nw-KSS (konv. Öl)	280 461	0,25	0,27	0,33	0,65	0,82
	nw-KSS (Esteröl)	132 109	0,23	0,24	0,28	0,39	0,53

<sup>\*)</sup> wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;  
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

Tabelle 6:  
Partikelverteilung bezogen auf die Masse

Tätigkeit	Kühlschmierstoff <sup>*)</sup>	Partikelkonzentration in mg/m <sup>3</sup>	Perzentile der Partikeldurchmesser in µm				
			10.	16.	50.	84.	90.
Stirnkopf- fräsen	MMS	4,3	0,30	0,32	0,73	1,73	2,28
	wg-KSS	8,9	0,57	0,75	2,28	7,65	9,42
	nw-KSS (konv. Öl)	20,8	0,60	0,74	1,53	3,48	4,08
	nw-KSS (Esteröl)	9,0	0,41	0,49	0,88	1,60	1,93
Außenlängs- drehen	MMS	0,7	0,29	0,32	0,70	1,70	2,16
	wg-KSS	12,6	0,62	0,93	2,48	7,48	9,09
	nw-KSS (konv. Öl)	46,6	0,74	0,90	1,65	3,12	3,58
	nw-KSS (Esteröl)	11,3	0,43	0,53	1,04	1,84	2,15
Außenrund- schleifen	wg-KSS	97,1	1,40	1,77	4,84	8,65	9,70
	nw-KSS (konv. Öl)	126,5	0,87	1,19	3,63	6,17	6,94
	nw-KSS (Esteröl)	85,6	1,87	2,45	4,56	6,64	7,37

<sup>\*)</sup> wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;  
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl



Zur Veranschaulichung sind die Summenhäufigkeitsverteilungen für die einzelnen Bearbeitungsverfahren in den Abbildungen 22 bis 27 dargestellt. Die Verteilungen weichen nicht sehr stark voneinander ab, obwohl große Unterschiede in der Gesamtanzahl bestehen. 90 % aller Partikeln sind kleiner als 1  $\mu\text{m}$ .

Eine Ausnahme bildet lediglich das Außenrundschleifen beim Einsatz eines wassergemischten KSS. Generell entstehen bei der MMS sehr kleine Partikeln während beim Einsatz wassergemischter KSS die größten Partikeln entstehen.

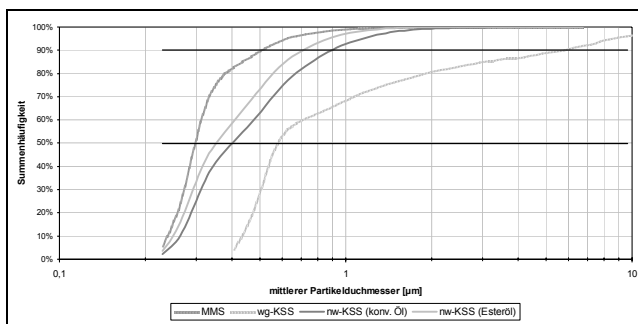


Abbildung 22:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Partikelanzahl  
beim Messerkopfstirnfressen

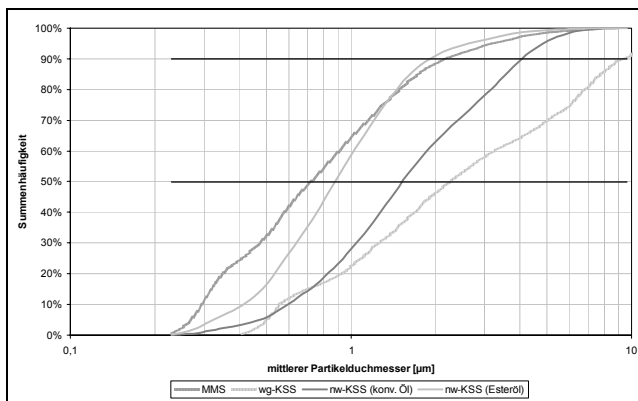


Abbildung 23:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Masse beim  
Messerkopfstirnfressen

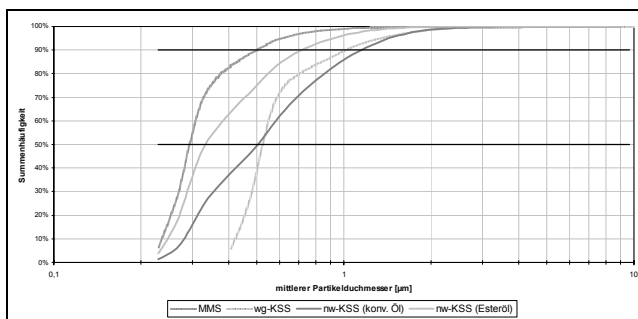


Abbildung 24:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Partikelanzahl  
beim Außenlängsdrehen

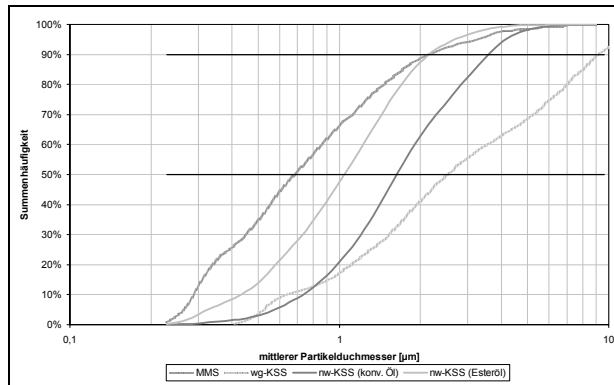


Abbildung 25:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Masse beim  
Außenlängsdrehen

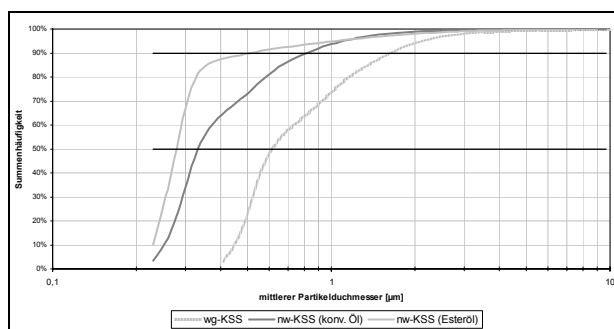


Abbildung 26:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Partikelanzahl  
beim Außenrundscheifen

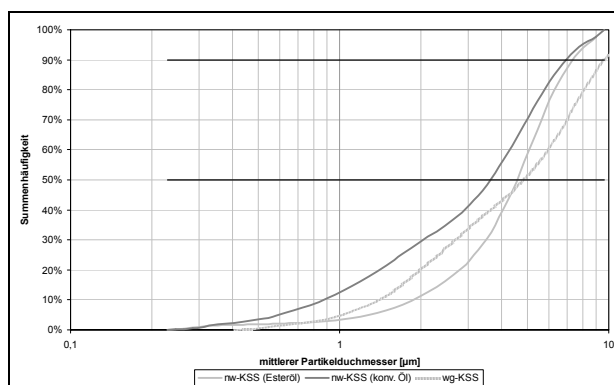


Abbildung 27:  
Summenhäufigkeitsverteilung  
bezogen auf die Masse beim  
Außenrundscheifen

Beim Messerkopfstirnfräsen und Außenlängsdrehen wurden jeweils die zwei Bearbeitungsarten „Schruppen“ und „Schlichten“ in einer Messung zusammengefasst. Mithilfe der kontinuierlichen Messverfahren der Partikelmessung und der Messung mit dem FID können diese Bearbeitungsarten einzeln untersucht werden. Am Beispiel des Außenlängsdrehens unter Einsatz eines wassergemischten KSS ist dazu in Abbildung 28 (Seite 61) die Gesamtpartikelanzahl über die Zeit aufgetragen. Zwischen dem Schrupp- und Schlichtvorgang schwankt die Partikelanzahl um einen Faktor von 3 bis 7. Um erkennen zu können, ob auch in der Partikelverteilung eine Veränderung



stattfindet, sind zu den in Abbildung 28 hervorgehobenen Messpunkten die Summenhäufigkeitsverteilungen in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 28:  
Gesamtpartikelanzahl im Roh- und Reingas beim Außenlängsdrehen

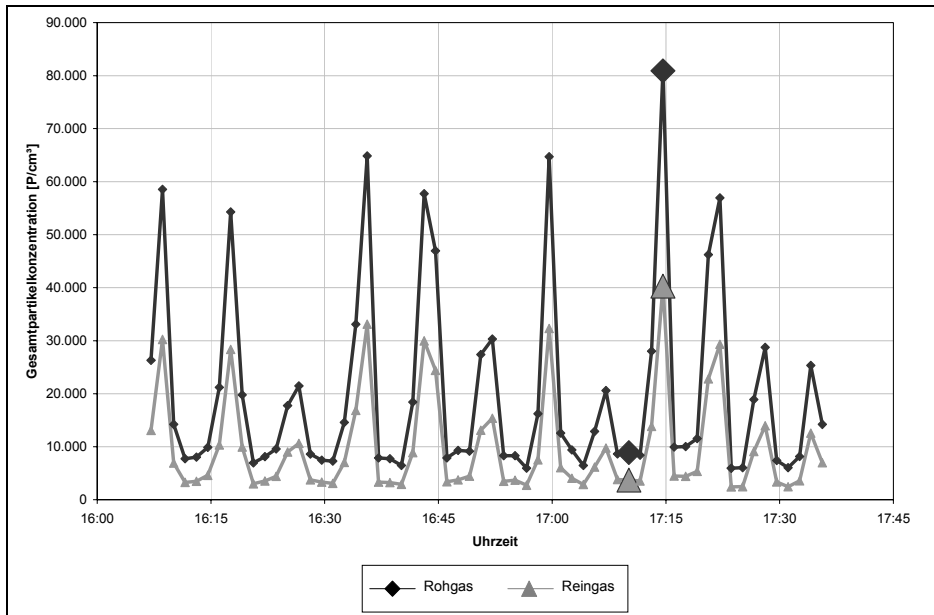
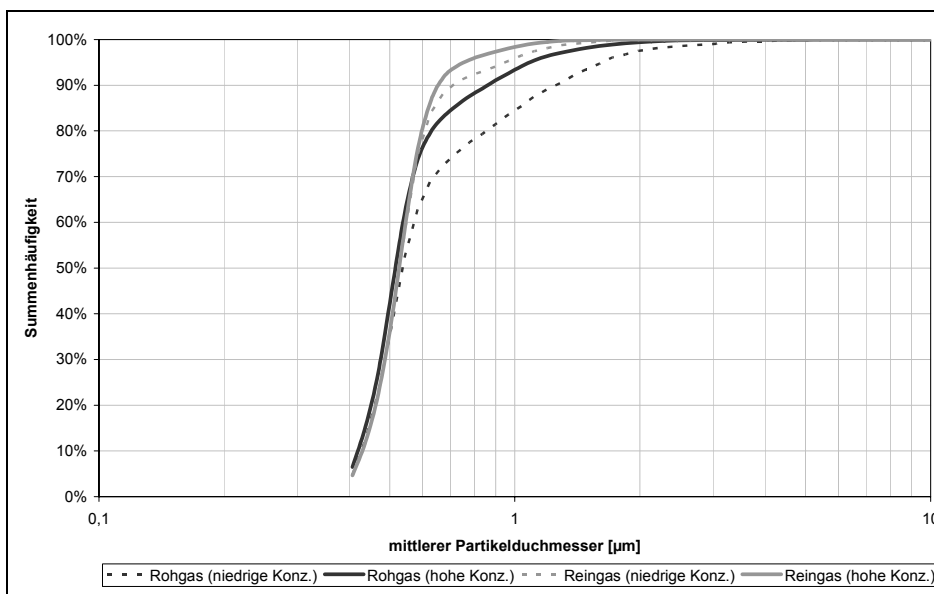


Abbildung 29:  
Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitsverteilungen für das Schlichten und Schruppen beim Außenlängsdrehen





Im Wesentlichen liegt demnach eine gleichartige Verteilung vor. Lediglich im Bereich zwischen 0,5 und 1,5  $\mu\text{m}$  lassen sich geringe Abweichungen erkennen. Schrupp- und Schlichtvorgänge unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der emittierten Partikel.

Zur Überprüfung der Partikelmessgeräte und um abzuklären, ob im Bereich unterhalb von 0,2  $\mu\text{m}$  weitere Partikel vorhanden sind, wurden beim Außenlängsdrehen zusätzlich Messungen mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) durchgeführt. In Tabelle 7 sind beispielhaft zwei Ergebnisse gegenübergestellt, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Bearbeitungsparameter nicht gleich sind (siehe Beitrag auf Seite 19). Die Ergebnisse zeigen, dass noch eine erhebliche Anzahl an Partikeln unterhalb der Messbereichsgrenze des optischen Partikelzählers von 0,2  $\mu\text{m}$  vorhanden sein kann. Bei der konventionellen Bearbeitung liegt allerdings die mit dem SMPS gemessene Massenkonzentration nur bei ca. 10 %. Bei der MMS sind die Verhältnisse deutlich anders: Da es sich hierbei nur um erste Einzelergebnisse handelt, ist eine weitere Ermittlung der Verhältnisse notwendig.

Tabelle 7:  
Gegenüberstellung der Ergebnisse für das Außenlängsdrehen

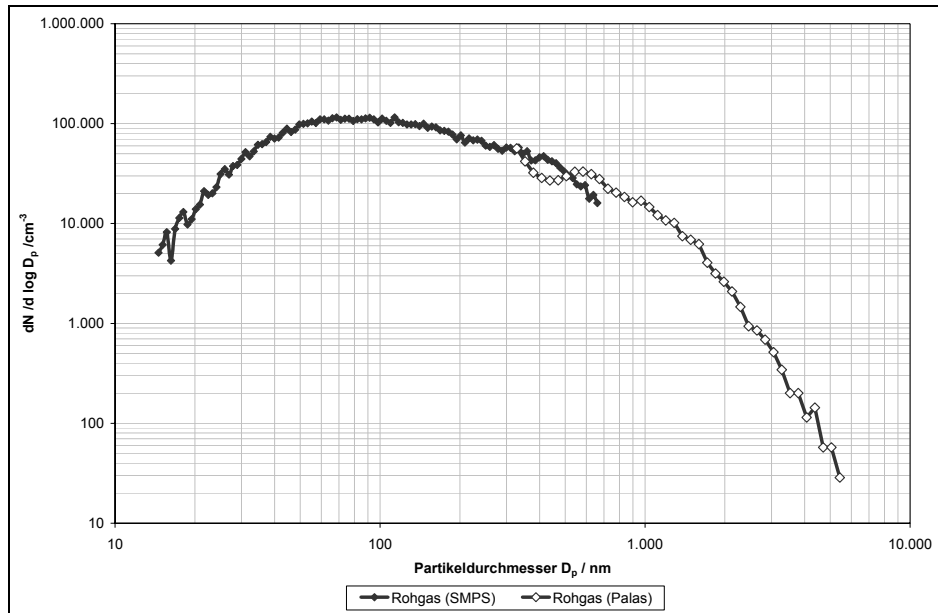
Parameter		Optischer Partikelzähler	SMPS
Untere Messbereichsgrenze in nm		220	14,6
Obere Messbereichsgrenze in nm		10 000	661,2
MMS	Gesamtpartikelkonzentration in P/cm <sup>3</sup>	11 131	4 309 110
	Gesamtmassenkonzentration in mg/m <sup>3</sup>	0,414	1,816
nw-KSS (konv. Öl)	Gesamtpartikelkonzentration in P/cm <sup>3</sup>	35 042	112 802
	Gesamtmassenkonzentration in mg/m <sup>3</sup>	11,46	1,03

nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff; MMS = Minimalmengenschmierung

In Abbildung 30 (Seite 63) sind die Partikelverteilungen, die mithilfe der beiden unterschiedlichen Messverfahren für das Außenlängsdrehen unter Einsatz eines nicht wassermischbaren KSS ermittelt wurden, grafisch dargestellt. Dabei wurden die ersten fünf Messkanäle des optischen Partikelzählers nicht berücksichtigt, da diese bekanntermaßen mit einem geringeren Zählwirkungsgrad verbunden sind.



Abbildung 30:  
Partikelverteilung beim Außenlängsdrehen unter Einsatz eines nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffes



### 3.4.3 Temperatur und Luftfeuchte

Parallel zu den oben aufgeführten Messungen wurden Temperatur und Luftfeuchte sowohl in der Halle als auch im Rohgaseingang und im Reingasausgang messtechnisch erfasst. Durch das Bearbeitungsverfahren und die von den Abscheidern eingebrachte Leistung wird die Temperatur der abgesaugten Luft erhöht. Die Temperaturerhöhung durch das Bearbeitungsverfahren wurde aus der Differenz der Rohgastemperatur zu Beginn und zum Ende der Bearbeitung bestimmt. Die Temperaturerhöhung durch die Abscheider wurde aus der Differenz zwischen Roh- und Reingastemperatur bestimmt. In den Tabellen 8 und 9 (siehe Seite 64) sind die Mittelwerte, berechnet aus allen Versuchen, bezogen auf den verwendeten KSS bzw. auf den eingesetzten Abscheider aufgeführt.

In Abbildung 31 (Seite 64) ist für die Minimalmengenschmierung der Temperaturverlauf in der Hallenluft, im Rohgas und Reingas beispielhaft dargestellt. Deutlich wird hier der Anstieg der Temperatur durch das Bearbeitungsverfahren erkennbar. Die



Wellenform wird durch die unterschiedliche Bearbeitungsschwere beim Schruppen und beim Schlichten hervorgerufen.

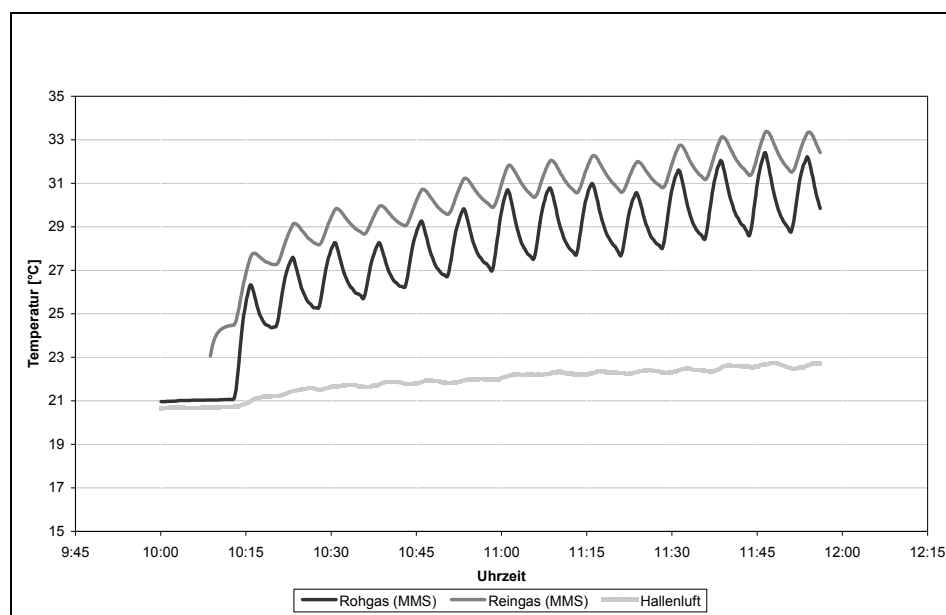
Tabelle 8:  
Mittelwerte der Temperaturerhöhung in Abhängigkeit vom verwendeten Kühlschmierstoff

Kühlschmierstofftyp	Temperaturerhöhung in °C
Minimalmengenschmierung	9,4
wassergemischter Kühlschmierstoff	1,7
nicht wassermischbarer Kühlschmierstoff (konventionelles Mineralöl)	2,7
nicht wassermischbarer Kühlschmierstoff (Esteröl)	2,5

Tabelle 9:  
Mittelwerte der Temperaturerhöhung in Abhängigkeit vom verwendeten Abscheider

Abscheidertyp	Temperaturerhöhung in °C
Elektrostatischer Abscheider	1,8
Filternder Abscheider	2,5
Zentrifugalabscheider	3,0

Abbildung 31:  
Temperaturverlauf am Beispiel der Minimalmengenschmierung



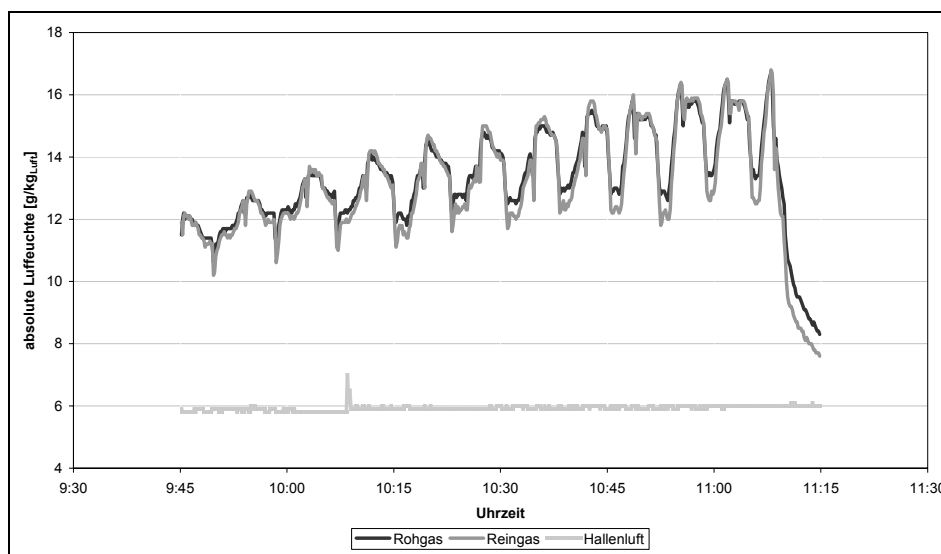




Außerdem ist ein kontinuierlicher Anstieg der Temperatur bis zum Ende der Bearbeitung festzustellen. Bei einer längeren Bearbeitungszeit wäre die Temperatur noch weiter angestiegen, die Messungen wurden also nicht im Gleichgewichtszustand durchgeführt. Dies könnte Auswirkungen auf das thermodynamische Gleichgewicht der Verteilung zwischen KSS-Aerosol und KSS-Dampf haben (siehe auch Beitrag auf Seite 71).

Parallel zu den Temperaturmessungen wurde die Luftfeuchte registriert, wobei lediglich die Ergebnisse beim Einsatz von wassergemischten KSS von Interesse sind. Am Beispiel des Außenlängsdrehens ist der Verlauf der absoluten Luftfeuchte in Abbildung 32 dargestellt.

Abbildung 32:  
Verlauf der absoluten Luftfeuchte beim Außenlängsdrehen

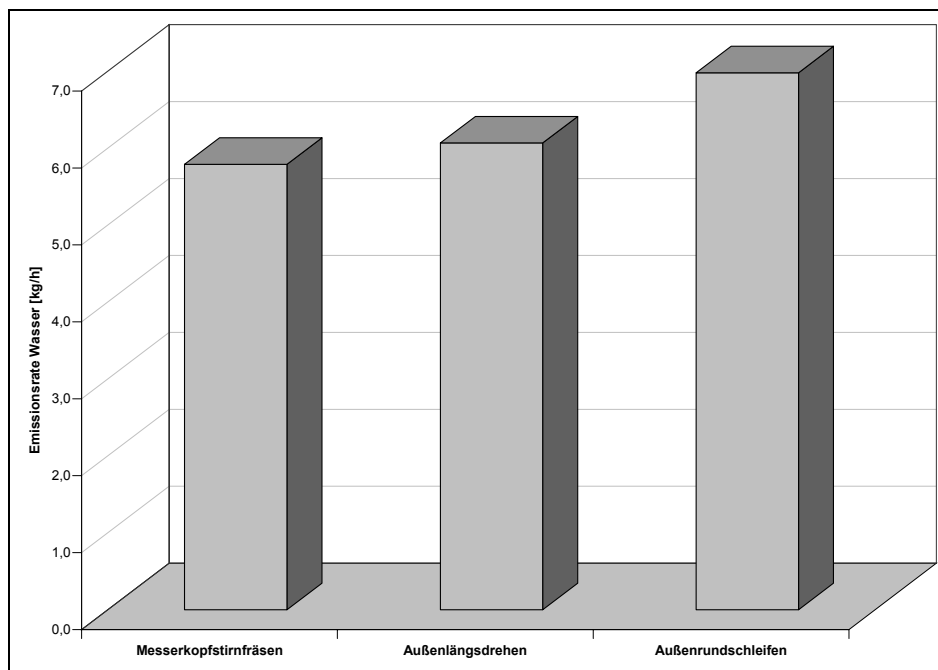


Die Verläufe der absoluten Luftfeuchte im Rohgas und im Reingas sind nahezu identisch. Die relative Luftfeuchte entspricht unter den vorliegenden Bedingungen während der Bearbeitung ungefähr 80 %. Bei den Versuchen konnte festgestellt werden, dass die KSS-Zufuhr unabhängig vom Bearbeitungsverfahren eine relative Luftfeuchte von ungefähr 70 % zur Folge hat.



Aus der Differenz zwischen der Feuchte der Hallenluft und derjenigen der abgesaugten Luft und unter Berücksichtigung des Absaugvolumenstroms wurde die Wasserdampfemissionsrate pro Maschine für die unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren berechnet (Abbildung 33). Im Vergleich zu den Emissionsraten der KSS (siehe Abbildungen 19 bis 21) ist die Emissionsrate für Wasser erheblich höher.

Abbildung 33:  
Emissionsraten in Abhängigkeit vom Bearbeitungsverfahren bei einem Absaugvolumenstrom von 618 bis 815 m<sup>3</sup>/h



Die relative Luftfeuchte im Absaugvolumenstrom lag während der Bearbeitung in der Regel bei mehr als 90 %. Daher reicht schon eine geringe Temperaturabkühlung an Oberflächen aus, damit Wasserdampf auskondensiert. Hierdurch können Probleme bei der Abscheidung auftreten.

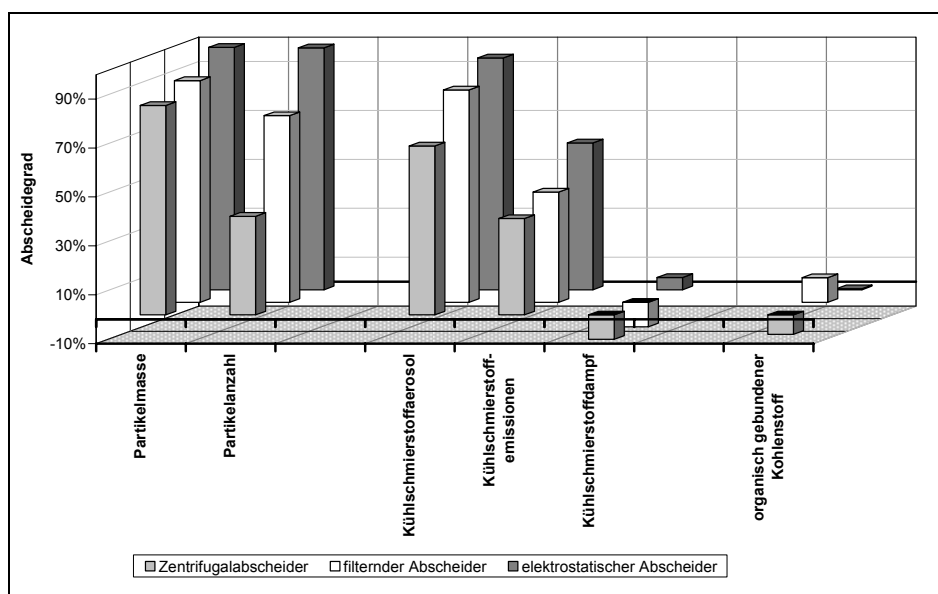
#### 3.4.4 Abscheidegrade der eingesetzten Abscheider

Alle errechneten Abscheidegrade dienen der Konzipierung des Entwicklungsprüfstandes sowie der Auswahl und Verifikation der Messverfahren und sind keinesfalls als Leistungsbewertung der eingesetzten Abscheider anzusehen. Darüber hinaus muss



man berücksichtigen, dass die Abscheider nur in einem Betriebszustand und ohne Voralterung eingesetzt wurden. In Abbildung 34 sind die Abscheidegrade – als Mittelwerte aller Messungen mit dem jeweiligen Abscheider – für unterschiedliche Parameter dargestellt. Bei einer Einzelbetrachtung der Abscheidegrade sind in Bezug auf die eingesetzten KSS deutliche Abweichungen möglich.

Abbildung 34:  
Abscheidegrade in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter



Eine Differenzierung zwischen den Abscheidern ist durch einen Vergleich sowohl der Feinstaerosolkonzentration als auch der Dampfphase möglich. Im Gegensatz dazu sind für die Partikelmassen und die mit dem IPS-PD-System ermittelten Gesamtkühlschmierstoffkonzentration nur geringe Unterschiede zu finden. Die Ursache dafür ist, dass sowohl der Zentrifugalabscheider als auch der filternde Abscheider kleine Partikeln im Wesentlichen passieren lassen, während der elektrostatische Abscheider sie unter den vorgegebenen Randbedingungen noch abscheiden kann. Er ist allerdings für einzelne größere Partikeln passierbar.

Eine Abscheidung des KSS-Dampfes konnte bei keinem der verwendeten Abscheider nachgewiesen werden. Sowohl der in Abbildung 34 dokumentierte positive als auch negative Abscheidegrad für den KSS-Dampf beruht auf thermodynamischen Effekten



in den Abscheidern und Probenahmesystemen. Aufgrund der großen Oberflächen im filternden Abscheider und auch im Zentrifugalabscheider verschiebt sich das KSS-Aerosol-Dampf-Verhältnis in Richtung der höheren Gleichgewichtsdampfkonzentration, sodass die KSS-Dampfkonzentration im Reingas rechnerisch höher ist als im Rohgas. Durch die optimierten Abscheidebedingungen beim Einsatz des elektrostatischen Abscheiders ist eine sehr gute Aerosolabscheidung gegeben, sodass hinter dem Abscheider im Reingas nur noch sehr wenige Aerosole vorhanden sind, die die KSS-Dampfkonzentration erhöhen können und dadurch scheinbar eine KSS-Dampfabscheidung bewirken.

### 3.5 Ausblick

Basierend auf den umfangreichen Messdaten und den Erfahrungen aus den Untersuchungen im WZL wird zurzeit im BGIA ein Prüfstand für KSS-Abscheider aufgebaut. Prinzipiell sind Untersuchungen mit zwei KSS-Typen vorgesehen. Zunächst wird man sich auf den Einsatz nicht wassermischbarer KSS beschränken, da deren thermodynamische Verhältnisse am besten überschaubar sind. In einem weiteren Schritt sollen die Untersuchungen auf wassergemischte KSS erweitert werden.

Die zurzeit durchgeführten Arbeiten am Prüfstand beziehen sich zum einen auf die Realisierung der technischen Voraussetzungen und zum anderen auf die Verifikation der Messverfahren. Parallel zu den Aufbauarbeiten des Prüfstandes finden in Fachkreisen der Berufsgenossenschaften und im VDMA Gespräche über die Entwicklung einer Prüfnorm statt. Wesentliche Diskussionspunkte hierbei sind die

- zur Beurteilung heranzuziehenden Messgrößen und Einstellparameter,
- Durchführung der Prüfung und
- die Voralterung der eingesetzten Abscheider.



### 3.6 Literatur

- [1] Isokinetisches Probenahmesystem (IPS) zur Messung der Konzentrationen partikel- und dampfförmiger Stoffe in strömender Luft durch Teilstromentnahme (Kennzahl 3110). In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 12. Lfg. IV/94. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg.  
[www.bgia-arbeitsmappedigital.de/3110](http://www.bgia-arbeitsmappedigital.de/3110)
  
- [2] Kühlschmierstoffe (Kennzahl 7750). In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 19. Lfg. XI/97. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg.  
[www.bgia-arbeitsmappedigital.de/7750](http://www.bgia-arbeitsmappedigital.de/7750)
  
- [3] VDI 2066-1: Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen. Blatt 1: Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung (10.75). Beuth, Berlin 1975
  
- [4] VDI 2066-2: Messen von Partikeln – Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen. Blatt 2: Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung – Filterkopfggeräte (4 m<sup>3</sup>/h, 12 m<sup>3</sup>/h) (08.93). Beuth, Berlin 1993
  
- [5] DIN EN 779: Partikel-Luffilter für die allgemeine Raumluftechnik – Bestimmung der Filterleistung (05.03). Beuth, Berlin 2003





## 4 Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Charakterisierung von Kühlschmierstoffabscheidern

D. Nagel, K. Schaber,  
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe

### 4.1 Einleitung

Kühlschmierstoffaerosole sind feinste Tropfen in einem Trägergas, das auch dampfförmige Komponenten enthält, sodass von einer Dampf- und einer Tropfenphase des Kühlschmierstoffs (KSS) gesprochen werden kann. An Wänden und auf Filterfasern kann sich eine zusätzliche flüssige Phase des KSS befinden. Der Stoffaustausch zwischen den Phasen kann sowohl die Charakterisierung als auch die Abscheidung von Ölnebeln erheblich erschweren. So passiert die Dampfphase herkömmliche Aerosolabscheider weitgehend ungehindert.

Ziel des Projekts „Modellierung und Simulation von Partikelgrößenänderungen aufgrund thermodynamischer Effekte“ ist, durch Simulationsrechnungen mit AerSolve ein Gesamtverständnis des Systems und eine Bewertung der Verdunstungseinflüsse auf die Messungen von Partikeln und Dampf zu erreichen. Das Simulationsprogramm AerSolve (Aerosol Solver) wurde am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe zur Berechnung des Verhaltens von KSS-Aerosolen entwickelt [1].

Die Ergebnisse der Berechnungen dienen sowohl der Interpretation der Messungen im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen als auch der Konzeption des geplanten Entwicklungsprüfstands am Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BGIA. Im ersten Projektteil werden nicht wassermischbare KSS behandelt, im zweiten Teil wassergemischte KSS. Im Folgenden werden Zwischenergebnisse des ersten Projektteils vorgestellt.

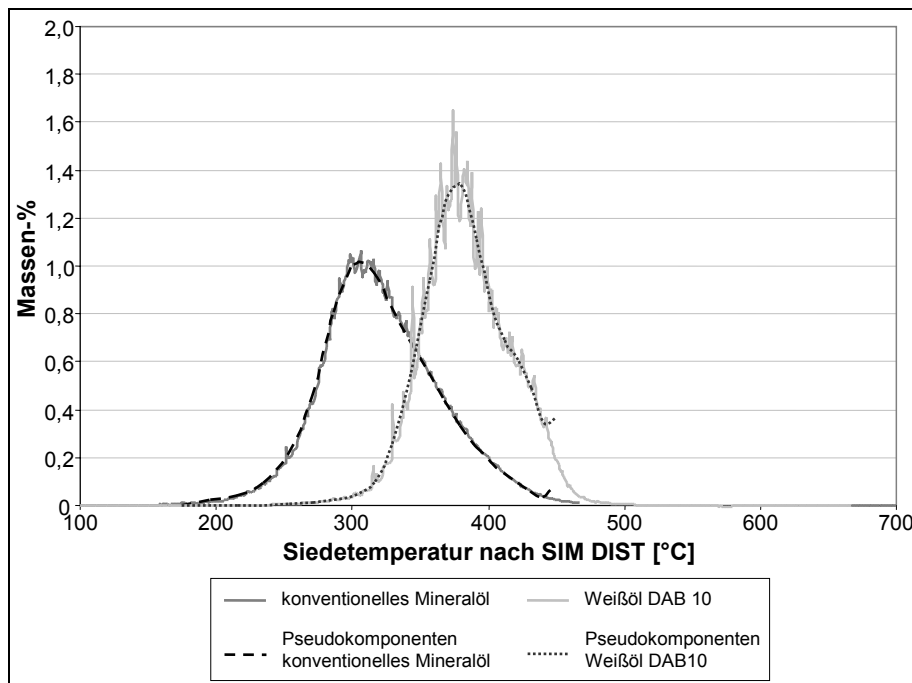


## 4.2 Modellierung der Kühlschmierstoffzusammensetzung

Mineralöle bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten unbekannter Zusammensetzung. Die Zusammensetzung von drei ausgewählten nicht wassermischbaren KSS (Weißöl, konventionelles Mineralöl und Esteröl) wurde daher mithilfe einer Mischung von Pseudokomponenten auf der Basis von n-Alkanen modelliert. Dafür wurde die homologe Reihe der n-Alkane von Undecan bis Triacontan verwendet. Die Siedefractionen des Öls wurden entsprechend den Siedetemperaturen den jeweiligen n-Alkanen zugeordnet. Die schwerst siedenden Komponenten wurden dem Triacontan zugeordnet, die leichtest siedenden dem Undecan. Die Siedekurven der Öle wurden von der Fa. Fuchs Europe Schmierstoffe zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 1 sind die Siedeverläufe des Weißöls (DAB 10) und des konventionellen Mineralöls sowie der jeweiligen Pseudokomponentenmischungen aufgetragen.

Abbildung 1:  
Siedekurven des Mineralöls, des Weißöls und der Pseudokomponenten (n-Alkane)



Die Komponenten, deren Siedetemperatur höher als 350 °C ist, haben bei Raumtemperatur einen vernachlässigbar kleinen Dampfdruck, der aber bei den Simulations-

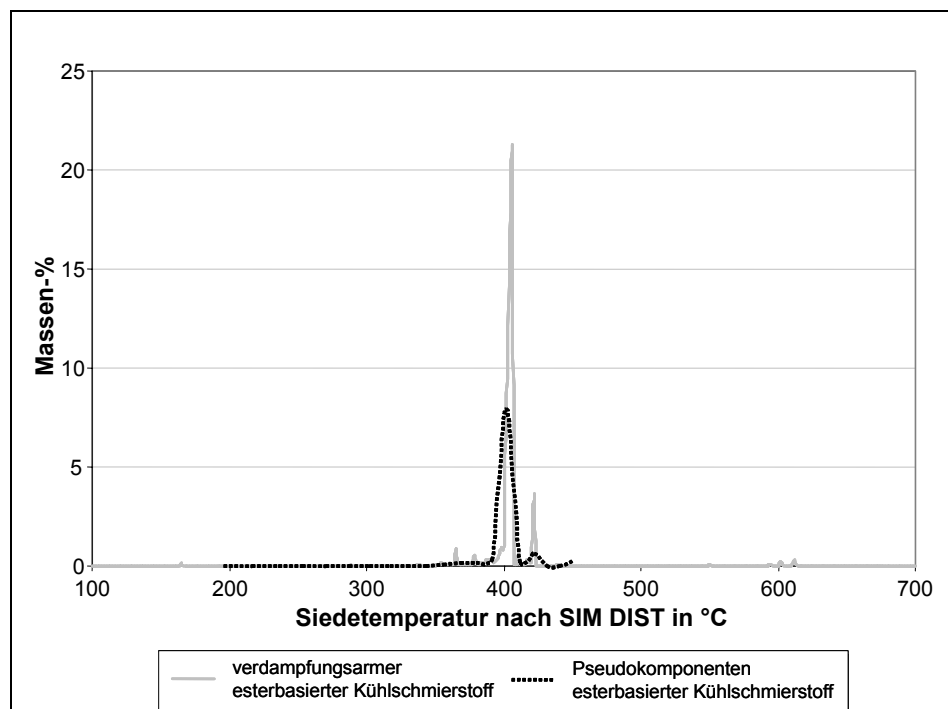




rechnungen berücksichtigt wird. Es ist deutlich zu sehen, dass das Mineralöl wesentlich mehr dampfdruckrelevante Komponenten enthält als das Weißöl.

Der Siedeverlauf des verdampfungsarmen esterbasierten KSS, im Folgenden Esteröl genannt, ist durch scharfe Peaks gekennzeichnet, da es im Wesentlichen aus reinen Komponenten besteht (Abbildung 2). Alle großen Peaks liegen im nicht dampfdruckrelevanten Bereich mit Siedetemperaturen von mehr als 350 °C. Der Dampfdruck des Esters wird daher hauptsächlich von leicht flüchtigen Stoffen mit sehr geringem Molanteil verursacht.

Abbildung 2:  
Siedekurve des Esteröls und der Pseudokomponenten (n-Alkane)



Das Weißöl DAB 10 wurde vorläufig als Referenzöl für die Messungen an dem im Aufbau befindlichen Entwicklungsprüfstand des BGIA ausgewählt, da es einen sehr geringen Dampfdruck besitzt und reproduzierbar herstellbar ist. Das Mineralöl und das Esteröl wurden bei der Messkampagne am WZL in Aachen eingesetzt.



### 4.3 Berechnung der Dampfkonzentrationen

Unter der Annahme eines idealen Mischungsverhaltens der n-Alkane wurde die Dampfkonzentration im thermodynamischen Gleichgewicht einer idealen Gasphase mit einer flüssigen Phase berechnet. Dabei wurde zunächst die – auf der Basis der Siedekurven berechnete – Zusammensetzung der Pseudokomponenten verwendet, ohne Konzentrationsänderungen der Flüssigkeit durch Verdunstungseffekte zu berücksichtigen. Die langkettigen Alkane, deren Aggregatzustand bei der Flüssigkeitstemperatur fest wäre, werden als unterkühlte Flüssigkeiten behandelt. Die Ergebnisse für 25 °C sind in der zweiten Spalte von Tabelle 1 in der Einheit Milligramm Alkan pro Betriebskubikmeter Luft dargestellt.

Tabelle 1:  
Dampfkonzentrationen der Pseudokomponentenmischungen

	Dampfkonzentrationen im thermodynamischen Gleichgewicht bei unveränderter Zusammensetzung der Pseudokomponenten bei 25 °C in mg/m <sup>3</sup>	Dampfkonzentrationen bei Prüfstandsbedingungen mit Aerosolgenerator in mg/m <sup>3</sup>	
		Rohgas <sup>1)</sup> bei 23 °C	Reingas bei 25,5 °C
Mineralöl	69,92	13,56	14,13
Weißöl	5,77	0,58	0,61
Esteröl	27,56	0,84	0,84

<sup>1)</sup> Die Gesamtmenge an KSS im Rohgas beträgt 200 mg/m<sup>3</sup>.

Die Pseudokomponentenmischung des Esteröls hat eine unerwartet hohe Dampfkonzentration. Diese wird fast ausschließlich durch den hohen Dampfdruck der Komponente Undecan verursacht, die aber nur einen Molanteil von 0,8 Mol-% ausmacht.

Je länger kettiger die Alkane sind, desto geringer ist ihr Dampfdruck. Als Faustformel kann man sagen, dass zwei zusätzliche CH<sub>2</sub>-Gruppen eine Verringerung des Dampfdrucks um den Faktor 10 bewirken. Die Dampfkonzentration bei unveränderter Flüssigkeitszusammensetzung hat allerdings für die praktische Anwendung von KSS keine Bedeutung, da sie dem Grenzfall einer kleinen Gasblase in einem großen Flüssigkeitsreservoir entspricht.



In der Praxis befinden sich kleine Flüssigkeitstropfen in einem großen Gasvolumen. Die Zusammensetzung der Flüssigkeit verändert sich durch den Stoffaustausch mit der Gasphase. Die leicht flüchtigen Komponenten reichern sich in der Flüssigphase stark ab, wodurch sich deren Molenbruch und damit auch der Partialdruck im Gemisch verringert. Das Mengenverhältnis von Flüssigkeit zu Trägergas hat daher einen entscheidenden Einfluss auf die Dampfkonzentration.

KSS-Nebel mit breitem Siedeverlauf sind typische Beispiele für Nichtgleichgewichtsaerosole. Bis ein annähernd thermodynamisches Gleichgewicht zwischen der Dampfphase und der Tropfenphase erreicht ist, sind hohe Verweilzeiten nötig. Besonders lange Verweilzeiten bis zum Erreichen eines annähernd thermodynamischen Gleichgewichts mit der Gasphase benötigen große Tropfen, da ihr Volumen im Vergleich zur Stoffaustauschfläche groß ist. Sie können daher vermehrt Leichtsieder enthalten, die über einen langen Zeitraum hinweg in die Gasphase emittieren. Um reale Dampfkonzentrationen berechnen zu können, muss deshalb der gesamte Prozess von der Aerosolentstehung bis zur Messung modelliert werden. Eine Simulationsrechnung für typische Prüfstandsbedingungen ist in Abschnitt 4.5.2 beschrieben.

In Tabelle 1 sind die berechneten Dampfkonzentrationen im Roh- und im Reingas eines Prüfstands dargestellt, in dem gezielt ein Aerosol mit einem volumetrisch gemittelten Tropfendurchmesser von 700 nm und einer Gesamtmenge von 200 mg KSS pro Betriebskubikmeter Luft erzeugt wird. Bei diesen Prozessbedingungen besitzt nur das Mineralöl eine nennenswerte Dampfkonzentration. Die Dampfkonzentrationen des Esteröls und des Weißöls sind kleiner als  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Die Bandbreite der Prozessbedingungen in Werkzeugmaschinen ist groß: Einerseits können sehr kleine Flüssigkeitsvolumenströme vernebelt werden, wie z. B. 10 ml/h bei der Minimalmengenschmierung, andererseits können große Flüssigkeitsvolumenströme, z. B. 100 l/min, zum Einsatz kommen, von denen aber nur ein geringer Teil als Nebel in die Absaugeinrichtung gelangt. Auch die nicht vernebelte Flüssigkeit steht im Stoffaustausch mit der Gasphase und kann zur Erhöhung der Dampfkonzentration beitragen, besonders, wenn sie mit heißen Oberflächen in Kontakt kommt.

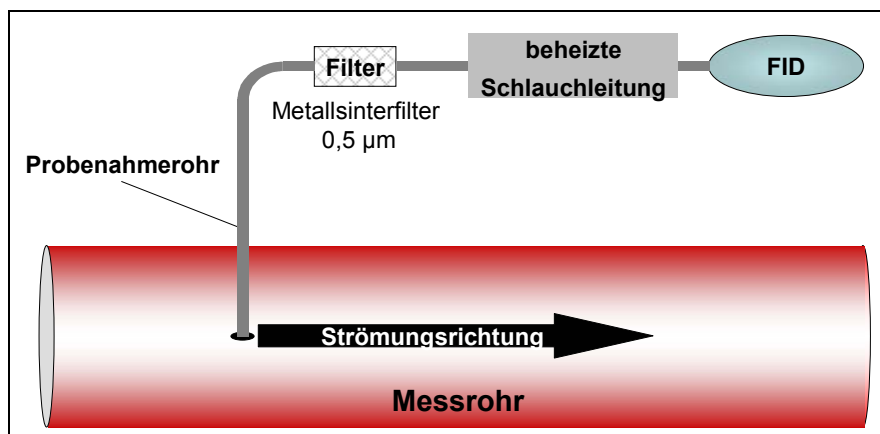


Mit der Zeit verarmt das Flüssigkeitsreservoir der Werkzeugmaschine an Leichtersiedern, sodass sich die Dampfemission verringert. Der Wärme- und Stoffaustausch der nicht vernebelten Flüssigkeit mit dem Trägergas hängt stark von den Bearbeitungsbedingungen der Werkzeugmaschine ab und ist nicht exakt modellierbar. Daher müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden, um den Beitrag der nicht vernebelten Flüssigkeit zur Dampfkonzentration beschreiben zu können. Insgesamt können sich in der Abluft von Werkzeugmaschinen sowohl niedrigere als auch deutlich höhere Dampfkonzentrationen ergeben als bei dem in Tabelle 1 gezeigten Beispiel für simulierte Prüfstandsbedingungen.

#### 4.4 Einflüsse der Tropfen auf die Messung der Dampfkonzentration

Zur Messung der Dampfkonzentration wurde am WZL in Aachen ein Gesamtkohlenwasserstoffanalysator verwendet, der mithilfe eines Flammenionisationsdetektors (FID) die Masse des organisch gebundenen Kohlenstoffs in Propanäquivalenten bestimmt (Abbildung 3).

Abbildung 3:  
Messung der Dampfkonzentration mit einem Gesamtkohlenwasserstoffanalysator (FID)



Der Probenahmestrom wird senkrecht aus der Mitte der Gasströmung abgesaugt. Der Großteil der Tropfen wird im Vorfilter, einem Metallsinterfilter mit einer Porengröße von ungefähr  $0,5 \mu\text{m}$ , abgetrennt. Das verbleibende Gas wird in einem Heizschlauch überhitzt und mit einem Flammenionisationsdetektor gemessen.



Feinstpartikel, die im Vorfilter nicht vollständig abgeschieden werden, verdunsten im Heizschlauch oder verbrennen im Messgerät und erhöhen so den Messwert der Dampfkonzentration. Auch die Tropfen, die im Vorfilter abgeschieden werden, können zum Teil verdunsten. Sie bilden eine flüssige Phase in den Poren des Metallsinterfilters, die in intensivem Stoffaustausch mit der Gasströmung steht.

Der Stoffaustausch im Vorfilter bewirkt eine Verdunstung und verschiebt das System in Richtung des thermodynamischen Gleichgewichts. Zusätzlich bewirkt der Druckverlust des Vorfilters eine Untersättigung der Gasphase, was die Verdunstung im Vorfilter fördert.

Hauptsächlich große Tropfen können in der Probenahmesonde, besonders am Einlass und in der 90°-Biegung, abgeschieden werden [2]. Da die großen Tropfen vermehrt Leichtersieder enthalten, kann die flüssige Phase an der Wand der Probenahmesonde den Gastrom noch zusätzlich aufsättigen.

Der FID-Messwert der Dampfkonzentration besteht daher aus folgenden Anteilen:

- Dampf,
- Feinstpartikeldurchtritt durch den Vorfilter,
- Verdunstung von Flüssigkeit im Vorfilter,
- Verdunstung von Flüssigkeit an der Wand der Probenahmesonde.

Die Isothermie des Sondenrohrs und des Vorfilters ist schwer realisierbar, wenn die Raumtemperatur deutlich von der Gastemperatur abweicht. Der Wärmekapazitätsstrom des Gases ist klein, sodass eine geringe Wärmeleitung schon ausreicht, um die Temperatur des Probenahmestroms zu verändern. Auch muss vermieden werden, dass die beheizte Leitung den Vorfilter erwärmt.

Während der Messung werden die Probenahmesonde und der Vorfilter immer stärker mit den abgeschiedenen KSS-Tröpfchen beladen, sodass die Verdunstung und dadurch der Tropfeneinfluss auf die Dampfmessung immer mehr zunehmen können.



Nach jedem Versuch müssen daher sowohl das Probenahmesystem als auch der Vorfilter gereinigt werden. Es kann auch eine Absaugung des Probenahmestroms entgegen der Strömungsrichtung des Gases getestet werden, um die Tropfenfracht im Probenahmestrom zu minimieren. Dabei können sich allerdings Tropfen an der Außenwand der Probenahmesonde abscheiden, die den Probenahmestrom ebenfalls aufsättigen können.

Es handelt sich bei den Einflüssen der Tropfen auf die Dampfmessung im Wesentlichen nicht um vermeidbare Fehler, sondern um unvermeidbare physikalische Zusammenhänge, die minimiert, aber nicht vollständig eliminiert werden können. Beispielsweise muss für die Erhöhung des Abscheidegrades für Feinstpartikel in der Regel eine Erhöhung des Druckverlusts oder der Filterfläche des Vorfilters in Kauf genommen werden.

Je nach Problemstellung können das Probenahmesystem und der Vorfilter optimiert werden. Eine vielversprechende Lösung liefert ein speziell als Vorfilter für Dampfmessungen entwickelter Elektrofilter, der den Kontakt zwischen den abgeschiedenen Tröpfchen und dem Gasstrom verhindert [3 bis 5].

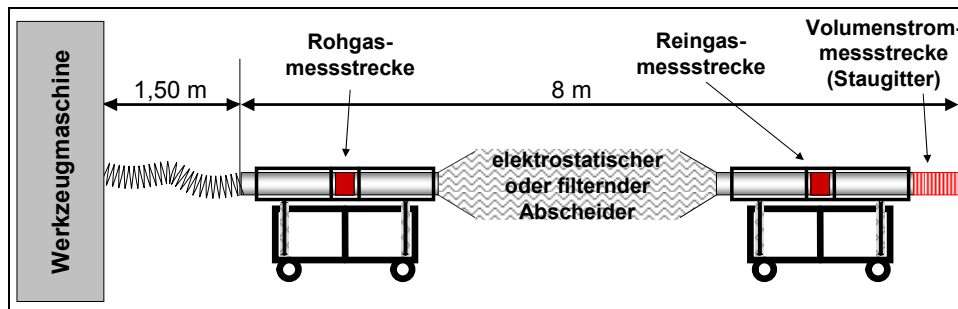
Da die Einflüsse der Tropfen auf die Dampfmessung durch das Probenahmesystem und den Vorfilter verursacht werden, sind sie von der Art des verwendeten Messgeräts unabhängig und können bei allen Aerosolen mit flüchtigen Komponenten auftreten.

Durch den Vergleich der gemessenen Dampfkonzentrationen im Rohgas und im Reingas (Abbildung 4, Seite 79) kann versucht werden, die Beeinflussung der Dampfphase durch den Abscheider zu bestimmen. Dabei muss aber beachtet werden, dass sich die Einflüsse der Tropfen auf die Dampfmessung im Roh- und Reingas unterscheiden können. Da die Tropfenkonzentration im Reingas deutlich niedriger ist als im Rohgas, ist es möglich, dass der Tropfeneinfluss auf die Dampfmessung im Reingas deutlich geringer ausfällt als im Rohgas. Die großen Tropfen werden im Abscheider zu nahezu 100 % abgeschieden, sodass ihr Einfluss auf die Dampfmessung im Reingas weitgehend entfällt. Da im Reingas weniger Feinstpartikel vorhanden sind als im Rohgas,



ist der Beitrag des Feinstpartikeldurchtritts durch den Vorfilter zur Dampfmessung im Reingas ebenfalls geringer als im Rohgas.

Abbildung 4:  
Gesamtanlage



In KSS-Abscheidern für Einzelanlagen ist in der Regel ein Ventilator integriert. Der Energieeintrag des Ventilators zum Druckverlustausgleich des Rohrleitungssystems und Abscheiders erhöht die Reingastemperatur. Diese Temperaturerhöhung bewirkt eine Tropfenverdunstung im Reingas, sodass die Dampfkonzentration steigt.

Das kann insgesamt dazu führen, dass im Rohgas fälschlicherweise höhere Dampfkonzentrationen gemessen werden als im Reingas, obwohl die Dampfkonzentration in Wirklichkeit im Reingas höher ist. Messtechnisch ergibt sich dann eine „Dampfabscheidung“ statt einer wirklichen Dampfanreicherung.

Die Problematik der Verdunstung von Flüssigkeiten auf Filterfasern wird vielfach in der Literatur beschrieben [6 bis 14]. Uns sind aber bisher keine Veröffentlichungen bekannt, die den Verdunstungsprozess beschreiben, während gleichzeitig anfiltriert wird. Dies ist Gegenstand der aktuellen Arbeiten. Simulationsergebnisse zur Problematik der Dampfmessung werden im weiteren Projektverlauf vorgestellt werden.



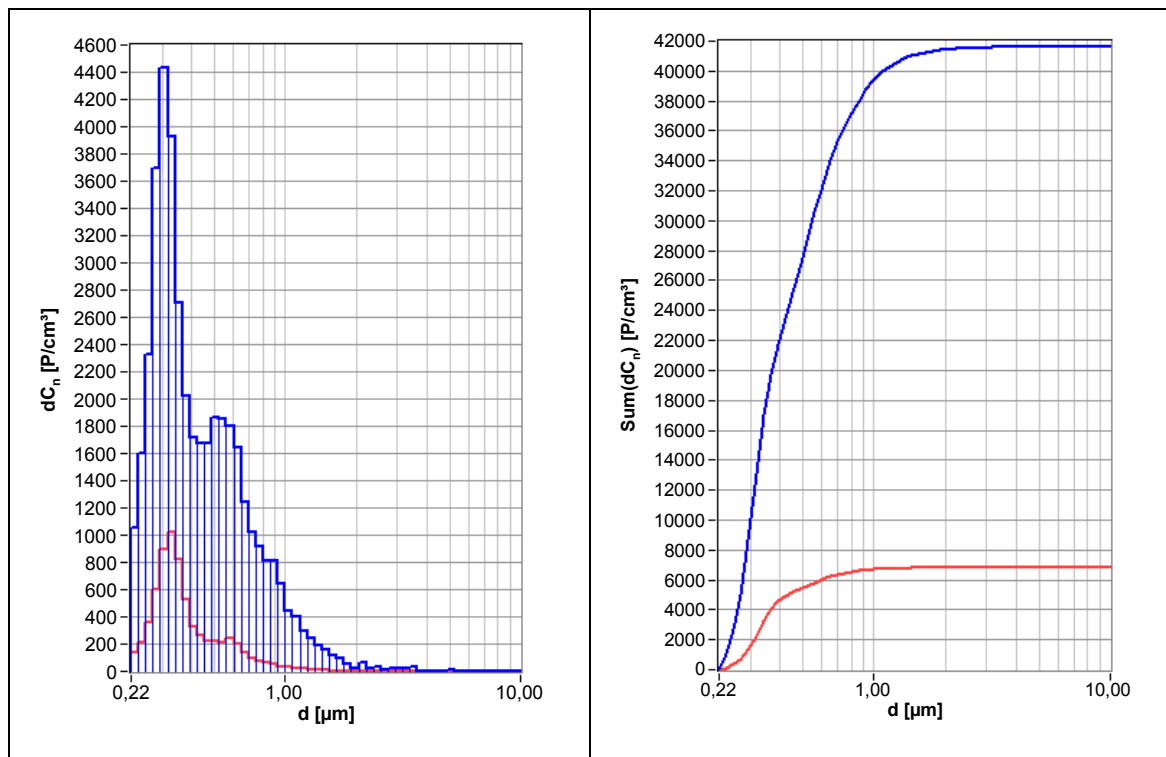
## 4.5 Verdunstungseinfluss auf die Messung des Fraktionsabscheidegradverlaufs

### 4.5.1 Messung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades

Die Abscheideleistung eines KSS-Abscheiders kann durch Messung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades bestimmt werden. Dafür werden die Tropfengrößenverteilungen sowohl im Roh- als auch im Reingas mit zwei Streulichtgeräten gemessen.

In Abbildung 5 sind die Anzahlkonzentrationsverteilungen der Tropfen im Roh- und im Reingas beim Messerkopfstirnfräsen mit konventionellem Mineralöl und unter Einsatz eines filternden Abscheiders dargestellt. Durch die unterschiedlichen Bearbeitungsschritte schwanken die Aerosolparameter stark, sodass die hier dargestellten Verteilungen ein nicht repräsentatives Einzelbeispiel darstellen.

Abbildung 5:  
Messerkopfstirnfräsen mit konventionellem Mineralöl und filterndem Abscheider;  
links: Anzahlkonzentrationsverteilung, rechts: Anzahlkonzentrationssummenverteilung  
(rote Linie = Rohgas, blaue Linie = Reingas)







Der Abfall der Anzahlkonzentration zum unteren Ende des Messbereichs hin kann durch den abnehmenden Zählwirkungsgrad der Streulichtmessgeräte bedingt sein. Messungen mit einem differentiellen Mobilitätsanalysator im WZL haben ergeben, dass das Maximum der Anzahlkonzentration bei Tropfengrößen unter 300 nm liegen kann.

Der Vergleich der Anzahlkonzentration einer Tropfengrößenklasse im Rohgas  $c_{N,roh}(X)$  und im Reingas  $c_{N,rein}(X)$  ergibt den Fraktionsabscheidegrad  $E(X)$ :

$$E(X) = 1 - \frac{c_{N,rein}(X)}{c_{N,roh}(X)} \quad (1)$$

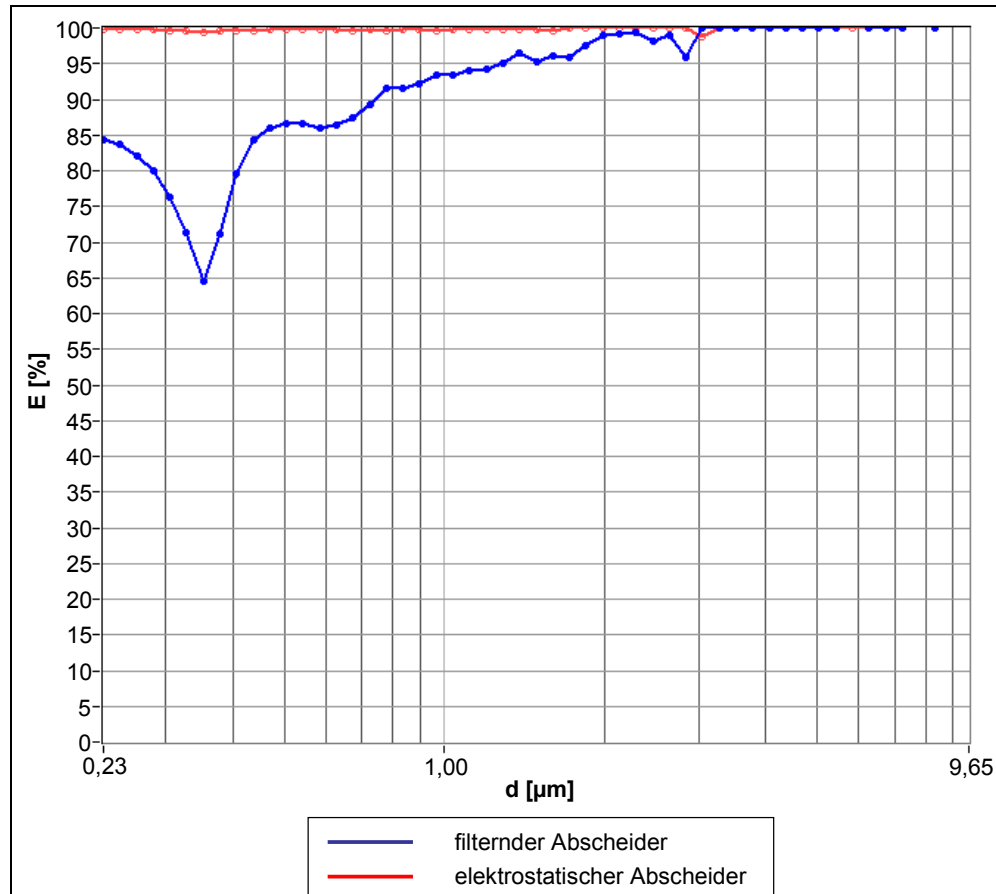
Ein Beispiel für den Verlauf der Fraktionsabscheidegrade des elektrostatischen und des filternden Abscheiders, die in der Messkampagne im WZL eingesetzt wurden, ist in Abbildung 6 (siehe Seite 82) dargestellt.

Sowohl das Aerosol als auch die Abscheidebedingungen waren nicht stationär, sodass sich die Fraktionsabscheidegrade verschiedener Messungen und verschiedener Versuche deutlich unterscheiden können. Abbildung 6 (siehe Seite 82) ist daher nur als Einzelbeispiel zu sehen und nicht repräsentativ für die beiden Abscheider.

Der elektrostatische Abscheider hat über den gesamten Tropfengrößenbereich einen hohen Fraktionsabscheidegrad, während der Fraktionsabscheidegrad des filternden Abscheiders zu kleinen Tropfengrößen hin abnimmt und bei 350 nm ein Minimum durchläuft. Um den Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Messung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades für typische Prüfstandsbedingungen beurteilen zu können, wurden Simulationsrechnungen mit AerSolve durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.



Abbildung 6:  
Verlauf der Fraktionsabscheidegrade für einen filternden und einen elektrostatischen Abscheider beim Messerkopfstirnräsen mit konventionellem Mineralöl



#### 4.5.2 Modellierung der Aerosoldynamik

Das Simulationsprogramm AerSolve wurde zur Berechnung des Aerosolverhaltens in zwei- oder dreiphasigen polydispersen Mehrkomponentensystemen entwickelt [1]. Die Tropfen werden dabei in Tropfengrößenklassen eingeteilt, die im Stoffaustausch mit der sie umgebenden Gasphase stehen. Zusätzlich kann der Wärme- und Stoffaustausch der Gasphase mit einer kontinuierlichen flüssigen Phase berechnet werden.

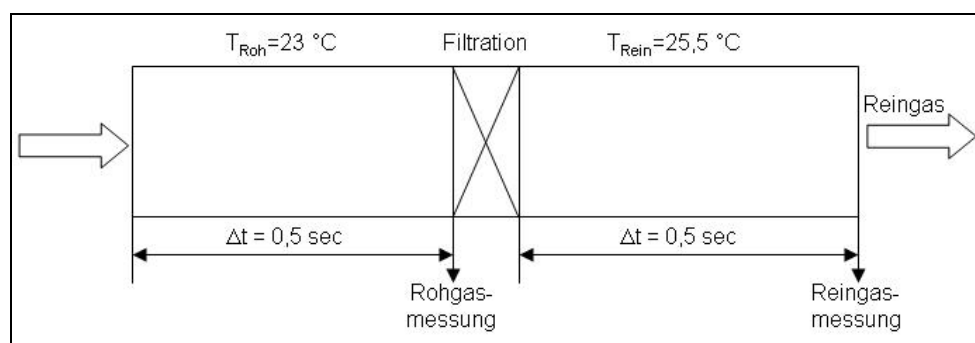
In AerSolve wird der Kelvin-Effekt, d. h. die Dampfdruckerhöhung kleiner Tropfen aufgrund der Oberflächenspannung berücksichtigt. Molekulare Stofftransportmechanismen werden in Form eines Korrekturfaktors für den Knudsen-Bereich analog zu Arbeiten von *Raynor* [15] dargestellt. Die Tropfentemperatur wird gleich der Gasphasentemperatur gesetzt, da die kleinen Verdunstungsgeschwindigkeiten nur eine



sehr geringe Abkühlung der Tropfen gegenüber der Gasphase bewirken. Es wird angenommen, dass die Flüssigphase eine ideale Mischung ist.

Die Simulation des Einflusses der Tropfenverdunstung auf die Messung des Fraktionsabscheidegrades bei typischen Prüfstandsbedingungen wird in drei Schritte unterteilt (Abbildung 7).

Abbildung 7:  
Schema der Simulationsrechnungen zur Messung des Fraktionsabscheidegradverlaufs



## 1. Rohgas

Die Tropfengrößenverteilung im Rohgaseintritt wird als logarithmische Normalverteilung mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 0,9$  und einem volumetrisch gemittelten Durchmesser von  $D_{3,0} = 0,7 \mu\text{m}$  angenommen, was der erzeugten Tropfengrößenverteilung eines Aerosolgenerators auf der Basis eines Minimalmengenschmiersystems entspricht. Die Gasphase im Rohgaseintritt ist vollständig ungesättigt. Das Aerosol strömt nach seiner Erzeugung durch eine Rohrleitung zum Filter. Die Verweilzeit in diesem Abschnitt beträgt 0,5 s. Dabei stehen die verschiedenen Tropfengrößenklassen des Aerosols im Stoffaustausch mit der sie umgebenden Gasphase. Die Rohgastemperatur beträgt 23 °C. Die Messung der Tropfengrößenverteilung des Rohgases erfolgt unmittelbar vor dem Eintritt in den Filter.

## 2. Filter

Der Filter wird als rein mechanischer Abscheider mit vorgegebenem Verlauf des Fraktionsabscheidegrades modelliert. Der Stoffaustausch der flüssigen Phase auf



den Filterfasern mit der Gasphase wird bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen noch nicht berücksichtigt.

### 3. Reingas

Nach dem Filter strömt das Aerosol als Reingas erneut durch eine Rohrleitung. Aufgrund des Energieeintrags des Ventilators beträgt die Reingastemperatur 25,5 °C. Die Tropfengrößenverteilung des Reingases wird nach einer Verweilzeit von wiederum 0,5 s gemessen.

Der Druck in der Anlage beträgt 1 atm.

Durch die Simulation wird die Tropfengrößenverteilung sowohl bei der Rohgas- als auch bei der Reingasmessung berechnet. Der Vergleich beider Tropfengrößenverteilungen nach Gl. (1) ergibt den Verlauf des Fraktionsabscheidegrades, der durch Tropfenverdunstung im Reingas beeinflusst ist. Der Vergleich dieses berechneten Verlaufs mit dem vorgegebenen Verlauf des Fraktionsabscheidegrades des Filters zeigt den Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Messung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades.

In Abbildung 8 sind die berechneten Verläufe des Fraktionsabscheidegrades bei einer Massenkonzentration  $C_M$  von 200 mg KSS pro Betriebskubikmeter Gas dargestellt.

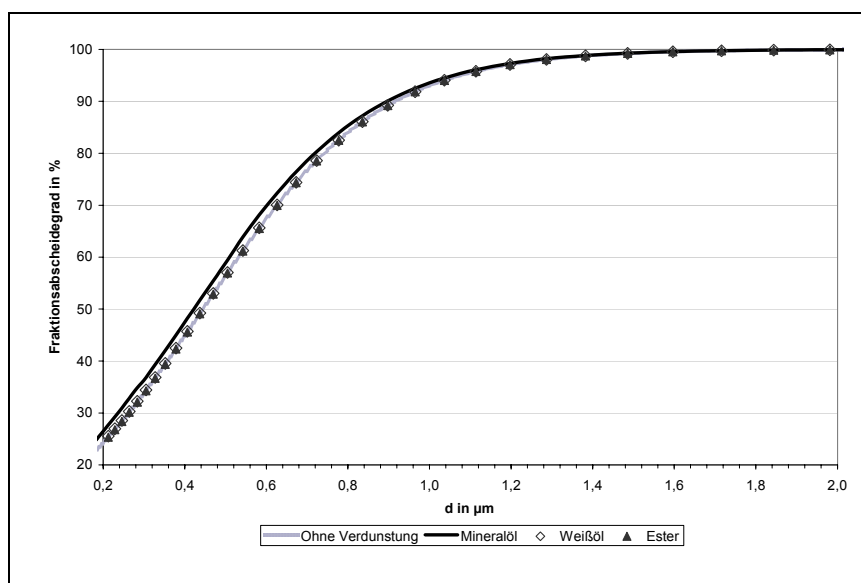


Abbildung 8:  
Berechnete Verläufe  
der Fraktionsabscheide-  
grade

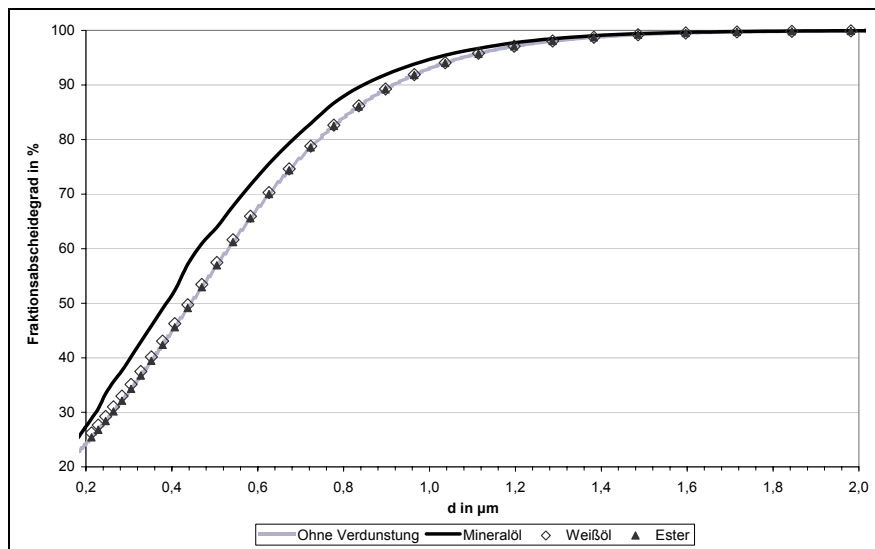


Die Anzahlkonzentration  $C_N$  des Aerosols beträgt  $1,452 \times 10^6$  Tropfen/cm<sup>3</sup> Gas. Die Verläufe des Fraktionsabscheidegrades des Weißöls und des Esteröls sind nahezu deckungsgleich mit dem Verlauf des Fraktionsabscheidegrades ohne Verdunstungseinfluss. Der Verlauf des Fraktionsabscheidegrades des Mineralöls ist um maximal 2,5 % erhöht.

Durch die hohe Anzahlkonzentration des Aerosols ist die Gasphase beim Eintritt in den Filter nahezu gesättigt. Die Aufsättigung der Gasphase bremst die Tropfenverdunstung, was den kleinen Verdunstungseinfluss auf den Fraktionsabscheidegrad erklärt. Die Dampfkonzentrationen, die sich aus diesen Simulationsrechnungen ergeben, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Der Grenzfall eines nahezu ungesättigten Gastroms wird durch die Simulationsrechnungen mit der Anzahlkonzentration  $C_N$  von 100 Tropfen pro Kubikzentimeter Gas veranschaulicht (Abbildung 9).

Abbildung 9:  
Fraktionsabscheidegrade für den Grenzfall eines nahezu ungesättigten Gastroms



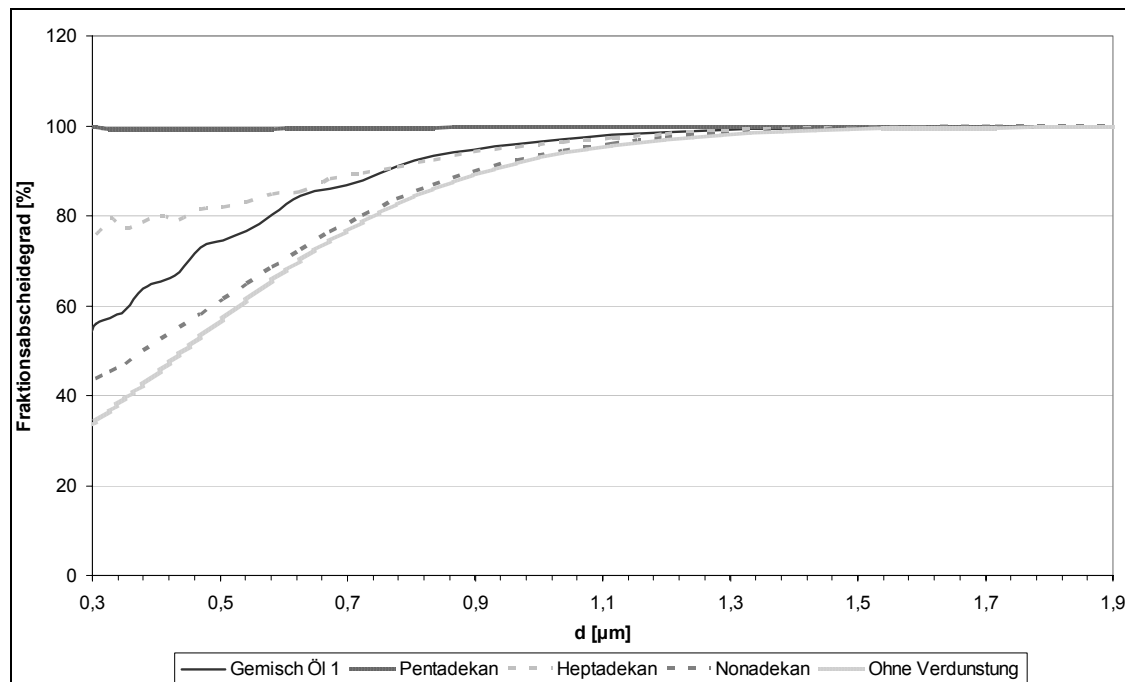
Die Abweichung des Fraktionsabscheidegrades der Rechnung mit dem Mineralöl vom Fraktionsabscheidegrad ohne Verdunstungseinfluss beträgt bis zu 8 %. Auch für diesen



Grenzfall ist der Verdunstungseinfluss bei der Verwendung des Weißöls und des Esteröls vernachlässigbar klein.

In Abbildung 10 sind analog zu Abbildung 9 Simulationsergebnisse für reine n-Alkane sowie ein Mineralöl (Öl1), das am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) der Universität Karlsruhe für Experimente verwendet wurde, dargestellt. Die Welligkeit der Kurven wird von der Umrechnung der Tropfengrößenklassen des Aerosols auf die Tropfengrößenklassen des Messgeräts verursacht.

Abbildung 10:  
Fraktionsabscheidegrade für reine n-Alkane



Ohne Kenntnis der Verdunstungsproblematik würde man den Verlauf des Fraktionsabscheidegrades des Pentadecans als nahezu vollständige Abscheidung mit einem Abscheideminimum bei einem Tropfendurchmesser von ungefähr 400 nm interpretieren. Auch das schwer flüchtige Nonadecan zeigt noch einen signifikanten Verdunstungseinfluss auf den Fraktionsabscheidegrad. Öl 1 zeigt eine Abweichung von bis zu 20 % vom Fraktionsabscheidegrad ohne Verdunstungseinfluss. Der starke Verdunstungseinfluss auf die Reinstoffe liegt an der stark größenabhängigen Verdunstungsgeschwindigkeit der Tropfen. Kleine Reinstofftropfen verdunsten deutlich schneller als große. Bei



Gemischen haben die schwer siedenden Komponenten einen stabilisierenden Einfluss auf die Tropfen.

#### **4.6 Zusammenfassung**

Die Zusammensetzungen eines konventionellen Mineralöls, eines Esteröls und eines Weißöls wurden auf der Basis von n-Alkanen modelliert. Simulationsrechnungen zeigen, dass die Dampfkonzentration stark von der Gesamtmenge des eingesetzten KSS abhängig ist.

KSS-Nebel mit einem breiten Siedeverlauf sind typische Beispiele für Nichtgleichgewichtsaerosole, da eine lange Verweilzeit nötig ist, bis sich ein annähernd thermodynamisches Gleichgewicht zwischen der Dampf- und der Tropfenphase einstellt. Bei großen Tropfen ist die Verdunstungskinetik besonders langsam, sodass sie vermehrt Leichtersieder enthalten können, die über einen langen Zeitraum hinweg in die Gasphase emittiert werden.

Um die Dampfkonzentration eines Aerosols zu messen, muss die Tropfenphase vorher abgetrennt werden, was üblicherweise in einem Probenahmesystem durch einen mechanischen Vorfilter geschieht. Die abgeschiedenen Tropfen bilden an der Wand der Probenahmesonde und auf den Filterfasern des Vorfilters flüssige Phasen, die durch Verdunstung den Probenahmestrom zusätzlich aufsättigen können. Der Druckverlust des Vorfilters untersättigt den Probenahmestrom und fördert dadurch die Verdunstung. Nicht abgeschiedene Feinstpartikel gelangen in die Gasphasenanalytik, was zusammen mit der Verdunstung abgeschiedener Tropfen im Probenahmesystem eine deutliche Überhöhung der gemessenen Dampfkonzentration bewirken kann.

Je größer die Tropfenkonzentration ist, desto stärker wird die gemessene Dampfkonzentration überhöht. Dadurch können im Rohgas von Abscheidern fälschlicherweise höhere Dampfkonzentrationen gemessen werden als im Reingas, auch wenn der Abscheider die Gasphase in Wirklichkeit aufsättigt. Messtechnisch ergibt sich dann eine „Dampfabcheidung“ im Abscheider, obwohl in Wirklichkeit eine Dampfanreicherung



stattfindet. Simulationsergebnisse zur Problematik der Dampfmessung werden im weiteren Projektverlauf vorgestellt.

Durch die Messung der Tropfengrößenverteilung im Roh- und Reingas eines KSS-Abscheiders kann der Verlauf des Fraktionsabscheidegrades berechnet werden. Tropfenverdunstung im Abscheider, in Rohrleitungen, in Probenahme- und Messsystemen kann die Messung beeinflussen und ein falsches Bild der Abscheideleistung ergeben. In KSS-Abscheidern für Einzelanlagen ist der Ventilator häufig im Abscheidergehäuse integriert. Dessen Energieeintrag erhöht die Gastemperatur, was die Tropfenverdunstung im Reingas fördert.

Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass sogar Versuchsstoffe mit geringer Flüchtigkeit die Messung des Fraktionsabscheidegrades durch Verdunstung beeinflussen können. Bei Mehrkomponentengemischen haben die schwer siedenden Komponenten einen stabilisierenden Einfluss auf die Tropfen.

Alle Prozessbedingungen, wie Messort, Probenahmebedingungen, Art der Aerosol-erzeugung, Verweilzeit, Ölzusammensetzung, Tropfengrößenverteilung, Anzahlkonzentration, Temperatur, Druck etc. ,beeinflussen das Verdunstungsverhalten. Das untersuchte Esteröl und das Weißöl sind allerdings so schwer flüchtig, dass der Verdunstungseinfluss auf die Messung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades bei allen betrachteten Betriebsbedingungen vernachlässigbar klein ist. Bei dem untersuchten Mineralöl ist der Verdunstungseinfluss von den Betriebsbedingungen abhängig.

#### 4.7 Literatur

- [1] *Nagel, D.; Schaber, K.:* Abschlussbericht zum BWPLUS-Forschungsvorhaben „Charakterisierung und Abscheidung von Ölnebeln“, 2006  
<http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BW122010SBer.pdf>
  
- [2] *Helsper, C.:* Probleme der Staubprobenahme bei der Filterprüfung. *Filtrieren & Separieren* 9 (1995) Nr. 1, S. 5-13





- [3] *Asbach, C.; Kuhlbusch, T. A. J.; Fissan, H.:* Entwicklung einer nahezu idealen elektrostatischen Trennapparatur für Gas und Partikel. *Chemie Ingenieur Technik* 76 (2004) Nr. 1, S. 69-72
- [4] *Asbach, C.; Kuhlbusch, T. A. J.; Fissan, H.:* Investigation on the gas particle separation efficiency of the gas particle partitioner. *Atmos. Environm.* 39 (2005) Nr. 40, S. 7825-7835
- [5] *Asbach, C.; Kuhlbusch, T. A. J.; Fissan, H.:* Effect of corona discharge on the gas composition of the sample flow in a gas particle partitioner. *J. Environm. Monit.* 7 (2005) Nr. 9, S. 877-882
- [6] *Furuuchi, M.; Fissan, H.; Horodecki, J.:* Evaporation behavior of volatile particles on fibrous filter flushed with particle-free dry air. *Powder Technol.* 118 (2001), S. 171-179
- [7] *Zhang, X.Q.; McMurry, P.H.:* Theoretical analysis of evaporative losses from impactor and filter deposits. *Atmos. Environm.* 21 (1987) Nr. 8, S. 1779-1787
- [8] *Volckens, J.; Leith, D.:* Filter and electrostatic samplers for semivolatile aerosols: Physical artefacts. *Environm. Sci. Technol.* 36 (2002) Nr. 21, S. 4613-4617
- [9] *McAneny, J. J.; Leith, D.; Boundy, M. G.:* Volatilization of mineral oil mist collected on sampling filters. *Appl. Occup. Environm. Hyg.* 10 (1995) Nr. 9, S. 783-787
- [10] *Cooper, S. J.; Raynor, P. C.; Leith, D.:* Evaporation of mineral oil in a mist collector. *Appl. Occup. Environm. Hyg.* 11 (1996) Nr. 10, S. 1204-1211
- [11] *Raynor, P. C.; Volckens, J.; Leith, D.:* Modeling evaporative loss of oil mist collected by sampling filters. *Appl. Occup. Environm. Hyg.* 15 (2000) Nr. 1, S. 90-96
- [12] *Volckens, J.; Boundy, M.; Leith, D.:* Oil Mist Concentration: A comparison of sampling methods. *AIHA J.* (1999) Nr. 5, S. 684-689



- [13] *Park, Dong-uk; Kim, Shin-bum; Yoon, Chung-sik*: Loss of straight metalworking fluid samples from evaporation during sampling and desiccation. *AIHA J.* 64 (2003) Nr. 6, S. 837-841
- [14] *Raynor, P. C.; Leith, D.*: Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters. *Ann. Occup. Hyg.* 43 (1999) Nr. 3, S. 181-192
- [15] *Raynor, P. C.; Cooper, S.; Leith, D.*: Evaporation of polydisperse multicomponent oil droplets. *AIHA J.* 57 (1996) Nr. 12, S. 1128-1136