

BGIA-Report 9/2006

Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen

Zusammenfassung der Vorträge
anlässlich einer Fachveranstaltung
am 11. Mai 2006 in Bonn



HVBG

Hauptverband der
gewerblichen
Berufsgenossenschaften

Bearbeitet von: Nadja von Hahn
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA
Sankt Augustin

Redaktion: Zentralbereich des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für
Arbeitsschutz – BGIA

Herausgeber: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG)
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA
Alte Heerstr. 111, D-53754 Sankt Augustin
Telefon: +49 / 02241 / 231 – 01
Telefax: +49 / 02241 / 231 – 1333
Internet: www.hvbg.de
– November 2006 –

ISBN: 3-88383-714-8

ISSN: 1869-3491

Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen

Zusammenfassung der Vorträge anlässlich einer Fachveranstaltung
am 11. Mai 2006 in Bonn

Kurzfassung

In zahlreichen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Reinluft hinter Abscheidern zu hohe Anteile an Aerosolen und Dämpfen von Kühlschmierstoffen enthält. Durch die Rückführung unzureichend gereinigter Abluft aus Werkzeugmaschinen wird die Raumluft dann mit Kühlschmierstoffemissionen unzulässig hoch belastet. Bisher fehlten jedoch Kenngrößen für eine geeignete Auslegung von Abscheidern, die den Anforderungen einer Reinlufrückführung gerecht werden. Darüber hinaus sind die Einhausungen an Werkzeugmaschinen in den meisten Fällen nicht so gestaltet, dass eine optimale Erfassung der Emissionen von Kühlschmierstoffen möglich ist. Um diese Emissionen auf das technisch machbare Maß zu senken, sind sowohl Verbesserungen an den Werkzeugmaschinen als auch an den Abscheidersystemen erforderlich. Im Rahmen eines Verbundprojektes soll eine hierzu geeignete Gesamtkonzeption basierend auf den Ergebnissen einzelner Teiluntersuchungen entwickelt werden. Die Projektpartner stellten ihre Ergebnisse und deren Umsetzung in die Praxis in einer Fachveranstaltung vor.

Exhaust and separation of metal-working fluid emissions

Summary of the papers presented at a conference
held in Bonn on 11 May 2006

Abstract

Numerous studies have shown that the purified air downstream of separators contains excessive quantities of aerosols and vapours from metal-working fluids. The return of insufficiently purified air exhausted from machine tools therefore causes the ambient air to be contaminated by metal-working fluid emissions beyond the permissible levels. In the past, no parameters existed for suitably dimensioning separators capable of meeting the requirements for the return of purified air. In addition, the design of most machine tool enclosures makes them unsuitable for optimum collection of metal-working fluid emissions. In order for these emissions to be reduced to a technically feasible level, improvements are required both on the machine tools, and in the separator systems. A joint project is to be conducted in order for a suitable overall solution to be developed, based upon the results of individual studies. At a conference, the parties within the project presented the results of their particular studies and described their application in practice.

Aspiration et séparation des émissions de fluides d'usinage

Synthèse des exposés présentés lors d'un colloque
qui a eu lieu le 11 mai 2006 à Bonn

Résumé

De nombreuses études ont montré que l'air issu de séparateurs contient des proportions trop importantes d'aérosols et de vapeurs de fluides d'usinage. C'est pourquoi le recyclage d'air aspiré au niveau de machines-outils et insuffisamment épuré se traduit par des concentrations inadmissibles de fluides d'usinage dans l'atmosphère des locaux de travail. Jusqu'à présent, il n'existait aucune grandeur caractéristique pour la conception de séparateurs satisfaisant aux exigences en matière de recyclage d'air épuré. En outre, les cabines de la plupart des machines-outils ne sont pas conçues de manière à permettre une aspiration optimale des émissions de fluides d'usinage. Pour réduire ces émissions à une valeur réalisable techniquement, il est nécessaire d'améliorer les machines-outils aussi bien que les systèmes de séparation. L'objectif est de développer, dans le cadre d'un projet commun, un concept global approprié basé sur les résultats de différentes études partielles. Les partenaires participant à ce projet ont présenté les résultats de leurs études ainsi que la mise en pratique de ceux-ci au cours du colloque.

Extraer y separar emisiones de lubricantes refrigeradores

Resumen de las ponencias presentadas con ocasión de una reunión de expertos, celebrada el 11 de mayo de 2006 en Bonn

Resumen

Los resultados de numerosos estudios indican que el aire puro que sale de colectores-separadores contiene niveles demasiado elevados de aerosoles y vapores de lubricantes refrigeradores. La reintroducción de aire de escape insuficientemente depurado, proveniente de máquinas-herramienta, a la atmósfera interior conlleva niveles inadmisibles en emisiones de lubricantes refrigeradores. Hasta la fecha, no se disponía de parámetros para el diseño adecuado de colectores-separadores que cumpliesen los requerimientos en materia de reintroducción de aire depurado. Además, en la mayoría de los casos, el diseño del encofre de máquinas-herramienta no permite la apropiada captación de las emisiones de lubricantes refrigeradores. A fin de reducir semejantes emisiones a un nivel técnicamente factible, se deberán mejorar sea las máquinas-herramienta como también los dispositivos de captación-separación. En el marco de un proyecto cooperativo se pretende desarrollar una concepción global, basada en los resultados de estudios parciales. Con ocasión de una reunión de expertos, los participantes de dicho proyecto presentaron los resultados obtenidos y su aplicación práctica.

Inhaltsverzeichnis

1	Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen an geschlossenen Werkzeugmaschinen – Einführung	9
	W. Pfeiffer, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin	
2	Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Versuchsplanung und Durchführung	19
	F. Klocke, K. Gerschwiler, B. Maier, Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH)	
3	Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Messungen und Ergebnisse	41
	R. Stockmann, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin	
4	Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Charakterisierung von Kühlschmierstoffabscheidern	71
	D. Nagel, K. Schaber Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe	
5	Verbesserung der Stoffeffassung an Werkzeugmaschinen mittels Strömungssimulation	91
	B. Gu, Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart J. Schmid, Fa. HLK Stuttgart, Stuttgart-Vaihingen	
6	Messungen im Werkzeugmaschinenlabor – Konsequenzen auf die Abscheider	107
	O. Bernstorff, Fa. GEA Delbag Lufttechnik, Herne	
7	Entwicklung eines Filterprüfstandes zum standardisierten Testen von Kühlschmierstoffabscheidern	111
	W. Höflinger, P. Wlaschitz, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der Technischen Universität Wien	

8	Lufttechnische Maßnahmen in Maschinenhallen	125
	R. Detzer, Fa. Imtech Deutschland, Hamburg	
9	Brand- und Explosionsschutz beim Einsatz von nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffen	137
	A. van Ryn, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln	
10	Brand- und Explosionsschutz an Werkzeugmaschinen	159
	H. Sefrin, Berufsgenossenschaft Metall Süd, Mainz	
	Anschriften der Autoren	167

Das Forschungsvorhaben zur Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen aus Werkzeugmaschinen wurde gefördert mit Mitteln des

- Fachausschusses Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau (FA MFS), Sachgebiet Kühlschmierstoffe (Beiträge 3, 6 und 10)
- Hauptverbands der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) mit Unterstützung des Verbands des Deutschen Maschinen- und Anlagenbaus (VDMA) (Beiträge 2, 4 und 5).



1 Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen an geschlossenen Werkzeugmaschinen – Einführung ¹

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

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

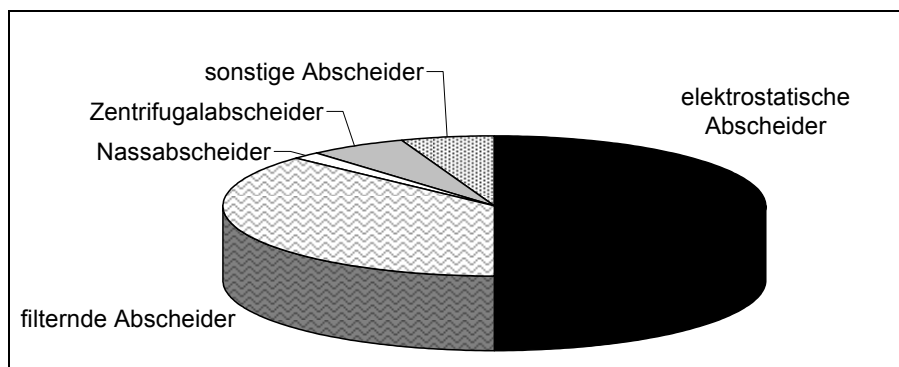


Projektes ist es, Grundlagen für die optimale Gestaltung von Erfassungseinrichtungen zu erarbeiten, die Abscheideleistung zu verbessern und hinreichenden Schutz vor Bränden und Explosionen zu gewährleisten.

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 m³/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



eingrichtet 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, 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
Filternder Abscheider	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	
Elektrostatisher Abscheider	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	
Zentrifugal- abscheider	Emulsion	✓	✓	✓
	Mineralöl	✓	✓	✓
	synthetischer Ester	✓	✓	✓
	MMS	✓	✓	

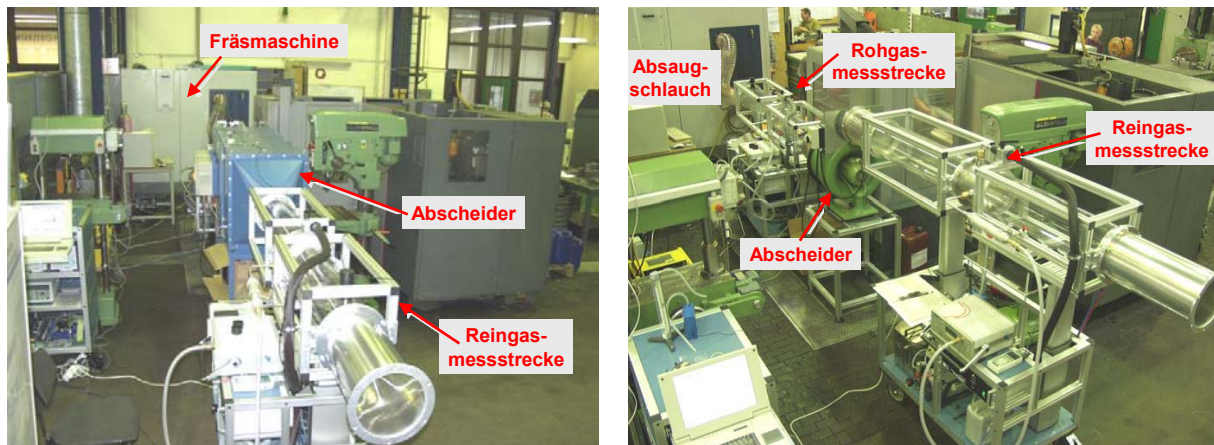
Vor und hinter dem jeweiligen Abscheider wurden in speziellen vom BGIA gefertigten und bedienten Prüfgasstrecken mithilfe eines isokinetischen Probenahmesystems die partikel- und dampfförmigen KSS-Emissionen erfasst. Zur Bestimmung der Konzentration organischer Substanzen wurde ein Flammenionisationsdetektor (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.

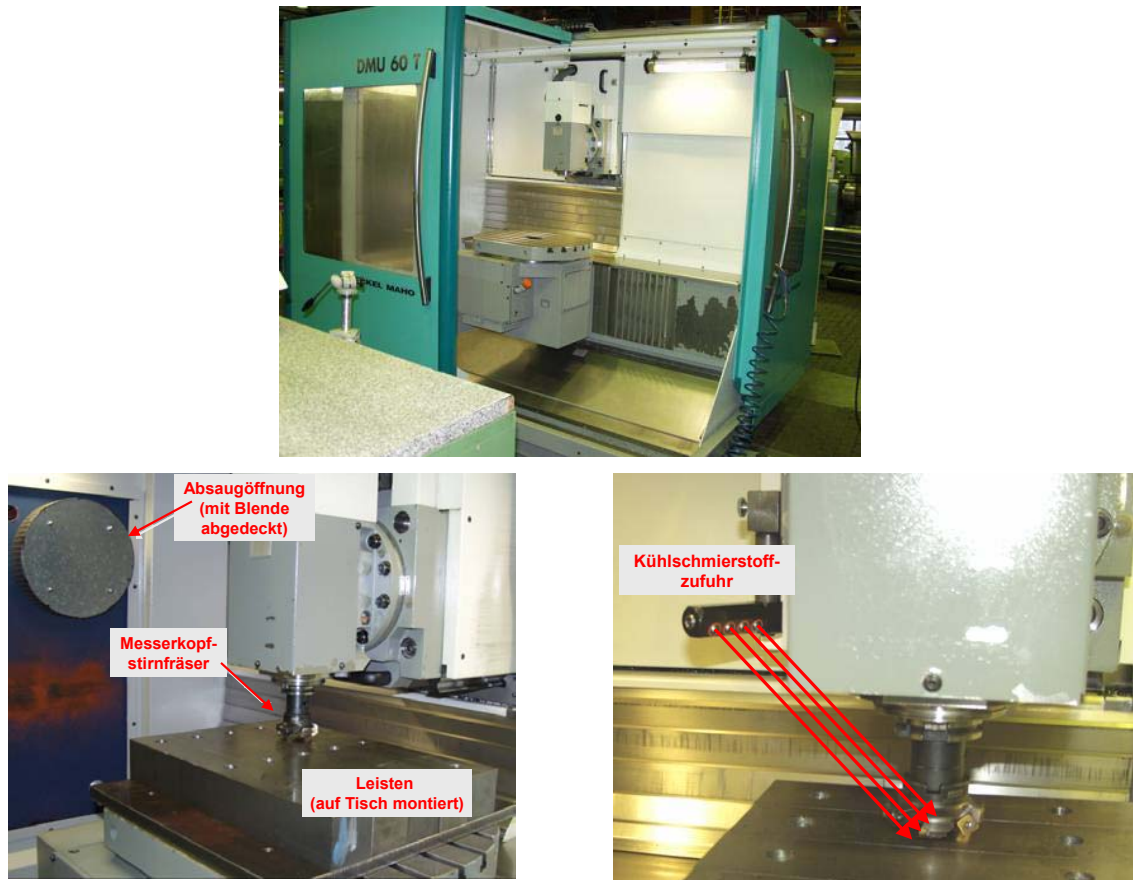
2.4 Durchführung der Versuche

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



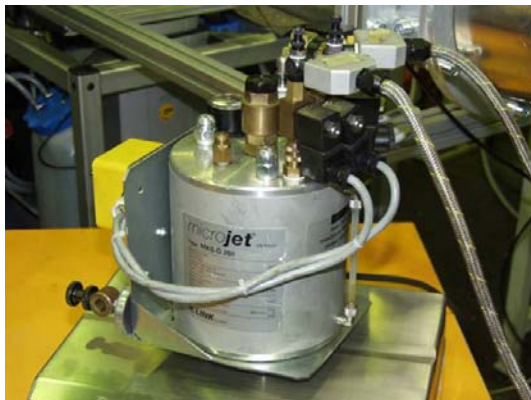
Als Verfahren wurde das Messerkopfstirnfräsen ausgewählt. Zum Einsatz kam ein fünf-schneidiger mit beschichteten Wendeschneidplatten aus Hartmetall bestückter Fräser (Messerkopfstirnfräser R245-063Q22-12M der Fa. Sandvik mit fünf Schneiden, einem Durchmesser von 63 mm und einem Einstellwinkel von 45°; 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 mm³ 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 Minimalmengenschmierung

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 $4\ 000\ \text{min}^{-1}$ 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).



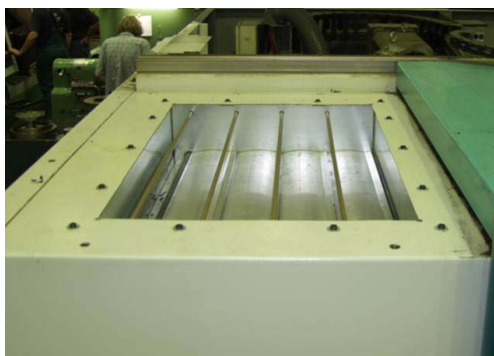
Medium	Viskosität in mm ² /s
Wasser	1
Mineralöl	9,4
Esterbasierter KSS	9,8

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 Druckentlastungsklappen 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:
Druckentlastungsklappen (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).

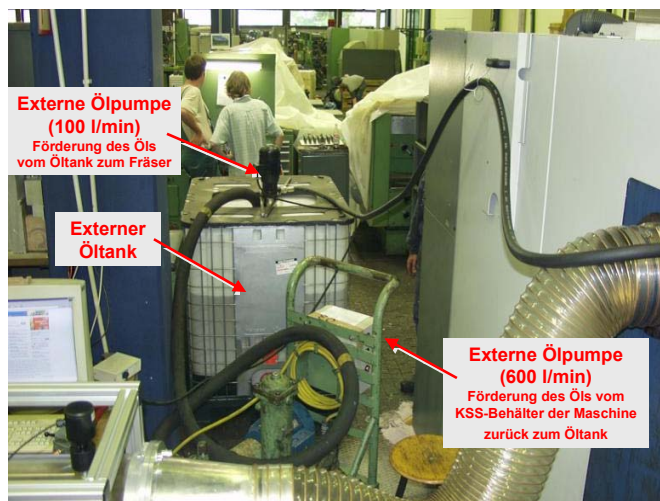


Abbildung 7:
Nachrüstung einer separaten
Kühlschmierstoffversorgung an
der Fräsmaschine

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.

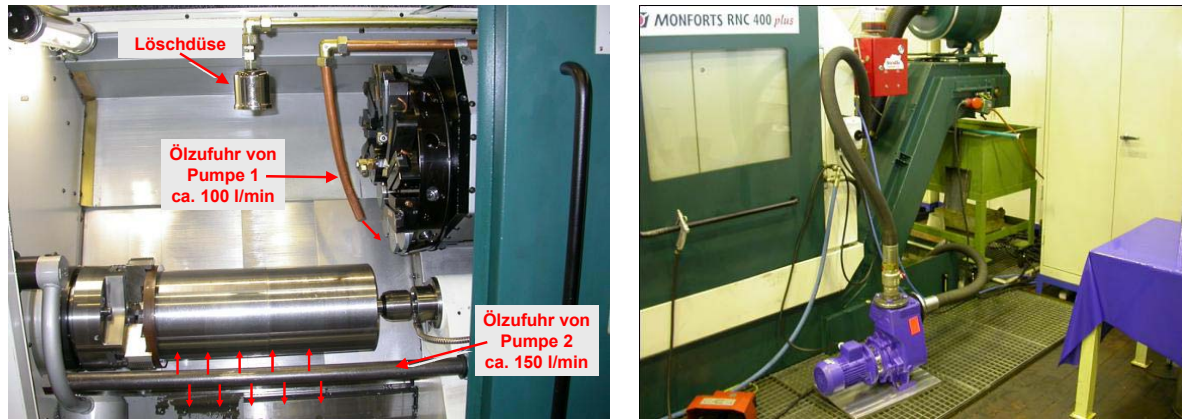


Abbildung 9:
Blick in den Arbeitsraum beim Drehen
mit Öl als Kühlschmierstoff

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 zerspannt 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

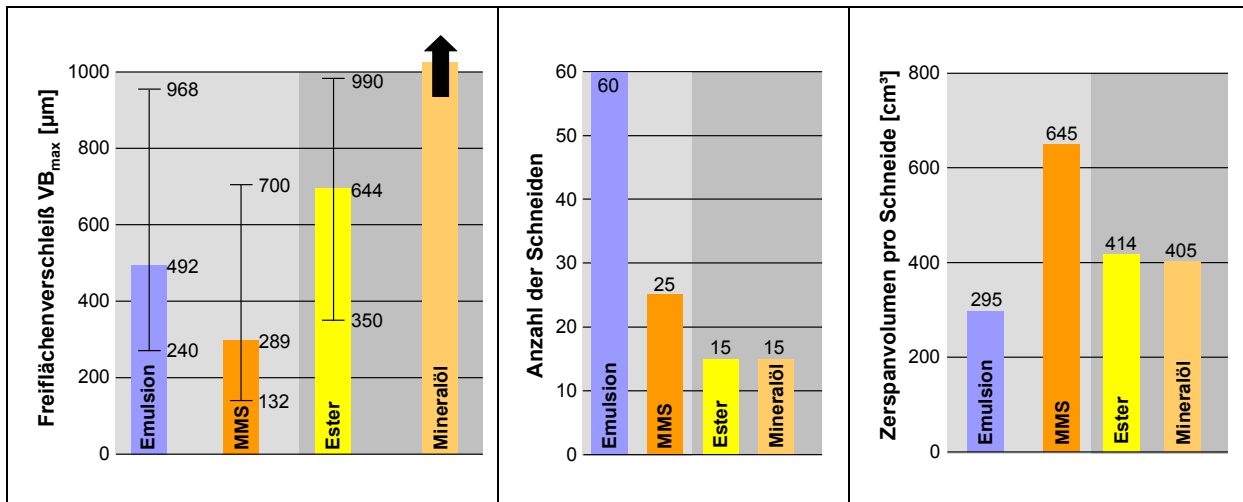
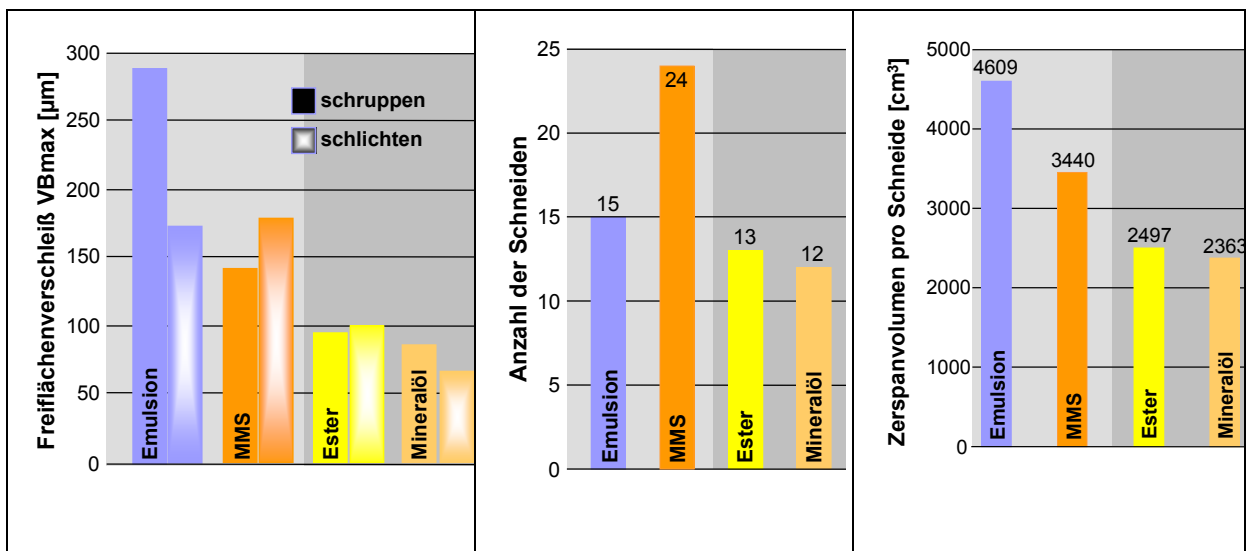


Abbildung 12:
Einfluss des Kühlschmiermediums auf die Verschleißausbildung beim Drehen, links: Freiflächenverschleiß, Mitte: Anzahl eingesetzter Schneiden, rechts: Zerspanvolumen



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



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

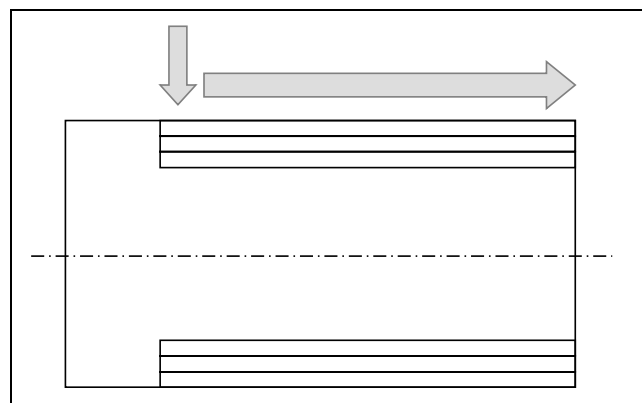
Die Schleifversuche bereiteten keine größeren Probleme. Die eingesetzte Schleifmaschine ist sowohl für wassergemischte als auch nicht wassermischbare Medien als KSS ausgelegt. Sie verfügt über KSS-Pumpen mit einer auch für Öle ausreichenden Förderleistung und darüber hinaus über die für das Schleifen 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 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, 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

- [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, 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 ¹

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

¹ 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 Rohgasmessstrecke (Abbildung 1),
- höhenverstellbare Reingasmessstrecke (Abbildung 2) und
- zentrale Datenerfassungseinheit.

Abbildung 1:
Schematische Darstellung der
Rohgasmessstrecke

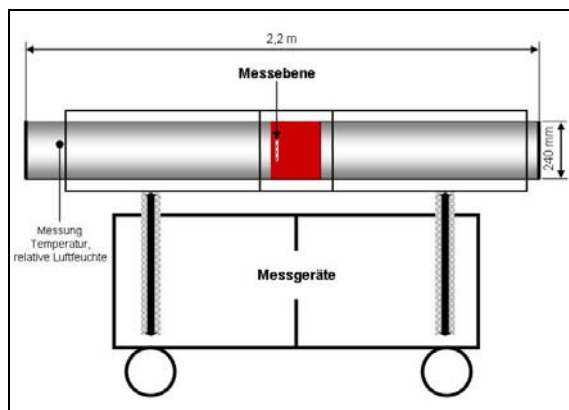
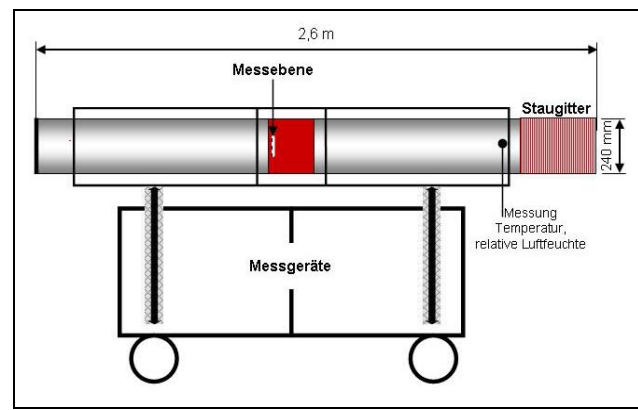


Abbildung 2:
Schematische Darstellung der
Reingasmessstrecke



Zwischen der Roh- und der Reingasmessstrecke 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

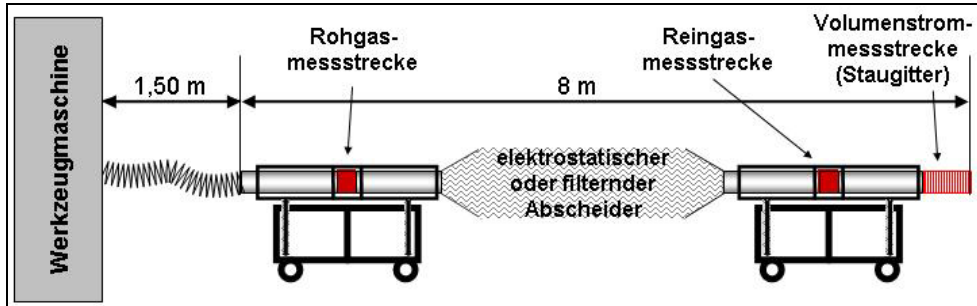


Abbildung 4:
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einem Zentrifugalabscheider

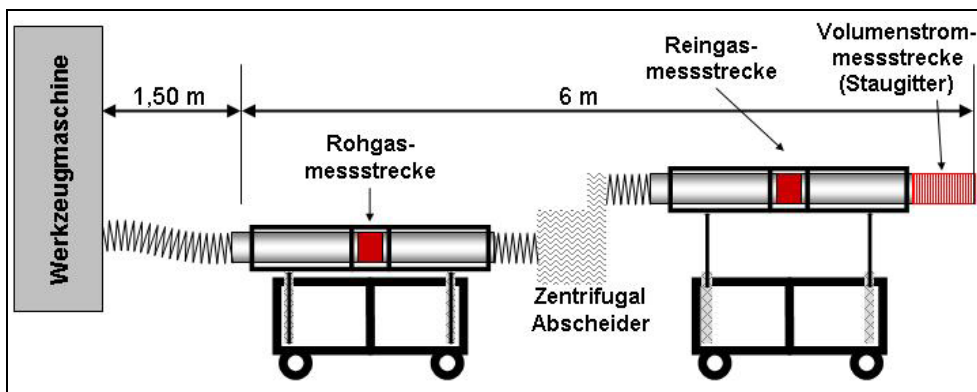


Abbildung 5:
Gesamtansicht des Prüfstandes mit einer Fräsmaschine der Fa. Deckel-Maho





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

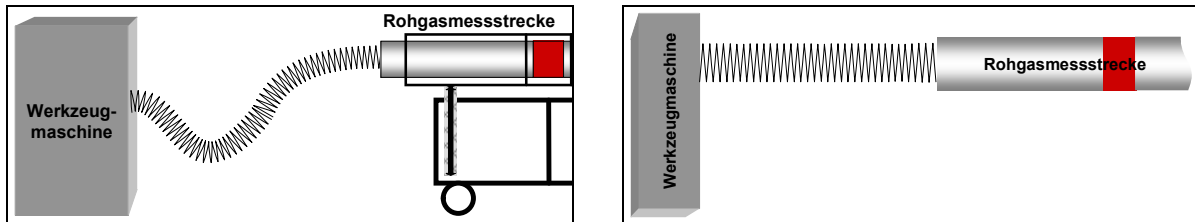


Abbildung 7:
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einer Schleifmaschine
der Fa. Tacchella Crossflex; links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht

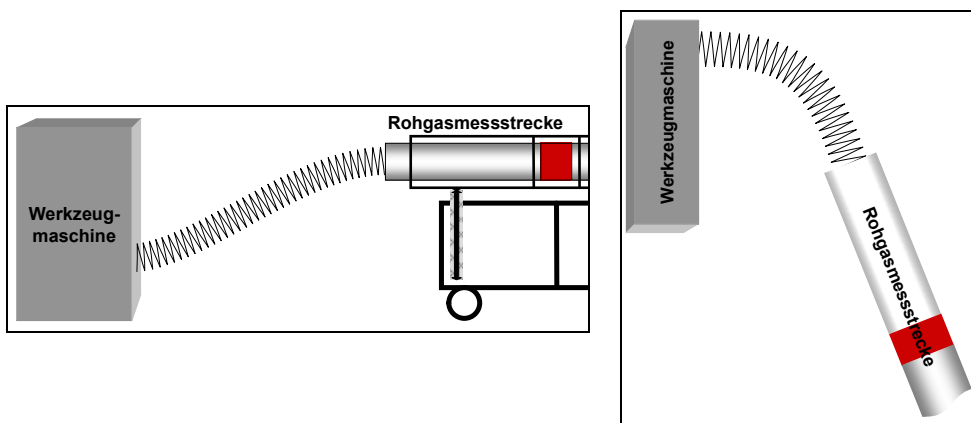
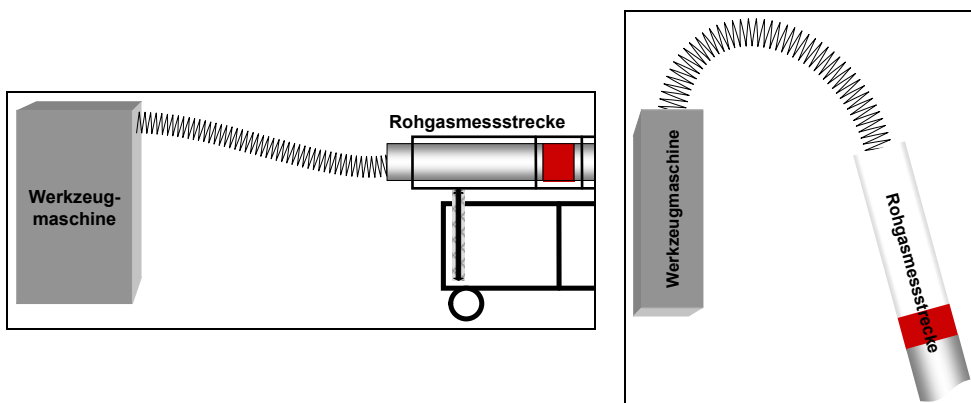


Abbildung 8:
Schematische Darstellung des Prüfstandes mit einer Drehmaschine
der Fa. Monforts; links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht



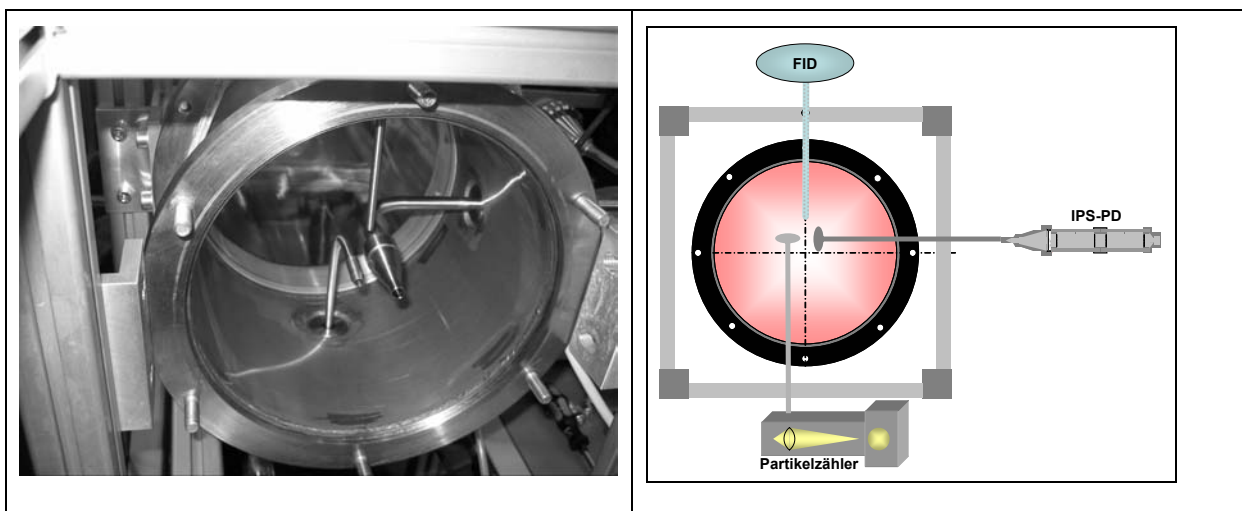


Sowohl in die Roh- als auch in die Reingasmessstrecke sind folgende Messsysteme eingebaut:

- 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





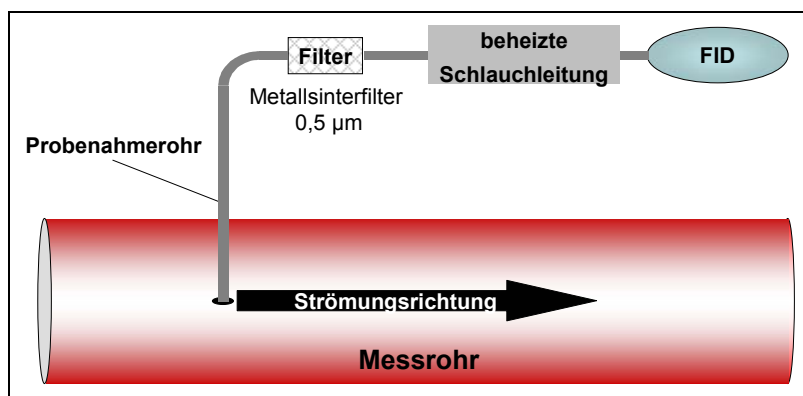
Mit Ausnahme des integrierenden Messverfahren IPS-PD werden alle Messgrößen kontinuierlich erfasst und auf Datenträger gespeichert. Im Folgenden werden die einzelnen Messsysteme und ihre Anordnung in der Messstrecke ausführlich dargestellt.

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 $180\ \text{°C}$ beheizte Leitung zugeführt (Abbildung 10).

Abbildung 10:
Schematische Darstellung der Probenahme mit dem FID

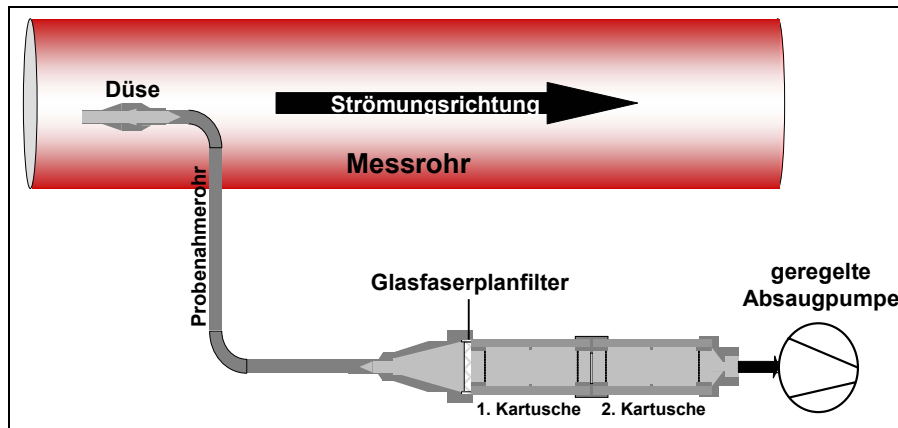


Isokinetisches Probenahmesystem Partikel-Dampf (IPS-PD)

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 Koinzidenz² 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.

² 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

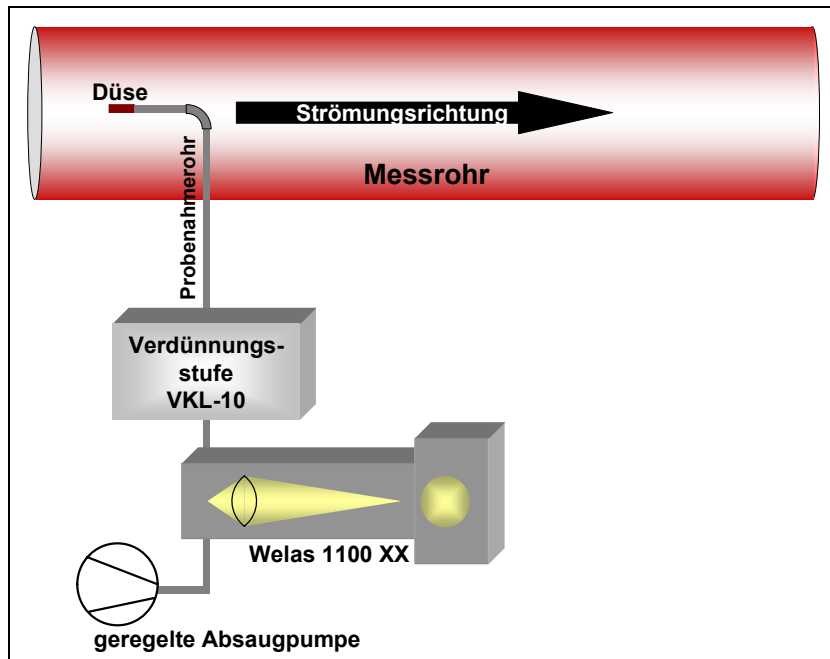
		Rohgasmessstrecke	Reingasmessstrecke
Typ		Welas 1100 HC	Welas 1100 LC
Hersteller		Palas	Palas
Absaugvolumenstrom in l_n/min		5	5
Optisches Messvolumen in μm³		90 x 90 x 90	200 x 200 x 200
Messprinzip (Weißlicht)		90°-Streulichtdetektion	90°-Streulichtdetektion
Auflösung in Klassen pro Dekade		32	32
Mess- bereiche in μm	1	0,18 bis 9	0,18 bis 9
	2	0,25 bis 17	0,25 bis 17
	3	0,6 bis 40	0,6 bis 40
Maximalkonzentration für 10 % Koinzidenzfehler in Partikel/cm³		10 ⁵	10 ⁴

Tabelle 2:
Einstellparameter der eingesetzten Verdünnungssysteme

Parameter	Wert
Vordruck	2,0 bar
Ansaugvolumenstrom	4,26 l _n /min
Verdünnungsvolumenstrom	38,3 l _n /min
Absaugvolumenstrom	5 l _n /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 m³/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

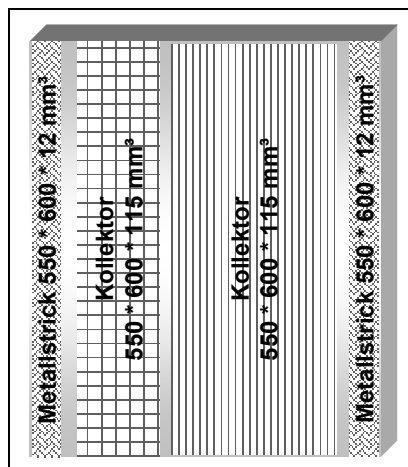
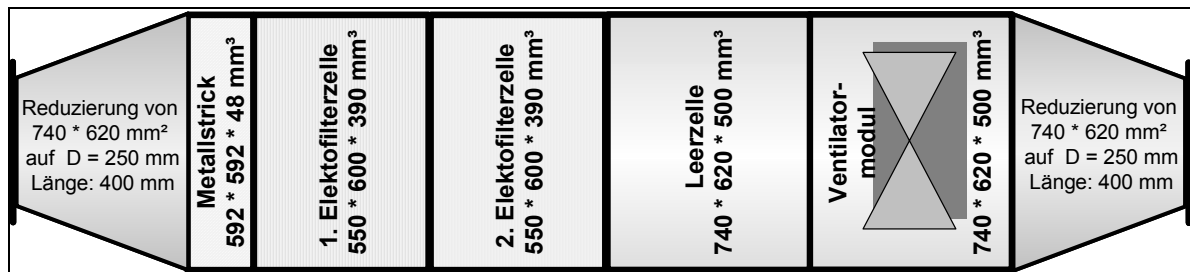


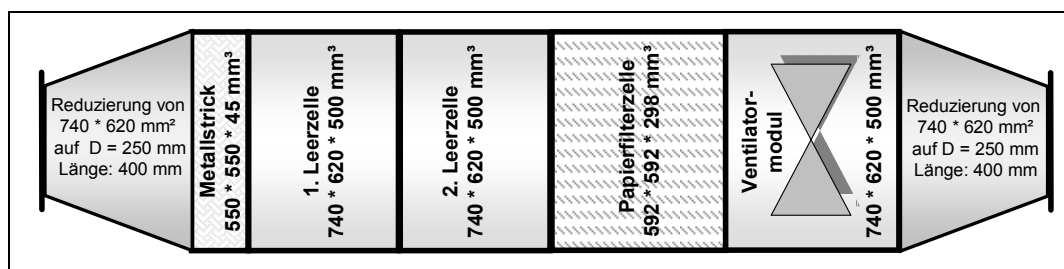
Abbildung 14:
Schematische Darstellung der Elektrofilterzelle



□ Filternder Abscheider

Ebenso wie der elektrostatische wurde auch der filternde Abscheider (Abbildung 15) mit einem Absaugvolumenstrom von 600 bis 650 m³/h betrieben. Als Filterstufe wurden Glasfaserfilter, die nach DIN EN 779 [5] in Klasse 8 eingestuft sind, verwendet. Die Filterfläche betrug 18 m² 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 m³/h. Die im Abscheider installierten Nadelfilter waren zweilagig ausgeführt und hatten eine Filterfläche von ungefähr 0,31 m².

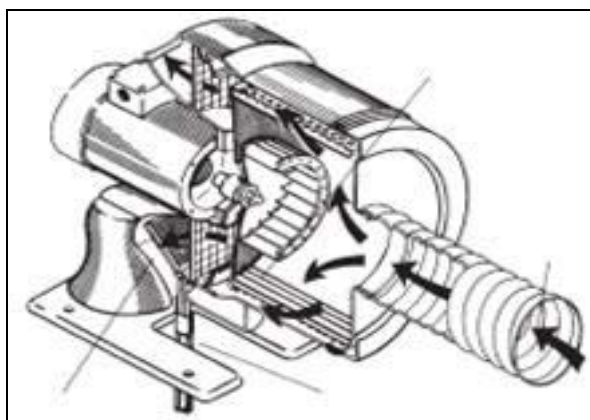


Abbildung 16:
Schematische Darstellung
des Zentrifugalabscheiders



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 *)	Abscheider **)
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 ^{*)}	Abscheider ^{**)}
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

^{*)} wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

^{**)} 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 ^{*)}	IPS-PD			FID in mg C/m ³	Partikelmessung (Pallas)	
		Gesamt in mg/m ³	Aerosol in mg/m ³	Dampf in mg/m ³		Anzahl in P/cm ³	Masse in mg/m ³
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

^{*)} 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

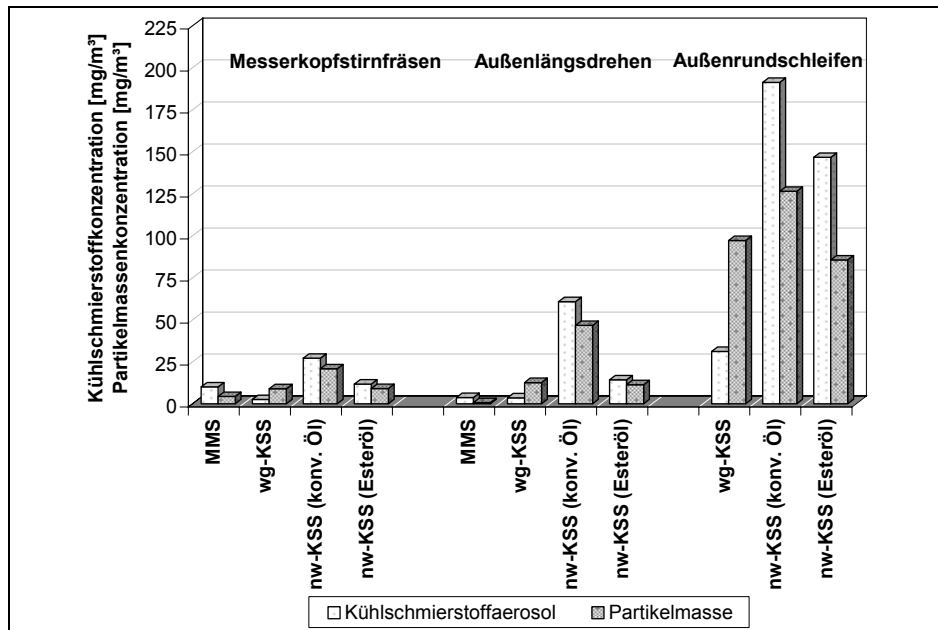
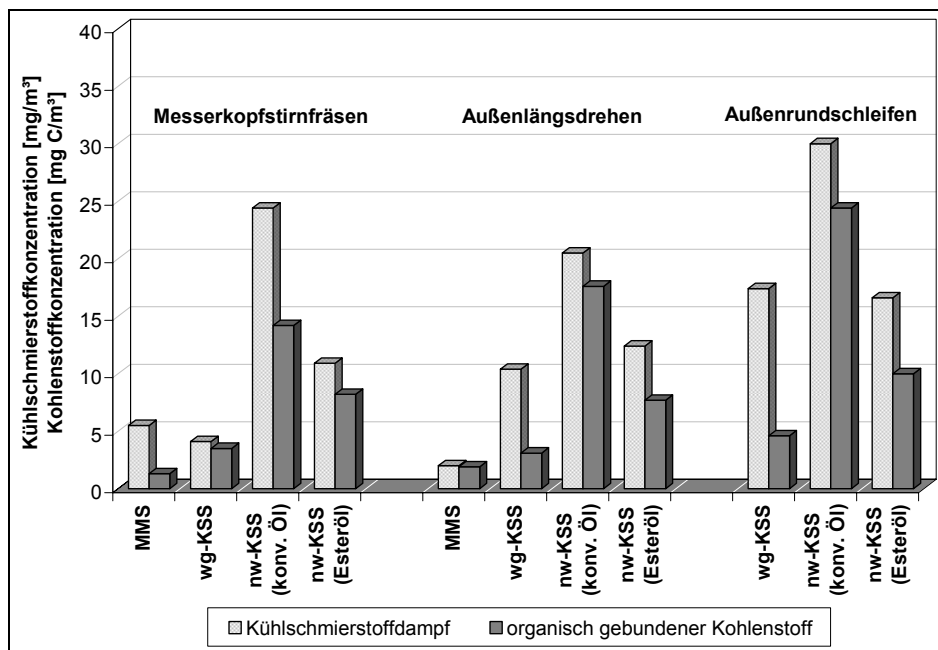


Abbildung 18:
Konzentration an Kühlschmierstoffdampf versus Masse an organischem Kohlenstoff



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

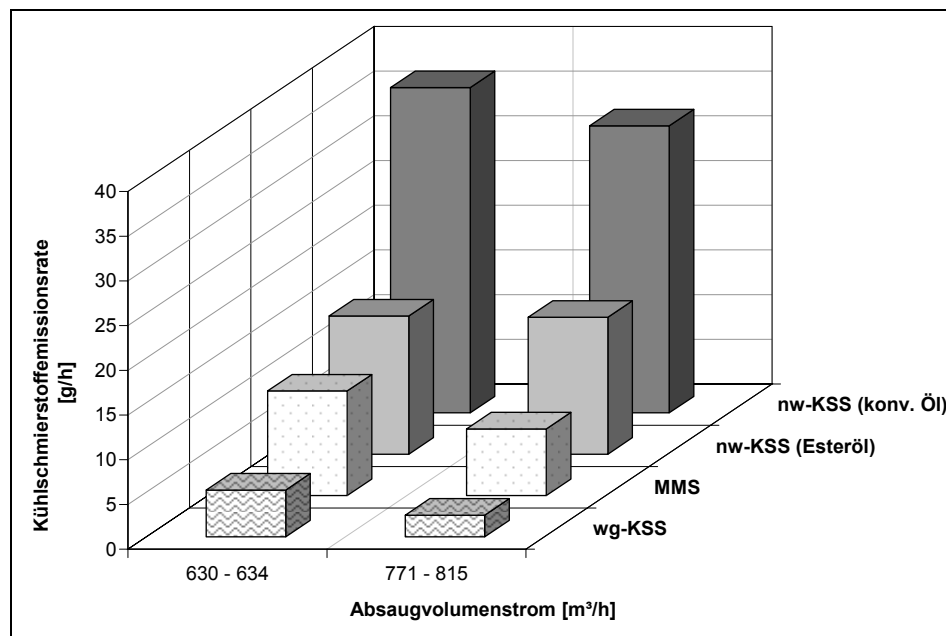




Abbildung 20:
Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenlängsdrehen

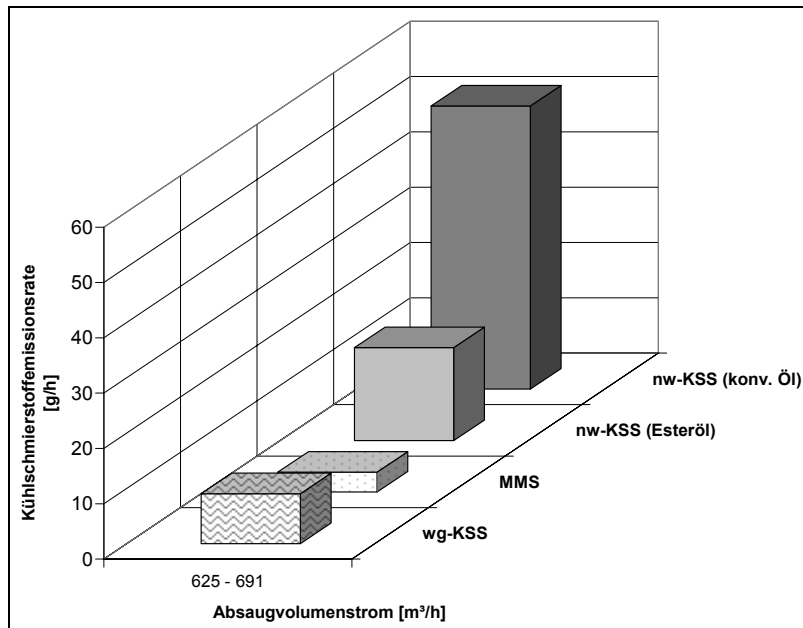
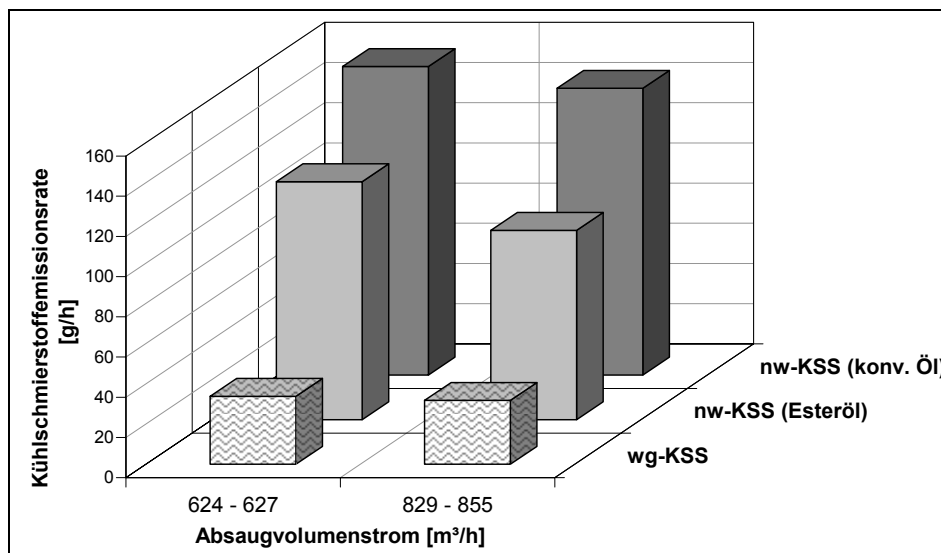


Abbildung 21:
Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenrundsleifen



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 ^{*)}	Partikelkonzentration in P/cm ³	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

^{*)} wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff;
MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

Tabelle 6:
Partikelverteilung bezogen auf die Masse

Tätigkeit	Kühlschmierstoff ^{*)}	Partikelkonzentration in mg/m ³	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

^{*)} 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 μm .

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.

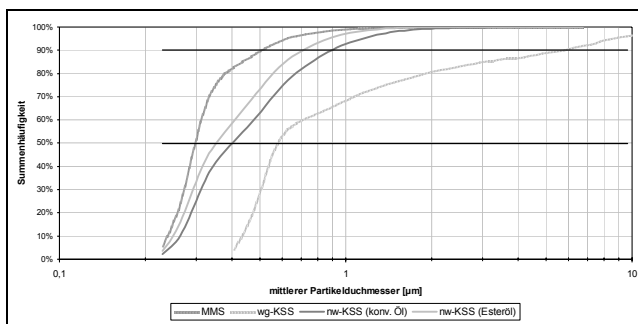


Abbildung 22:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Partikelanzahl
beim Messerkopfstirnräsen

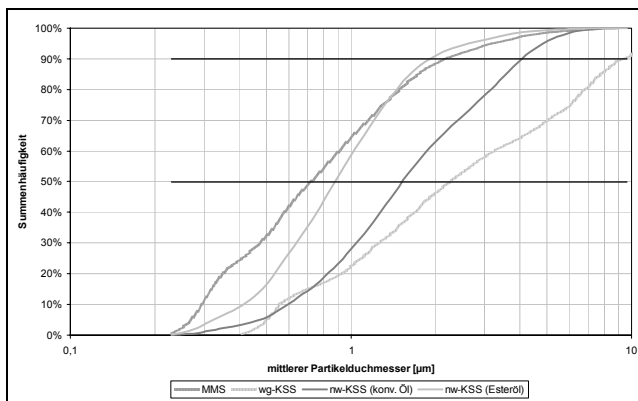


Abbildung 23:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Masse beim
Messerkopfstirnräsen

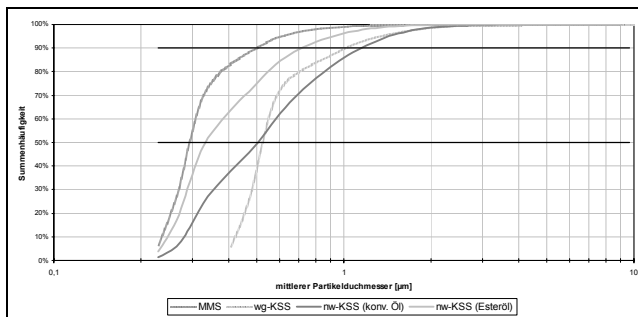


Abbildung 24:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Partikelanzahl
beim Außenlängsdrehen

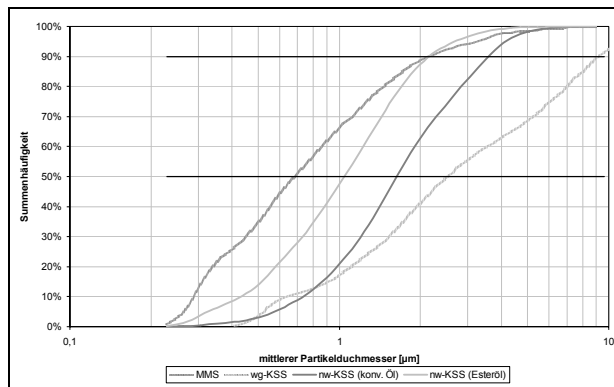


Abbildung 25:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Masse beim
Außenlängsdrehen

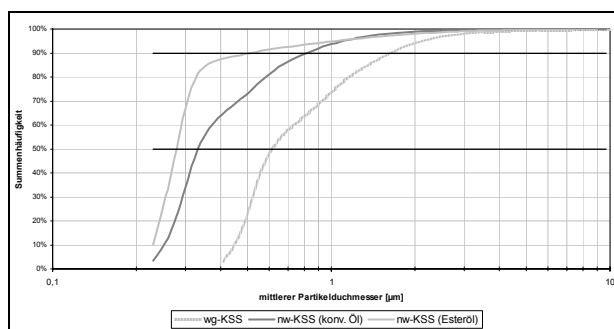


Abbildung 26:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Partikelanzahl
beim Außenrundscheifen

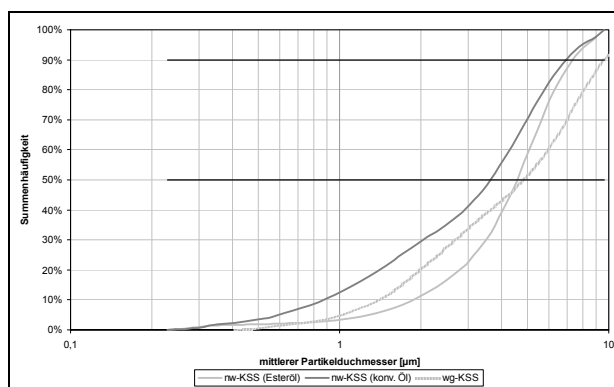


Abbildung 27:
Summenhäufigkeitsverteilung
bezogen auf die Masse beim
Außenrundscheifen

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

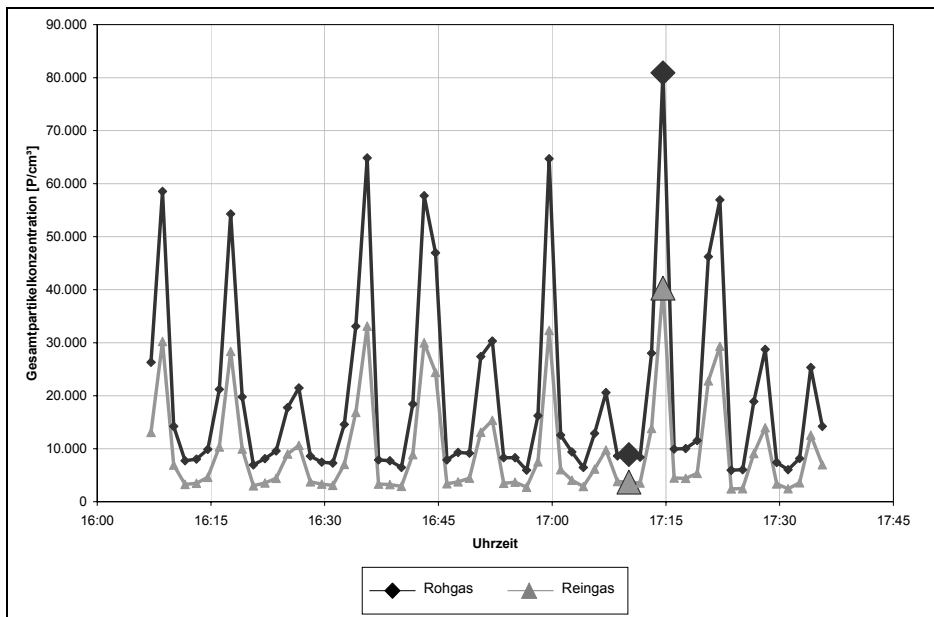
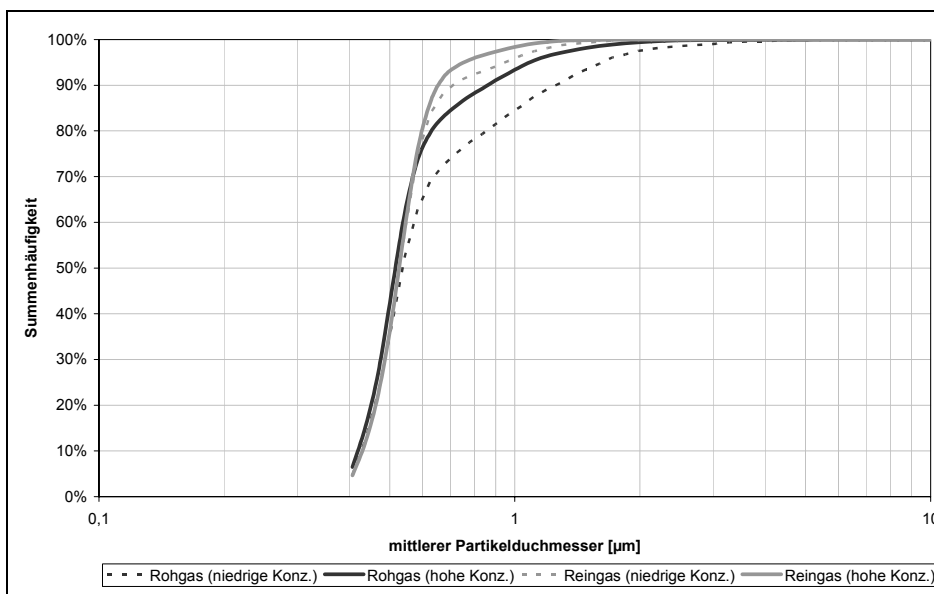


Abbildung 29:
Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitsverteilungen für das Schlichten und Schruppen beim Außenlängsdrehen





Im Wesentlichen liegt demnach eine gleichartige Verteilung vor. Lediglich im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 μm 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 μm 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 μm 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

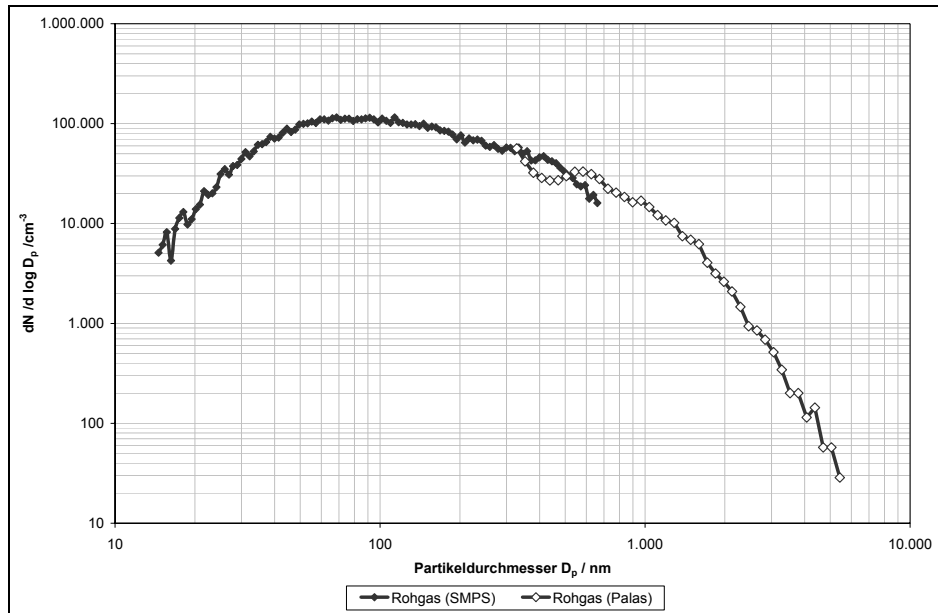
Parameter		Optischer Partikelzähler	SMPS
Untere Messbereichsgrenze in nm		220	14,6
Obere Messbereichsgrenze in nm		10 000	661,2
MMS	Gesamtpartikelkonzentration in P/cm ³	11 131	4 309 110
	Gesamtmassenkonzentration in mg/m ³	0,414	1,816
nw-KSS (konv. Öl)	Gesamtpartikelkonzentration in P/cm ³	35 042	112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

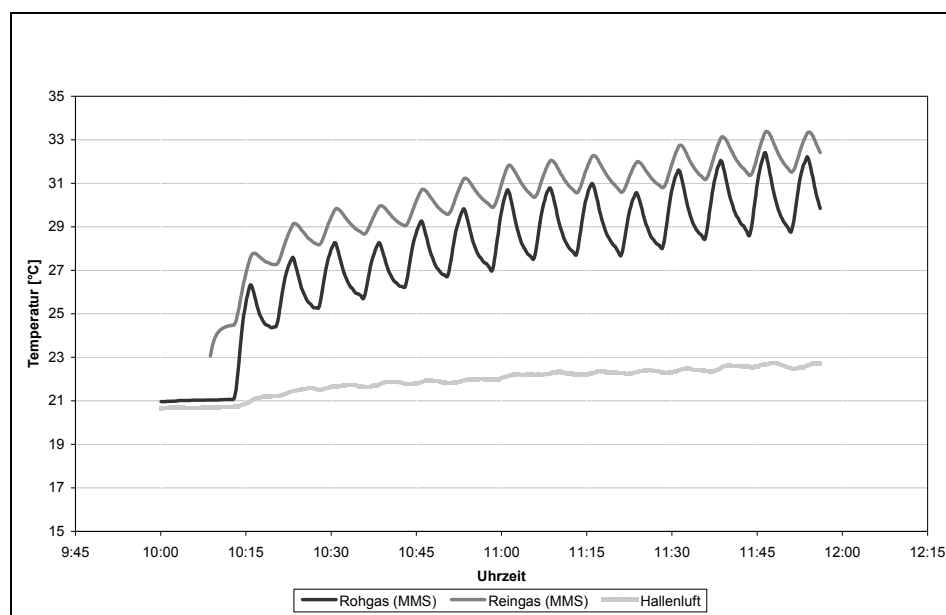
Tabelle 8:
Mittelwerte der Temperaturerhöhung in Abhängigkeit vom verwendeten Kühlschmierstoff

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

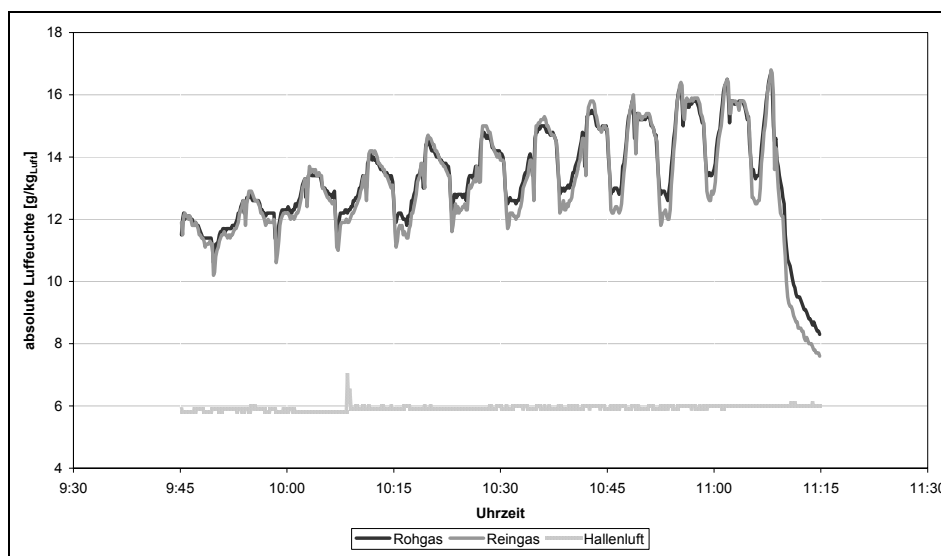




Außerdem ist ein kontinuierlicher Anstieg der Temperatur bis zum Ende der Bearbeitung festzustellen. Bei einer längeren Bearbeitungszeit wäre die Temperatur noch weiter angestiegen, die Messungen wurden also nicht im Gleichgewichtszustand durchgeführt. Dies könnte Auswirkungen auf das thermodynamische 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

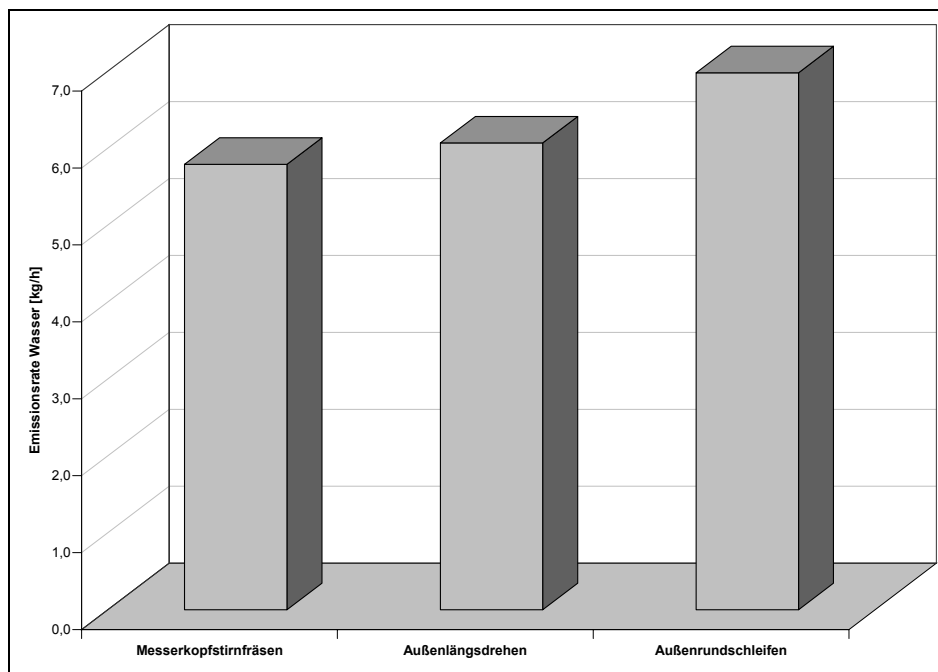


Die Verläufe der absoluten Luftfeuchte im Rohgas und im Reingas sind nahezu identisch. Die relative Luftfeuchte entspricht unter den vorliegenden Bedingungen während der Bearbeitung ungefähr 80 %. Bei den Versuchen konnte festgestellt werden, dass die KSS-Zufuhr unabhängig vom Bearbeitungsverfahren eine 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 m³/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.

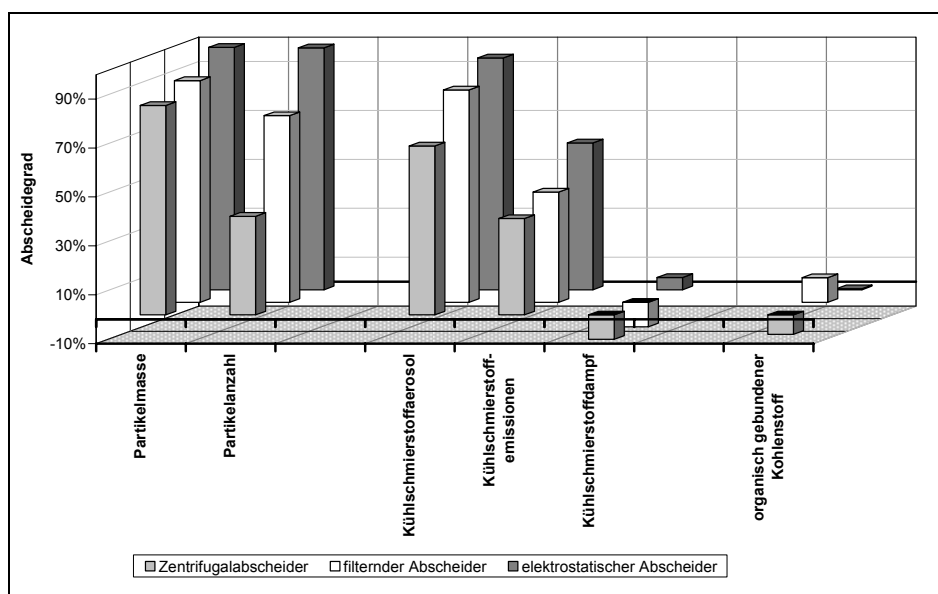
3.4.4 Abscheidegrade der eingesetzten Abscheider

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

- [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

- [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 m³/h, 12 m³/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.

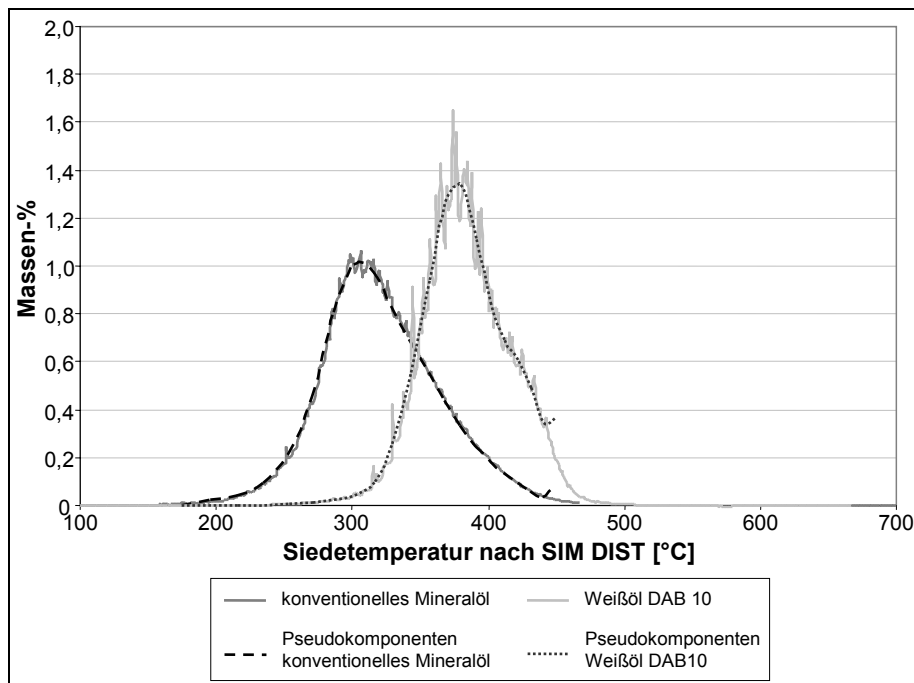


4.2 Modellierung der Kühlschmierstoffzusammensetzung

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)



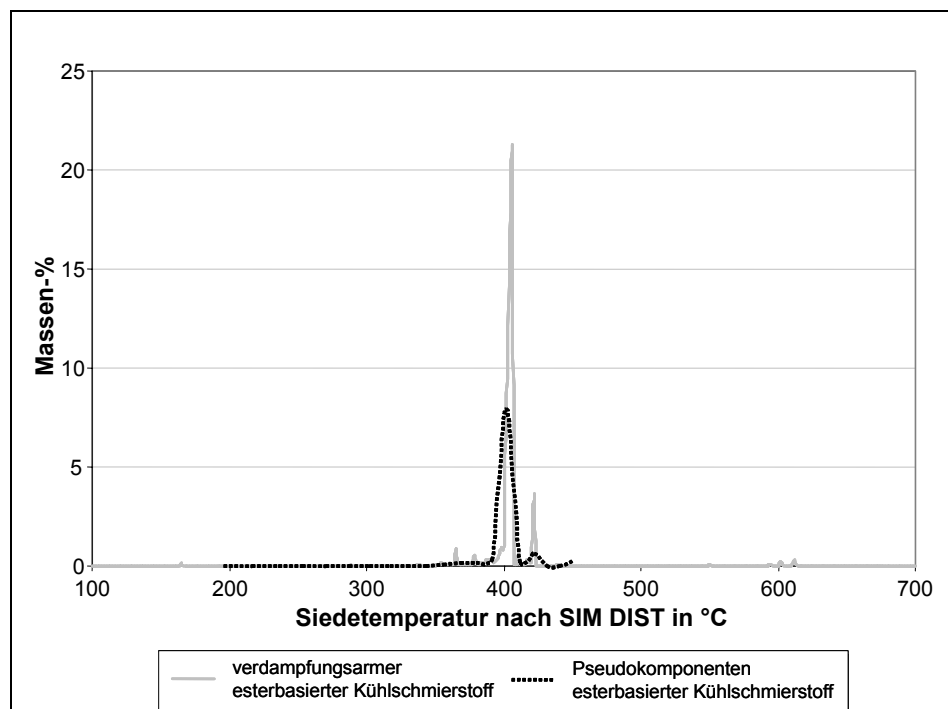
Die Komponenten, deren Siedetemperatur höher als 350 °C ist, haben bei Raumtemperatur einen vernachlässigbar kleinen Dampfdruck, der aber bei den Simulations-



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 ³	Dampfkonzentrationen bei Prüfstandsbedingungen mit Aerosolgenerator in mg/m ³	
		Rohgas ¹⁾ 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

¹⁾ Die Gesamtmenge an KSS im Rohgas beträgt 200 mg/m³.

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 CH₂-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 Nichtgleichgewichts-aerosole. 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 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.

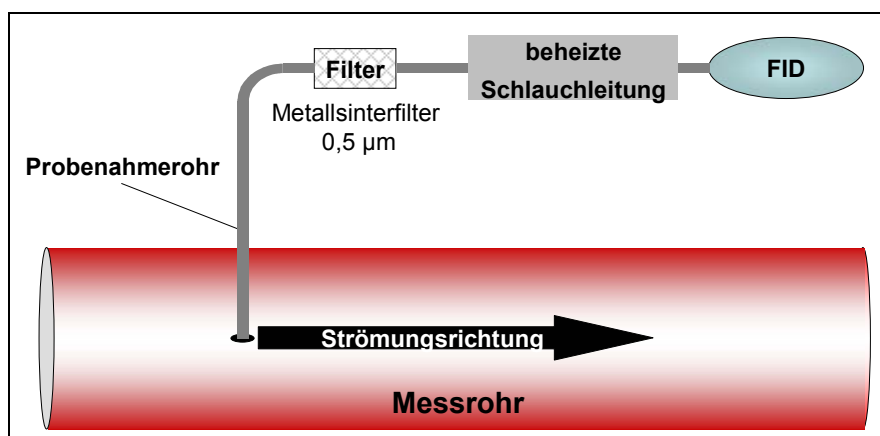


Mit der Zeit verarmt das Flüssigkeitsreservoir der Werkzeugmaschine an Leichtersiedern, sodass sich die Dampfemission verringert. Der Wärme- und Stoffaustausch der nicht vernebelten Flüssigkeit mit dem Trägergas hängt stark von den Bearbeitungsbedingungen der Werkzeugmaschine ab und ist nicht exakt modellierbar. 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].

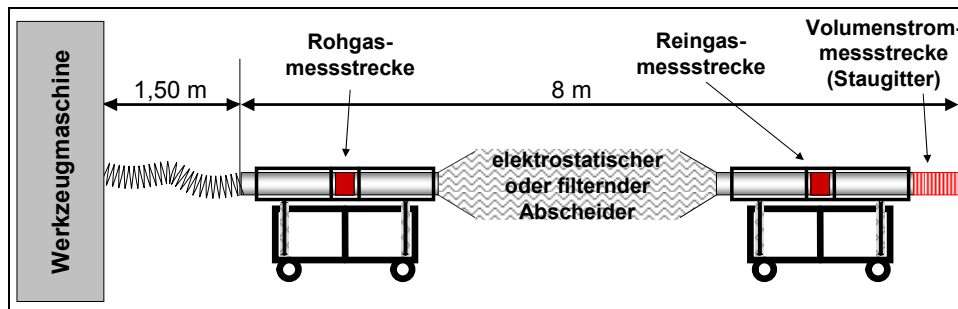
Da die Einflüsse der Tropfen auf die Dampfmessung durch das Probenahmesystem und den Vorfilter verursacht werden, sind sie von der Art des verwendeten Messgeräts unabhängig und können bei allen Aerosolen mit flüchtigen Komponenten auftreten.

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.



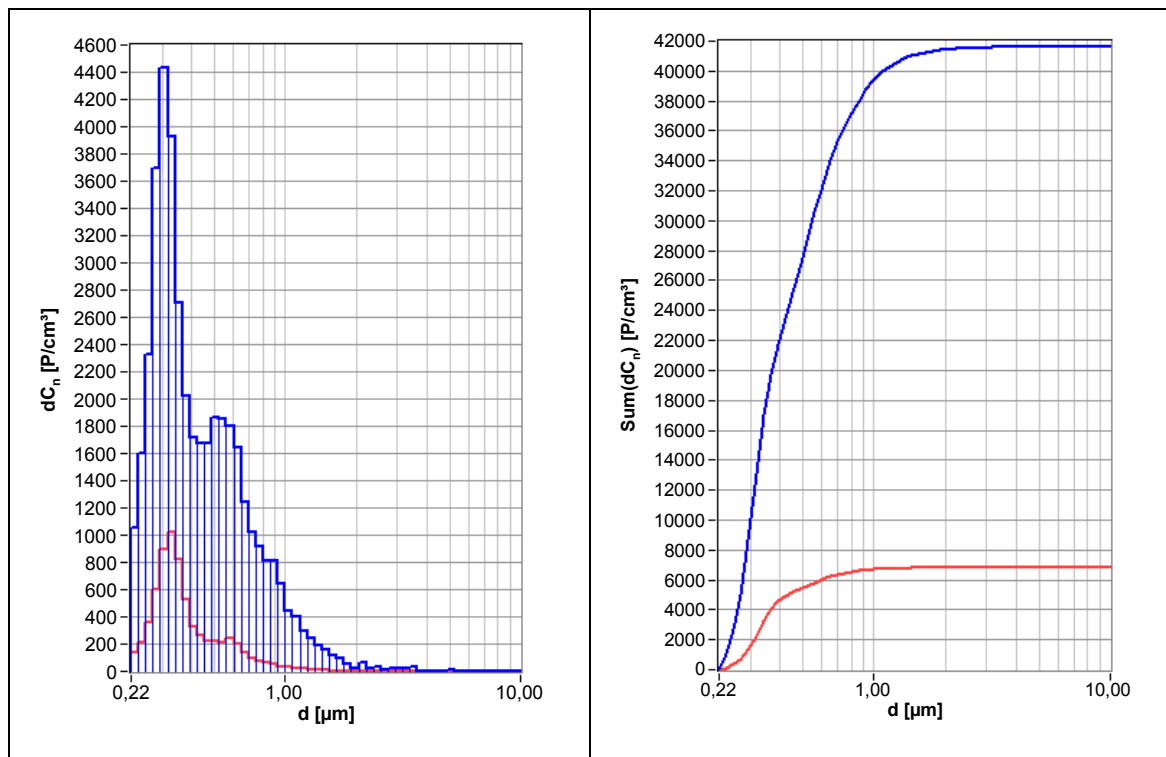
4.5 Verdunstungseinfluss auf die Messung des Fraktionsabscheidegradverlaufs

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 $E(X)$:

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

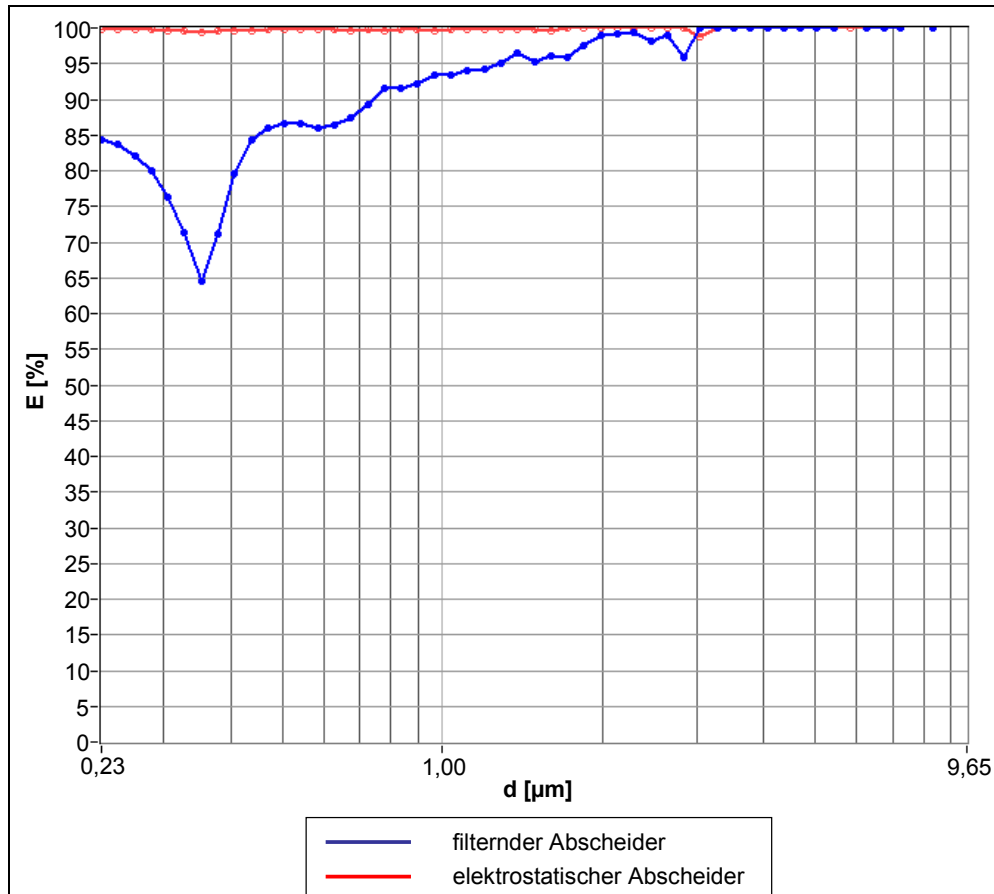
Ein Beispiel für den Verlauf der Fraktionsabscheidegrade des elektrostatischen und des filternden Abscheiders, die in der Messkampagne im WZL eingesetzt wurden, ist in Abbildung 6 (siehe Seite 82) dargestellt.

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.

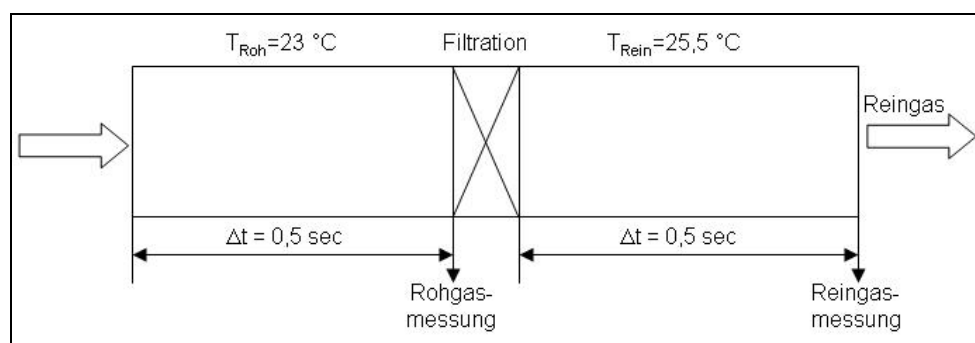
In AerSolve wird der Kelvin-Effekt, d. h. die Dampfdruckerhöhung kleiner Tropfen aufgrund der Oberflächenspannung berücksichtigt. Molekulare Stofftransportmechanismen werden in Form eines Korrekturfaktors für den Knudsen-Bereich analog zu Arbeiten von *Raynor* [15] dargestellt. Die Tropfentemperatur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

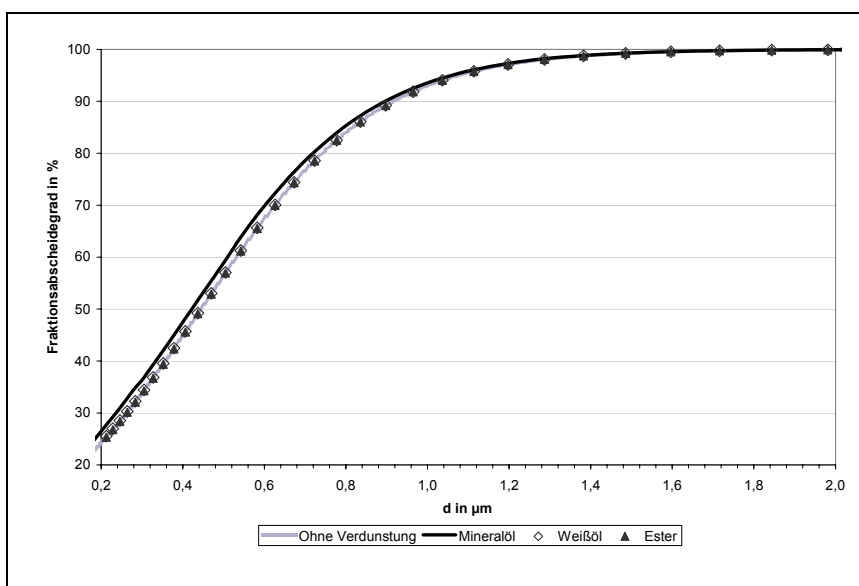


Abbildung 8:
Berechnete Verläufe
der Fraktionsabscheide-
grade

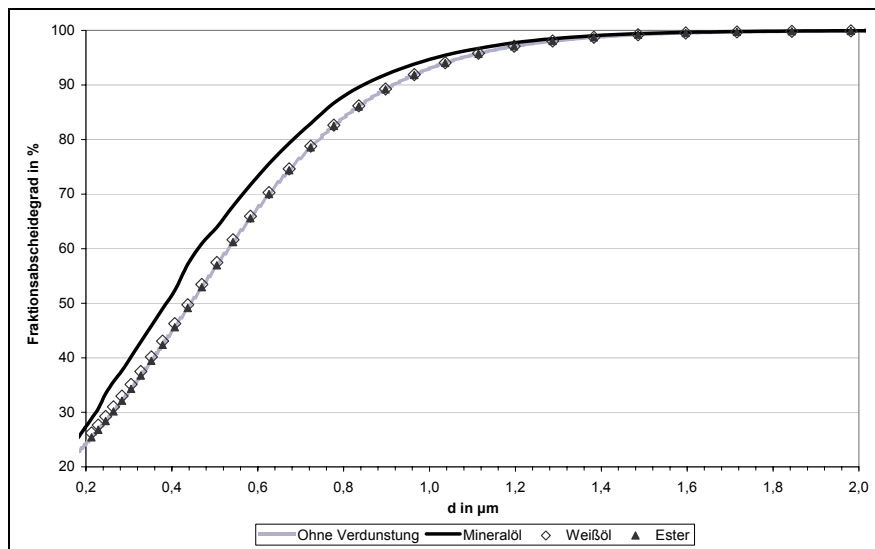


Die Anzahlkonzentration C_N des Aerosols beträgt $1,452 \times 10^6$ Tropfen/cm³ Gas. Die Verläufe des Fraktionsabscheidegrades des Weißöls und des Esteröls sind nahezu deckungsgleich mit dem Verlauf des Fraktionsabscheidegrades ohne Verdunstungseinfluss. Der Verlauf des Fraktionsabscheidegrades des 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



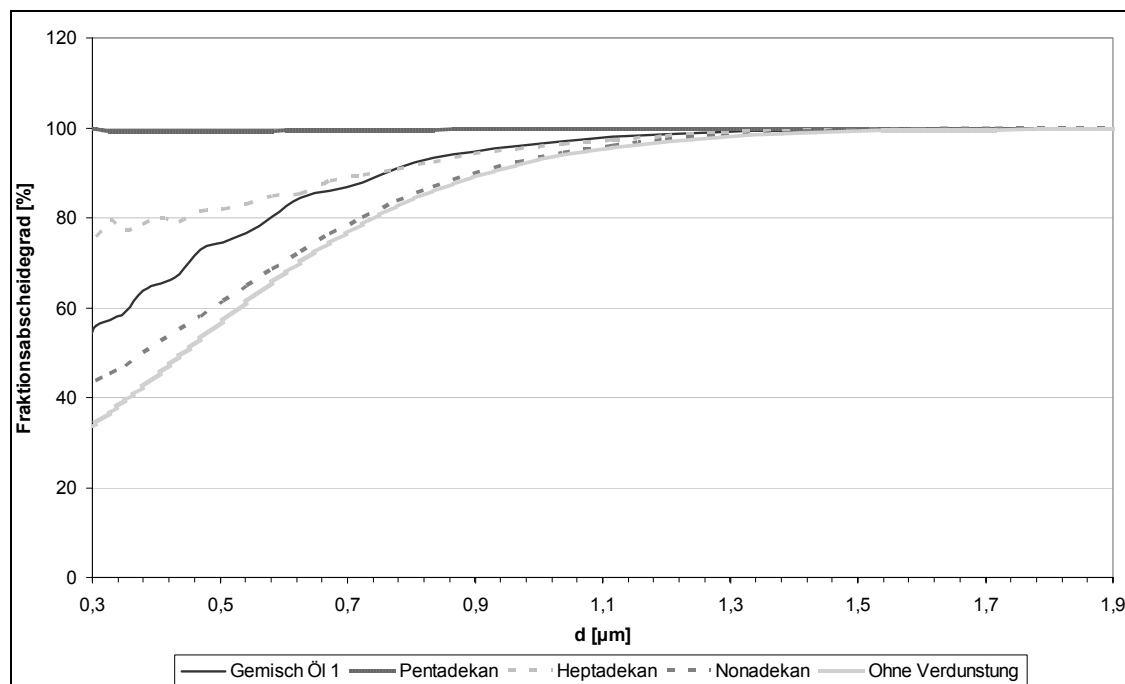
Die Abweichung des Fraktionsabscheidegrades der Rechnung mit dem Mineralöl vom Fraktionsabscheidegrad ohne Verdunstungseinfluss beträgt bis zu 8 %. Auch für diesen



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 „Dampfabsecheidung“ 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



5 Verbesserung der Stofffassung an Werkzeugmaschinen mittels Strömungssimulation ¹

Dipl.-Ing. Bing Gu,
Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Jörg Schmid,
Fa. HLK Stuttgart GmbH

5.1 Problembeschreibung

An Werkzeugmaschinen gelangen Kühlschmierstoffe (KSS) auf folgenden Wegen in die Produktionshalle und damit in den Aufenthaltsbereich der Beschäftigten:

- über die Restkonzentration in der sogenannten Reinluft,
- über die warmen bzw. heißen KSS-benetzten Späne und Werkstücke,
- über Öffnungen und Undichtigkeiten, wenn diese im Abschleuderbereich rotierender Teile liegen bzw. örtlich Überdruck herrscht,
- beim Öffnen der Türen am Ende eines Bearbeitungszyklus.

Um die KSS-Freisetzung über Öffnungen und Undichtigkeiten zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass an diesen Stellen Unterdruck herrscht. Daraus ergibt sich eine der wesentlichen Aufgaben des bei solchen Werkzeugmaschinen üblichen Abluftsystems; typische Luftwechselraten sind 300 h^{-1} und darüber. Mit diesem Luftwechsel soll auch das Ausströmen KSS-beladener Luft beim Öffnen der Einhausungstür vermieden werden. Weitere Aufgaben des Abluftsystems sind die Begrenzung der KSS-Konzentration sowohl aus Gründen des Explosionsschutzes als auch aus bearbeitungstechnischen Gründen sowie die Abfuhr thermischer Lasten. Letzteres ist allerdings nur bei der Minimalmengenschmierung bzw. bei der Trockenbearbeitung von Bedeutung, da bei der überfluteten Kühlung/Schmierung die wesentlichen thermischen Lasten vom KSS aufgenommen werden.

¹ Nachdruck aus: Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 417-422, Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Springer VDI Verlags, Düsseldorf



Eines der Probleme ist, dass die Wirkungsgrade von Abscheidern vom Luftstrom abhängen. Mit zunehmendem Luftstrom nehmen die Wirkungsgrade grundsätzlich ab, wodurch der Anteil der KSS-Bestandteile in der Reinluft steigt.

Die Forderung, dass keine Späne und/oder KSS-Partikeln aus der Maschine hinaus geschleudert werden, sollte in den meisten Fällen verhältnismäßig einfach zu erfüllen sein. Sofern die Abluftöffnungen nicht eindeutig außerhalb dieses Schleuderbereiches angeordnet sind, sollten sie mit einer Blende versehen werden, deren Durchmesser größer ist als derjenige der Abluftöffnung. Um zu vermeiden, dass größere KSS-Partikeln zum Abscheider gelangen, sollten sich sogenannte Spritzwasserabscheider bzw. Vorabscheider direkt an die Abluftöffnung an der Einhausung anschließen.

Dem Problem der Freisetzung von KSS-Partikeln über die Späne kann man begegnen, indem man die Späneabfuhr in das Abluftsystem einbezieht. Dies wird später anhand eines Beispiels gezeigt.

5.2 Analyse der Strömungsvorgänge in der Einhausung

Abbildung 1 zeigt eine der Drehmaschinen im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, die im Rahmen eines Teilprojekts exemplarisch untersucht wurde. In Abbildung 2 (siehe Seite 93) ist das Modell der Maschine für die Strömungssimulation mit den wesentlichen Einbauten sowie Öffnungen und Undichtigkeiten zu sehen.



Abbildung 1:
Drehmaschine im WZL der RWTH
Aachen

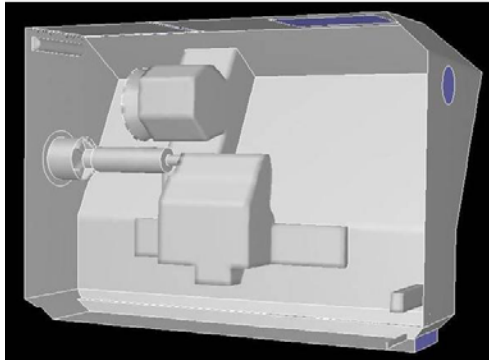


Abbildung 2:
Modell der Drehmaschine
für die Strömungssimulation

In den Abbildungen 3 bis 8 (siehe Seite 94 bis 96) sind die simulierten Strompfadlinien sowie die zugehörigen Druckverhältnisse in der Einhausung für einen Abluftstrom von $650 \text{ m}^3/\text{h}$ und für eine maximale Spindeldrehzahl der Maschine von $3\,000 \text{ U/min}$ dargestellt. Gezeigt werden die Verhältnisse für die Fälle,

- dass nur die Abluftanlage in Betrieb ist (keine rotierenden Teile),
- dass nur die Spindel etc. rotiert (ohne Abluftstrom) und
- die dem realen Betrieb entsprechende Kombination beider Vorgänge.

Abbildung 3 zeigt die Strompfadlinien ausgehend von der Öffnung für die Späneabfuhr. Für den Fall, dass nur die Abluftanlage in Betrieb ist, gelangt etwa die Hälfte der nachströmenden Luft durch diese Öffnung in die Einhausung. Der Luftstrom legt sich an den Boden an und strömt nach links. Von der Seitenwand wird er dann nach oben und im weiteren Verlauf von der Decke wieder nach rechts zur Abluftöffnung hin abgelenkt.

Die zugehörige Druckverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt. Im Mittel herrscht ein Unterdruck gegenüber der Umgebung von etwa 7 Pa . Man erkennt, dass der Unterdruck an den Umlenkstellen in den beiden Ecken links unten und oben wegen des Staudrucks der Luftströmung etwas schwächer ist.

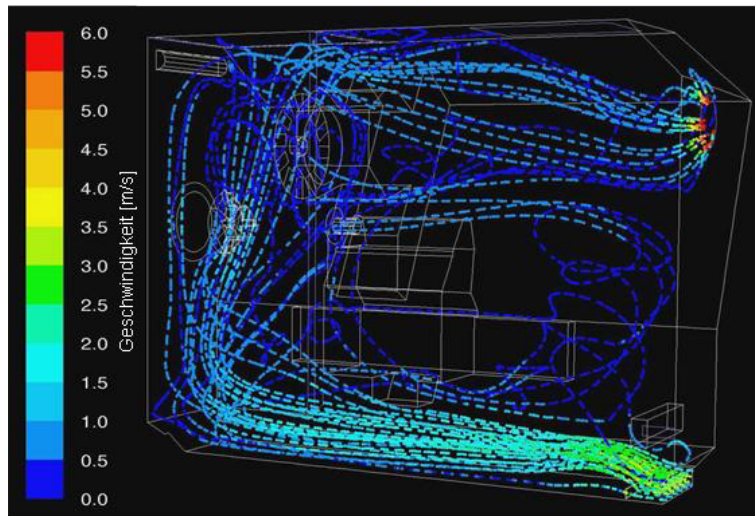


Abbildung 3:
Strompfadlinien innerhalb
der Maschine bei ein-
geschalteter Abluftanlage

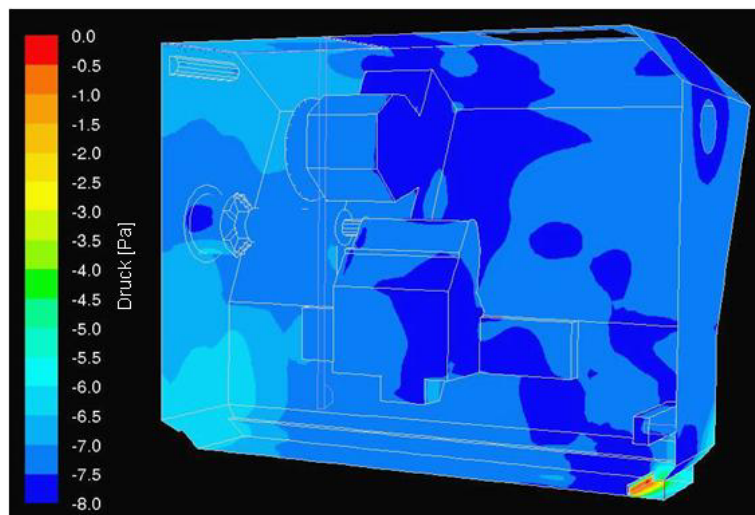


Abbildung 4:
Druckverteilung innerhalb
der Maschine bei ein-
geschalteter Abluftanlage

Bei abgeschalteter Abluftanlage wirken die Spannbacken der Drehmaschine wie ein Propeller, der die Luft radial verdrängt (Abbildung 5). Die Nachströmung erfolgt axial über das eingespannte Werkstück hinweg. Vom Backenfutter ausgehend entstehen so zwei entgegengesetzt gerichtete Luftwalzen. Im Bereich der Schließfugen der von rechts nach links schließenden Schiebetür entsteht Überdruck (Abbildung 6). An diesen Stellen kann KSS-beladene Luft ausströmen. Bei der Kombination beider Vorgänge, die der Simulation des realen Betriebs entspricht, sind keine klaren Luftwalzen mehr zu erkennen (Abbildung 7). Die Strömung erfasst in diesem Fall die gesamte Einhausung. Der vom Abluftventilator erzeugte Unterdruck reicht nicht aus, um das Ausströmen von KSS-beladener Luft an den bereits erwähnten Türfugen zu vermeiden (Abbildung 8).

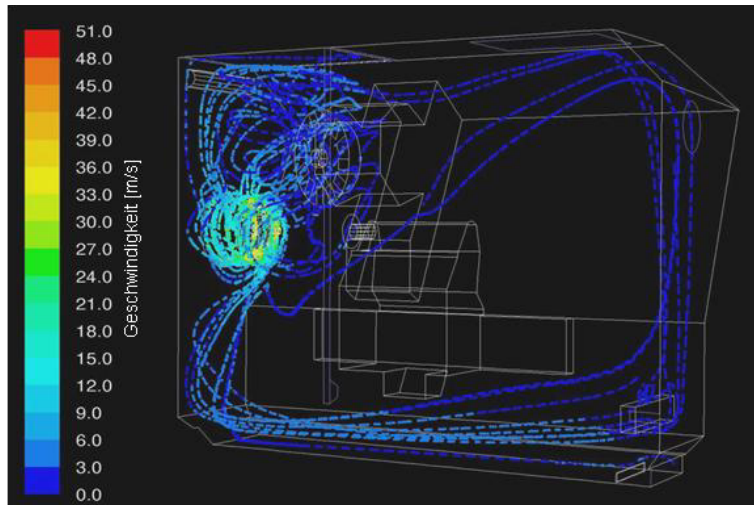


Abbildung 5:
Strompfadlinien innerhalb
der Maschine bei abge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

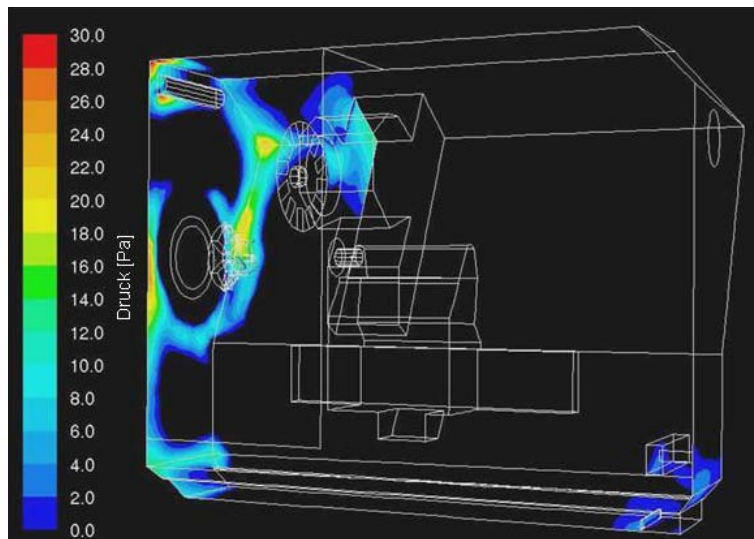


Abbildung 6:
Druckverteilung innerhalb
der Maschine bei abge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

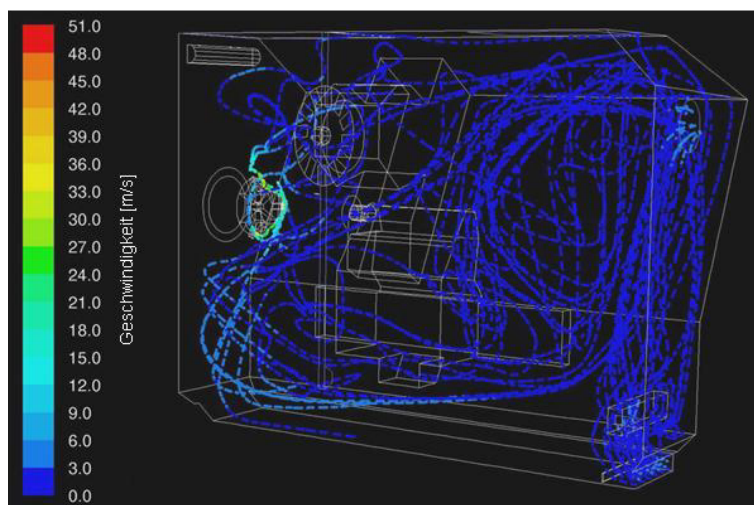


Abbildung 7:
Strompfadlinien innerhalb
der Maschine bei einge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

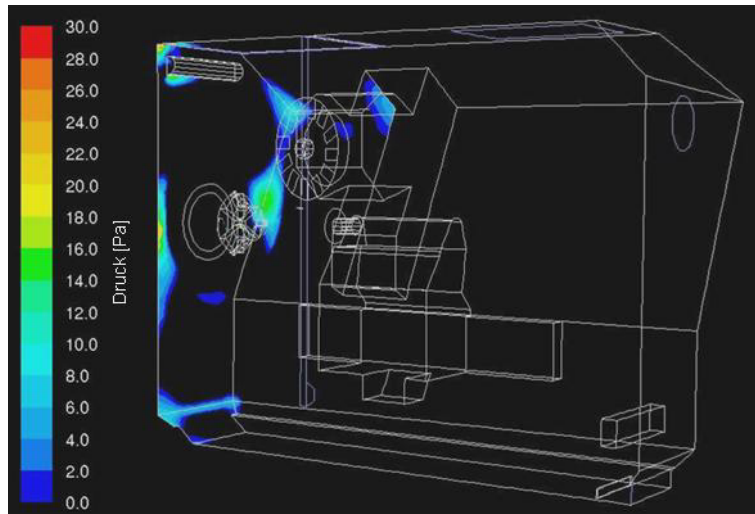
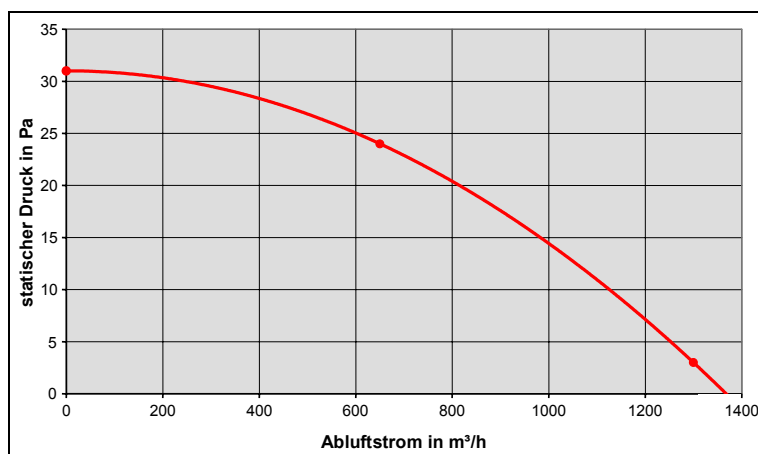


Abbildung 8:
Druckverteilung innerhalb
der Maschine bei eingeschalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

5.3 Ermittlung der Mindestabluftröme

Aus dem Vergleich der Druckverhältnisse bei Rotation von Spindel und Werkzeug ohne Abluftstrom mit den entsprechenden Druckverhältnissen bei Betrieb der Abluftanlage kann der Zusammenhang zwischen dem statischen Druck an den potenziell undichten Stellen der Einhausung und dem Abluftstrom abgeleitet werden. Der Durchmesser der Abluftöffnung spielt in dieser Hinsicht praktisch keine Rolle. Abbildung 9 verdeutlicht den Zusammenhang.

Abbildung 9:
Grafische Ermittlung des Mindestabluftröms für eine
Drehmaschine mit einer Spindeldrehzahl von 3 000 U/min

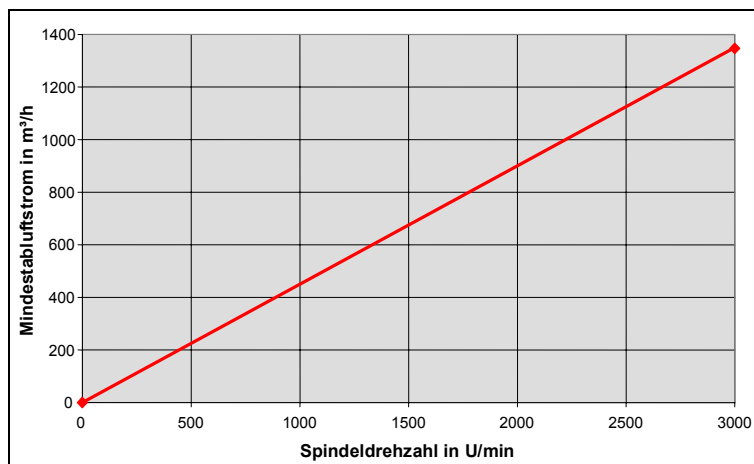




Für die Ermittlung des Verlaufs genügen zwei Punkte, weil man weiß, dass die Abhängigkeit zwischen den beiden Größen quadratisch ist. Die Maschine erreicht demnach bei Betrieb mit einer Maximaldrehzahl von 3 000 U/min erst bei einem Abluftstrom von 1 350 m³/h an den kritischen Stellen einen statischen Druck von 0 Pa.

In Abbildung 10 ist der Zusammenhang zwischen dem Mindestablufstrom und der Spindeldrehzahl dargestellt. Wenn innerhalb der Einhausung keine bzw. nur geringe Thermik vorliegt und keine Teile rotieren, ist auch kein Abluftstrom erforderlich. Damit ist der Nullpunkt vorgegeben. Aufgrund des linearen Zusammenhangs der beiden Variablen genügt ein weiterer Punkt für die Erstellung des Diagramms.

Abbildung 10:
Abhängigkeit des Mindestablufstroms von der Spindeldrehzahl



Bei den Versuchen des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BGIA im WZL an dieser Maschine betrug die maximale Drehzahl beim Schlichten 950 U/min. Aus Abbildung 10 folgt, dass unter diesen Bedingungen ein Mindestablufstrom von etwa 450 m³/h erforderlich gewesen wäre.

Wenn der Abluftstrom nicht wegen anderer Anforderungen, z. B. Begrenzung der KSS-Konzentration aus Gründen des Explosionsschutzes oder der notwendigen Abfuhr thermischer Lasten, hoch gehalten werden muss, besteht also die Möglichkeit, den Abluftstrom an die Spindeldrehzahl zu koppeln und so den Abscheidegrad am Abscheider günstig zu beeinflussen.



5.4 KSS-Konzentration in der Abluft

Es stellt sich nun die Frage, ob es möglich ist, durch eine entsprechende Anordnung der Abluftöffnung in der Einhausung den Mindestabluftstrom auch für stationäre Bearbeitungsvorgänge zu senken und damit die Abscheider zu entlasten.

Im stationären Betrieb muss aus Bilanzgründen der aus der Maschine abgeführte KSS-Strom genau so groß sein wie der an der Quelle. Dabei ist nicht der über die verschiedenen Zufuhrsysteme in die Einhausung eingebrachte KSS-Strom ausschlaggebend, sondern der Strom an luftgetragenen KSS-Partikeln, der an der Bearbeitungsstelle entsteht. Man kann davon ausgehen, dass dieser KSS-Quellstrom im Wesentlichen vom Bearbeitungsvorgang und der Art der Einbringung abhängt. Damit ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen der Quellstärke $\dot{m}_{\text{KSS, luftgetragen}}$ und dem Abluftstrom \dot{V}_{Abluft} und somit die mittlere Konzentration K_{KSS} in der Abluft:

$$K_{\text{KSS}} = \frac{\dot{m}_{\text{KSS, luftgetragen}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} \quad (1)$$

Für den stationären Fall ist die KSS-Konzentration in der Abluft demnach unabhängig vom Ort der Anbringung innerhalb der Einhausung.

5.5 Einfluss der Luftführung auf die KSS-Konzentrationsverteilung in der Einhausung

Die Abbildungen 11 bis 14 (siehe Seite 99 ff.) zeigen die Verteilung der KSS-Konzentration in einer Längsebene der Einhausung für einen Referenzfall und drei Varianten. Die Skalierung der KSS-Konzentrationen ist normiert auf die mittlere Konzentration in der Abluft. Demnach zeigen die roten Bereiche örtliche Konzentrationen, die dreimal so hoch sind wie die in der Abluft.

Im Referenzfall (Abbildung 11) erfolgt der Schlichtvorgang bei einer Drehzahl von 950 U/min. Dies entspricht einer Schnittgeschwindigkeit von 400 m/s bezogen auf den aktuellen Werkstückdurchmesser. Die Abluft wird über die vorgesehene Abluftöffnung (rechts oben im Bild) abgeführt (650 m³/h). Die Konzentrationsverteilung ist



sehr ungleichmäßig und die mittlere Konzentration in der Einhausung hoch. Sie beträgt das 1,4-fache der Konzentration in der Abluft.

Abweichend vom Referenzfall ist in Variante I die Abluftöffnung geschlossen (Abbildung 12). Das Abluftsystem ist stattdessen an die Öffnung für die automatische Späneabfuhr angeschlossen. Die Bereiche hoher Konzentration sind kleiner als im Referenzfall und somit ist auch die mittlere Konzentration in der Einhausung deutlich niedriger. Sie beträgt hier das 0,9-fache der Konzentration in der Abluft.

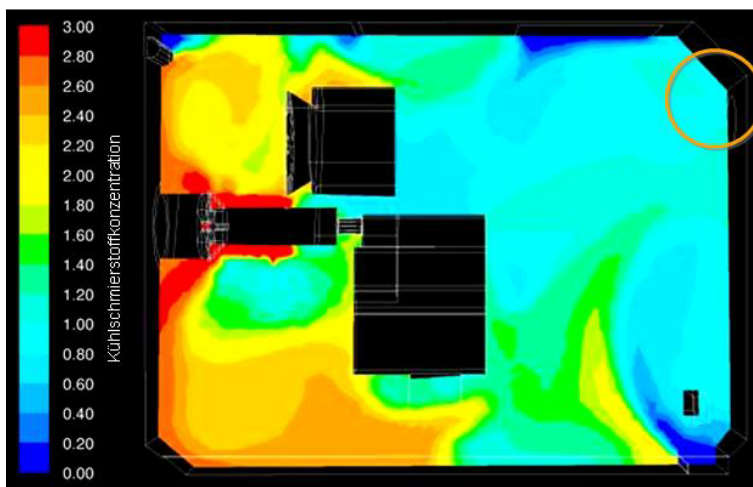


Abbildung 11:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration im Referenzfall

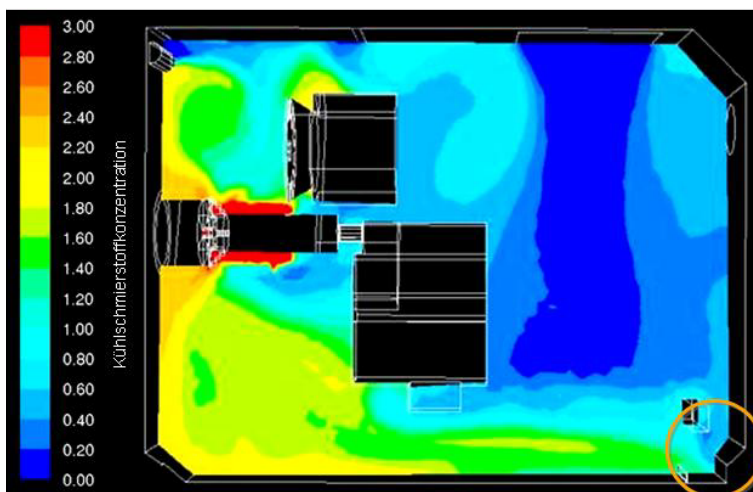


Abbildung 12:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration für Variante I

In Variante II werden die oberen Türfugen als Abluftöffnungen angenommen (Abbildung 13, Seite 100). Hier sind die Verhältnisse im Vergleich zu Variante I nochmals verbessert. Die mittlere Konzentration in der Einhausung beträgt nur das 0,4-fache der Abluft.



In Variante III wird die Luft im Bereich der Öffnung für die Späneabfuhr so zugeführt, dass gezielt ein regelrechter hydraulischer Kurzschluss hin zur Abluftöffnung entsteht (Abbildung 14). Entsprechend hoch ist die mittlere Konzentration in der Einhausung, sie beträgt das 1,5-fache der Abluft.

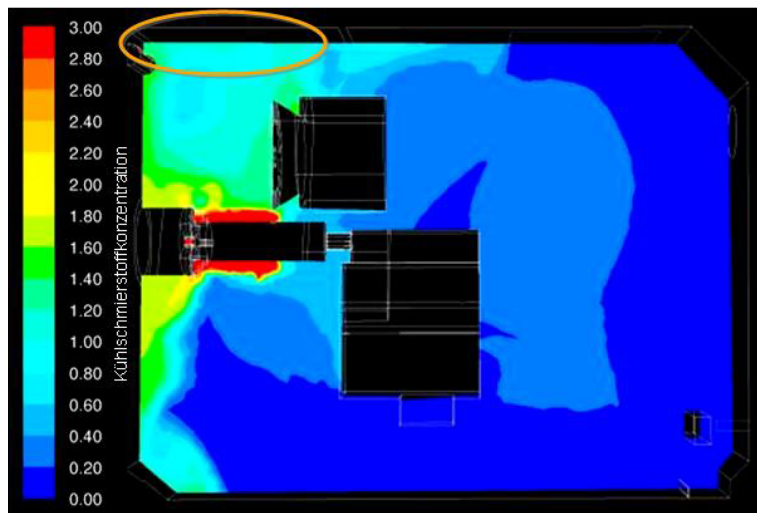


Abbildung 13:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration für Variante II

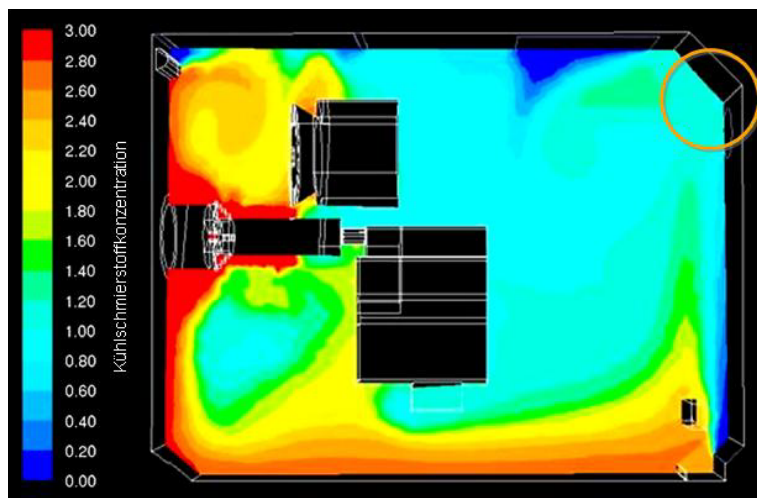


Abbildung 14:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration für Variante III

Die KSS-Konzentration in der Abluft stellt kein geeignetes Kriterium für die Anordnung der Abluftöffnungen innerhalb der Einhausung dar. In Verbindung mit der Führung der Zuluft hat die Anordnung aber großen Einfluss auf die Konzentrationsverteilung und die mittlere Konzentration in der Einhausung. Dies wiederum ist wichtig im Hinblick auf den Explosionsschutz und hinsichtlich der Anfangsbedingungen für den Moment des Türöffnens.



5.6 Instationäre Vorgänge beim Öffnen der Einhausung am Ende eines Bearbeitungsvorgangs

Immer wieder wird die Frage diskutiert, ob während des stationären Bearbeitungsvorgangs oder während des instationären Vorgangs beim und nach dem Öffnen der Einhausungstür mehr KSS-Partikeln bzw. -masse in die Produktionsbereiche entweichen. Die Zeitkonstante T für die mittlere Konzentration an luftgetragenen KSS-Partikeln nach Beginn eines Bearbeitungsvorgangs ist folgendermaßen definiert:

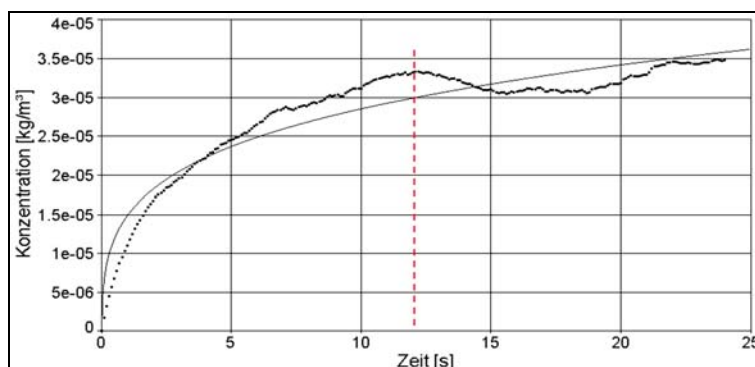
$$T = \frac{m_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{m}_{\text{Abluft}}} \hat{=} \frac{V_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} \hat{=} \frac{1}{n} \text{ in s} \quad (2)$$

Sie entspricht dem Kehrwert der dimensionslosen Luftwechselrate n in Sekunden. Angewandt auf die untersuchte Drehmaschine ergibt sich wie folgt eine Zeitkonstante von 12 s:

$$T = \frac{V_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} = \frac{2,2 \text{ m}^3}{650 \text{ m}^3/\text{h}} \approx 12 \text{ s} \quad (3)$$

Nach einer Zeitspanne, die dem Vier- bis Fünffachen dieser Konstante entspricht – also nach weniger als einer Minute – ist der Endwert praktisch schon erreicht (siehe Abbildung 15). Der simulierte Verlauf der Aufkonzentration – durchgezogene Linie in Abbildung 15 – stimmt gut mit dieser Annahme überein.

Abbildung 15:
Zeitabhängiger Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung der Drehmaschine für den Schruppvorgang





Welcher Einfluss überwiegt, hängt also davon ab, welche KSS-Mengen beim Türöffnen einerseits und beim stationären Bearbeitungsvorgang andererseits (hier pro Zeiteinheit) freigesetzt werden und wie sich diese beiden Phasen zum gesamten Maschinenzyklus im konkreten Fall zusammensetzen.

Die Vorgänge beim Türöffnen sind sehr verschieden und hängen neben der Maschinengeometrie von folgenden Faktoren ab:

- Luftgeschwindigkeiten und -richtungen unmittelbar vor der Türöffnung; die hier gespeicherten Impulse bauen sich zwar schnell ab, beeinflussen aber den Vorgang während der allerersten Zeit nach bzw. während des Türöffnens.
- Thermik an mehr oder weniger heißen Werkzeugen und Werkstücken
- Abluftstrom und Luftführung bei offener Tür; beides kann vom Fall der stationären Bearbeitung abweichen.

Abbildung 16 (siehe Seite 103) gibt den Verlauf der KSS-Konzentration in der Einhausung in zwei senkrecht zueinander stehenden Schnittebenen bei geöffneter Tür am Ende eines Schruppvorgangs wieder. Dargestellt sind die Konzentrationsverteilungen für die Zeitpunkte unmittelbar nach dem Öffnen der Tür sowie nach einer Sekunde, nach vier Sekunden und nach ungefähr zehn Sekunden. Die Bilder vermitteln einen Eindruck davon, wie schnell die KSS-beladene Luft in der Einhausung abgesaugt wird.

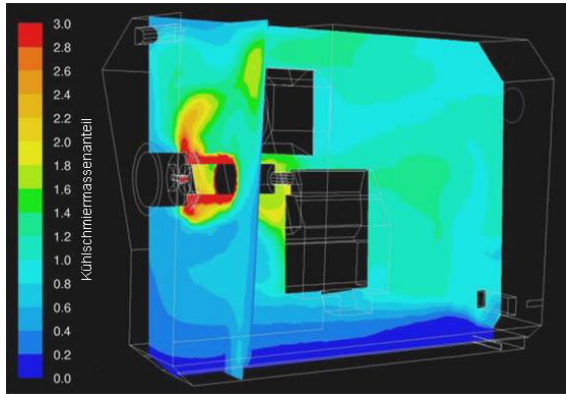
Abbildung 17 (siehe Seite 104) zeigt für die gleichen Zeitpunkte wie in Abbildung 16 die Konzentrationsverteilungen in der Einhausung und im Bedienbereich des Arbeiters. Die Schnittebene liegt diesmal in der Mitte der Tür. Dabei ist zu beachten, dass wegen der gewählten Skalierung nur Konzentrationen bis zum 0,1-fachen der Abluft dargestellt werden. Es ist deutlich zu sehen, wie nach wenigen Sekunden KSS-beladene Luft in den Aufenthaltsbereich gelangt.



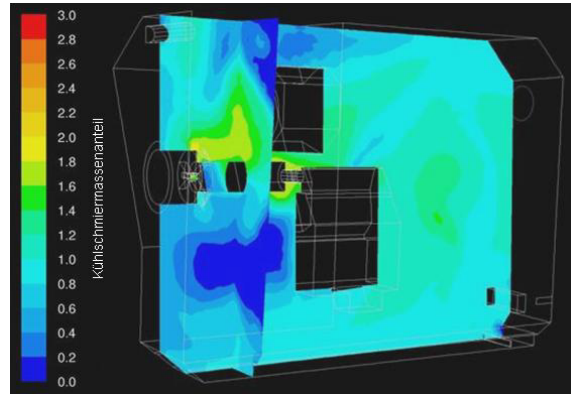
Abbildung 16:

Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung der Drehmaschine für den Schruppvorgang

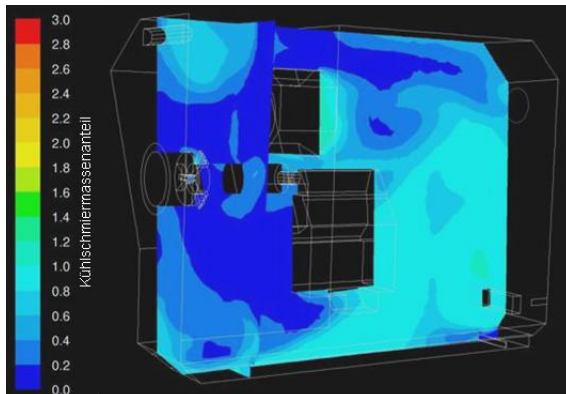
(a) direkt nach Öffnen der Tür



(b) eine Sekunde nach Öffnen der Tür



(c) vier Sekunden nach Öffnen der Tür



(d) ~10 Sekunden nach Öffnen der Tür

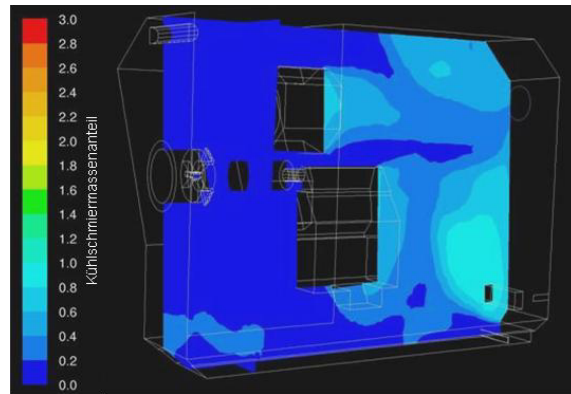
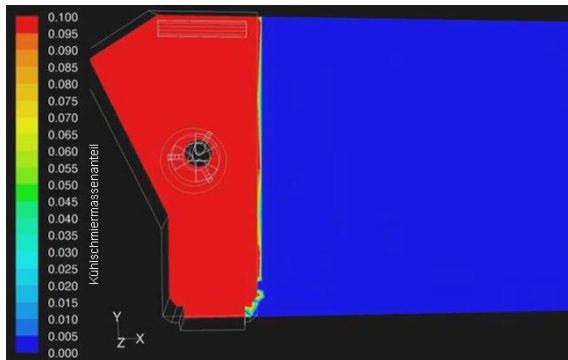


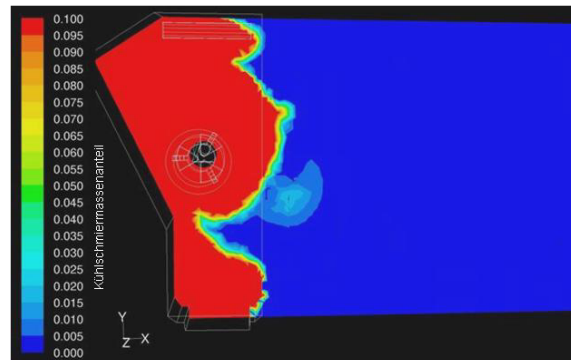


Abbildung 17:
Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung
der Drehmaschine für den Schruppvorgang

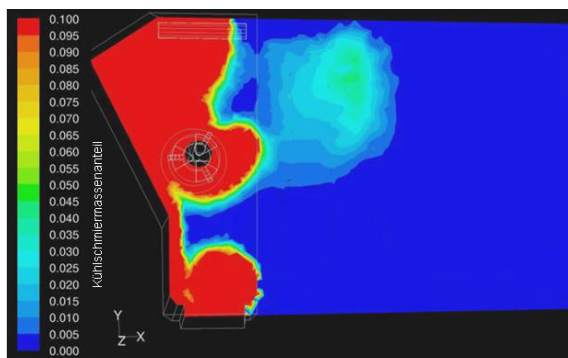
(a) direkt nach Öffnen der Tür



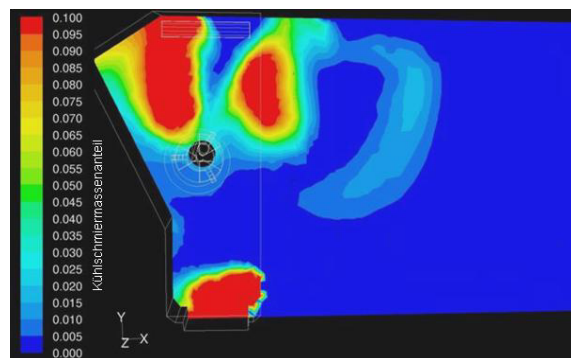
(b) eine Sekunde nach Öffnen der Tür



(c) vier Sekunden nach Öffnen der Tür



(d) ~ 10 Sekunden nach Öffnen der Tür



5.7 Zusammenfassung

- Die Druckverhältnisse in den Einhausungen werden von den rotierenden Teilen bestimmt. Die Abluftströme können an deren Drehzahl angepasst werden.
- Die Konzentration luftgetragener KSS-Bestandteile in der Abluft ist kein geeignetes Kriterium für die Anordnung der Abluftöffnungen innerhalb der Einhausung.
- Die Luftführung hat einen großen Einfluss auf Niveau und Verteilung der KSS-Konzentrationen in der Einhausung. Dies wiederum schafft mehr oder weniger günstige Bedingungen hinsichtlich des Explosionsschutzes sowie für die Phase des Öffnens der Einhausungstür.



- Wegen kleiner Zeitkonstanten gehen KSS-Konzentrationen schnell in stationäre Verhältnisse über, was für die Gewichtung der Emissionen während der Bearbeitung bzw. beim Türöffnen wichtig ist.

In weiteren Untersuchungen

- soll zum einen der Schwerpunkt von wassergemischten KSS auf mineralische und synthetische Öle verlagert werden,
- soll zum anderen der Schwerpunkt von „überfluteter“ Kühlung/Schmierung auf Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung (starke Thermik) verlagert werden,
- sollen die besonderen Belange des Explosionsschutzes berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sollen Untersuchungen zur Reduzierung der Entstehung von KSS-Aerosolen bei der Bearbeitung – also direkt am Ort der Entstehung – durchgeführt werden.



6 Messungen im Werkzeugmaschinenlabor – Konsequenzen für die Abscheider

Olaf Bernstorff,
Fa. GEA Delbag Lufttechnik, Herne

Ausgehend von dem Ziel, Kühlschmierstoff-(KSS)-Abscheider zu klassifizieren, wurden im Rahmen der Versuche im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen die Emissionsraten aus Werkzeugmaschinen ermittelt und erste Erkenntnisse zu Abscheidern gewonnen.

Es gibt vier klassische Filtersysteme, die auf sehr unterschiedlichen Abscheidemechanismen beruhen: Elektrofilter und speichernde Filter (z. B. Abbildungen 1 und 2) sowie Demisterfilter und Zentrifugalabscheider. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, werden zurzeit die Filternormen DIN EN 779 [1] und DIN EN 1822-5 [2] herangezogen. Beide Normen gelten aber nur behelfsmäßig, da sie grundlegende Faktoren für die KSS-Abscheidung vernachlässigen.



Abbildung 1:
Elektrofilter

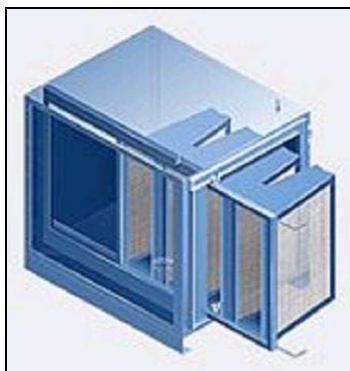


Abbildung 2:
Speichernder Filter



Die Messungen am WZL dienten dazu, die Rahmenbedingungen zu bestimmen und eine Klassifizierung der Abscheider vorzubereiten. Folgende Fakten, die in den Normen DIN EN 779 und DIN EN 1822 nicht berücksichtigt wurden, lassen sich festhalten:

- 50 Massen-% der an den Werkzeugmaschinen entstehenden Aerosole sind kleiner als $1,5 \mu\text{m}$.
- Zwischen 15 und 50 % (in der Regel um 20 %) der Emissionen emittieren als Dampfphase.
- Die Abscheidecharakteristik verändert sich im Laufe eines Wartungszyklus.
- Die Druckdifferenzen der Abscheider sind extrem unterschiedlich.

Darüber hinaus besteht das Problem, dass die KSS-Aerosole zum größten Teil aus Flüssigkeitspartikeln bestehen. Dies trifft zwar auch auf die Prüfung nach DIN EN 779 zu, in deren Rahmen der Wirkungsgrad mit Diethylhexylsebacat-Prüfaerosol (DEHS) geprüft wird. Jedoch sind zum einen die Konzentrationen bei der Prüfung mit DEHS um den Faktor 10 geringer und zum anderen liegt der Siedebereich des Prüfaerosols deutlich über dem der verwendeten KSS.

Für eine Klassifizierung der Abscheider müssen alle diese Faktoren berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind Zusatzinformationen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Durchströmgeschwindigkeit (speziell bei Elektrofiltern und Demistern) zu erheben.

Zur Durchführung vergleichender Messungen wird zurzeit ein Prüfstand im Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BGIA in Sankt Augustin eingerichtet (Abbildung 3, Seite 109). Erste Messungen sollen die Reproduzierbarkeit der Praxisbedingungen im WZL überprüfen. Im nächsten Schritt soll ein Prüfgrundsatz für Abscheider erstellt werden, der durch Beratung in verschiedenen Ausschüssen abschließend optimiert werden soll.



Abbildung 3:
Prüfstand im BGIA



Für die Messungen wurden im Vorfeld folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Es wird nicht nur der Gesamtabscheidegrad gemessen. Angelehnt an die Norm DIN EN 779 soll der Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Partikelgrößenfraktion erfasst werden. Insbesondere wird der Abscheidegrad für Partikelgrößen $< 1 \mu\text{m}$ bestimmt.
- Es werden nicht nur die Aerosole erfasst. Der Abscheidegrad muss immer im direkten Zusammenhang mit der Gasphase gesehen werden.
- Der Abscheidegrad kann sich immer nur auf einen Referenz-KSS beziehen. In der Praxis kann der Abscheidegrad daher vom Laborwert sowohl nach oben als auch nach unten abweichen.
- Da sich das Abscheideverhalten im Laufe eines Wartungszyklus stark verändert, muss der Prüfling künstlich vorgealtert werden.



- Der Abscheidegrad muss immer im Zusammenhang mit der Durchströmgeschwindigkeit bzw. dem Volumenstrom, der Temperatur und der Luftfeuchte gesehen werden.
- Eine Klassifizierung erfolgt nur im Zusammenhang mit einem definierten Filtergerät.

Vor den Messungen müssen noch folgende Fragen geklärt werden:

- Wie kann man die Filtersysteme künstlich voraltern?
- Wie fein soll die Abstufung der Filterklassen sein?
- Sollen Aerosolabscheidegrad und Gasphasenabscheidung zusammen angegeben werden oder getrennt?

Insgesamt zeichnet sich durch die Klassifizierung erstmals eine Möglichkeit für den Kunden ab, unabhängig von Herstelleraussagen ein für ihn optimales Filtersystem auszuwählen.

Literatur

- [1] DIN EN 779: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Bestimmung der Filterleistung (05.03). Beuth, Berlin 2003
- [2] DIN EN 1822-5: Schwebstofffilter (HEPA und ULPA) – Teil 5: Abscheidegradprüfung des Filterelementes (02.01). Beuth, Berlin 2001



7 Entwicklung eines Filterprüfstandes zum standardisierten Testen von Kühlschmierstoffabscheidern

Wilhelm Höflinger, Peter Wlaschitz,
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften
der Technischen Universität Wien

7.1 Einleitung

Filterprüfstände dienen dazu, für das jeweilige disperse Emissionsauftreten unterschiedliche Abscheider bzw. Filtermaterialien im Vergleich zueinander in ihrer Effizienz zu bewerten. Eine möglichst gleichbleibende standardisierte Apparatekonzeption und Versuchsdurchführung zielen darauf ab, die in ihrer Vielfalt möglichen Untersuchungsbedingungen auf die Mehrzahl der in der Praxis vorhandenen Betriebs- und Apparatebedingungen zu vereinheitlichen. Eine Filteruntersuchung stets nach dieser gleichen genormten Vorgehensweise sichert ein reproduzierbares und generell vergleichbares Testergebnis.

Beispiele solcher Filterprüfstände sind

- Prüfstände entsprechend VDI 3926 [1] nach Typ I und Typ II für abreinigbare Oberflächenstaubfilter sowie
- Tiefenfilterprüfstände nach DIN EN 779 [2] und DIN EN 1822 [3].

Allen diesen Prüfständen ist gemein, dass ein geeigneter Generator zur Erzeugung eines realitätsnahen Testaerosols oder Teststaubes vorhanden ist. Der Generator muss gewährleisten, dass sowohl eine über den Testzeitraum konstante als auch eine für Wiederholungsmessungen reproduzierbare Partikelkonzentration und -größenverteilung vorliegt. Eine Beaufschlagung der Filtereinheiten mit Aerosolen unterschiedlicher Eigenschaften würde keinen exakten Filtervergleich zulassen. Beispiele für geeignete Generatoren sind der Bürstendosierer und die Zweistoffdüse (Abbildungen 1 und 2, siehe Seite 112).



Abbildung 1:
Bürstendosierer (www.palاس.de)

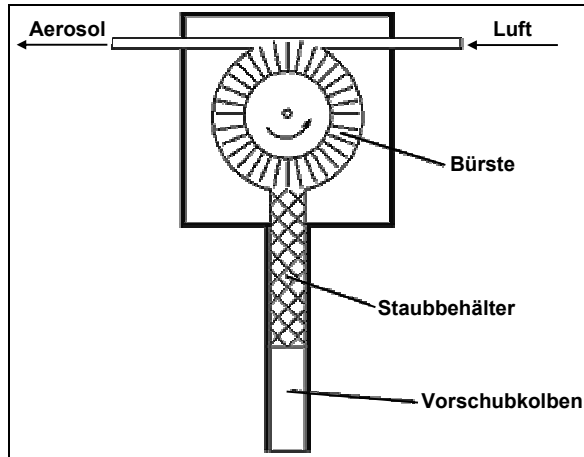
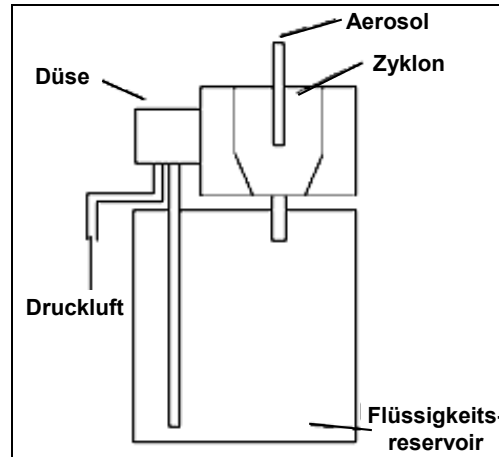
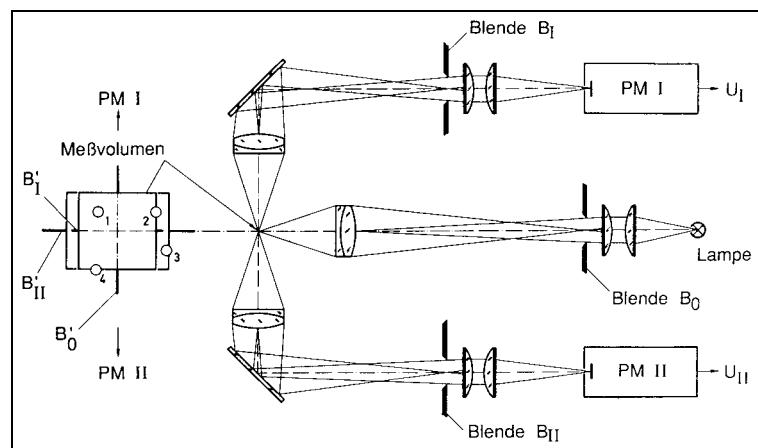


Abbildung 2:
Zweistoffdüse (www.palاس.de)



Darüber hinaus verfügen die Prüfstände über Aerosolmesssysteme, mit denen das Aerosol- oder Staubkorngrößenspektrum im relevanten Partikelgrößenbereich vor und nach der Filtereinheit kontinuierlich gemessen werden kann (Abbildungen 3 und 4, Seite 113).

Abbildung 3:
Streulicht-Partikelgrößenanalysator PCS 2010 und sein Funktionsprinzip (www.palاس.de)



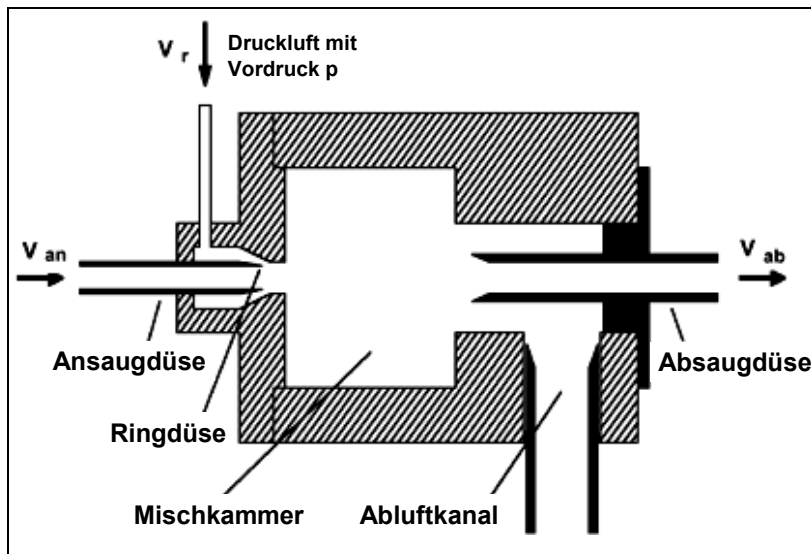


Abbildung 4:
Funktionsprinzip einer
Verdünnungsstrecke
(www.palas.de)

Als Prüfmaterialien stehen Teststäube, z. B. Quarzstaub und Titandioxid, und Testaerosole, z. B. Diethylhexylsebacat – DEHS, zur Verfügung.

Für einen Prüfstand zur Prüfung von Abscheidern für Kühlschmierstoffemissionen, wie sie bei der Bearbeitung von Werkstücken in der Metall verarbeiteten Industrie entstehen, gelten dieselben Anforderungen. Erschwerend kommt in diesem Fall hinzu, dass die Emissionen nicht nur aus einer partikulären, sondern auch aus einer dampfförmigen Komponente bestehen, die ebenfalls abgeschieden werden muss.

Im Rahmen von Forschungsaktivitäten an der Technischen Universität Wien, finanziert durch die Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Österreich, konnte ein entsprechender Nebelgenerator für KSS [4] und ein Messsystem für KSS-Emissionen [5] entwickelt werden, mit denen die partikulären und dampfförmigen Emissionen kontinuierlich messbar sind. Im Folgenden wird der derzeitige Entwicklungsstand beschrieben.

7.2 Nebelgenerator für Kühlschmierstoffe

Die allgemeinen Anforderungen an einen Nebelgenerator, nämlich

- eine über den Testzeitraum konstante Aerosol- und Dampfkonzentration,
- eine über den Testzeitraum konstante Aerosoltropfengrößenverteilung sowie
- ausreichend der Realität entsprechende Konzentrationsbereiche



werden durch das Generatorkonzept in Abbildung 5 verwirklicht.

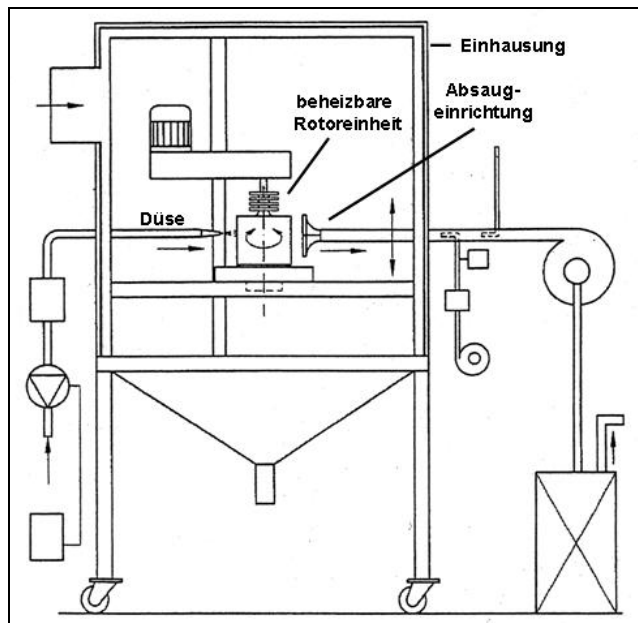


Abbildung 5:
Anlagenschema des
Aerosolgenerators

Kernstück des Aerosolgenerators ist eine beheizbare Rotoreinheit, die den KSS an austauschbaren Rotoren unterschiedlicher Form zerstäubt und so den Span abhebenden Bearbeitungsvorgang simuliert. Der Rotor wird über eine oder mehrere Düsen beliebiger Größe mit KSS beaufschlagt. Die gesamte Rotoreinheit befindet sich in einer Einhausung, die den im Betrieb gebildeten Nebel einschließt. Von dort wird er, analog zu einem Metallbearbeitungszentrum, abgesaugt.

Die Rotoreinheit (Abbildung 6, siehe Seite 115) besteht aus einem zylindrischen Stator, der mit dem Trägergestell fest verbunden ist. Der Stator ist mit Heizpatronen ausgestattet, die über Leitungen versorgt werden. Zudem sind im Rotor mehrere Temperaturfühler angeordnet, die über Leitungen an das Auswertegerät angeschlossen sind. Der Stator ist von einem hohlzylindrischen Probekörper umgeben, der mittels eines Stutzens und eines Konus mit Gewindekopf mit dem Getriebe gekuppelt ist. An seiner Mantelfläche ist er mit Zähnen zur Simulation der Schneidwerkzeuge ausgestattet. Am Stutzen befinden sich Kühlrippen.

An der Rotoreinheit können Probekörper beliebiger Form montiert werden. Der derzeit verwendete gezahnte Probekörper (Abbildung 7, siehe Seite 115) entspricht in Größe und Form etwa einem Walzenstirnfräser (Abbildung 8, Seite 115).



Abbildung 6:
Schema der beheizbaren Rotoreinheit [6]

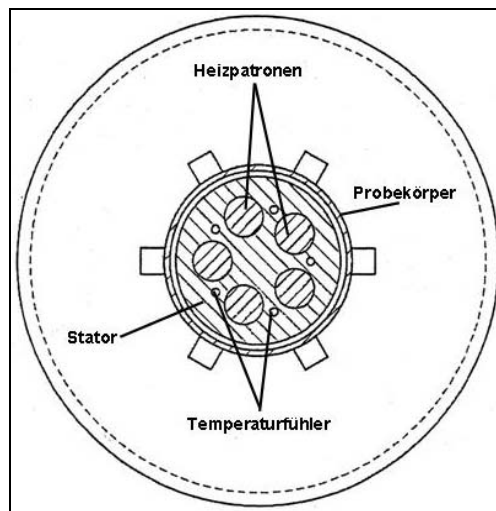
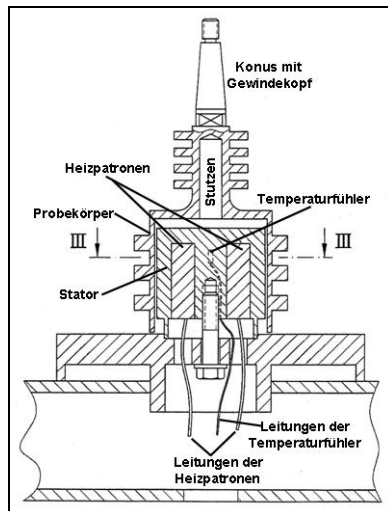


Abbildung 7:
Gezahnter Probekörper



Abbildung 8:
Walzenstirnfräser



Die maximale Rotordrehzahl von 15 000 U/min deckt alle bei verschiedenen Bearbeitungsvorgängen auftretenden Schnittgeschwindigkeiten ab (Tabelle 1).

Tabelle 1:
Schnittgeschwindigkeiten und Drehzahlen bei
der Span abhebenden Metallbearbeitung

Bearbeitungsvorgang		Ungefähre Schnittgeschwindigkeit in der Praxis in m/min	Drehzahl des Rotors (Durchmesser: 80 mm) in U/min
Drehen/Fräsen von	Stahl	120 bis 200	477 bis 795
	Gusswerkstoffen	150	596
	Aluminium	500	1 989
Schleifen		3 000	11 936



Das Generatorkonzept bringt folgende Vorteile:

- realitätsnahe Tropfen- und Dampferzeugung,
- über die Testzeit konstante Erzeugungsbedingungen,
- keine Verfälschung durch unterschiedliche Spanbildung (Verdampfung an heißen Spänen),
- kein Material- und Werkzeugverbrauch,
- Untersuchung des Temperatureinflusses möglich und
- prinzipiell für jede Art von KSS einsetzbar (Emulsionen und reine Öle).

7.3 Tropfengrößenverteilung und -konzentration des erzeugten Aerosols

Beispielhaft für das vom Nebelgenerator erzeugte KSS-Aerosol wurden im Absaugrohr des Generators isokinetisch mit dem Partikelstreulichtmessgerät, Typ PCS 2010 (PCS, particle counter sizer), der Fa. Palas die Tropfengrößenverteilungen für wassergemischte KSS sowohl auf Esteröl- als auch auf Mineralölbasis gemessen (Abbildungen 9 und 10).

Abbildung 9:
Tropfengrößenverteilung für einen wassergemischten Kühlschmierstoff auf Esterölbasis (Emulsion 5 %)

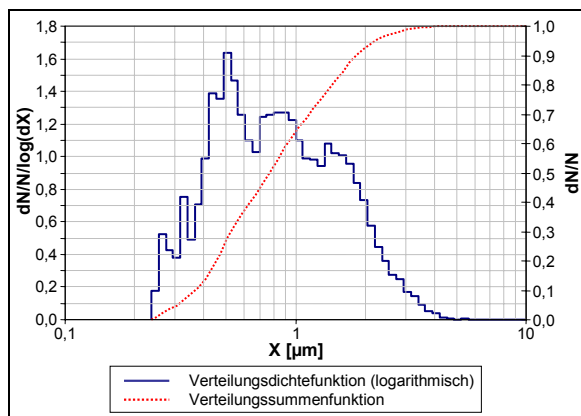
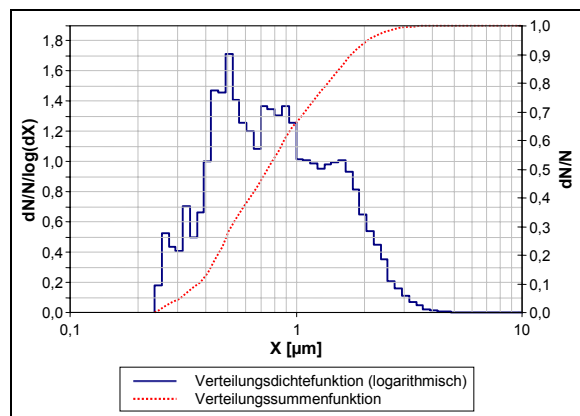


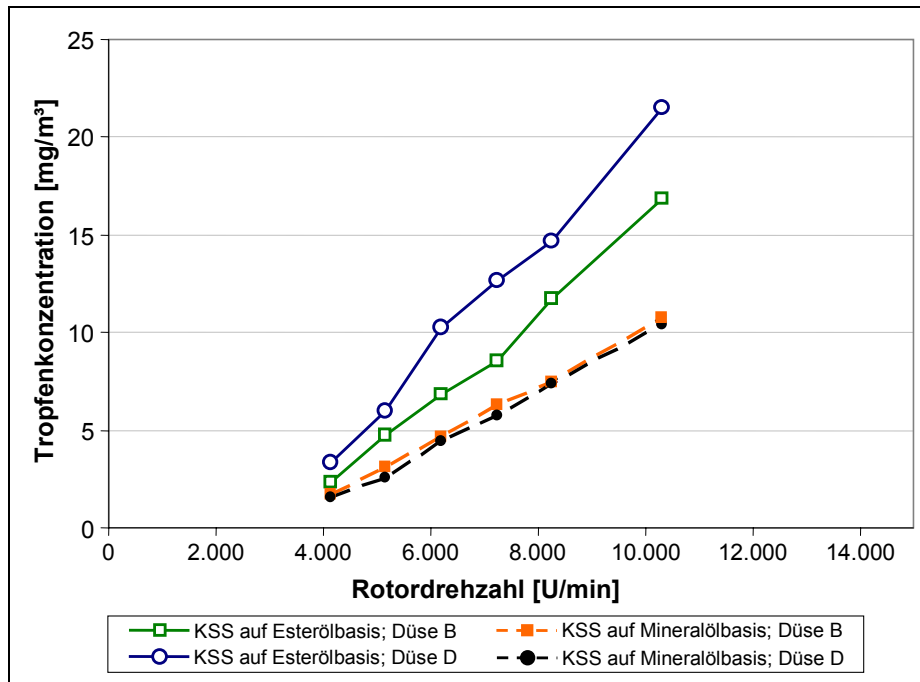
Abbildung 10:
Tropfengrößenverteilung für einen wassergemischten Kühlschmierstoff auf Mineralölbasis (Emulsion 5 %)





In Abbildung 11 ist die Tropfenkonzentration in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rotordrehzahlen und Aufbringungsdüsen dargestellt.

Abbildung 11:
Tropfenkonzentrationen für verschiedene KSS-Aufbringungsdüsen in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl



7.4 Entwicklung eines Messsystems für Kühlschmierstoffemissionen

Generell kann die Tropfengrößenverteilung eines Aerosols mithilfe eines Streulichtpartikelsensors gemessen werden. Durch die untere Messgrenze des Messgerätes besteht jedoch die Einschränkung, dass der Dampfbereich nicht mit erfasst werden kann. Eine weitere Schwierigkeit besteht bei der Erfassung von Emulsionstropfen, die zu 90 % oder mehr aus Wasser bestehen. Der in Österreich geltende Grenzwert ist jedoch auf die reine Ölkomponente bezogen und die Ölkonzentration in den einzelnen Öltropfen ist nicht bekannt.

Als kumulative Methode kann das Messverfahren des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BGIA [6] angesehen werden. Dabei wird die Summe aus der im Filter abgeschiedenen Tropfenfraktion und dem im Adsorberharz adsorbierten



Dampfanteil über einen längeren Zeitraum als Mittelwert erfasst. Soll aber exakt zwischen Tropfen- und Dampfanteil unterschieden werden, beginnen die Schwierigkeiten. Einerseits ist nicht klar, unterhalb welcher Partikelgröße man von Dampf sprechen kann. Andererseits ist die Grenze durch die willkürlich festgelegte Trennkorngröße des Filtermaterials bestimmt, die sich mit fortschreitender Verstopfung weiter nach unten verschiebt. Somit entspricht das gemessene Verhältnis von Dampf zu Tropfenmenge nicht den üblichen Anforderungen an einen Messwert.

Zur Lösung der Problematik und um in Zukunft ein „Online“-Messgerät für Filtertests zur Bestimmung der charakteristischen Trennfunktion zur Verfügung zu haben, wurde folgendes Messkonzept entwickelt: Die Messphilosophie beruht darauf, dass nicht zwischen Dampf und Tropfen unterschieden wird. Durch Vorklassierung wird die Emissionsmenge in unterschiedliche Tropfenfraktionen zerlegt, wobei nur die kleinste Fraktion als Summe aus Tropfen und Dampf angesehen wird. Die Fraktionierung erfolgt mithilfe von Impaktoren, deren Trenngrenze in der kleinsten Stufe weit unter den bisher üblichen Filtertrenngrenzen liegen kann. Somit wird eine exakte und reproduzierbare Analyse der KSS-Emission möglich.

Durch anschließendes Verdampfen der fraktionierten Teilmengen bei einer ausreichend hohen Temperatur und Zuführung zu einem Flammenionisationsdetektor (FID) kann der zugehörige Ölanteil über die Messung der Konzentration von Kohlenstoffatomen bestimmt werden. In Abbildung 12 (siehe Seite 119) ist dieses Messkonzept dargestellt.

Die Auswertung der Ergebnisse aus fünf verschiedenen Impaktoren ist in den Abbildungen 13 und 14 (siehe Seite 119) ersichtlich. Durch Subtraktion der verschiedenen FID-Messergebnisse können die einzelnen Tropfenfraktionen bestimmt werden. In diesem Fall könnte als „Dampf“ alles das bezeichnet werden, das kleiner ist als $0,25 \mu\text{m}$.

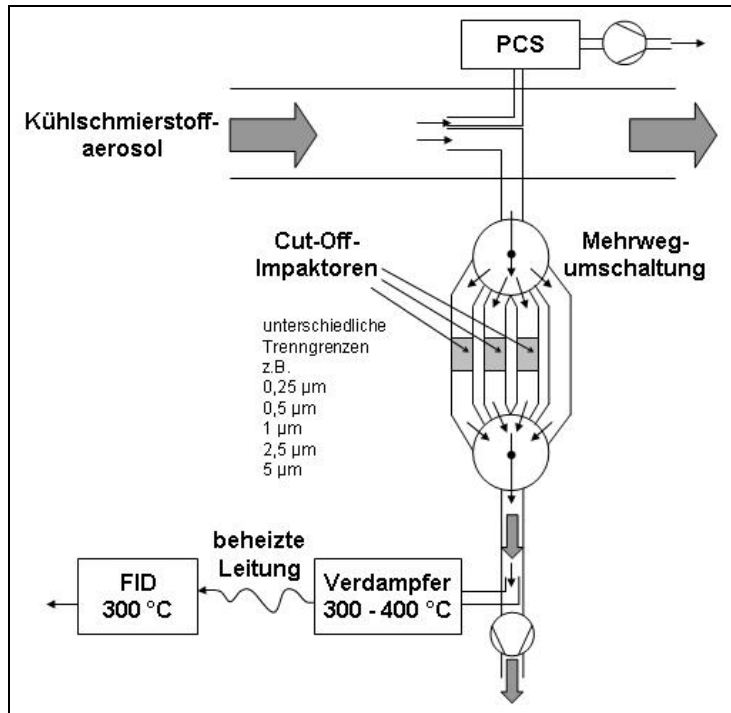


Abbildung 12:
Messkonzept

Abbildung 13:
Ergebnisse für fünf unterschiedliche Impaktoren

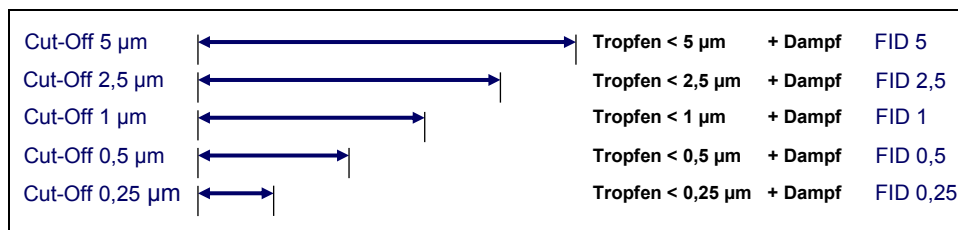
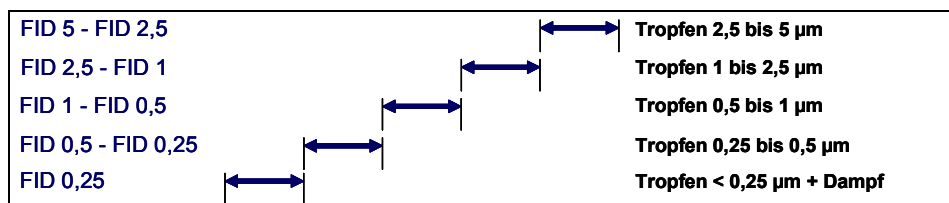


Abbildung 14:
Subtraktion der FID-Messungen



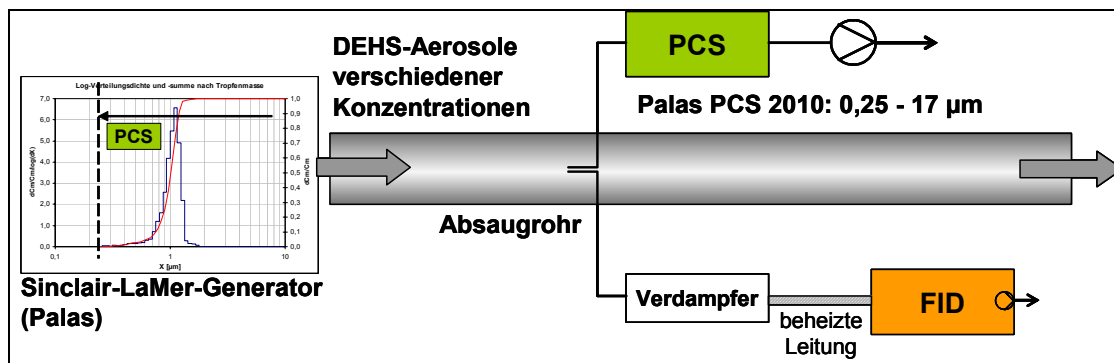


7.5 Kalibrierung des Messsignals

Da der FID nur die Konzentration der Kohlenstoffatome als Summenwert angibt, muss ein Zusammenhang zu der zugehörigen Ölmenge hergestellt werden. Dies wird durch gleichzeitige Messung der Partikelgrößenverteilung des Tropfenspektrums mit einem Streulichtpartikelsensor erreicht.

Um aufwändige Kalibrierarbeiten zu vermeiden (für jeden KSS in den verschiedensten Zusammensetzungen müsste eine eigene Kalibrierung durchgeführt werden), wird ein Kalibrierbezugswert bzw. eine Äquivalenzsubstanz als Testmaterial eingeführt, deren Emissionswerte für alle KSS gültig sind. Als Äquivalenzsubstanz wird Diethylhexylsebacat (DEHS) verwendet, das einen niedrigen Dampfdruck aufweist. Dieses wird mit einem Sinclair LaMer Tropfengenerator in einem engen Partikelbereich dispergiert und kann so vollständig mit einem Streulichtpartikelzähler erfasst werden (Abbildung 15).

Abbildung 15:
Schema des Aufbaus zur Kalibrierung mit Diethylhexylsebacat



Aus der mithilfe des Streulichtsensoren ermittelten Anzahlkonzentration kann die DEHS-Gesamtmasse berechnet werden. Aus einer parallelen Messung mit dem FID lässt sich dann ein Kalibrierfaktor PCS/FID [mg/m^3 DEHS/ppm Propan] ermitteln. In Abbildung 16 (siehe Seite 121) sind die Ergebnisse für verschiedene Aerosolkonzentrationen dargestellt.

Nach Abbildung 17 (siehe Seite 121) ergibt sich daraus für verschiedene Konzentrationen ein annähernd identischer Kalibrierfaktor.

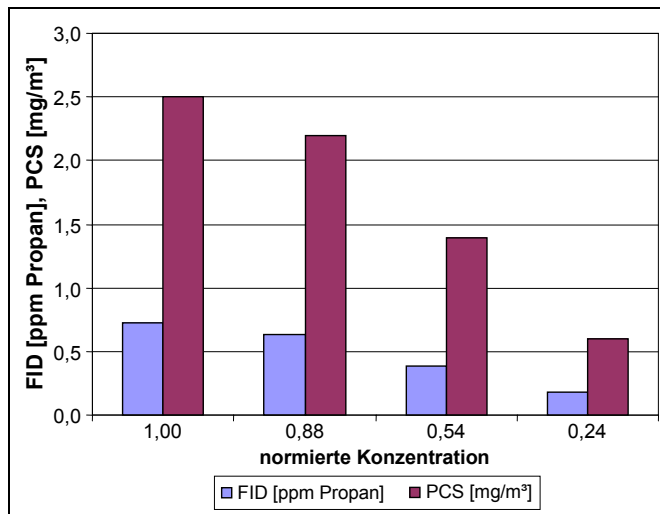


Abbildung 16:
Messwerte von FID und
PCS für verschiedene
DEHS-Aerosolkonzentrationen

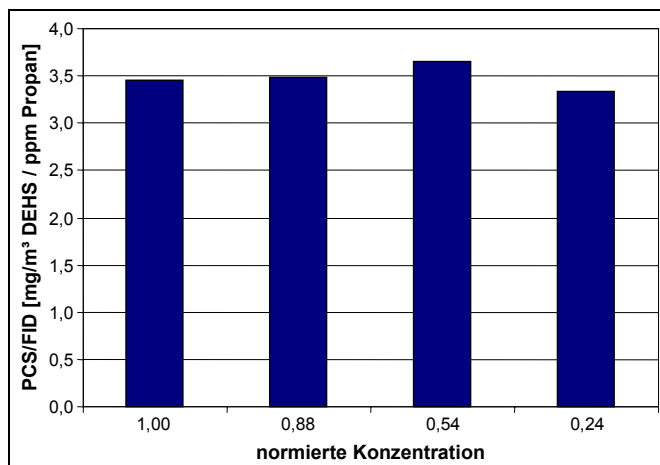


Abbildung 17:
Kalibrierfaktor PCD/FID
in Abhängigkeit von der
DEHS-Aerosolkonzentration

Wenn nun von einem beliebigen KSS-Öl oder einer KSS-Emulsion mittels FID die Konzentration der Kohlenstoffatome ermittelt wird, so kann festgestellt werden, welche Ölmenge DEHS der getesteten Ölmenge äquivalent ist. Wird bei Emulsionen gleichzeitig auch die Tropfengrößenverteilung mit dem PCS gemessen, kann daraus auf eine äquivalente Ölkonzentration in den Tropfen geschlossen werden.

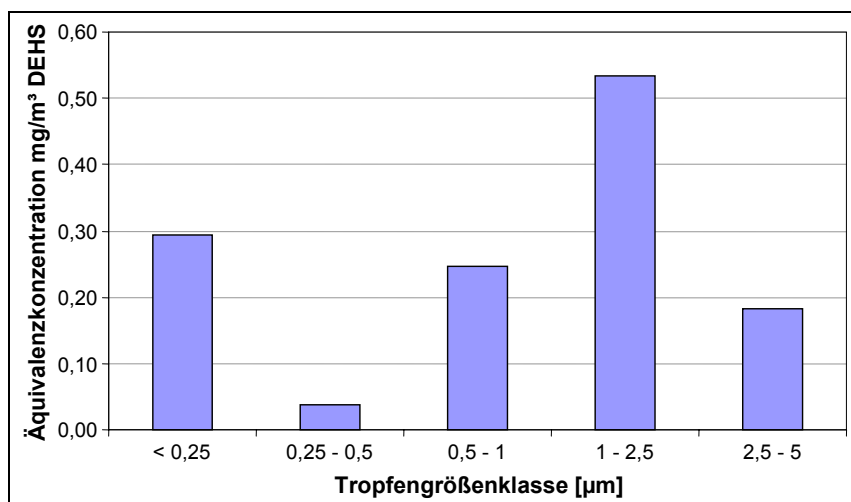
Als Beispiel für einen wassergemischten KSS auf der Basis eines synthetischen Öls (Emulsion 5 %, zerstäubt mit dem in den Abbildungen 5 und 18, Seite 122, dargestellten KSS-Generator) zeigt sich das Ergebnis in Abbildung 19 (siehe Seite 122). Es wird ersichtlich, dass eine beträchtliche Ölmenge mit einer Tropfengröße kleiner als $0,25 \mu\text{m}$ existiert.



Abbildung 18:
Aerosolgenerator



Abbildung 19:
Verteilung der Ölkonzentration in Tropfengrößenklassen



7.6 Literatur

- [1] VDI 3926 Blatt 1: Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter – Standardprüfung zur vergleichenden Bewertung von abreinigbaren Filtermedien (10.04). Beuth, Berlin 2004



- [2] DIN EN 779: Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Bestimmung der Filterleistung (05.03). Beuth, Berlin 2003
- [3] DIN EN 1822-1: Schwebstofffilter (HEPA und ULPA) – Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung (07.98). Beuth, Berlin 1998
- [4] *Höflinger, W.; Neumann, B.*: Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Eigenschaften von Kühlschmierstoffen. Patent: Österreich, Nr. A 1658/2003; eingereicht: 20.10.2003
- [5] *Höflinger, W.; Waschitz, P.*: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der bei Kühlschmiervorgängen in die Atmosphäre emittierten Anteile an Schmierstoffen. Patent: Österreich, Nr. A 1390/2005; eingereicht: 22.08.2005
- [6] Isokinetisches Probenahmesystem (IPS) (Kennzahl 3110). In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 12.Lfg. IV/94. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin. Erich Schmidt, Berlin – Losebl.-Ausg. 1989. www.bgia-arbeitsmappedital.de/3110

Weiterführende Literatur

Neumann, B.; Mauschitz, G.; Höflinger, W.: Measurement for the determination of the emissivity of cutting fluids as a primary measure to the risk avoidance in metal processing companies. In: Proceeding of the 9th World Filtration Congress, New Orleans-Louisiana USA April 2004 (CD-ROM)

Neumann, B.; Mauschitz, B.; Höflinger, W.: Investigations of aerosol emissions of different cutting fluids (CF) appearing in metal working companies at different working parameters. In: PARTEC 2004. International Congress for Particle Technology, Nürnberg, März 2004

Waschitz, P.; Höflinger, W.: Anforderungen an einen Aerosolgenerator zur Erzeugung eines praxisnahen KSS-Aerosols. In: Prüfung von Filtern und Abscheidern. 19. Palas ATS-Seminar, Karlsruhe 2005, S. 83-93



Wlaschitz, P.; Höflinger, W.: A new measuring method to detect the emissions of metal working fluid mist. In: Chemical industry and environment V. 5th European Meeting on Chemical Industry and Environment, Wien Mai 2006



8 Lufttechnische Maßnahmen in Maschinenhallen

Rüdiger Detzer,
Fa. Imtech Deutschland, Hamburg

8.1 Einleitung

Um die bei Produktionsprozessen in Fertigungsstätten entstehenden Gefahrstoffe aus dem Aufenthaltsbereich der Beschäftigten fernzuhalten, sind raumlufttechnische Maßnahmen erforderlich. Diese Maßnahmen haben in der jüngsten Vergangenheit stark an Bedeutung gewonnen, da bei Fertigungsprozessen frei werdende luftfremde Stoffe durchaus kanzerogene oder mutagene Eigenschaften aufweisen können. Der Druck zur Verbesserung der Luftverhältnisse in Fertigungsstätten ging nicht zuletzt auch von den Berufsgenossenschaften aus, um eine Reduzierung der Berufskrankheitsfälle zu erreichen.

Bei der Schadstofffreisetzung muss in verschiedenen Bereichen der Produktion sowohl mit gas- als auch mit partikelförmigen Stoffen gerechnet werden. Bei den gasförmigen Komponenten handelt es sich hauptsächlich um kurzkettinge Aldehyde, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Nitrosamine u. Ä., die eine gesundheitsschädigende Wirkung aufweisen. Aber auch staubförmige Verunreinigungen können Atemwegserkrankungen bewirken, insbesondere, wenn die Partikel alveolengängig sind.

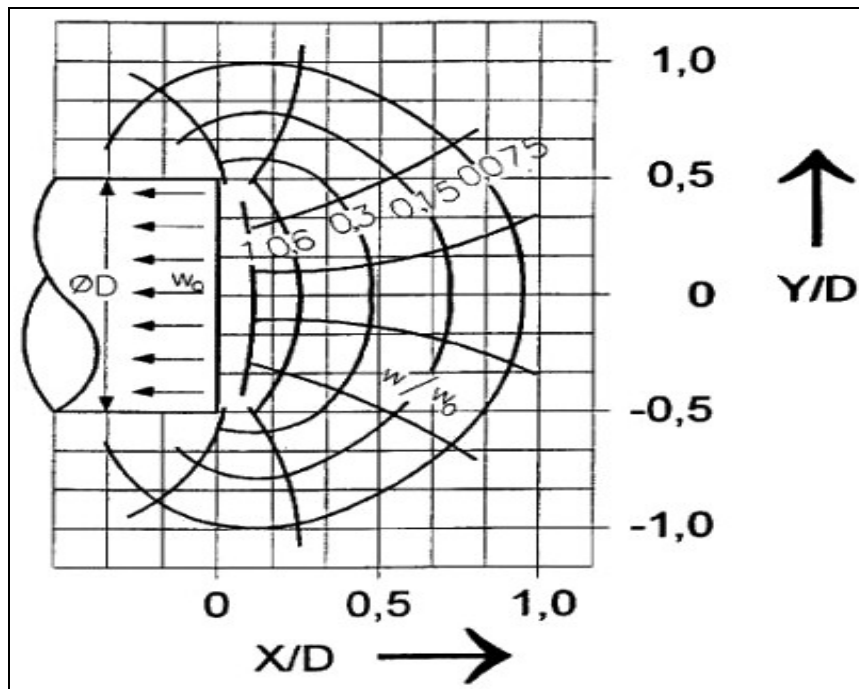
8.2 Direkterfassung luftfremder Stoffe

Die günstigste Maßnahme, um luftfremde Stoffe aus dem Arbeitsbereich zu entfernen, ist die Direkterfassung am Ort der Emission. Dies scheitert jedoch häufig daran, dass Erfassungseinrichtungen nicht oder nur schwer in den Produktionsprozess integrierbar sind. Hinzu kommt, dass Erfassungsströmungen (Senkenströmungen) nur eine sehr geringe Tiefenwirkung aufweisen, da die Geschwindigkeit im Gegensatz zum Blasstrahl mit wachsendem Abstand von der Absaugstelle sehr rasch abnimmt. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 1 (siehe Seite 126), in der die Isotachen vor einer Absaug-



stelle dargestellt sind. Die Erfassungsgeschwindigkeit sinkt demnach schon in einem Abstand vor der Absaugung, der dem Durchmesser der Absaugeinrichtung entspricht, auf ungefähr 5 % der Geschwindigkeit in der Absaugöffnung ab.

Abbildung 1:
Geschwindigkeitsfeld vor einer Rohröffnung

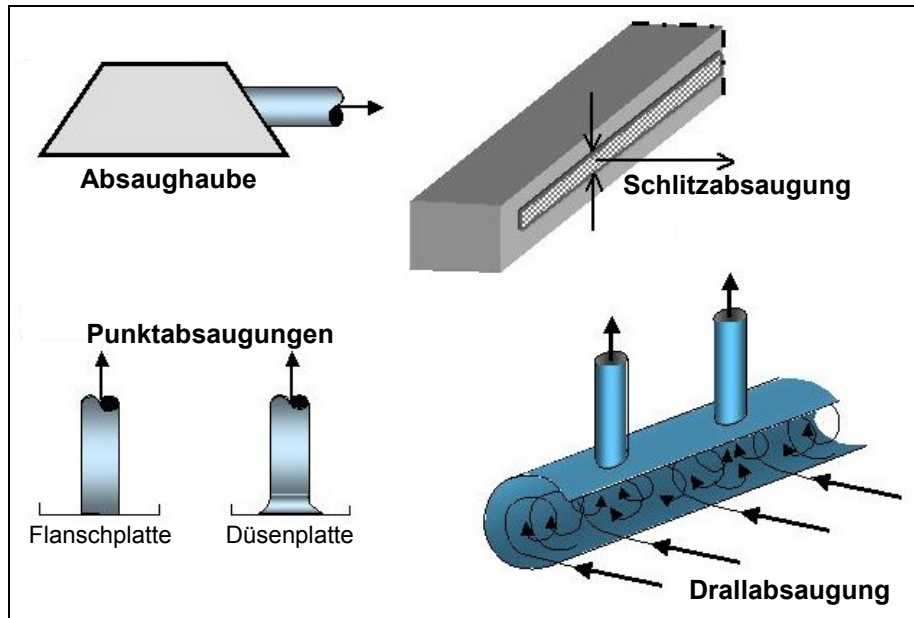


Luftfremde Stoffe, die luftgetragen emittiert werden, sind nur dann erfassbar, wenn die Erfassungsgeschwindigkeit größer ist als die durch die Raumluftströmung verursachte Geschwindigkeitskomponente am Bezugsort. Aus diesem Grund sind „freie Erfassungseinrichtungen“ im Allgemeinen am schwierigsten zu beherrschen und bedürfen einer aufwändigen Dimensionierungsanalyse. Vollständig gekapselte Arbeitsmaschinen oder Teileinkleidungen im Wirkungsbereich der Gefahrstofffreisetzung sind – bezogen auf die Arbeitsplatzbelastung – im Allgemeinen leichter beherrschbar.

Bei offenen Erfassungseinrichtungen unterscheidet man zwischen solchen für punktförmige Quellen und solchen für linienförmige Quellen. Einen Überblick über derartige Einrichtungen zeigt Abbildung 2 (siehe Seite 127).



Abbildung 2:
Beispiele für offene Erfassungseinrichtungen



Durch die geringe Tiefenwirkung sind Absaughauben am wenigsten geeignet, weil die Erfassungsgeschwindigkeiten unterhalb des Haubenkörpers sehr gering sind. Absaughauben lassen sich nur dann einsetzen, wenn nahezu keine Störströmungen im Raum auftreten oder die Haube unmittelbar über der Emissionsquelle angeordnet werden kann.

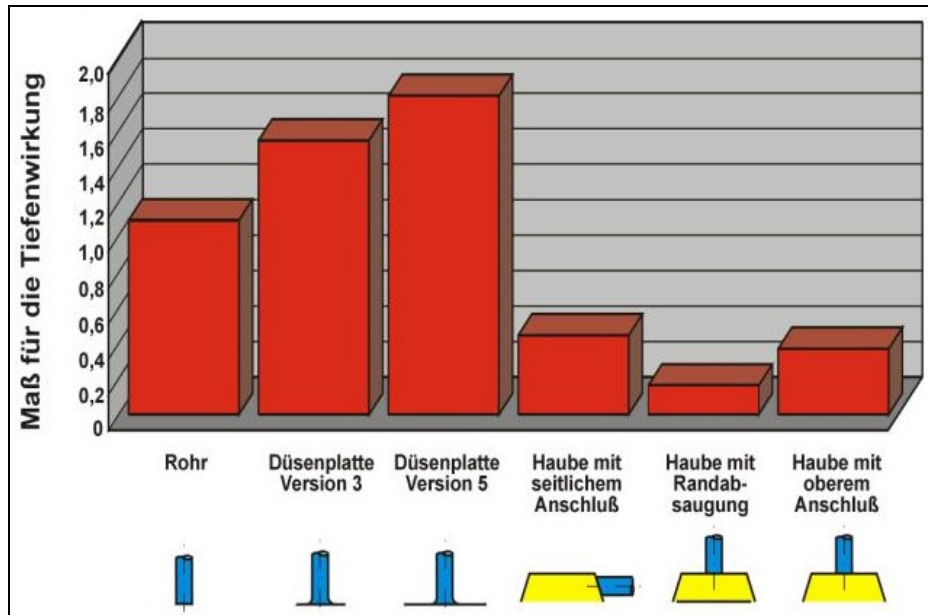
Sehr viel günstigere Werte liefern Düsenplatten, die gegenüber herkömmlichen Hauben eine mehrfach höhere Erfassungstiefe erreichen. Abbildung 3 (siehe Seite 128) zeigt die Gütegrade von Düsenplatten und Absaughauben, wobei dieser Grad ein Maß für die Erfassungstiefe von Emissionen darstellt.

Von geringerem Einfluss auf den Gütegrad der Erfassungseinrichtung sind

- die Art der Anbindung der Haube an das Kanalnetz,
- die Ausführung der Haube und
- bei Düsenplatten die Ausbildung des Übergangs zwischen Platte und Rohranschluss.



Abbildung 3:
Gütegrade verschiedener Erfassungseinrichtungen



Als sehr wirksam für die Erfassung luftgetragener Emissionen zeigen sich Drall- oder Wirbelhauben¹. Deren große Effizienz beruht auf einem sehr hohen Unterdruck, der sich im Zentrum einer Drallströmung einstellt. Solche Strömungsformen sind in der Natur in Taifun- oder Tornadoströmungen zu beobachten. Abbildung 4 (siehe Seite 129) zeigt eine Tornadoströmung in der Natur, und in Abbildung 5 (Seite 129) ist die Drallströmung im Schnittmodell einer Drallabsaugung gezeigt.

In einem solchen Strömungsfeld verlaufen die Stromlinien auf logarithmischen Spiralen zu einem Wirbelzentrum, um das herum sehr hohe Umfangsgeschwindigkeiten auftreten, aus denen der hohe Unterdruck im „Auge des Tornados“ resultiert.

Bei Erfassungseinrichtungen bilden sich diese Drallströmungen in einem teilummantelten Mantelgehäuse durch eine Überlagerung von Unterdruckfeldern aus, die an in regelmäßigen Abständen nebeneinander angeordneten Senken entstehen. Die Anwendung derartiger Einrichtungen ist sehr vielfältig und reicht von der Erfassungs-

¹ patentrechtlich geschützt



haube mit Randabsaugung (Abbildung 6) bis zur Maschinenabsaugung an großen Werkzeugmaschinen (Abbildung 7).

Abbildung 4:
Tornadoströmung

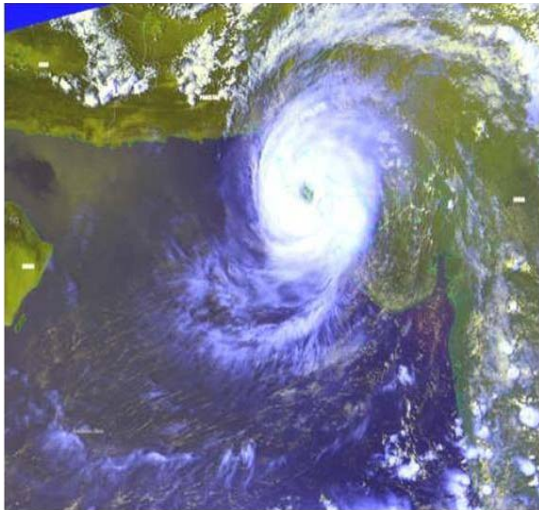


Abbildung 5:
Drallströmung

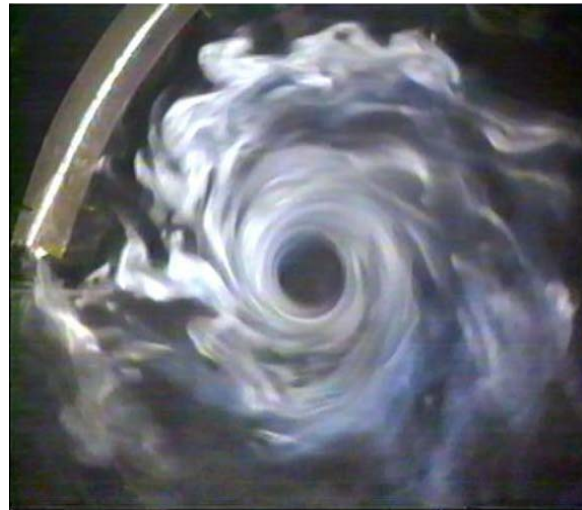


Abbildung 6:
Erfassungshaube mit Randabsaugung



Abbildung 7:
Maschinenabsaugung



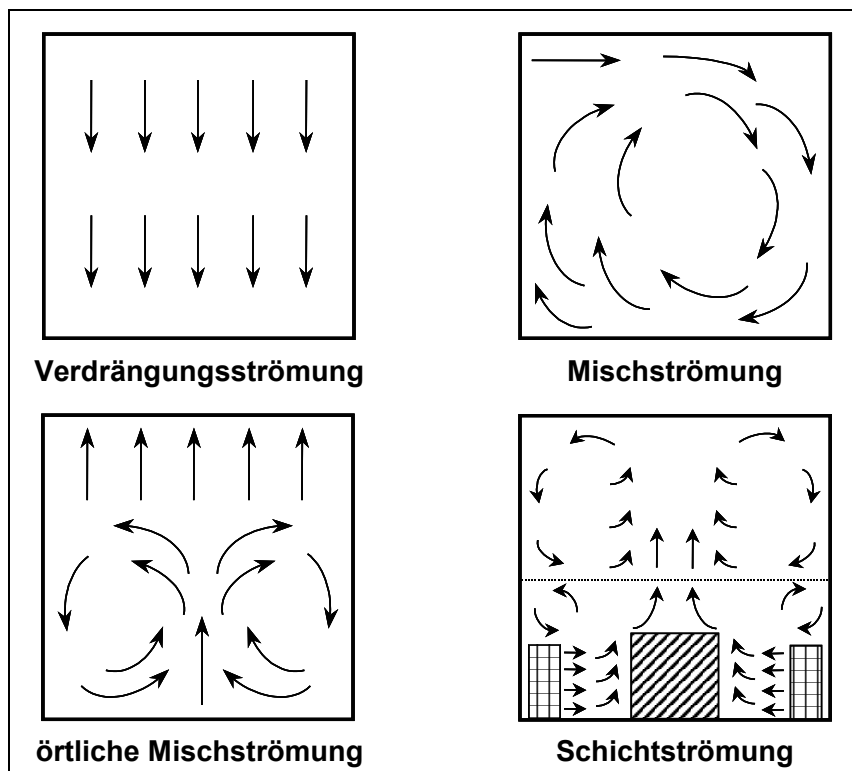
8.3 Raumluftrömung

Für die Luftführung in Räumen sind grundsätzlich vier verschiedene Strömungsmuster bekannt, die in Abbildung 8 (siehe Seite 130) dargestellt sind:



- Mischströmung,
- Verdrängungsströmung,
- örtliche Mischströmung und
- Schichtenströmung.

Abbildung 8:
Schematische Darstellungen der unterschiedlichen Strömungsmuster im Raum



8.3.1 Verdrängungsströmung

Die Verdrängungsströmung ist gekennzeichnet durch eine großflächige Luftzufuhr. Zur Strömungsstabilisierung benötigt diese Strömungsform sehr große Luftströme bei geringen Temperaturunterschieden zwischen Raum- und Zuluft. Daher findet sie nur in Sonderfällen, zum Beispiel in der Reinraumtechnik, Anwendung.



8.3.2 Mischströmung

Bei der Mischströmung wird die Zuluft mit hohem Impuls über Luftdurchlässe in den Raum eingebracht. Abbildung 9 zeigt schematisch das sich einstellende Raumströmungsbild bei der Zuluft einbringung über Drallluftdurchlässe im Deckenbereich des Raumes.

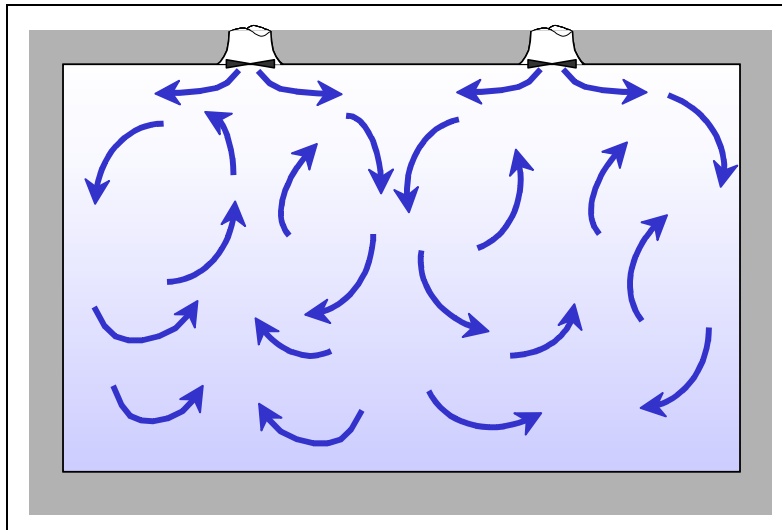


Abbildung 9:
Raumströmungsbild einer
Mischströmung

Die Strömungsgeschwindigkeit im (Zuluft-)Strahl baut sich dadurch ab, dass Umgebungsluft aus dem Raum angesaugt und dem Luftstrahl beigemischt wird. Dadurch nimmt der Luftstrahl auf seinem Weg durch den Raum an transportiertem Luftvolumen zu. Basis hierfür ist der Impulsaustausch am Strahlrand, der durch überlagerte turbulente Bewegungen eine intensive Vermischung von Zuluft und Raumluft bewirkt.

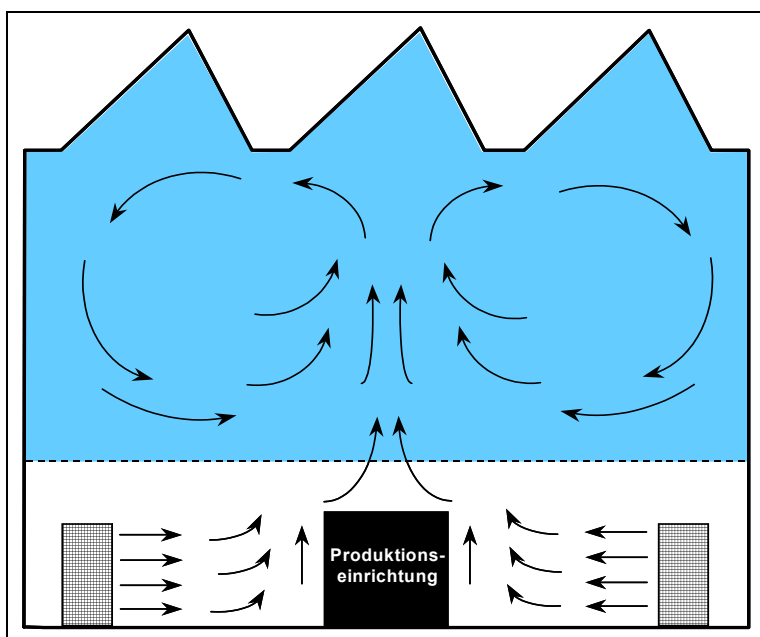
Der Induktionsanteil als sekundär bewegter Luftanteil ist dabei um ein Vielfaches größer als der am Durchlass eingebrachte Primärluftstrom und strömt aus anderen Raumbereichen nach. Hierdurch wird eine gleichförmige Verteilung aller im Raum entstehenden luftfremden Stoffe erreicht, sodass über die mittlere Konzentration hinausgehende Werte nur im unmittelbaren Umfeld der Emissionsquelle auftreten.

Da Raumlufttemperaturen beim Einsatz eines Mischlüftungssystems in gleicher Weise wie Schadstoffkonzentrationen homogen im Raum verteilt vorliegen, bietet dieses System Vorteile bei Räumen, in denen keine Temperaturgradienten erwünscht sind und bei Räumen oder Raumgruppen mit hohen Heizlastanteilen.

8.3.3 Schichtenströmung

In Industriebereichen mit stofflichen und thermischen Belastungen werden heute zunehmend Schichtenströmungen eingesetzt, um die Luftverhältnisse zu verbessern, insbesondere dann, wenn in den Räumen größere thermische Freisetzungen zu erwarten sind. Abbildung 10 verdeutlicht das Strömungsprinzip.

Abbildung 10:
Schematische Darstellung einer Schichtströmung



Schichtenströmungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Raumluftrömung nicht durch die Zuluffführung, sondern durch einzelne freie Konvektionsbewegungen bestimmt wird. Jeder Körper, der eine höhere Oberflächentemperatur als die Umgebungsluft aufweist, bewirkt eine vertikal nach oben gerichtete Luftströmung. Diese führt oberhalb des Wärme abgebenden Körpers zu einem Thermikstrahl, der die Eigenschaften eines freien Luftstrahles besitzt; das heißt, die im Thermikstrahl enthaltene Strömungsenergie wird durch Induktion von Umgebungsluft abgebaut.

Wird nun die durch direkte Konvektion nach oben transportierte Luft und die Induktionsluft bis zu einer entsprechenden Höhe im unteren Raumbereich nachgespeist, bilden sich zwei deutlich unterschiedliche Luftschichten aus: Während im unteren



Raubereich die Luft nahezu Zuluftqualität besitzt, ergeben sich in der oberen Schicht deutlich höhere Kontaminationen an luftfremden Stoffen, die gas- oder partikelförmig sein können.

Um dies zu erreichen, sind gewisse Voraussetzungen zu schaffen:

- Der Konvektionsstrom ist bis zu einer Schichthöhe H vollständig durch Zuluft im unteren Raumbereich zu ersetzen, um Rückströmungen von oben zu verhindern; die Schichtgrenze muss oberhalb des Arbeitsbereiches liegen.
- Die Nachführung von Zuluft muss impulsarm erfolgen. Wesentlich dabei ist, dass durch die nachgeführte Zuluft die an den Wärmequellen entstehenden Thermikströme nicht gestört werden, damit es nicht zu Ausspüleffekten kommen kann.
- Die Zuluft sollte vorzugsweise unterhalb der Schichtgrenze zugeführt werden; die Zuluft einbringung oberhalb der Schichtgrenze bewirkt einen Rücktransport luftfremder Stoffe aus dem oberen Raumbereich in den Aufenthaltsbereich und führt zur verstärkten Gefahr von Ausspülungen.
- Thermikströmungen, insbesondere an kalten Wandflächen, sind weitestgehend zu vermeiden, da Kaltluftströmungen an kalten Flächen Einmischprozesse höher kontaminierter Luft in den unteren Raumbereich bewirken.

Abbildung 11 (siehe Seite 134) verdeutlicht einige der Einflussgrößen.

Eine maßgebliche Bewertungsgröße für die Qualität der Luftführung stellt in diesem Zusammenhang der Belastungsgrad

$$\mu_s = \frac{\text{im Arbeitsbereich wirksamer Stoffstrom}}{\text{in den Raum freigesetzter Stoffstrom}}$$

dar, der den Anteil der insgesamt in den Raum emittierten Stoffgrößen beschreibt.

Die Auswirkung unterschiedlicher Luftführungssysteme auf den Belastungsgrad zeigt Abbildung 12 (Seite 134).



Abbildung 11:
Einflussgrößen auf die Schichtenbildung

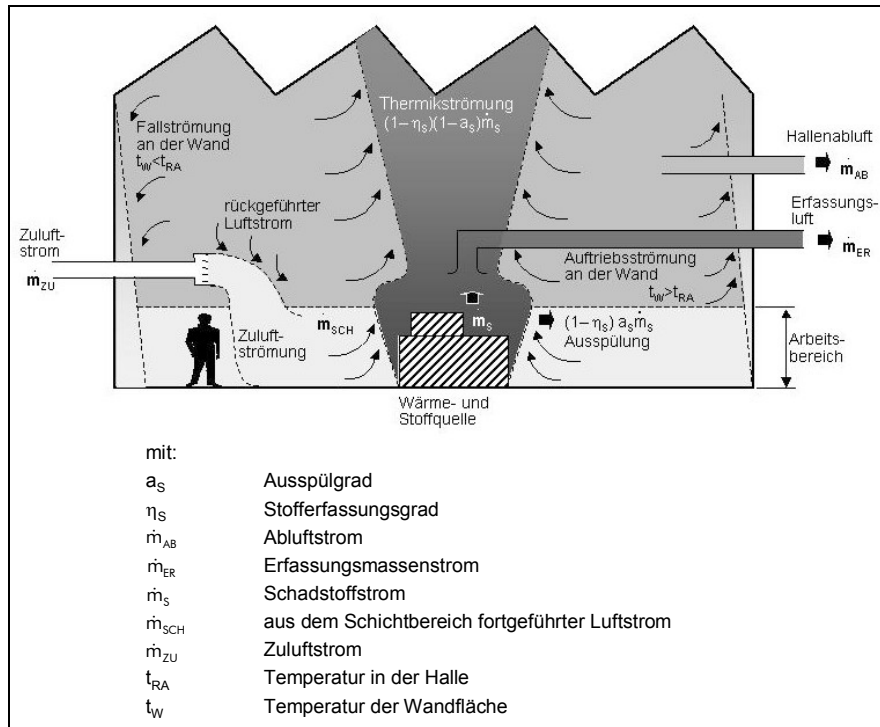
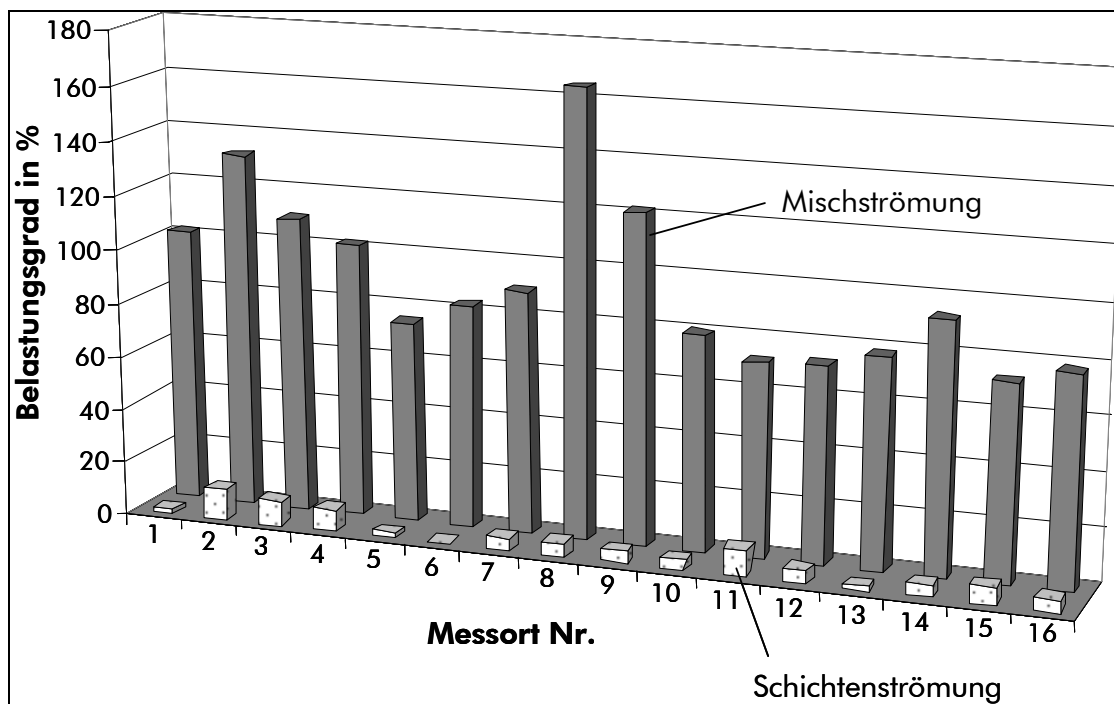


Abbildung 12:
Örtliche Gefahrstoffbelastung an Arbeitsplätzen bei unterschiedlicher Luftführung





Die Ergebnisse resultieren aus Untersuchungen in einem Bereich einer Aluminiumgießerei, in der Motorteile für die Automobilindustrie gegossen werden. Durch Einsatz einer Schichtenströmung gegenüber einer Mischströmung verbessert sich der Belastungsgrad im Aufenthaltsbereich bei gleichem Luftstrom nahezu um den Faktor 10 (Abbildung 12).

Schichtenströmungen führen auch zu einer Reduzierung der thermischen Belastung innerhalb des Aufenthaltsbereiches. Allerdings ist der Belastungsgrad durch Wärmeabgabe höher als der stoffliche Belastungsgrad. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Wärme von den Wärme abgebenden Produktionseinrichtungen zu ca. 50 % durch Strahlung und nur zu ca. 50 % durch Konvektion abgeführt wird. Die durch Strahlung abgegebene Wärme wird zu wesentlichen Teilen innerhalb des Aufenthaltsbereiches wirksam, sodass der thermische Belastungsgrad in der Größenordnung von μ_{therm} im Allgemeinen mit $\mu = 0,5$ zu erwarten ist.



9 Brand- und Explosionsschutz beim Einsatz von nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffen ¹

Axel van Ryn,
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln

9.1 Einleitung

In der Metall verarbeitenden Industrie werden nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe (nwm KSS) eingesetzt – technisch bedingt dort, wo eine hohe Schmierwirkung und eine Reibungsverminderung gefordert werden. Aufgrund immer kürzerer Prozesszeiten werden zunehmend KSS mit niedriger Viskosität eingesetzt, wodurch das Risiko von Brand- und Explosionsgefahren steigt. Hier sind präventive Maßnahmen erforderlich, um Unfälle mit Verletzungen von Beschäftigten zukünftig vermeiden zu können. Daneben sind auch die gesundheitsschädigenden Wirkungen bei Hautkontakt und Einatmen der je nach Anwendung mehr oder weniger stark entstehenden KSS-Dämpfe und -Aerosole nach wie vor von großer Bedeutung.

Brände und Explosionen sind zwar nicht die häufigsten Ursachen von Arbeitsunfällen, ihre Folgen können aber tödlich sein und sind häufig mit großen wirtschaftlichen Schäden verbunden. Primäres Ziel ist es, durch geeignete Maßnahmen die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre bzw., wenn dies nicht möglich ist, wirksame Zündquellen zu vermeiden. Da dies beim aktuellen Stand der Technik nicht immer gelingt, sind konstruktive Maßnahmen erforderlich, um die Auswirkungen von Explosionen einschränken.

Im Folgenden werden Maschinen zur spanenden Metallbearbeitung betrachtet, bei denen nwm KSS zum Einsatz kommen. Schutzmaßnahmen beim Umgang mit wassergemischten KSS (wg KSS), die ebenso weit verbreitet sind, werden nicht behandelt. Bei

¹ Die im Folgenden gezeigten Darstellungen enthalten Gedankenmodelle, die nicht alle wissenschaftlich hinterlegt sind. Der Begriff Explosion ist im weiteren Sinne zu verstehen. Oftmals handelt es sich um eine Verpuffung (druckschwache Explosion).



den meist anzutreffenden Gebrauchskonzentrationen von fünf bis acht Prozent in Wasser bestehen beim Einsatz von wg KSS keine Brand- und Explosionsgefahren.

9.2 Unfallgeschehen und Ursachen

Immer wieder kommt es beim Einsatz von nwm KSS zu Unfällen mit unterschiedlichen Ursachen. Oft sind dies Unregelmäßigkeiten während des Bearbeitungsverfahrens. Eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebes ist jede sicherheitstechnisch bedeutende Abweichung nach unten vom bestimmungsgemäßen Betrieb. Hierzu zählen u. a. Ereignisse, die Brände oder Explosionen zur Folge haben.

1993 ereignete sich in einem Metall bearbeitenden Betrieb bei einer Verpuffung an einer automatischen Bohr- und Fräsmaschine ein tödlicher Unfall. Der eingesetzte nwm KSS mit einem Flammpunkt von ungefähr 140 °C verspritzte und vernebelte aufgrund hoher Drehzahlen sehr stark. Durch eine Verpuffung im Maschineninneren ohne größere unmittelbare Auswirkungen wurde unverbranntes Aerosol-Luft-Gemisch nach außen getragen. Eine nachfolgende Flammenfront löste eine Sekundärexplosion bzw. Stichflamme aus, die den Maschinenbediener erfasste. Dessen durch das Abblasen von Werkstücken mit KSS benetzte Kleidung sowie die Kunststoffanteile seines Hemdes verschlimmerten die Flammenwirkung [1].

In einem anderen Fall war das kurzzeitige Aussetzen (weniger als eine Sekunde) des Hochdruckspülstrahls Ursache von Bränden an mehreren Drehmaschinen. Die nicht mehr gekühlten Späne zündeten die noch im Maschinenraum vorhandene Sekundärzerstäubung des nwm KSS [2].

Ein Unfall mit ähnlicher Ursache ereignete sich an der in Abbildung 1 (siehe Seite 139) dargestellten Drehmaschine. Mithilfe von mehreren Gliedergelenkschläuchen wurde der nwm KSS auf die Bearbeitungsstelle geleitet. Durch eine Anhäufung von Spänen am Werkstück wurden die Gliedergelenkschläuche mechanisch verstellt mit der Folge einer unzureichenden Kühlung an der Bearbeitungsstelle. Durch die folgende Überhitzung in der Kontaktzone von Werkzeug und Werkstück entzündete sich der nwm KSS. Die Gliedergelenkschläuche sowie Teile des Gehäuses zerschmolzen beim



anschließenden Brand. Aufgrund der hohen Wärmeentwicklung haben sich statische Bauteile der Maschine verformt, so dass ein hoher Sachschaden entstand.



Abbildung 1:
Brand an einer Drehmaschine aufgrund mangelnder KSS-Zufuhr

An einer Schleifmaschine ereigneten sich immer wieder Brände. Nach langer Suche wurde ein defekter Messtaster gefunden. Das Umschalten vom Eilgang in den Bearbeitungsvorschub mit diesem Taster versagte, da dieser aufgrund von eingedrungenem KSS nur zeitverzögert reagierte und die Schleifscheibe somit im Eilgang auf das Werkstück fuhr. Die dabei entstehende heiße Oberfläche konnte das Gemisch im Maschinengehäuse entzünden [2]. Heiße Oberflächen sind die wesentlichsten Zündquellen für Brände von nwm KSS in Werkzeugmaschinen [3].

Bei einem internationalen Automobilhersteller entstand 2004 bei einer Explosion ein Sachschaden in sechsstelliger Höhe, verbunden mit einem 24-stündigen Produktionsausfall. Während der Aluminiumbearbeitung fuhr ein Fräswerkzeug auf eine Spannpratze aus Stahl und erzeugte aufgrund der hohen Schnittparameter mechanische Funken. Die dabei entstandene Flammenfront breitete sich über die Abluftleitungen aus und entzündete die im Abscheider angesammelten nwm KSS.

9.3 Schutzmaßnahmen vor Brand- und Explosionsgefahren

Das Flussdiagramm in Abbildung 2 (siehe Seite 140) gibt eine Übersicht über die im folgenden Abschnitt erläuterten Schutzmaßnahmen. Die Rangfolge der Maßnahmen findet sich auch in der BGR 104 [4] sowie in der Norm DIN EN 1127-1 [5] wieder.

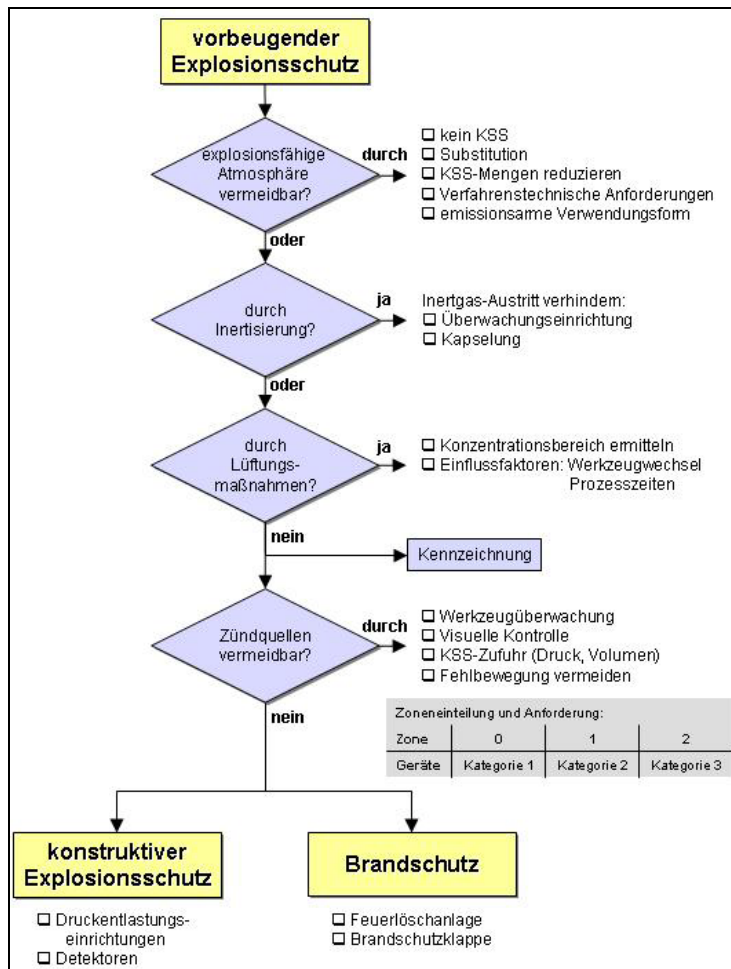


Abbildung 2: Übersicht über die Rangfolge der Schutzmaßnahmen bei Brand- und Explosionsgefahren

9.3.1 Vorbeugender Explosionsschutz

9.3.3.1 Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre

Eine explosionsfähige Atmosphäre kann während der spanenden Metallbearbeitung durch das Zerstäuben von KSS entstehen. So werden z. B. bei schnell rotierenden Teilen, wie Werkstücke in einem Drehautomaten oder Schleifscheiben, die mit einem KSS-Film behaftet sind, aufgrund der Zentrifugalkräfte Flüssigkeitsteilchen zerstäubt und in die Umgebungsluft geschleudert [6]. Die Übersicht in Tabelle 1 (siehe Seite 141) gibt die Rangfolge von Maßnahmen zur Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre wieder.



Tabelle 1:
Übersicht über Maßnahmen zur Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre
beim Einsatz von nwm KSS

Maßnahme		Umsetzung
1	kein KSS	z. B. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC – High Speed Cutting)
2	Gefahrstoffsubstitution	durch wg KSS (TRGS 611 [7] beachten)
3	Mengen reduzieren	durch Minimalmengenschmierung <input type="checkbox"/> Esteröle besser als Mineralölprodukte <input type="checkbox"/> hohe Viskosität (32 mm ² /s) <input type="checkbox"/> richtige Zerspanungsparameter wählen
4	verfahrenstechnische Anforderungen	nach VDI 3035 [8]: <input type="checkbox"/> Volumenstrom <input type="checkbox"/> Druck <input type="checkbox"/> Temperatur <input type="checkbox"/> Behälterdimensionierung
5	emissionsarme Verwendungsform	<input type="checkbox"/> Reduzierung von Aerosolen durch Additive <input type="checkbox"/> Reduzierung von Dämpfen durch emissionsarme Grundöle mit hoher Viskosität und hohem Flammpunkt

Zunächst ist zu prüfen, ob ein Fertigungsverfahren gewählt werden kann, bei dem der Einsatz von KSS, wie u. a. beim High Speed Cutting (HSC), entfällt. Die Einsatzmöglichkeiten des HSC sind jedoch beschränkt (z. B. Bearbeitung von Aluminium).

Als nächste Maßnahme ist eine Gefahrstoffsubstitution in Betracht zu ziehen: Kann der nwm KSS durch Stoffe ersetzt werden, die nicht zu einer Explosionsgefahr führen? Hier bietet sich ein Austausch durch wg KSS an. Bei deren Einsatz sind allerdings die Verwendungsbeschränkungen bzw. Pflegehinweise gemäß TRGS 611 [7] zu beachten. Ist eine Substitution nicht möglich, sollte versucht werden, die Menge des eingesetzten nwm KSS zu reduzieren. Dies kann z. B. durch eine Umstellung auf Minimalmengenschmierung (MMS) erfolgen.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts [9] wurden die Konzentrationen entstehender Dämpfe und Aerosole beim Einsatz von Esterölen und Schmierstofffertigprodukten



u. a. bei der MMS untersucht. Die untersuchten Esteröle (ohne Zusatz von Additiven) zeichneten sich durch sehr gute Schmiereigenschaften, einen hohen Flammpunkt von 176 bis über 300 °C und eine geringe Verdampfungsneigung aus. Darüber hinaus gelten sie als dermatologisch unbedenklich. Die Fertigprodukte basierten auf unterschiedlichen Grundölen, denen verschiedene Additive zugesetzt waren.

Die Messstelle lag nahe am Zerspanwerkzeug, also in unmittelbarer Umgebung einer möglichen Zündquelle (z. B. bei Werkzeugbruch), womit eine Beurteilung der Explosionsgefahr in Abhängigkeit vom eingesetzten KSS möglich wurde. Bei den Esterprodukten lagen die Emissionswerte bei 5 mg/m³. Eine Ausnahme bildeten niedrig viskose Ester mit einer Viskosität kleiner 32 mm²/s, diese zeigten mit bis zu 40 mg/m³ deutlich höhere Emissionswerte. Bei der Wahl ungünstiger Zerspanungsparameter stiegen die Dampf- und Aerosolemissionen um den Faktor 10 an, wobei die Aerosolfraction mit ungefähr 90 % einen deutlich höheren Anteil aufwies. Bei den Fertigprodukten lagen die Emissionen in der Regel zwischen 10 und 30 mg/m³.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass Esteröle aufgrund geringerer Emissionen grundsätzlich vorteilhafter sind als Mineralölprodukte. Bei der MMS begünstigen nwm KSS mit hoher Viskosität die Vermeidung einer explosionsfähigen Atmosphäre und sind daher bevorzugt einzusetzen [9].

Im Hinblick auf Maßnahmen zur Vermeidung einer explosionsfähigen Atmosphäre sind auch verfahrenstechnische Anforderungen, z. B. Art und Weise des Eintrags von nwm KSS (Düsengeometrie), zu berücksichtigen. So sollten der zugeführte KSS-Volumenstrom und der Druck optimal aufeinander abgestimmt sein. Ebenso darf die Temperatur des umlaufenden nwm KSS nicht zu hoch sein, da sonst zum einen die Kühlwirkung abnimmt und zum anderen der Verdampfungsanteil und damit die Explosionsgefahr ansteigen. Weiterhin wird in der VDI 3035 [8] gefordert, eine ausreichende Auslegung des KSS-Behälters und ggf. eine Temperierung des nwm KSS zu berücksichtigen.

Ist der Einsatz von nwm KSS unumgänglich, lässt sich die Aerosolbildung durch Antinebeladditive reduzieren. Diese Zusätze sind besonders bei niedrig viskosen KSS



wirksam. Die Bildung von KSS-Dämpfen kann durch die Auswahl von emissionsarmen Grundölen, wie z. B. Hydrocracksolvate, Solventraffinate oder synthetische Esteröle, reduziert werden. Auch durch den Einsatz von Multifunktionsölen können die Emissionen verringert werden [8]. Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Forschung und Technologie [10] konnte die emissionsreduzierende Wirkung nachgewiesen werden.

Als Richtwert zur Auswahl eines emissionsarmen nwm KSS haben sich in Abhängigkeit von der Viskosität insbesondere der Flammpunkt sowie der Verdampfungsverlust nach *Noack* bei 250 °C gemäß DIN 51581-1 [11] bewährt [12].

Als Schutzmaßnahme zur Vermeidung einer explosionsfähigen Atmosphäre ergibt sich somit für die Praxis, dass möglichst nwm KSS mit einer hohen Viskosität und einem niedrigen Verdampfungsverlust nach *Noack* eingesetzt werden sollten. Technische Maßnahmen wie Düsengeometrie und Kühlung des KSS sind ebenso zu betrachten wie der Einsatz von Additiven (Antinebelzusätze).

9.3.2.1 Inertisierung

Ist die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch entsprechende Maßnahmen nicht vermeidbar, ist zu prüfen, ob vorbeugender Explosionsschutz durch verfahrenstechnische Maßnahmen zu erreichen ist. Eine Möglichkeit bildet z. B. eine Inertisierung des Anlageninneren, da die Explosionsgrenzen nicht nur von der Ölkonzentration, sondern auch von der Sauerstoffkonzentration abhängen. Durch kontinuierliche Zufuhr von Inertgasen, wie z. B. Stickstoff, in das Anlageninnere wird die Sauerstoffkonzentration herabgesetzt. Dabei muss ein Austritt von Inertgas in den Arbeitsbereich sicher ausgeschlossen werden. Hierzu ist eine entsprechende Überwachungseinrichtung erforderlich. Um den Gasverbrauch zu minimieren, ist die Maschinenkapselung entsprechend auszulegen.

Forderungen des Arbeitsschutzes sowie wirtschaftliche Aspekte zeigen, dass diese Schutzmaßnahme zwar theoretisch denkbar, jedoch für die spanende Metallbearbeitung in der Regel nicht praktikabel ist.



9.3.1.3 Lüftungsmaßnahmen

Absauganlagen beeinflussen die Entstehung einer explosionsfähigen Atmosphäre und damit die Zoneneinteilung (siehe hierzu [4] und [13]). Sie haben folgende Aufgaben:

- Einhaltung des für KSS bisher gültigen Luftgrenzwertes von 10 mg/m^3 ,
- Minimierung von Emissionen am Arbeitsplatz,
- Verringerung von KSS-Ablagerungen in Rohrleitungen und
- möglichst geringe Frischluftzufuhr in die Einhausung.

Daraus ergeben sich gegensätzliche Anforderungen an Absauganlagen. Einerseits sollen Dämpfe und Aerosole aus dem Bearbeitungsbereich abgesaugt werden, andererseits ist damit – aufgrund der Massenkonstanz – zwangsläufig eine Ansaugung von Frischluft aus der Umgebung in die Einhausung der Maschine verbunden. Die Frischluftzuführung wirkt sich jedoch negativ auf den Brand- und Explosionsschutz aus, da sie die Konzentration der Atmosphäre beeinflusst (Abbildung 3).

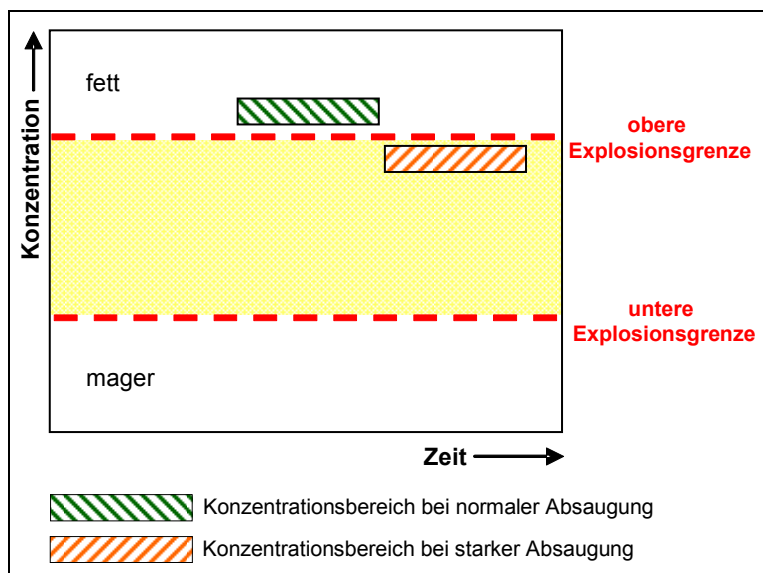


Abbildung 3:
Auswirkung der Absaugleistung auf die Konzentration der Atmosphäre im Bereich der Oberen Explosionsgrenze

Unter der Annahme, dass im Anlageninneren ein zu fettes Gemisch vorliegt, kann sich aufgrund der mit der Absaugung verbundenen Frischluftzufuhr temporär eine Konzentration unterhalb der oberen Explosionsgrenze einstellen. Somit wird ein explosionsfähiger Bereich bei Normalbetrieb geschaffen. Dieser Zustand wird entweder



annähernd gehalten oder die Konzentration senkt sich weiter bis unterhalb der unteren Explosionsgrenze ab.

Ausschlaggebend ist der Lüftungsgrad, wie in [14] erläutert. Dies hat zur Folge, dass für den ersten Fall die Zone 1 festgesetzt werden muss und für den zweiten Fall Zone 2 (siehe auch Seite 148). In beiden Fällen liegt über eine gewisse Zeitspanne ein gefährlicher Konzentrationsbereich vor.

Aufgrund weiterer Einflussgrößen wie z. B. unterschiedlicher Stellungen des Werkzeugs, besonders beim Einsatz von mehreren Werkzeugen, kann es zu sich ständig ändernden Strömungsverhältnissen innerhalb des Maschinengehäuses kommen. Liegen kleine Prozesszykluszeiten, verbunden mit einem automatischen oder auch manuellen Werkstückwechsel vor, werden die Konzentrationsbereiche ständig durchlaufen. Es muss also mit sich ständig ändernden Mischungsverhältnissen gerechnet werden. Dies hat zur Folge, dass eine explosionsfähige Atmosphäre nicht nur kurzzeitig auftreten kann (Zone 2) sondern gelegentlich (Zone 1). Damit sind Geräte und Schutzsysteme gemäß ATEX 95 [15] auszuwählen, d. h. für Zone 1 mindestens Kategorie 2G. Bei elektrischen Betriebsmitteln sind ferner die Bestimmungen nach DIN VDE 0165, Teil 1 [14] und DIN VDE 0170/0171 [16] einzuhalten.

Betrachtet man dies im Bereich der unteren Explosionsgrenze (Abbildung 4, Seite 146), so ergibt sich hier durchaus die Notwendigkeit einer Absauganlage mit hoher Leistung. Damit kann die untere Explosionsgrenze unterschritten und somit Zone 2 erreicht werden. Geräte und Schutzsysteme müssen dann der Kategorie 3G entsprechen [15].

Die Absaugleistung ist letztendlich dem jeweiligen Konzentrationsbereich, in dem der Bearbeitungsvorgang abläuft, anzupassen. Es ist also notwendig, den Konzentrationsbereich zu kennen. In der Praxis wird in der Regel zu viel abgesaugt. Dies wird häufig deutlich durch hohe KSS-Rückstände im Rohrsystem. Vermutlich wird eher in einem Konzentrationsbereich oberhalb der oberen Explosionsgrenze als unterhalb der unteren gearbeitet. Durch eine zu hohe Absaugleistung besteht dann die Gefahr, in einen explosionsfähigen Bereich zu gelangen.

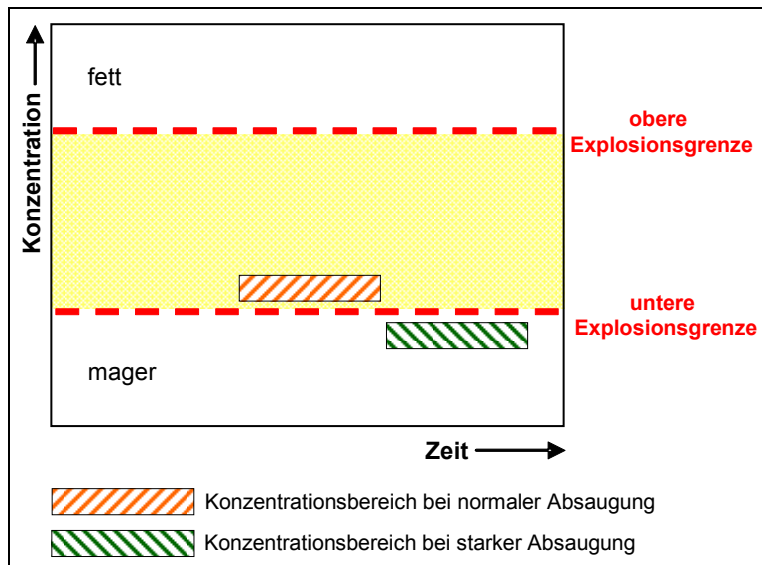


Abbildung 4:
Auswirkung der Absaugleistung auf die Konzentration der Atmosphäre im Bereich der unteren Explosionsgrenze

Zusammenfassend lässt sich gemäß diesem Gedankenmodell feststellen, dass bei Lüftungsmaßnahmen als Brand- und Explosionsschutz eine Absaugung nur unter Berücksichtigung der vorliegenden Konzentration sinnvoll ist. Bei fetten Gemischen oberhalb der oberen Explosionsgrenze entstehen explosionsschutztechnische Vorteile durch geringere Absaugleistung. Erfahrungsgemäß können die bisher gültigen Luftgrenzwerte auch mit geringer Absaugleistung eingehalten werden. Bei mageren Gemischen ist jedoch eine höhere Absaugleistung zum sicheren Unterschreiten der unteren Explosionsgrenze erforderlich. Dieses Ergebnis erscheint vorerst paradox, ergibt sich aber bei näherer Betrachtung des Sachverhaltes. Wichtig ist somit die Kenntnis des Konzentrationsbereiches, in dem der Fertigungsprozess abläuft.

9.3.1.4 Kennzeichnung

Liegt eine explosionsfähige Atmosphäre vor, ist der Bereich mit dem Warnzeichen W21 zu kennzeichnen (Abbildung 5).



Abbildung 5:
Warnung vor explosionsfähiger Atmosphäre



Explosionsgefährdete Bereiche liegen vor, wenn die

- Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre grundsätzlich möglich und zu erwarten ist und
- Schutzmaßnahmen lediglich zu einer Einschränkung, nicht aber zu einer sicheren Verhinderung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre führen.

9.3.1.5 Vermeiden wirksamer Zündquellen

Zündquellen können sich zum einen aus dem Bearbeitungsprozess selbst ergeben, zum anderen auch aus den mit dem Verarbeitungsprozess in Zusammenhang stehenden Geräten, Schutzsystemen bzw. Komponenten. Die Wirksamkeit einer Zündquelle hängt von der Entzündbarkeit des brennbaren Stoffes ab. Kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer wirksamen Zündquelle nicht abgeschätzt werden, ist davon auszugehen, dass die Zündquelle stets vorhanden ist [5]. Wesentliche Zündquellen bei der spanenden Metallbearbeitung, die einen Brand oder eine Explosion auslösen können, sind

- heiße Oberflächen: Werkzeug, Werkstück, Lampen, Spulen
- mechanisch erzeugte Funken: Funkenregen (Schleifen), einzelne Funken (z. B. Schlagvorgänge), Fremdmaterialeinschlüsse im Werkstück, Brüche an rotierenden Teilen (z. B. Werkzeugbruch)
- elektrische Funken: Lichtbogen durch Schaltvorgänge (z. B. Türkontakte), Ausgleichsströme, statische Entladung, Wackelkontakte

Diese Zündquellen können vermieden werden durch [3]

- Werkzeugüberwachung, z. B. Überwachung der elektrischen Leistungsaufnahme der Antriebseinheit,
- regelmäßige visuelle Kontrolle der Werkzeuge,



☐ Kontrolle der richtigen KSS-Zufuhr durch Überwachung von Druck und Volumenstrom (siehe auch VDI 3035 [8]) und automatische Unterbrechung im Störfall sowie

☐ Überwachung von Fehlbewegungen.

Es muss sichergestellt werden, dass eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre und eine wirksame Zündquelle nie gemeinsam, d. h. zur gleichen Zeit am gleichen Ort, auftreten. Dazu muss abgeschätzt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit mit der Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen ist. Nach dieser Wahrscheinlichkeit werden die betroffenen Bereiche in Zonen (Tabelle 2) [4; 13] eingeteilt. Die Anforderungen zur Vermeidung von Zündquellen richten sich nach den Gegebenheiten der jeweiligen Zone.

Tabelle 2:
Zoneneinteilung explosionsgefährdeter Bereiche

Ursache	Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ist vorhanden		
	ständig, über lange Zeiträume oder häufig	gelegentlich bei Normalbetrieb	normalerweise nicht oder kurzzeitig bei Normalbetrieb
Gase, Dämpfe, Nebel	Zone 0	Zone 1	Zone 2
Stäube	Zone 20	Zone 21	Zone 22

In Versuchen bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) [3] wurde festgestellt, dass beim Versprühen von nwm KSS in Werkzeugmaschinen immer mit dem Auftreten von Bereichen gerechnet werden muss, in denen der KSS-Sprühnebel zündbar ist. Dies gilt unabhängig von der Tröpfchengröße für nebelarme KSS und für KSS mit hoher Viskosität. Weiterhin ist dies unabhängig von der chemischen Beschaffenheit, vom Flammpunkt und von der Zündtemperatur des eingesetzten KSS. Somit ist nicht auszuschließen, dass Zone 2 innerhalb von Werkzeugmaschinen zumindest in Teilbereichen vorhanden ist.



9.3.2 Konstruktiver Explosionsschutz

Wenn Maßnahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes keine ausreichende Sicherheit vor Explosionen gewährleisten, müssen nach DIN EN 1127-1 [5] und BGR 104 [4] konstruktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Dadurch sollen die Auswirkungen einer möglichen Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränkt werden. In der spanenden Metallbearbeitung unter Einsatz von nwm KSS werden dazu überwiegend Druckentlastungseinrichtungen eingesetzt.

9.3.2.1 Druckentlastungseinrichtungen

Aufgabe einer Druckentlastungseinrichtung ist es, beim Entstehen einer Explosion bzw. Verpuffung das ursprünglich abgeschlossene Maschinengehäuse an einer definierten Stelle kurzfristig bzw. bleibend zu öffnen, um den Aufbau eines unzulässig hohen Drucks im Maschinengehäuse zu verhindern. Das Öffnen geschieht bei Erreichen eines Ansprechdrucks [4].

Da Maschinengehäuse eine geringe Druckfestigkeit ($< 0,1$ bar) haben [17], liegt der Ansprechdruck unterhalb von $0,1$ bar. Durch die Freigabe der definierten Öffnungen wird dafür gesorgt, dass im Gehäuseinneren ein Druckabbau erfolgen kann. Dadurch wird das Maschinengehäuse nicht mit einem über seine Festigkeit hinausgehenden Explosionsdruck beaufschlagt, sodass keine Flammen herausschlagen und Personen gefährden können. Eine Druckentlastungseinrichtung in der Ausführung als Explosionsklappe öffnet sich nur kurzzeitig und verschließt sich wieder. Sie darf nur verwendet werden, wenn ihre Funktionsfähigkeit durch Explosionsversuche nachgewiesen wurde [4; 17].

Druckentlastungseinrichtungen müssen konstruktiv so ausgelegt sein, dass bei einer Explosion deren Wegfliegen z. B. durch eine Befestigung mit einem Stahlseil sicher verhindert wird. Ihre Wirkungsweise ist grundsätzlich durch eine Baumusterprüfung nachzuweisen. Die Dimensionierung wird unter [17] beschrieben. Die Mindestdruckentlastungsfläche soll $0,1 \text{ m}^2$ pro m^3 Maschinenarbeitsvolumen betragen [18].



In Abbildung 6 ist die Anordnung einer Druckentlastungseinrichtung an einem Maschinengehäuse zu erkennen. Die Anordnung ist wichtig, da neben dem Druckabbau auch unverbranntes Gemisch und Verbrennungsgase durch die Öffnung ins Freie gelangen können. Die Druckentlastung soll möglichst auf kurzem geradem Weg erfolgen.



Abbildung 6:
Beispiele einer Anordnung einer Druckentlastungseinrichtung

Beim Ansprechen einer Druckentlastungseinrichtung muss mit erheblichem Flammenaustritt und entsprechender Nachverbrennung im Freien gerechnet werden. Daher muss die Anordnung der Druckentlastungseinrichtungen die Entlastung und einen eventuellen Flammenaustritt in Bereiche ableiten, in denen für Personen keine Gefährdungen durch wegschleudernde Teile bzw. Druck- oder Flammenwirkung auftreten können [4; 17]. So ist darauf zu achten, dass die Maschine in Abbildung 6 nicht unterhalb eines höher gelegenen Arbeitsplatzes oder eines Verkehrsweges (z. B. ein Treppenaufgang) aufgestellt wird, da dort Personen gefährdet werden könnten.

Durch Druckentlastungseinrichtungen, die mit Flammensperren z. B. aus feinmaschigem Gewebe ausgestattet sind, können Gefährdungen durch austretende Flammen vermindert werden. Dieses Rückhaltesystem behindert jedoch den Druckentlastungsvorgang, was bei der Dimensionierung der Mindestdruckentlastungsfläche zu berücksichtigen ist. Weiterhin ist zu beachten, dass zwar weniger Flammen, aber dennoch heiße Verbrennungsprodukte austreten.

9.3.2.2 Detektoren

Detektoren erkennen einen Brand oder eine Explosion und leiten entsprechende Schutzmaßnahmen ein:



- ❑ Wärmemelder reagieren auf Temperaturänderungen.
- ❑ Flammenmelder erkennen die markanten Lichtreflexe, die Flammen beim Flackern abgeben und lösen ab einer gewissen Intensität Schutzmaßnahmen aus.
- ❑ Differentialmelder sprechen an, wenn die Änderungsgeschwindigkeit, z. B. der Temperatur, einen bestimmten Wert überschreitet [19].
- ❑ Druckdetektoren messen ständig den Prozessdruck und dessen Änderungen. Ein Explosionsdruckanstieg unterscheidet sich von normalen Prozessdruckschwankungen aufgrund der Geschwindigkeit des Druckaufbaus. Dadurch kann ein Druckdetektor eine Explosion erkennen.

Beim Einsatz von nwm KSS in der spanenden Metallbearbeitung steht die Branderkennung im Vordergrund. Der Druck wird über Druckentlastungskappen abgeleitet. Somit werden überwiegend Flammenmelder oder Wärmemelder eingesetzt.

9.3.3 Beschaffenheitsanforderungen an Geräte, Schutzsysteme und Komponenten

Geräte, Schutzsysteme und Komponenten stellen im Zusammenhang mit dem Verarbeitungsprozess eine mögliche Zündquelle dar. Mit den Beschaffenheitsanforderungen sollen diese Zündquellen unschädlich gemacht oder die Wahrscheinlichkeit des Auftretens wirksamer Zündquellen verringert werden [5]. Aus diesem Grunde wird eine Kennzeichnung nach ATEX 95 [15] erforderlich.

Die Kennzeichnung dient zur Auswahl von geeigneten Geräten, Schutzsystemen und Komponenten und lässt sich der Zoneneinteilung zuordnen. Angegeben werden die Gerätegruppe, Gerätekategorie, Zündschutzart, Explosionsgruppe, Temperaturklasse sowie die Gehäuseschutzart für elektrische Betriebsmittel.

Wie im Abschnitt über Lüftungsmaßnahmen (siehe Seite 144 ff.) beschrieben, ist bei fetten Gemischen mit Zone 1 zu rechnen. Elektrische Betriebsmittel müssen bau-mustergeprüft sein und mit dem Ex-Zeichen gekennzeichnet sein.



9.3.4 Feuerlöschanlagen

Feuerlöschanlagen gehören zum „Technischen Brandschutz“ für Maschinen und sind Bestandteil des „Vorbeugenden Brandschutzes“ [20]. Zu Feuerlöschanlagen gehören im Wesentlichen folgende Komponenten:

- Löschmittelbehälter,
- Auslösevorrichtung,
- Schlauchleitungen,
- Löschdüsen,
- Steuergerät,
- akustische und optische Alarmierung.

Es können unterschiedliche Löschmittel verwendet werden, deren Löscheffekte entweder auf Sauerstoffverdrängung (CO_2 , Inertgase) oder auf Wärmeentzug beruhen. Pulver als Löschmittel ist aufgrund des durch den Einsatz folgenden Maschinenschadens nicht zu empfehlen.

9.3.4.1 CO_2 -Feuerlöschanlagen

Bei diesen Feuerlöschanlagen wird als Löschmittel Kohlendioxid (CO_2) eingesetzt. Im Brandfall gibt der Brandmelder (Abbildung 7) ein Signal an das Steuergerät, das die CO_2 -Löschanlage auslöst. Das CO_2 -Löschmittel strömt durch Löschdüsen aus und verdrängt den zur Brandreaktion erforderlichen Luftsauerstoff; das Feuer wird erstickt.



Abbildung 7:
Brandmelder



Die Auslösung muss auch manuell z. B. durch Betätigung eines genormten Druckknopfes erfolgen können (Abbildung 8) [21].

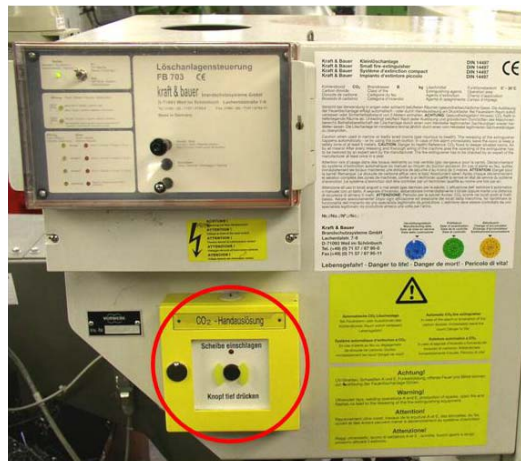


Abbildung 8:
Steuereinheit und manueller Druckknopf

Kann die Einsatzmenge von Löschgas Personen gefährden, muss eine Vorwarnzeit wirksam werden. Dies ist bei CO₂-Konzentrationen von mehr als 5 Vol.-% im Löschbereich der Fall. Weiterhin sind eine akustische und ggf. zusätzlich eine optische Alarmeinrichtung erforderlich.

Ebenso ist an allen Zugängen zu den gefährdeten Bereichen eine Kennzeichnung mit dem Warnzeichen W00 „Warnung vor einer Gefahrenstelle“ gemäß Unfallverhütungsvorschrift BGV A8 [22] notwendig. Weiterhin müssen Zusatzzeichen mit der Aufschrift „CO₂-Löschanlage“ und „Bei Feualarm oder Ausströmen von CO₂ gefährdeten Bereich sofort verlassen, Gesundheitsgefahr!“ angebracht werden [21].

9.3.4.2 Brandschutzklappen

Oftmals sind an Bearbeitungsmaschinen Absauganlagen angeschlossen. Gefahrstoffe werden dabei an der Entstehungsstelle erfasst und über Rohrleitungen einem Abscheider (Filter) zugeführt. Dazu wird ein Luftstrom erzeugt, der die Gefahrstoffe mitführt. Dies hat zur Folge, dass dem Maschinenraum kontinuierlich Frischluft und damit auch Sauerstoff von außen zugeführt wird. Im Falle eines Brandes wird dadurch das Feuer angefacht. Um dies zu verhindern, werden Brandschutzklappen (Abbildung 9, Seite 154) eingesetzt.

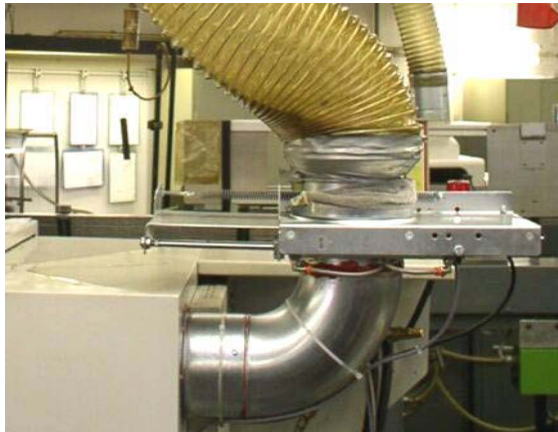


Abbildung 9:
Brandschutzklappe

Aufgabe einer Brandschutzklappe ist es, die Absaugöffnung zu verschließen. Damit wird verhindert, dass weiter abgesaugt wird und Sauerstoff von außen in die Maschine nachströmt. Auch wird die Lüftungsanlage geschützt. Dies ist besonders bei vernetzten Anlagen von Bedeutung, um ein Übergreifen von Bränden/Flammen auf benachbarte Maschinen zu verhindern.

Brandschutzklappen bestehen aus einem Gehäuse aus nicht brennbarem Baustoff, einer beweglichen Klappe, einem Auslöseelement und einer Rückstellvorrichtung. Das Öffnen und Schließen der Klappe kann motorisch, manuell in Kombination mit einer Feder oder auch mithilfe einer Fernbedienung geschehen. Brandschutzklappen benötigen eine Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DiBt).

9.3.5 Wirkungsweise von Schutzmaßnahmen

Ein wirksamer Brand- und Explosionsschutz entsteht erst durch die Kombination der Komponenten

- Brandschutzklappe,
- Druckentlastungsklappe und
- Löschanlage.

Eine Ölnebelwolke entzündet sich, der Druck in der Maschine steigt, die Druckwelle bewegt sich vom Zündort fort und breitet sich aus. Sie erreicht die Druckentlastungsklappe und öffnet diese (Öffnungsdruck z. B. 20 mbar). Im Maschinenraum



erscheinen erste Flammen, die als Flammenfront der Druckwelle folgen. Die Brandschutzklappe wird geschlossen, sodass der Ölnebel nicht mehr abgesaugt und die Absauganlage vor einem andauernden Brand innerhalb des Maschinengehäuses geschützt wird. Gleichzeitig wird das Ansaugen von Frischluft unterbunden.

Nach dem Entweichen des Überdrucks schließt die Druckentlastungsklappe wieder selbständig, sodass auch hier keine weitere Sauerstoffzufuhr von außen möglich ist. Über die Steuereinheit wird die CO₂-Löschanlage aktiviert und das Löschmittel über die Löschköpfe zum Brandherd geleitet; der Brand wird gelöscht.

9.4 Zusammenfassung

Beim Einsatz von nicht wassermischbaren KSS in der spanenden Metallbearbeitung ereigneten sich in der Vergangenheit immer wieder Brände und Explosionen bzw. Verpuffungen. Dabei sind Verletzungen von Beschäftigten – auch mit Todesfolge – verbunden mit hohen Sachschäden und Produktionsausfällen zu beklagen.

Diese Gefährdungen erfordern Schutzmaßnahmen, wobei das Vermeiden von explosionsfähiger Atmosphäre primäres Schutzziel ist. Dies lässt sich z. B. durch den Einsatz von KSS mit hoher Viskosität und hohem Flammpunkt bei gleichzeitig niedrigem Verdampfungsverlust erreichen.

Weiter wird aufgezeigt, dass innerhalb von Werkzeugmaschinen eine Einteilung in die Zone 1 in Abhängigkeit von Absaugung und Prozesszeit durchaus zu erwarten ist. Daher sind Zündquellen durch den Bearbeitungsprozess selbst und durch Betriebsmittel, z. B. durch Ausführung elektrischer Betriebsmittel entsprechend den Beschaffenheitsanforderungen nach Gerätekategorie 2G, zu vermeiden.

Zum konstruktiven Explosionsschutz gehören neben Feuerlöschanlagen zur Brandbekämpfung Druckentlastungsklappen mit integrierter Flammensperre als ganzheitlicher Brand- und Explosionsschutz.

Mit den dargestellten Informationen und Gedankenmodellen kann dem Leser eine Hilfestellung gegeben werden, wie Unfälle durch Brand und Explosion bzw.



Verpuffung zukünftig vermieden oder deren Auswirkungen zumindest begrenzt werden können.

9.5 Literatur

- [1] Explosionsschutz an Maschinen zur spanabhebenden Bearbeitung von Metallen. Vermerk des Bayerischen Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, Familie, Frauen und Gesundheit, Nr. II3/3112/2/94, München 1994
- [2] *Kähler, B.*: Brände an ölgekühlten Werkzeugmaschinen. Vortrag BIA-Seminar „Minderung der Gefahrstoffexposition“, Sankt Augustin, 30. September 1997
- [3] *Hirsch, W.; Hempel, D.; Förster, H.*: Untersuchung zum Explosionsschutz beim Einsatz von Kühlschmierstoffen in Werkzeugmaschinen. PTB-ThEx-2. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1997
- [4] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Explosionsschutz-Regeln (BGR 104). Carl Heymanns, Köln 2005
- [5] DIN EN 1127-1: Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz, Teil1: Grundlagen und Methodik (10.97). Beuth, Berlin 1997
- [6] Kühlschmierstoffe. BIA-Report 7/96. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1995
- [7] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Verwendungsbeschränkungen für wassermischbare bzw. wassergemischte Kühlschmierstoffe, bei deren Einsatz N-Nitrosamine auftreten können (TRGS 611). Ausg. 10/2002. BArbBl. (2002) Nr. 10, S. 67-72
- [8] VDI 3035: Anforderungen an Werkzeugmaschinen, Fertigungsanlagen und periphere Einrichtungen beim Einsatz von Kühlschmierstoffen (09/97). Beuth, Berlin 1997



- [9] *Stäbler, D.; Schönwald, M.; Sefrin, H.; Wolf, M.*: Gefährdungsbeurteilung bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe sowie Abschlussbericht. Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft, April 2003
- [10] *Kiechle, Hobelsberger, Darafsch, Freiler, Luther, Buß*: Entwicklung und technische Erprobung emissionsarmer Schmierstoffe unter Verwendung nachwachsender Rohstoffe zur Verminderung der schadstoffbedingten Belastung der Umwelt durch organische Stoffe; BMFT Projekt 01 ZH 8821/5
- [11] DIN 51581-1. Prüfung von Mineralölerzeugnissen – Bestimmung des Verdampfungsverlustes – Teil 1: Verfahren nach Noack (3/2003). Beuth, Berlin 2003
- [12] Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der spanenden Metallbearbeitung. BIA-Report 4/04. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2004. www.hvbg.de/bgja, Webcode: 941742
- [13] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes vom 27. September 2002 (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV). BGBl. I (2002), S. 3777
- [14] DIN EN 60079-10 (DIN VDE 0165, Teil 101): Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 10: Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche (9/1996). Beuth, Berlin 1996
- [15] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX-Produkt-Richtlinie). ABl. EG (1994) Nr. L 100, S. 1, zul. geänd. ABl. EG (2003) Nr. L 284, S. 1



- [16] DIN EN 50014 (DIN VDE 0170/0171 Teil 1): Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Allgemeine Bestimmungen (2/2000). Beuth, Berlin 2000
- [17] *Zimmermann, K.*: Explosionsdruckentlastung von spanabhebenden Werkzeugmaschinen; Forschungsbericht VDW 3002. Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., 1996
- [18] MRL-News – 13/12/01, Brand- und Explosionsschutz an Werkzeugmaschinen – Anforderungen, Schutzkonzepte und Diskussionen. Hrsg.: Elan Schaltelemente, Wettenberg 2001. www.elan.de/tweb/ger/news/data/mrlnews.htm
- [19] DIN EN 54-1: Brandmeldeanlagen, Teil 1: Einleitung (10/1996). Beuth, Berlin 1996
- [20] DIN EN 13478: Sicherheit von Maschinen – Brandschutz (4/2002). Beuth, Berlin 2002
- [21] DIN EN 14497: Kleinlöschanlagen – Anforderungen, Prüfung (02/1990). Beuth, Berlin 1990
- [22] Berufsgenossenschaftliche Vorschriften: Sicherheits- und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (BGV A8). Carl Heymanns, Köln 2002



10 Brand- und Explosionsschutz an Werkzeugmaschinen

Harald Sefrin,
Berufsgenossenschaft Metall Süd, Mainz

In der europäischen Norm DIN EN 13478 [1] wird beschrieben, wie Hersteller und Konstrukteure ihren Verpflichtungen für die Festlegung des bestimmungsgemäßen Betriebs, zur Risikoanalyse und -bewertung, zu Schutzmaßnahmen sowie der Erstellung von Benutzerinformationen zum Restrisiko nachkommen können. Der Betreiber erhält anhand der Betriebsanleitung Informationen zur bestimmungsgemäßen Verwendung der Maschine, die er dann an seinen Prozess anpassen sollte und je nach Randbedingungen der Gesamtanlage eventuell durch zusätzliche Maßnahmen ergänzen muss.

Zur Umsetzung eines effektiven Brand- und Explosionsschutzes an Werkzeugmaschinen kann man beim Einsatz brennbarer nicht wassermischbarer Kühlschmierstoffe (KSS) auch eine Beispiel-Checkliste nach dem neuen Normentwurf E DIN 31007 [2] heranziehen. Darin werden das beispielhafte Vorgehen für eine Risikobeurteilung und entsprechende Maßnahmen zum Schutz vor Maschinenbränden und -explosionen geschildert.

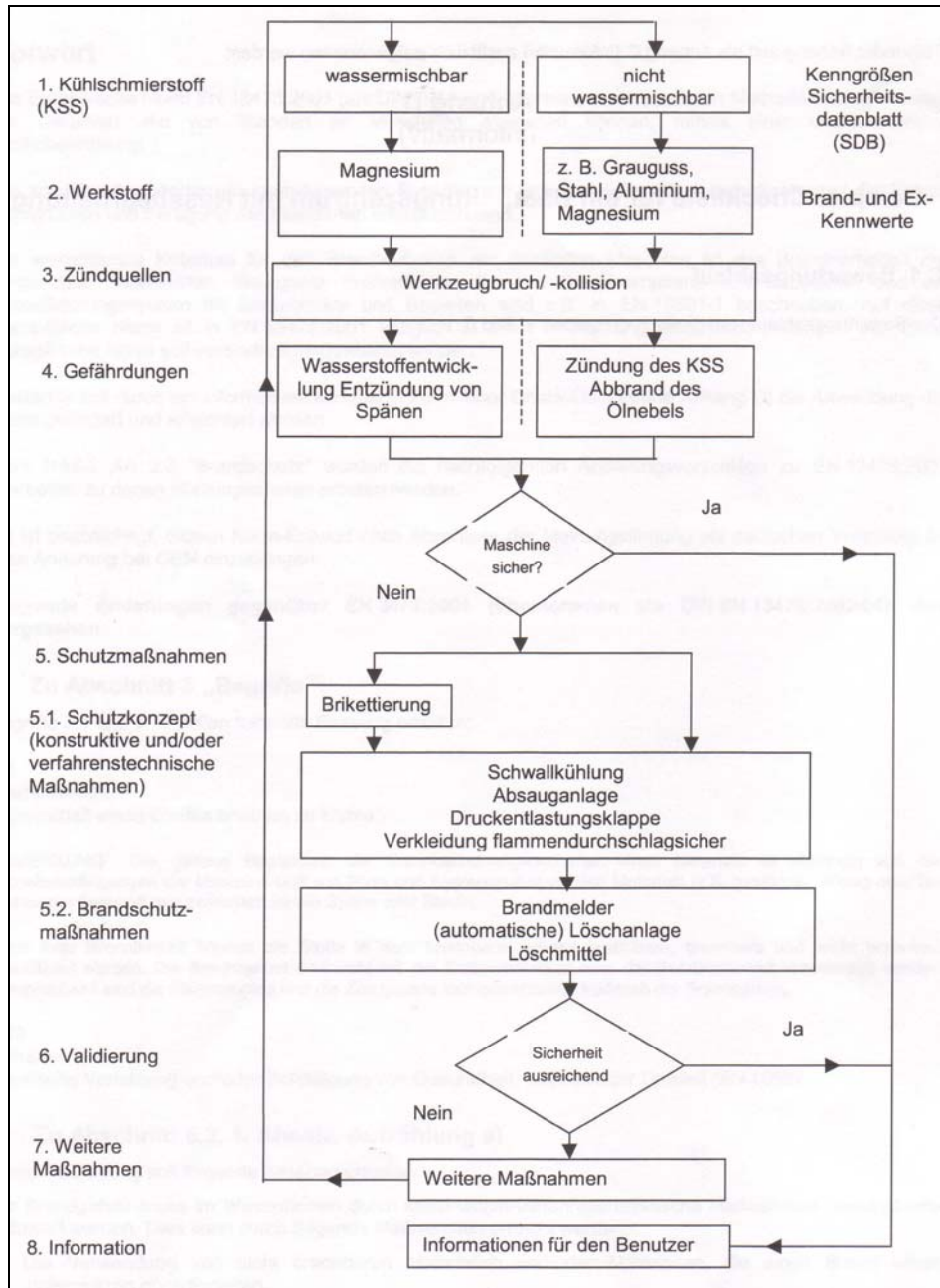
Anhand eines Flussdiagramms (Abbildung 1, Seite 160) führt E DIN 31007 den Anwender durch die Brandschutz-Checkliste für Bearbeitungszentren und handelt die wesentlichen Punkte

- Kühlschmierstoffe,
- Werkstoffe,
- Zündquellen,
- Gefährdungen und Schutzmaßnahmen

ab.



Abbildung 1:
Flussdiagramm zur Gefährdungsermittlung nach E DIN 31007 [2]



Nach der Checkliste werden Bearbeitungsprozesse, bei denen wassergemischte KSS mit einem Öl- bzw. Konzentratanteil von weniger als 15 % zum Einsatz kommen, als unkritisch angesehen. In diesem Fall kann eine Explosionsgefahr aufgrund Verdampfung und Vernebelung der Emulsion sicher ausgeschlossen werden. In der Praxis



liegen die meisten Anwendungen mit Emulsionen – bis auf wenige Ausnahmefälle – weit unterhalb dieser Konzentrationsgrenze.

Aufwändiger ist die Bewertung der Gefährdungen beim Einsatz brennbarer nicht wassermischbarer KSS. Hinsichtlich der Brand- und Explosionsgefahr spielt deren „Qualität“ eine entscheidende Rolle, sie wird im Wesentlichen durch die verwendeten Basisöle bestimmt. Zur Beurteilung nicht wassermischbarer KSS können Kennwerte, wie z. B. Flammpunkt, Ölnebelindex oder Verdampfungsverlust, herangezogen werden.

Bei den zu bearbeitenden Werkstoffen – vor allem bei den Leichtmetallen Magnesium und Aluminium, aber auch bei Stahl oder Guss – sind neben den Brandkenngrößen (Brennzahl oder Brennbarkeit) die Korngrößen der Metallstäube entscheidend für das Ausmaß der Gefährdung.

Als vorrangige Zündquelle geht aus Untersuchungen von Bränden an Werkzeugmaschinen [3] in erster Linie der Werkzeugbruch aufgrund von Fehlbedienung, „stumpfen“ Werkzeug oder „Trockenlaufen“ (mangelnde KSS-Zufuhr) hervor. Weitere Gefährdungen sind

- verklemmte Werkstücke oder eine defekte Werkstückaufnahme,
- defekte Kabel bzw. Kurzschlüsse,
- Funken aus elektrostatischen Ölabscheidern,
- eine mögliche Wasserstoffentwicklung bei der Magnesiumbearbeitung mit Emulsion sowie
- eine mögliche Entzündung von Leichtmetallspänen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Madica“ wurde am Institut für Feuerungstechnik der Universität Karlsruhe die untere Explosionsgrenze (UEG) eines KSS-Aerosol-/Dampfgemisches zu etwa 30 g/m³ Luft bestimmt [4]. Bei gekapselten Werkzeug-



maschinen geht man von einer ähnlichen Konzentration im Maschinenraum bei solchen Reaktionen aus.

Bei der Auswahl eines emissionsarmen nicht wassermischbaren KSS ist neben dem Flammpunkt und der Viskosität vor allem der Verdampfungsverlust nach *Noack* bei 250 °C ausschlaggebend. Darüber hinaus können durch den Einsatz von Antinebelzusätzen oder Multifunktionsölen die Emissionen beim Prozess reduziert werden. Ebenso wichtig ist es, den KSS möglichst sauber zu halten und den Eintrag bzw. Leckagen von Reinigungs- oder Lösungsmitteln zu verhindern.

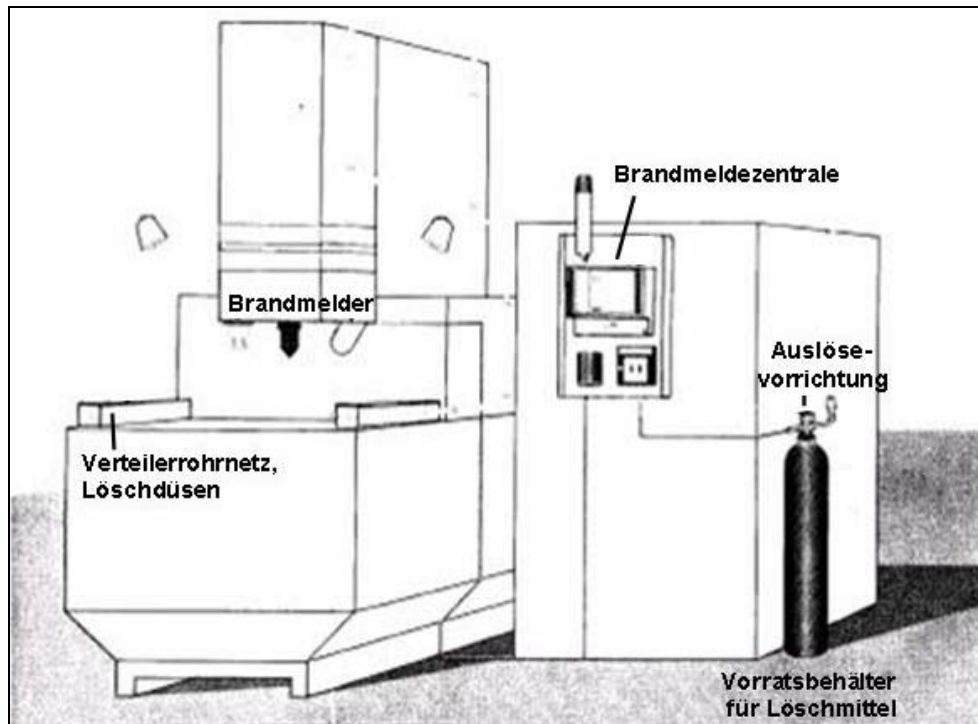
Als Schutzmaßnahmen für Bearbeitungszentren, die mit nicht wassermischbaren KSS betrieben werden, empfiehlt E DIN 31007

- den Einsatz von Umhausungen mit einer Druckbelastbarkeit bis 0,1 bar,
- ausreichend dimensionierte Druckentlastungsklappen möglichst im Dachbereich,
- eine flammendurchschlagsichere Verkleidung an Öffnungen und Türspalten (Labyrinth-Dichtungen),
- außerhalb des Arbeitsraumes gelegene Versorgungsleitungen sowie
- eine Steuerung zur Überwachung der KSS-Zufuhr und des Absaugvolumenstroms bei natürlich geschlossenem Arbeitsraum.

Bei einer Ausstattung mit Löschanlage sollte deren Steuerung über Brandsensoren verfügen, die den Brand im Ernstfall schnell und zuverlässig detektieren und den Löschvorgang über die Steuerung auslösen. Ebenfalls sollte die Energie- und KSS-Zufuhr sowie der Luftvolumenstrom der Absauganlage durch die Steuerung abgeschaltet werden (Abbildung 2, siehe Seite 163).



Abbildung 2:
Beispiel für eine integrierte Löschanlage



Druck und Volumenstrom der Absauganlage sollten überwacht werden. Beim Einsatz von elektrostatischen oder mechanischen Filtersystemen sind diese nach den Angaben aus der Betriebsanleitung auf ihre Eignung zum Brand- und Explosionsschutz zu überprüfen.

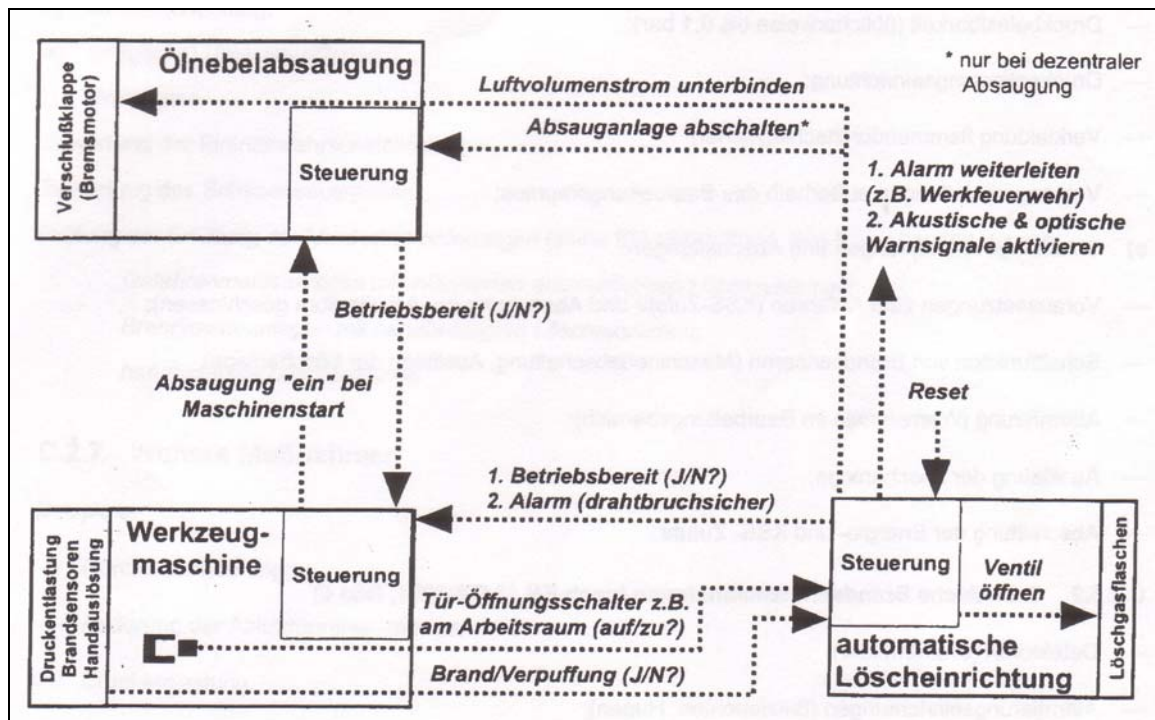
Für die Späneabfuhr eignen sich besonders:

- Schwallspülung im Innenraum,
- Späneförderer im Bodenbereich und
- ggf. Brikettierung von Magnesiumspänen am Austragsbereich der Maschine.

Die logischen sowie technischen Zusammenhänge und Verknüpfungen zwischen Steuerung der Werkzeugmaschine sowie Absaug- und Löschanlage sind in Abbildung 3 (siehe Seite 164) erklärt.



Abbildung 3:
Beispiel eines Schutzkonzeptes für ein Bearbeitungszentrum
mit nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffen [1]



Ziel der Maßnahmen nach E DIN 31007 ist die Verhinderung von möglichen Personen- und Sachschäden sowie die Bewertung der Brandeintrittswahrscheinlichkeit und deren Ausmaß. Bei einer ungünstigen Bewertung sollten die Betreiber über geeignete Maßnahmen nachdenken. Dies können u. a.

- eine Änderung der Ablufführung,
- der Einbau von Druckentlastungskappen,
- die Wahl eines geeigneten KSS hinsichtlich Verdampfung und Vernebelung sowie
- eine Verbesserung der KSS-Zufuhr

sein.



Literatur

- [1] DIN EN 13478: Sicherheit von Maschinen – Brandschutz (4/2002). Berlin, Beuth 2002

- [2] E DIN 31007: Sicherheit von Maschinen – Brandschutz; Vorschlag für eine Änderung und Ergänzung der Europäischen Norm DIN EN 13478. Ausgabe: 10/2003

- [3] *Brand, C.*: Verpuffungen und Brände in Werkzeugmaschinen. Hrsg.: Fachgemeinschaft Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme im VDMA, Frankfurt am Main 1995

- [4] Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und Bearbeitung. Projekt-konsortium MADICA, Steinbeiss Transferzentrum, Aalen 1999



Anschriften der Autoren

Dipl.-Ing. Olaf Bernstorff	Fa. GEA Delbag Lufttechnik Südstraße 48 44625 Herne
Prof. Dr. Rüdiger Detzer	Fa. Imtech Deutschland Tilsiter Straße 162 22047 Hamburg
Dr.-Ing. Klaus Gerschwiler	Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Steinbachstraße 53 B 52074 Aachen
Dipl.-Ing. Bing Gu	Institut für Gebäudeenergetik Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 35 70569 Stuttgart
Prof. Dr. Wilhelm Höflinger	Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der Technischen Universität Wien Getreidemarkt 9 / 166 1060 Wien
Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke	Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Steinbachstraße 53 B 52074 Aachen
Dipl.-Ing. Bastian Maier	Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Steinbachstraße 53 B 52074 Aachen



Dipl.-Ing. Dominik Nagel	Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik Universität Karlsruhe Engler-Bunte-Ring 21 76131 Karlsruhe
Dipl.-Ing. Wolfgang Pfeiffer	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA Alte Heerstraße 111 53754 Sankt Augustin
Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schaber	Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik Universität Karlsruhe Engler-Bunte-Ring 21 76131 Karlsruhe
Dipl.-Ing. Jörg Schmid	Fa. HLK Stuttgart Pfaffenwaldring 6A 70569 Stuttgart
Dipl.-Ing. Harald Sefrin	Berufsgenossenschaft Metall Süd Wilhelm-Theodor-Römheld-Straße 15 55130 Mainz
Dipl.-Ing. Reinhard Stockmann	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA Alte Heerstraße 111 53754 Sankt Augustin
Dipl.-Ing. Axel van Ryn	Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik Gustav-Heinemann-Ufer 130 50968 Köln
Dipl.-Ing. Peter Wlaschitz	Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der Technischen Universität Wien Getreidemarkt 9 / 166 1060 Wien