

Ultrafeine Partikel in der spanenden Metallbearbeitung

R. Stockmann, H. Sefrin, J. Pelzer, M. Wolf

Zusammenfassung In Werkzeugmaschinen werden sowohl wasser-gemischte als auch nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe eingesetzt. Daneben findet in neuerer Zeit die Bearbeitung mit Minimalmengenschmierstoff statt. Zur Charakterisierung der entstehenden Emissionen in der abgesaugten Luft aus Werkzeugmaschinen wurden umfangreiche Messungen im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte durchgeführt. Neben der Messung der Kühlschmierstoffmassenkonzentrationen wurde auch die Größenverteilung der Partikelanzahlkonzentrationen im Bereich von wenigen Nanometer bis zu ca. 10 µm ermittelt. Bei allen genannten Kühlschmierstoffen wurden im Rohgasvolumenstrom ultrafeine Partikel nachgewiesen. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse der Messungen vor.

Ultrafine particles in the machining of metal

Abstract In machine tools both water miscible and neat cutting fluids are applied. Furthermore, in recent times minimal quantity lubricants are in use. In order to characterize the emissions in the air exhausted from machine tools extensive measurements were performed during several research projects. In addition to the metalworking fluids (MWFs) mass concentration the size distribution of the particle number concentration in the range of few nanometers up to 10 µm was determined. For all MWFs mentioned above ultrafine particles were detected in the raw gas air flow. This article presents the results of the measurements.

1 Einleitung

Kühlschmierstoffe (KSS) werden in Werkzeugmaschinen zur spanenden Metallbearbeitung eingesetzt. Dabei entstehen Emissionen, die bei Beschäftigten zu Atemwegserkrankungen führen können. Trotz vieler Versuche, die KSS zu ersetzen, ist ihr Einsatz in den meisten Fällen immer noch unverzichtbar. Die Begrenzung der Exposition gegenüber KSS-Emissionen erfordert ein Maßnahmenpaket: Neben der Kontrolle, Wartung und Pflege der KSS sind technische Schutzmaßnahmen, wie die Erfassung und Abscheidung der Emissionen sowie eine effektive Raumlüftung unumgänglich [1].

Im Rahmen eines vom damaligen Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) geförderten Forschungsvorhabens am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen im Jahr 2005 wurden Messungen in der Rohluft vor Abscheidern durchgeführt. Ziel dieser Messungen war die Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen im Rohluftvolumenstrom (Partikelverteilung, -konzentration) während der Bearbeitung. Die Ergebnisse sollten Grund-

lagen für die optimale Gestaltung von Erfassungseinrichtungen und für die Verbesserung der Abscheideleistung liefern. Bei den Untersuchungen am WZL wurden exemplarisch auch ultrafeine Partikel betrachtet. Aufgrund der ersten Ergebnisse wurden weitere Untersuchungen sowohl an Forschungsinstituten als auch bei Industriepartnern durchgeführt.

2 Ultrafeine Partikel

Als ultrafeines Aerosolteilchen (UFP, ultrafine particle) bezeichnet man ein Teilchen, dessen Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser bei $< 0,1 \mu\text{m}$ liegt. Der Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser entspricht dem Durchmesser einer Kugel, die im gleichen Dispersionsmittel (z. B. Luft) die gleiche Mobilität oder Beweglichkeit hat wie das untersuchte beliebig geformte Teilchen [2; 3].

Von Nanopartikeln spricht man, wenn die Partikel mit ihren besonderen Eigenschaften gezielt hergestellt werden. Häufig verwendet wird der Begriff „engineered nanoparticle“ [4]. Beispiele sind Titandioxid als Zusatzstoff in Cremes und Zahnpasta oder Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes, CNTs). Eine exakte Definition für Nanopartikel liegt nicht vor, allerdings haben sich mehrere europäische Messinstitute unter der Federführung des BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung in Abstimmung mit der MAK-Kommission 1998 vorläufig auf die o. g. Konvention geeinigt.

3 Messung von ultrafeinen Partikel bei der Metallbearbeitung

Die Messung ultrafeiner Partikel in der Rohluft vor Abscheidern fand parallel zu weiteren Messungen statt, die zum Ziel hatten, die Emissionen aus Werkzeugmaschinen zu charakterisieren. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in **Bild 1**, die Messstrecke in **Bild 2** dargestellt. Abschnitt 3.1 erläutert die verwendete Messtechnik. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sowie eine detaillierte Beschreibung der Messstrecke sind im BGIA-Report 9/2006 [5] zu finden.

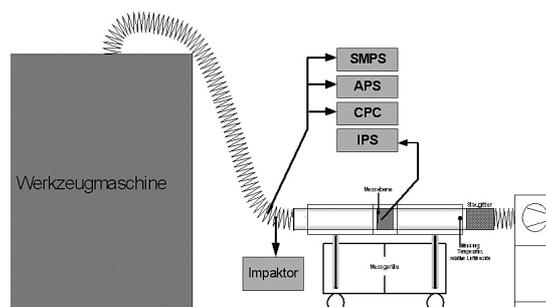


Bild 1. Skizze des Versuchsaufbaus. SMPS = Scanning Mobility Particle Sizer, APS = Aerodynamic Particle Sizer, CPC = Condensation Particle Counter, IPS = Isokinetisches Probensystem

Dipl.-Ing. Reinhard Stockmann,
Dipl.-Ing. Johannes Pelzer,

BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin.

Dipl.-Ing. Harald Sefrin, Dipl.-Ing. Michael Wolf,
Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd, Mainz.

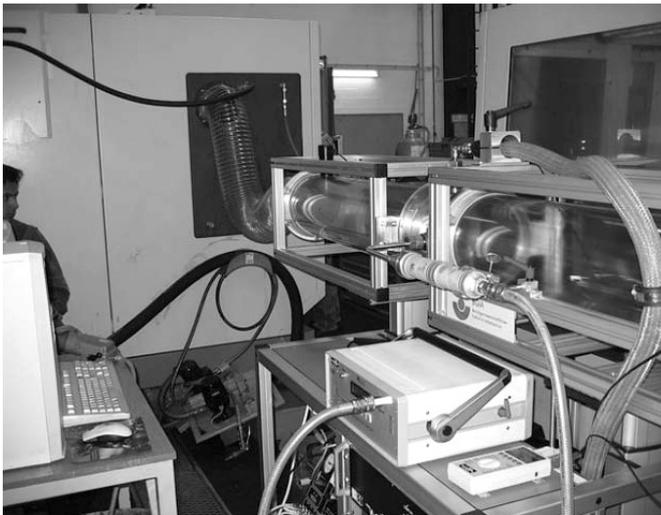


Bild 2. Messstrecke.

3.1 Messtechnik

Für die Bestimmung der Anzahlkonzentration und der Partikeldurchmesser wurden folgende Messgeräte eingesetzt:

- zur größen aufgelösten Messung ultrafeiner Partikel (Messbereich 6 bis 750 nm) der Scanning Mobility Particle Sizer SMPS 3936L25 der Fa. TSI, Aachen,
- zur Messung der Anzahlkonzentration aller Partikel von 0,01 bis 1 µm (10 bis 1 000 nm) der Condensation Particle Counter CPC 3007 der Fa. TSI, Aachen,
- zur größen aufgelösten Messung der Anzahlkonzentration von Aerosolpartikeln von 0,5 bis 20 µm der Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer APS Model 5321 der Fa. TSI, Aachen,
- zur größen aufgelösten Messung der Partikelmassen im Bereich von 0,025 bis 11,4 µm der Niederdruckkaskadenimpaktor vom Typ AERAS LPI 25/0.018/2.0 der Fa. Hauke, Gmunden, Österreich.

Zur Messung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte wird am Anfang der Messstrecke ein kapazitiver Temperatur-Feuchte-Fühler der Fa. Ahlborn eingesetzt. Die Bestimmung des Absaugvolumenstromes erfolgte mit einem Stau-

gitter der Fa. Airflow. Temperatur, relative Luftfeuchte sowie Absaugvolumenstrom wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der freiwerdenden metallischen Stäube diente das isokinetische Probenahmesystem (IPS-Messsystem) [6], das ebenfalls zur Beaufschlagung von Kernporrenfiltern zur Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop eingesetzt wurde.

3.2 Untersuchte Einsatzgebiete

Ausgehend von ersten Hinweisen für das Auftreten ultrafeiner Partikel aus Untersuchungen bei der Minimalmengenschmierung (MMS) und der Metallbearbeitung mit nichtwassermischbaren KSS im WZL in Aachen wurden umfangreiche Untersuchungen bei der MMS beim WBK (Institut für Produktionstechnik) der Universität Karlsruhe und bei zwei Herstellern beim Einsatz von wassergemischten bzw. nichtwassermischbaren KSS durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Erste Messungen am WZL

Zur Überprüfung der unteren Messbereichsgrenze der eingesetzten optischen Partikelzähler wurde bei einzelnen Messungen ein weiteres Messsystem eingesetzt, das die Partikel nach dem elektrodynamischen Durchmesser klassiert und zählt (SMPS). Diese Messungen wurden sowohl bei der MMS als auch bei der konventionellen Ölbearbeitung durchgeführt. Erstmals wurden bei der spanenden Metallbearbeitung auch ultrafeine Partikel festgestellt. Die Ergebnisse des Projektes im WZL enthält der BGIA-Report 9/2006 „Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen, Zusammenfassung der Vorträge anlässlich einer Fachveranstaltung am 11. Mai 2006 in Bonn“ [5].

Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der unterschiedlichen Partikelanalytoren im Bereich von 300 und 600 nm. Darüber hinaus sind weitere Partikel im Bereich < 300 nm vorhanden, wobei bei der MMS ein deutlicher Konzentrationsanstieg gegenüber der konventionellen Bearbeitung bei den Partikeln < 300 nm festzustellen ist. Die

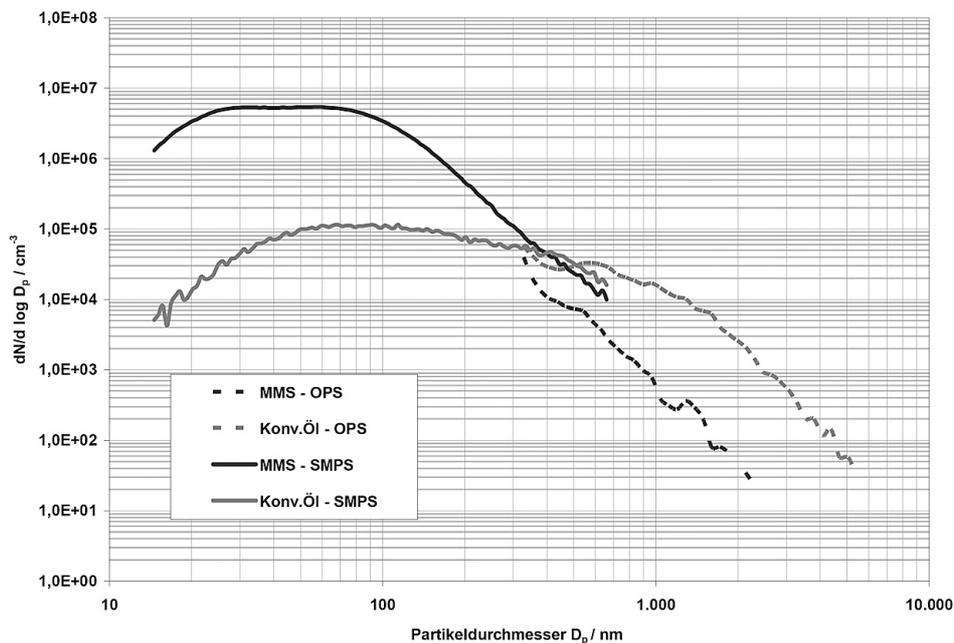


Bild 3. Partikelgrößenverteilung bei der Bearbeitung mit Minimalmengenschmierung und einem nichtwassermischbaren Kühlschmierstoff. OPS = optical particle sizer

Tabelle 1. Zeitlicher Mittelwert der Partikelanzahlkonzentrationen bei unterschiedlichen Werkstoffen.

Werkstoff	Öl	Partikelanzahlkonzentration (SMPS)	Modalwert in nm
Guss	Öl 1	11 600 000	40
Guss	Öl 2	20 270 000	35
Stahl	Öl 2	3 420 000	82
Aluminium	Öl 3	1 290 000	31
Aluminium	Öl 2	2 420 000	46

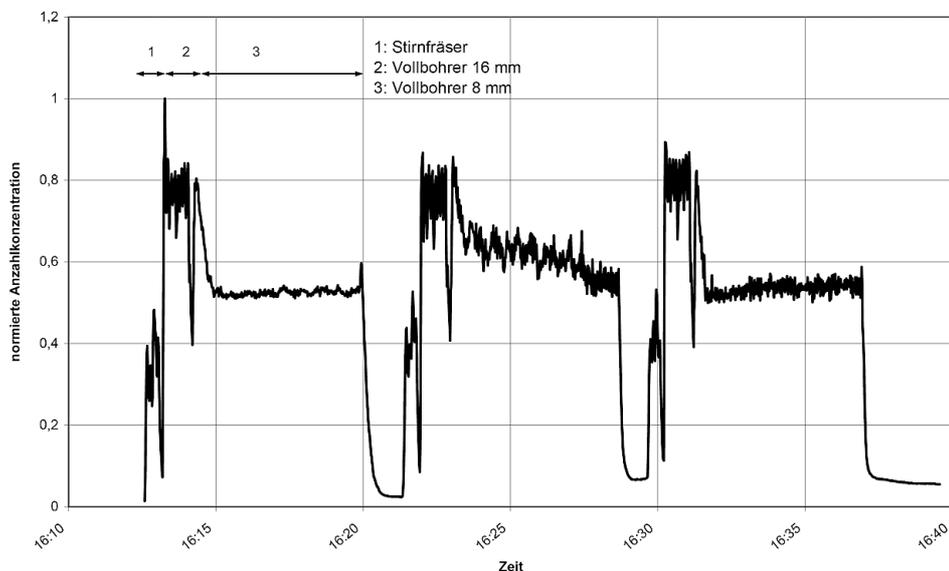


Bild 4. Anzahlnormierter Verlauf der Partikelanzahlkonzentration bei drei identischen Bearbeitungszyklen.

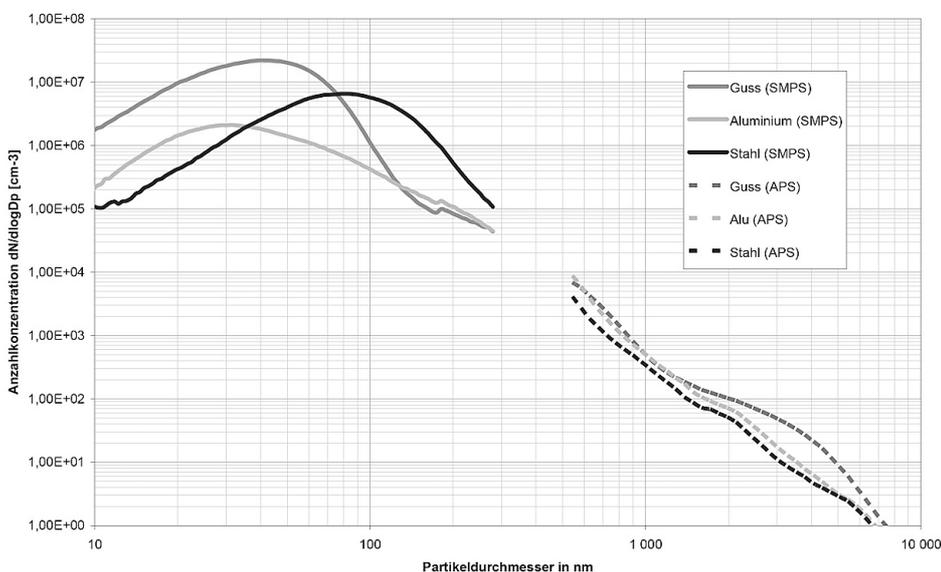


Bild 5. Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von den bearbeiteten Werkstoffen.

Bearbeitungsparameter Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Vorschub waren bei der Ölbearbeitung gegenüber der Bearbeitung mit MMS reduziert. Da die Werte (Bild 5) nur durch wenige Messungen ermittelt wurden, waren weitere Untersuchungen notwendig, um die Ergebnisse der ersten Messungen am WZL verifizieren zu können. Aus diesem Grund wurden weitere Untersuchungen auch unter Praxisbedingungen durchgeführt.

sich neben den in dunklen Flecken abgeschiedenen Partikeln auch Tropfen gebildet haben, die durch Abscheidung von feinsten Flüssigaerosolen entstanden sind.

An zwei Fraktionen der gesammelten Aerosole bei der Stahlbearbeitung (Fraktionen von 25 bis 50 nm und von 50 bis 100 nm) wurde durch Glühen ein Masseverlust der Belegung von 54 bzw. 66 % ermittelt. Bezogen auf die unterschiedliche Dichte der zu erwartenden metallischen Partikel und der Kühlschmierflüssigkeit kann das Volumen- bzw.

4.2 Minimalmengenschmierung (MMS)

Die Messungen am WBK dienen der Bestimmung von Partikeln bei der MMS unterschiedlicher Werkstoffe. Voraussetzung für die Messungen war ein ideal eingestellter Prozess, bei dem Bearbeitungsparameter, Art und Menge des Schmierstoffs für den Serienbetrieb optimiert waren. Mithilfe der CPC-Messungen (Gesamtpartikel) war es möglich, die einzelnen Prozessschritte zeitlich darzustellen (Bild 4).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen. Dargestellt sind jeweils die zeitlichen Mittelwerte einer gesamten Messung. Zusätzlich ist der Modalwert (Partikeldurchmesser mit der größten Häufigkeit) angegeben.

Die Konzentration ist abhängig vom Werkstoff, dem Bearbeitungsprozess und dem verwendeten Schmierstoff. Die höchste Partikelanzahlkonzentration wurde bei der Gussbearbeitung gemessen, während bei der Aluminiumbearbeitung deutlich niedrigere Konzentrationen ermittelt wurden. Die niedrigen Konzentrationen bei der Stahlbearbeitung gegenüber der Gussbearbeitung können entweder werkstoffabhängig oder durch unterschiedliche Prozessparameter bedingt sein (Bild 5).

4.3 MMS-Untersuchungen zur Ermittlung der Beschaffenheit der ultrafeinen Partikel

Neben der reinen Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration wurden am WBK auch sammelnde Messverfahren eingesetzt, um den Charakter der entstehenden Partikel aufzuklären.

Bereits durch einfache visuelle Kontrolle der mittels Niederdruckkaskadenimpaktor belegten Aluminiumfolien ist festzustellen, dass die Aerosole bei der MMS aus festen Partikeln und aus Tröpfchen bestehen. Bild 6 zeigt beispielhaft, dass

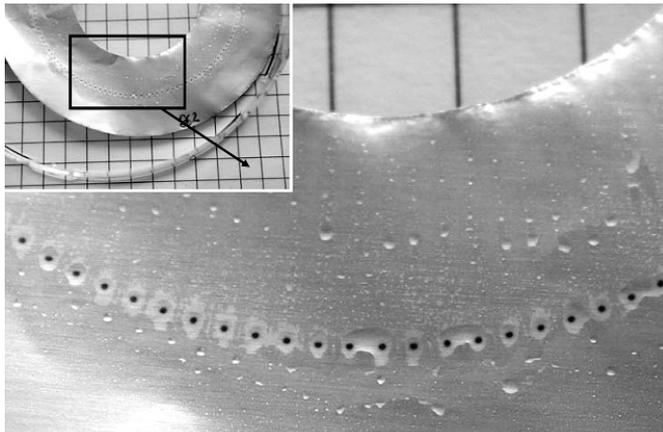


Bild 6. Mikroskopische Aufnahme einer bei der Minimalmengenschmierung belegten Kaskadenimpaktorfolie.

Partikelzahl-Verhältnis von metallischen und KSS-Aerosolen grob mit etwa 1 : 4 abgeschätzt werden.

Zur Bestätigung der Unterscheidung wurden ergänzend REM-EDX-Analysen (Rasterelektronenmikroskopische energiedispersive Röntgenspektroskopie) durchgeführt. Zu-

nächst ergaben diese Analysen qualitative Informationen über die chemische Zusammensetzung der „Flecken“ der Belegung. Differenzierte Resultate konnten erst bei der Partikelfraktion von 200 bis 400 nm (Probenahme bei Gussbearbeitung) gewonnen werden. Einzelne Partikel auf der Folie zeigten deutliche Gehalte an Eisen. In Bereichen zwischen den Partikeln, die wie Flüssigkeitsansammlungen erschienen, dominierte dagegen Kohlenstoff als Element.

Des Weiteren wurden belegte Bereiche auf Folien der Fraktion von 50 bis 100 nm (Stahlbearbeitung) vor und nach einem Glühprozess mittels REM-EDX-Analyse untersucht. Dabei zeigte sich, dass die EDX-Spektren, die in belegten Bereichen der nicht geglähten Folie aufgenommen wurden, dominierend Kohlenstoff und nur untergeordnet Aluminium (Probenträgermaterial) aufwiesen. Nach dem Glühen war ein Großteil des Kohlenstoffs entfernt und im EDX-Spektrum desselben Bereichs dominierte das Aluminium des Probenträgermaterials.

4.4 Wassergemischter Kühlschmierstoff (w-KSS)

Bei den Messungen der Anzahlkonzentration unter einer Partikelgröße von 1 µm (CPC mit Verdünnungssystem) bei einem Werkzeugmaschinenhersteller (Hersteller 2) wurden die in Tabelle 2 dargestellten Werte ermittelt. Hierbei war sowohl ein Unterschied zwischen Aluminium- und Stahlbearbeitung festzustellen als auch in der Konzentrationshöhe in Abhängigkeit von der effektiven Antriebsleistung. Messungen der Partikelanzahlkonzentrationsverteilung (SMPS-Messungen) bei einem weiteren Maschinenhersteller (Hersteller 1) bestätigten diese Ergebnisse.

Der Modalwert der Partikelgrößenverteilung (Bild 7) liegt deutlich niedriger als 100 nm.

Tabelle 2. Partikelkonzentration bei der Bearbeitung mit wassergemischten Kühlschmierstoffen.

Werkstoff	Schnittleistung in kW ¹⁾	Partikelanzahlkonzentration	
		Hersteller 1	Hersteller 2
Stahl	1,3		1300000
	2,4	7000000	
	4,7	11400000	
	6,3		7500000
	9,4	17500000	
Aluminium	13,8		10500000
	2,0		20000
	3,7	2200000	
	7,5		26000

¹⁾ Mit den Bearbeitungsparametern und den Werkstoffeigenschaften errechnete theoretisch eingebrachte effektive Leistung

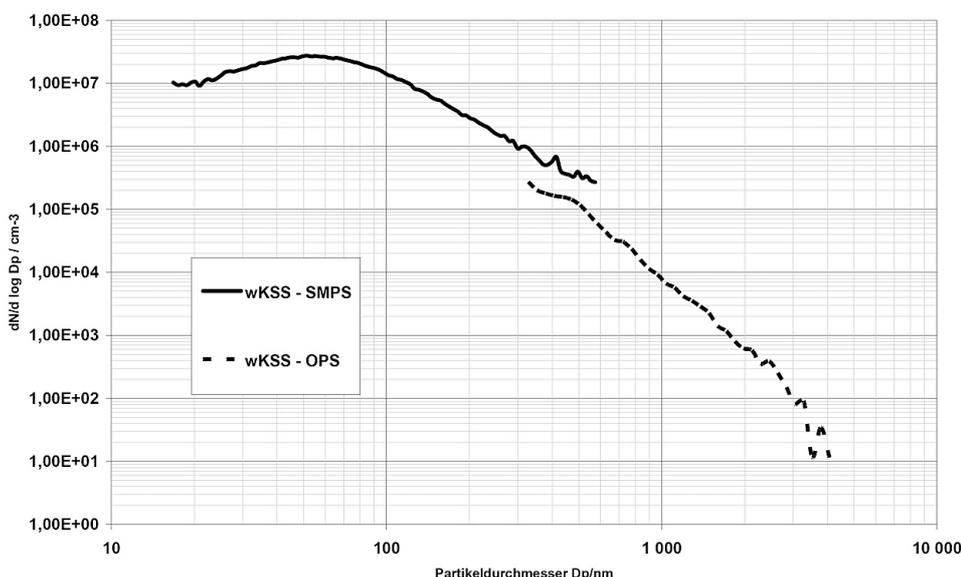


Bild 7. Beispiel einer Partikelgrößenverteilung (9,4 kW).

4.5 Nichtwassermischbarer Kühlschmierstoff (nw-KSS)

Bei der konventionellen Ölbearbeitung wurden Versuche mit unterschiedlichen Werkstoffen und unterschiedlichen Antriebsleistungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Danach gibt es einen sehr großen Unterschied in der Partikelanzahlkonzentration zwischen den Messungen beim Hersteller 1 und den Messungen beim WZL. Die Ursache ist aller Wahrscheinlichkeit nach in der Menge des zugeführten Kühlschmierstoffs zu suchen. Beim WZL in Aachen erfolgte eine optimierte Überflutungskühlung mit einem Volumenstrom von 150 bis 200 l/min, während bei Hersteller 1 nur ein KSS-Volumenstrom von maximal 35 l/min zur Verfügung stand. Dies führte zu einer deutlichen Rauch- und Nebelbildung im Arbeitsraum der Werk-

Tabelle 3. Partikelkonzentration bei der Bearbeitung mit nicht wassermischbarem Kühlschmierstoff.

Werkstoff	Leistung in kW	Partikelanzahlkonzentration (SMPS)	
		Hersteller 1	WZL
Stahl	0*	17 000	
	1,8		240 000
	2,4	9 100 000	
	3,2		620 000
	4,7	9 200 000	
	7	18 300 000	
	9,4	8 800 000	
Aluminium	3,7	800 000	

*: Kühlschmierstoffzufuhr war eingeschaltet, kein Werkzeug im Eingriff, Werkstückrotation erfolgte ebenso wie bei Bearbeitung

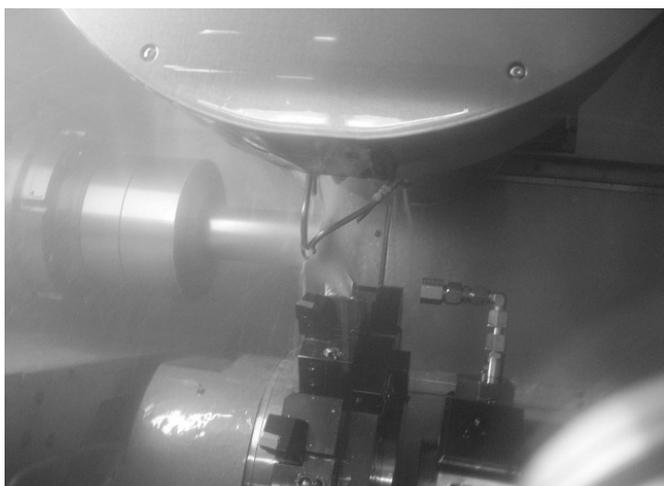


Bild 8. Maschineninnenraum bei geringer Kühlschmierstoffzufuhr.



Bild 9. Maschineninnenraum bei hoher Kühlschmierstoffzufuhr.

zeugmaschine (siehe **Bilder 8 und 9**). Der Modalwert (häufigste Partikelgröße) liegt zwischen 100 und 200 nm.

Wie aus **Bild 10** ersichtlich, ist die Partikelanzahlkonzentration bei den Versuchen ohne Werkzeugeingriff (Eindüsen des KSS mit Werkstückrotation) wesentlich geringer als bei der Bearbeitung. Ebenso steigt mit höherer effektiver Antriebsleistung die Partikelanzahlkonzentration an.

4.6 Ergebnisvergleich

Ein Vergleich der Partikelanzahlkonzentrationen zeigt, dass bei der Aluminiumbearbeitung tendenziell die geringsten Partikelanzahlkonzentrationen auftreten (**Tabelle 4**). Dies kann auch auf die niedrige Antriebsleistung bei der Aluminiumbearbeitung zurückzuführen sein. Des Weiteren ist die Partikelanzahlkonzentration bei der Bearbeitung mit nicht wassermischbarem KSS von der eingebrachten Leistung und der verwendeten Kühlschmierstoffmenge abhängig.

Bemerkenswert ist, dass bei der Bearbeitung mit unterschiedlichen Arten von KSS unterschiedliche Kurvenformen auftreten (**Bild 11**).

Der Abfall vom Maximum zu größeren Partikeln ist bei der MMS am steilsten und bei der Bearbeitung mit nw-KSS am flachsten. Bei der Bearbeitung mit w-KSS und MMS liegen die Modalwerte deutlich unter 100 nm, bei der Bearbeitung mit nw-KSS liegt der Modalwert deutlich über 100 nm. Die höchsten Gesamtemissionen wurden bei der Bearbeitung mit nw-KSS ermittelt.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Anzahlkonzentration infolge der sehr hohen Konzentration im Abluftstrom zeitlich nicht konstant ist, sondern sich durch Stöße der Partikel untereinander immer größere Öltröpfchen bilden. Somit sind Anzahlkonzentration und Größenverteilung stark vom „Alter“ des Aerosols abhängig.

Tabelle 4. Zusammenfassung der Partikelanzahlkonzentrationen.

Werkstoff	Eingesetzter Schmierstoff	Anzahlkonzentration in Partikel pro cm ³	Modalwert in nm
Stahl	MMS	900 000 bis 13 000 000	10 bis 40
Stahl	nw-KSS	2 720 000 bis 25 800 000	100 bis 190
Stahl	wg-KSS	2 200 000 bis 17 500 000	23 bis 51
Aluminium	nw-KSS	1 300 000 bis 2 240 000	98 bis 117
Aluminium	wg-KSS	2 170 000	30

MMS = Minimalmengenschmierung, KSS = Kühlschmierstoff, nw = nichtwassermischbar, wg = wassergemischt

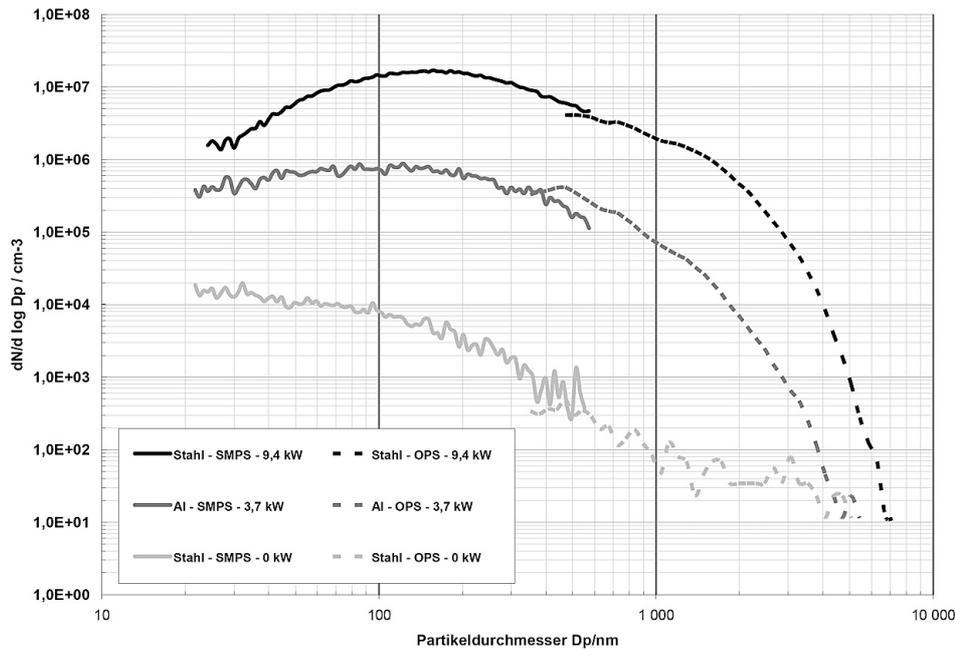


Bild 10. Partikelkonzentration bei unterschiedlicher Antriebsleistung.

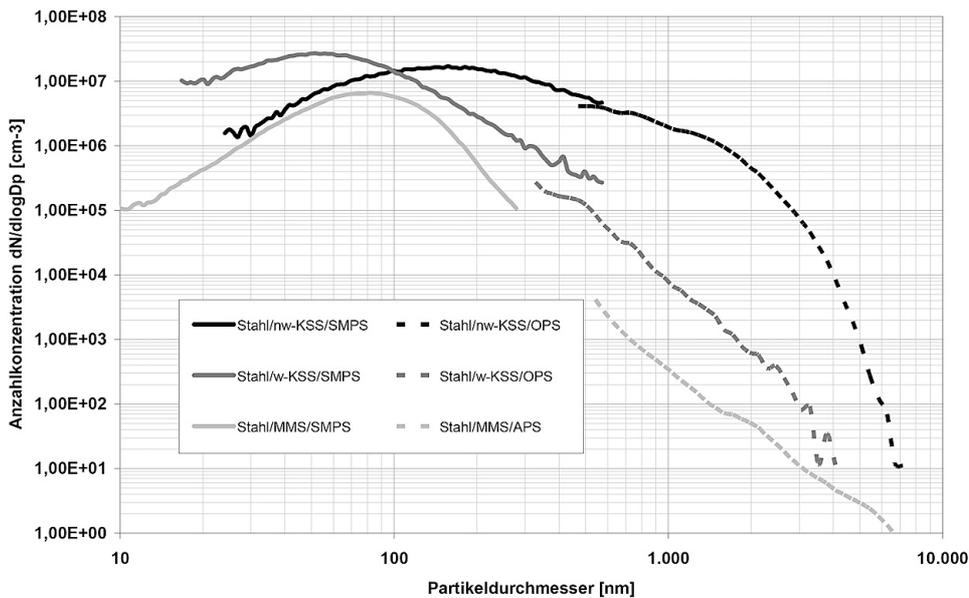


Bild 11. Vergleich der Partikelverteilungen bei unterschiedlichen Arten von Kühlschmierstoffen.

5 Schutzmaßnahmen bei der spanenden Metallbearbeitung

Für die spanende Metallbearbeitung werden in der einschlägigen Literatur seit Jahren die gleichen Schutzmaßnahmen genannt. Die geschlossenen Maschinen müssen mit einem gerade so großen Volumenstrom abgesaugt werden, dass an gewollten Öffnungen eine nach innen gerichtete Strömung entsteht. Das abgesaugte Rohgas wird über eine Abscheidung ins Freie abgeführt und der abgesaugte Volumenstrom wird durch Frischluft im Arbeitsbereich des Beschäftigten ersetzt. Diese Schutzmaßnahmen können ebenso gegenüber ultrafeinen Partikeln angewendet werden.

Die Messergebnisse wurden alle in der Rohluft und nicht im Atembereich der Beschäftigten ermittelt. Bei einzelnen Ver-

suchen wurde auch hinter den Abscheidern in der Reinluft gemessen. Aus diesen ersten Hinweisen ist darauf zu schließen, dass entsprechend konzipierte Einzelabscheider in der Lage sind, ultrafeine Partikel abzuscheiden.

6 Fazit

Die Ergebnisse der Messungen bei der spanenden Metallbearbeitung zeigen, dass bei allen Zerspanungsverfahren mit KSS (wassergemischte KSS, nichtwassermischbare KSS, Minimalmengenschmierung) ultrafeine Partikel im Rohgasvolumenstrom nachgewiesen werden konnten. Bei allen Verfahren ist die Konzentration der entstehenden ultrafeinen Partikel abhängig vom eingesetzten Werkstoff (Aluminium, Stahl, Guss) sowie von weiteren Prozessparametern. Eine Stoffanalyse dieser Partikel war nur ansatzweise bei der Minimalmengenschmierung möglich. Um genauere Angaben zu den frei werdenden Stoffen und deren intrinsischen Eigenschaften zu erhalten, sind weitere umfangreiche Untersuchungsprogramme notwendig.

Während bei der Metallbearbeitung mit wassergemischten KSS eine lineare Abhängigkeit der erzeugten Partikelanzahl von der effektiven Antriebsleistung feststellbar war, zeigte sich beim Einsatz von nichtwassermischbaren KSS ein starker Anstieg der ultrafeinen Partikel, sobald eine starke Vernebelung und Rauchbildung vorlag (Systemüberlastung). In diesem Fall lohnt es sich, die Bearbeitungsstelle durch eine Erhöhung des KSS-Volumenstroms ausreichend zu überfluten und zu kühlen.

Als weitere wirksame Schutzmaßnahme kann die Absaugung der entstehenden Emissionen angesehen werden. Einzelne Versuche zeigen, dass der Einsatz geeigneter Abscheidersysteme hohe Abscheidegrade erzielt.

Festzuhalten bleibt, dass die in der Literatur der Unfallversicherungsträger (Vorschriften, Regeln, Informationen etc.) beschriebenen Schutzmaßnahmen bei der spanenden Metallbearbeitung auch gegenüber Emissionen von ultrafeinen Partikeln ausreichend wirksam sind. Insbesondere die Themengebiete der Kapselung und Einhausung sowie der Absaugung der Emissionen sind in der BGR 143 [7], in den BG-BIA-Empfehlungen KSS und BG-BGIA-Empfehlungen MMS detailliert beschrieben.

Literatur

- [1] *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 4/2004. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin 2004.
- [2] *Möhlmann, C.*: Ultrafeine (Aerosol)-Teilchen und deren Agglomerate und Aggregate. Kennzahl 0412/5. In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 38. Lfg. IV/07. Hrsg.: BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989.
- [3] *Möhlmann, C.*: Ultrafeine Aerosole am Arbeitsplatz. Kennzahl 120 130. In: BGIA-Handbuch Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. 2. Aufl. Lfg. 2/07, IX/2007. Hrsg.: BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 2003.
- [4] ISO/TR 27628: Arbeitsplatzatmosphäre – Ultrafeine, nanoteilige und nanostrukturierte Aerosole – Charakterisierung und Bewertung der Inhalationsexposition. Ausg. 2/2007. Berlin: Beuth 2007.
- [5] Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen. Zusammenfassung der Vorträge anlässlich einer Fachveranstaltung am 11. Mai 2006 in Bonn. BGIA-Report 9/2006. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin 2006.
- [6] Isokinetisches Probenahmesystem (IPS) zur Messung der Konzentration partikel- und dampfförmiger Stoffe in strömender Luft durch Teilstromentnahme. Kennzahl 3110. In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 12. Lfg. IV/94. Hrsg.: BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989.
- [7] Berufsgenossenschaftliche Regel: Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen. BGR/GUV-R 143. Ausg. 5/2009. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Köln: Carl Heymanns 2009.