

Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen

Messungen und Ergebnisse

R. Stockmann

Zusammenfassung Als Teil des Verbundprojektes „Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen an Werkzeugmaschinen“ wurden im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es, Höhe und Zusammensetzung der Kühlschmierstoffemissionen aus Maschinen unter vergleichbaren Bedingungen zu ermitteln. Hierzu wurden an drei Werkzeugmaschinen mit vier unterschiedlichen Kühlschmierstoffen (KSS) Messungen im Absaugvolumenstrom durchgeführt. Um vergleichbare Messbedingungen zu erhalten, wurde ein Gesamtmessstand entwickelt und drei Abscheidesysteme untersucht, um erste Anhaltspunkte für deren Leistungsfähigkeit zu geben. Zur Verifikation und Planung eines Prüfstandes für KSS-Abscheider im BGIA wurden die Konzentrationen im Reingas und auf der Rohgasseite gemessen. Die Messungen zeigten, dass ein erheblicher Anteil der KSS-Emissionen als Aerosol mit sehr kleinem Durchmesser auftreten. Eine Prüfnorm für KSS-Abscheider soll entwickelt werden.

Determining the level of emissions from machine tools – Measurements and results

Abstract Studies were conducted as part of the joint project “Separating metal-working fluids emitted from machine tools” in the machine tool laboratory of the Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen. The aim here was to determine the level and composition of metal-working fluids (MWFs) that machine tools emitted under comparable conditions. For this, measurements were taken from the suction air flow at three machine tools operating with four different MWFs. In order to obtain comparable measuring conditions, an overall measurement bench was developed and three separating systems were studied so as to get the initial indications of their effectiveness. To verify and plan a test bench for MWF separators at the BG Institute for Occupational Safety and Health (BGIA), the concentrations were measured both in the pure gas and on the raw gas side. The measurements showed that a major portion of MWF emissions are produced as aerosols of a very small diameter. A testing standard is to be developed for MWF separators.

1 Einleitung

Als Teil des Verbundprojektes „Abscheidung von Kühlschmierstoffemissionen an Werkzeugmaschinen“¹⁾ wurden im Zeitraum von April bis Oktober 2005 insgesamt 55 Versuche im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen durchgeführt. Dabei wurden die Emissionen unter unterschiedlichen Randbedingungen, z. B. hinsichtlich Bearbeitungsverfahren und eingesetztem Kühlschmierstoff (KSS), in der Absaugung der Werkzeugmaschinen gemessen. Mit den unten beschriebenen Messverfahren wurden die Emissionen charakterisiert, so dass der Dosierer im zu entwickelnden Prüfstand so ausgelegt werden kann, dass pra-

¹⁾ Gefördert vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) mit Unterstützung des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA).

Dipl.-Ing. Reinhard Stockmann,

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA,
Sankt Augustin.

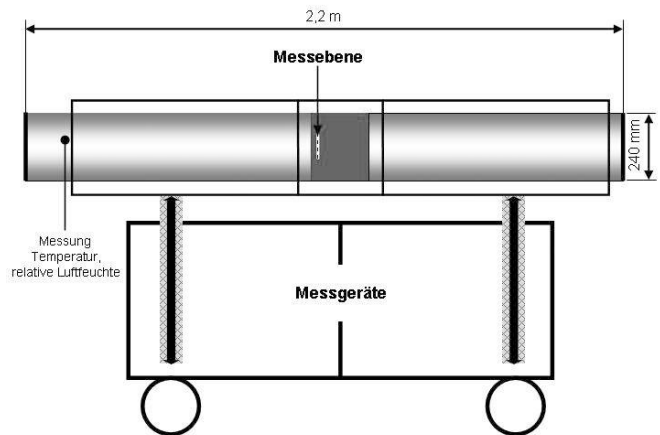


Bild 1. Schematische Darstellung der Rohgasmessstrecke.

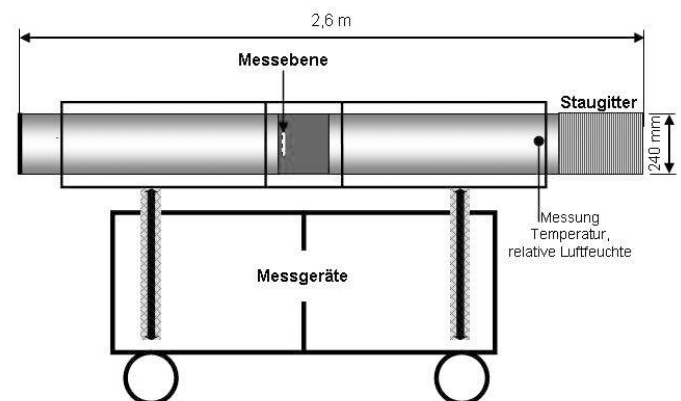


Bild 2. Schematische Darstellung der Reingasmessstrecke.

xisnahe 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 [1]. Das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitsschutz – BGIA entwickelte die Messstrecke, erfasste die Messwerte und wertete diese aus.

2 Entwicklung der Messstrecke sowie Auswahl der zu bestimmenden Messgrößen

Werkzeugmaschinen werden in der Regel abgesaugt und die abgesaugte Luft wird einem Abscheider zugeführt. Um Emissionen messtechnisch ermitteln zu können, muss die Messtechnik auf Messungen in strömenden Gasen ausgerichtet werden. Im Rahmen des Projektes wurde ein Prüfstand entwickelt, der aus drei Teilen besteht:

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

Zwischen der Roh- und der Reingasmessstrecke wird der jeweilige KSS-Abscheider platziert. Die Anbindung an die Werkzeugmaschine erfolgt über einen flexiblen Spiral-

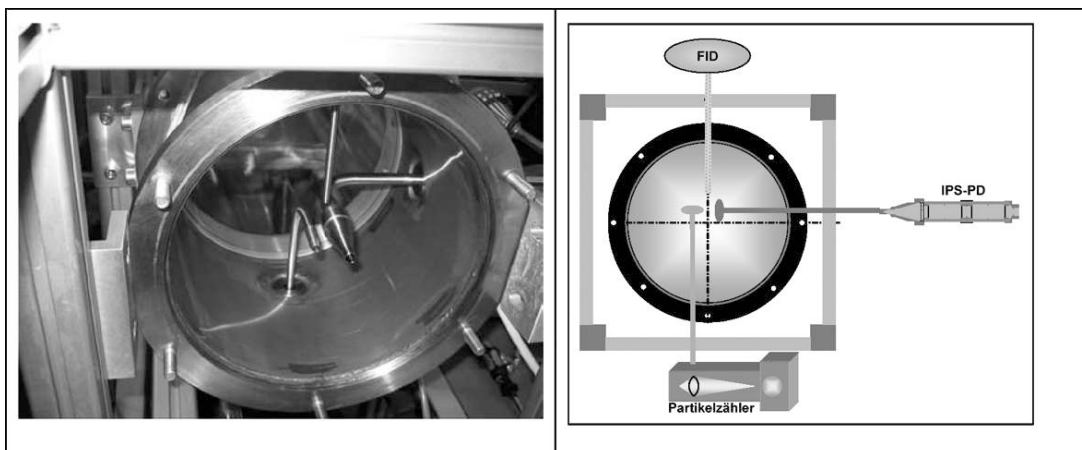


Bild 3. Anordnung der Ansaugöffnungen für den FID, das IPS-PD und den Partikelzähler innerhalb des Messrohrs.

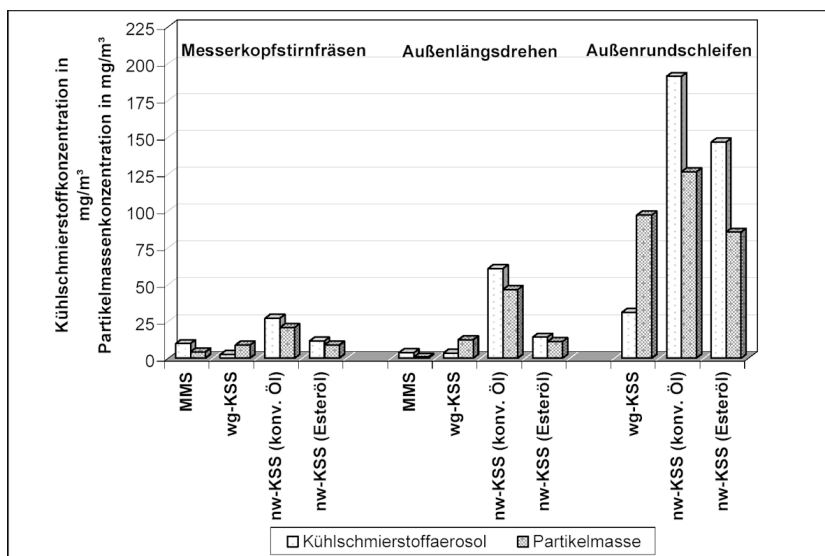


Bild 4. Konzentration an Kühlschmierstoffaerosolen versus Partikelmasse. Abkürzungen siehe Tabelle 1.

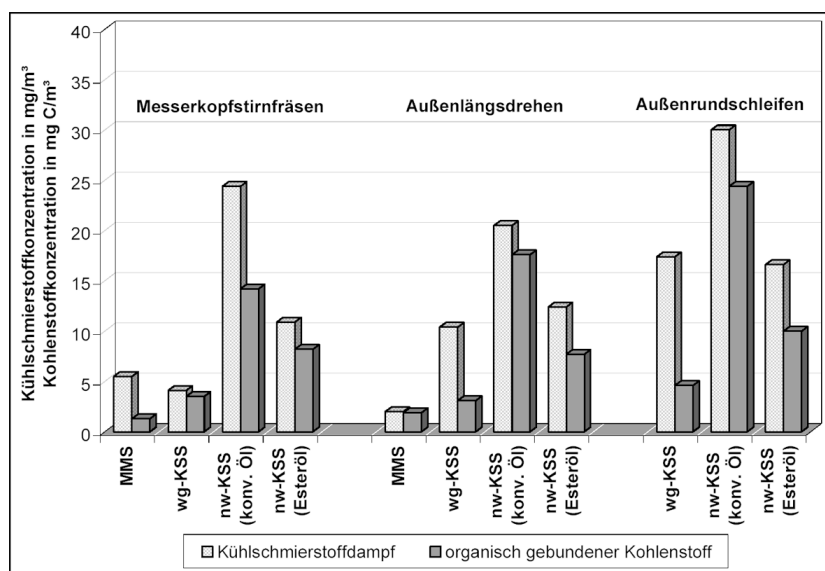


Bild 5. Konzentration an Kühlschmierstoffdampf versus Masse an organischem Kohlenstoff. Abkürzungen siehe Tabelle 1.

schlauch. 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. 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.

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 (Bild 3). Mit Ausnahme des integrierenden Messverfahrens IPS-PD werden alle Messgrößen kontinuierlich erfasst und auf Datenträger gespeichert.

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.

3 Ergebnisse der Untersuchungen

3.1 Gesamtemission bezogen auf die Masse

Untersucht wurden die drei beispielhaften Tätigkeiten Stirnkopffräsen, Außenlängsdrehen und Außenrundscheifen [1]. In Tabelle 1 sind die Messergebnisse für das Rohgas jeweils als Mittelwerte aus den Messungen mit den drei verschiedenen Abscheidern dargestellt. In den Bildern 4 und 5 sind diese Ergebnisse grafisch dargestellt. Bezogen auf die verschiedenen Bearbeitungsverfahren wurden die höchsten Konzentrationen sowohl für die „Aerosolphase“ als

Tabelle 1. Übersicht über die Messergebnisse im Rohgas.

Bearbeitungsverfahren	Kühlschmierstoff ^{*)}	Gesamt in mg/m ³	IPS-PD		FID in mg C/m ³	Partikelmessung	
			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	86100	4,3
	wg KSS	6,6	2,5	4,1	3,5	20167	8,9
	nw KSS (konv. Öl)	51,6	27,1	24,4	14,2	78563	20,8
	nw KSS (Esteröl)	22,6	11,7	10,9	8,2	85052	9,0
Außenlängsdrehen	MMS	5,7	3,7	2,0	1,9	13937	0,7
	wg KSS	13,9	3,5	10,4	3,1	22916	12,6
	nw KSS (konv. Öl)	81,3	60,8	20,5	17,6	103742	46,6
	nw KSS (Esteröl)	26,6	14,3	12,4	7,7	94677	11,3
Außenrundscheifen	wg KSS	48,4	31,1	17,4	4,6	42559	97,1
	nw KSS (konv. Öl)	221,3	191,3	30,0	24,4	280461	126,5
	nw KSS (Esteröl)	163,3	146,7	16,6	10,0	132109	85,6

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

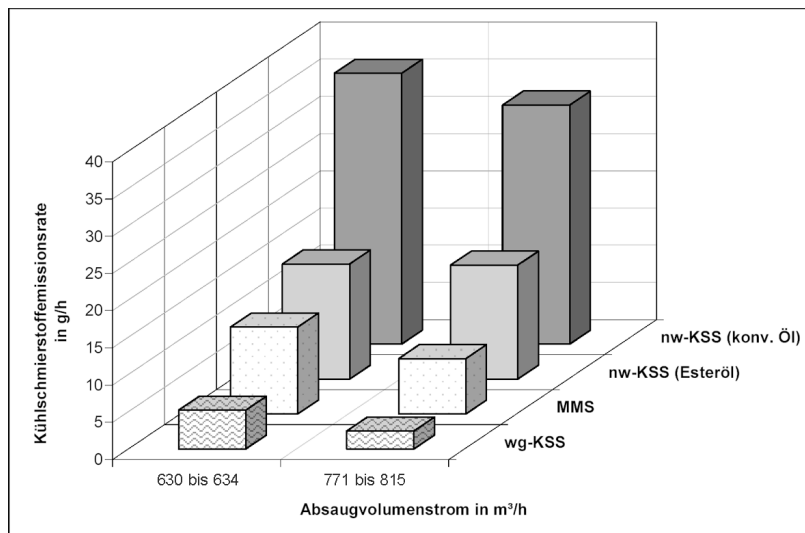


Bild 6. Kühlschmierstoffemissionsrate beim Messerkopffräsen.

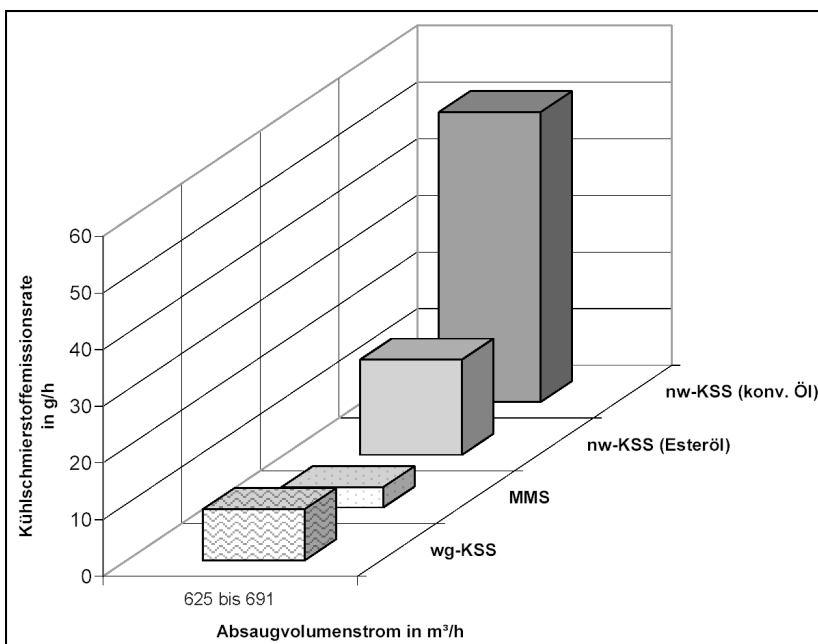


Bild 7. Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenlängsdrehen.

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]).

Beim Vergleich der Bilder 4 und 5 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 (Bild 4). 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 (Bilder 6 bis 8).

Vergleicht man die Emissionsraten beim Messerkopffräsen und beim Außenrundscheifen – 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.

3.2 Partikelverteilung

In den Tabellen 2 und 3 sind die Partikelverteilungen im Rohgas bezogen auf deren Anzahl und bezogen auf die Masse zusammengestellt. Beim Messerkopffräsen und Außenlängsdrehen wurden jeweils die zwei

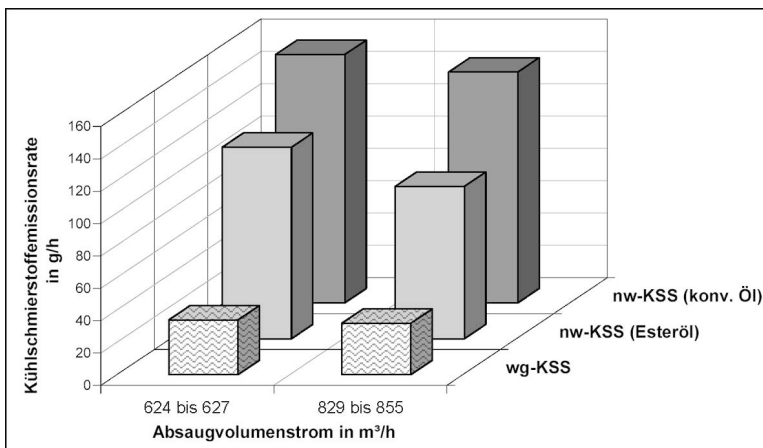


Bild 8. Kühlschmierstoffemissionsrate beim Außenrundschleifen.

Tabelle 2. Partikelverteilung bezogen auf die Partikelanzahl.

Tätigkeit	Kühlschmierstoff ¹⁾	Partikelkonzentration in P/cm ³	Perzentile in µm				
			10	16	50	84	90
Stirnkopffräsen	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
Außenlängsdrehen	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
Außenrundschleifen	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

¹⁾ wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff; MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

Tabelle 3. Partikelverteilung bezogen auf die Masse.

Tätigkeit	Kühlschmierstoff ¹⁾	Partikelkonzentration Masse in mg/m ³	Perzentile in µm				
			10	16	50	84	90
Stirnkopffräsen	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
Außenlängsdrehen	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
Außenrundschleifen	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

¹⁾ wg = wassergemischt; nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff; MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

Bearbeitungsarten „Schruppen“ und „Schlichten“ in einer Messung zusammengefasst [1]. 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 Bild 9 die Gesamtpartikelanzahl über die Zeit aufgetragen. Zwischen dem Schrupp- und Schlichtvorgang schwankt die

Partikelanzahl um einen Faktor von 5 bis 7. Um erkennen zu können, ob auch in der Partikelverteilung eine Veränderung stattfindet, sind von den in Bild 9 hervorgehobenen Messpunkten die Summenhäufigkeitsverteilungen in Bild 10 dargestellt. 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 Partikeln.

Zur Überprüfung der Partikelmessgeräte und um abzuklären, ob im Bereich unterhalb von $0,2 \mu\text{m}$ weitere Partikeln vorhanden sind, wurden beim Außenlängsdrehen zusätzlich Messungen mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) durchgeführt. In **Tabelle 4** sind beispielhaft zwei Ergebnisse gegenübergestellt, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Bearbeitungsparameter nicht gleich sind [1]. Sie zeigen, dass noch eine erhebliche Anzahl an Partikeln unterhalb der Messbereichsgrenze des optischen Partikelzählers von $0,2 \mu\text{m}$ vorhanden sein kann. Bei der konventionellen Bearbeitung liegt allerdings die mit dem SMPS gemessene Massenkonzentration nur bei ca. 10 %. Bei der Minimalmengenschmierung sind die Verhältnisse deutlich anders: Da es sich hierbei nur um erste Einzelergebnisse handelt, ist eine weitere Ermittlung der Verhältnisse notwendig.

In **Bild 11** sind die Partikelverteilungen, die mithilfe der beiden 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.

3.3 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 **Bild 12** 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.

Eine Differenzierung zwischen den Abscheidern ist durch einen Ver-

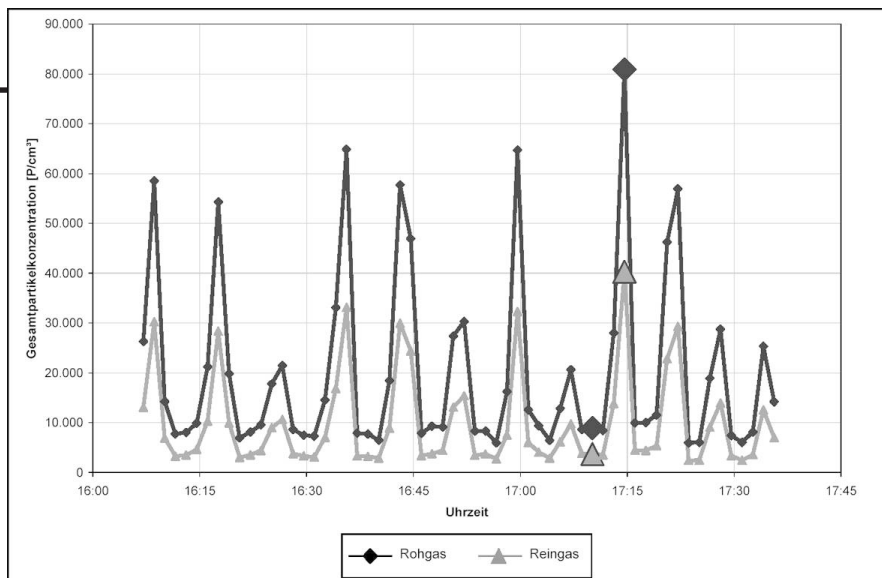


Bild 9. Gesamtpartikelanzahl im Roh- und Reingas beim Außenlängsdrehen.

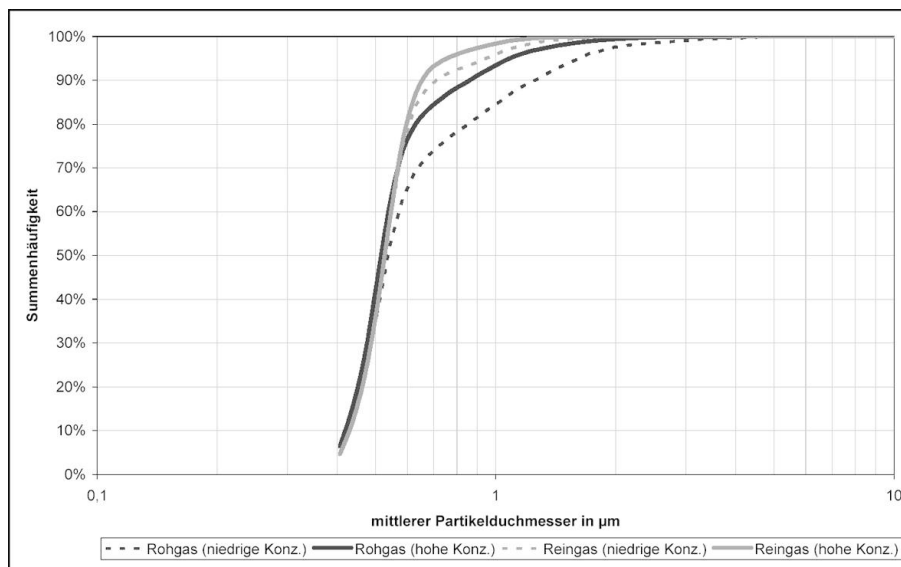


Bild 10. Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitsverteilungen für das Schlichten und Schruppen beim Außenlängsdrehen.

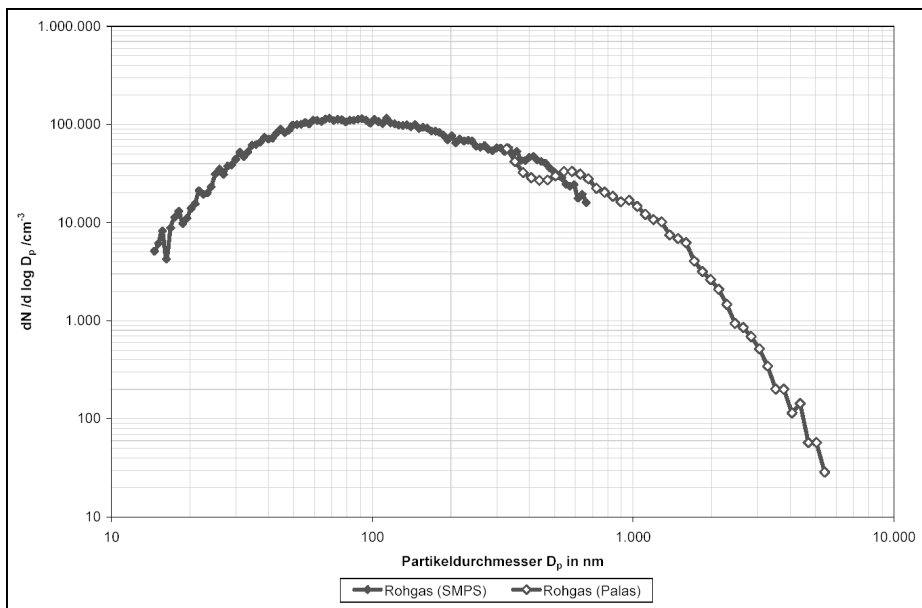


Bild 11. Partikelverteilung beim Außenlängsdrehen unter Einsatz eines nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffes.

Tabelle 4. Gegenüberstellung der Ergebnisse für das Außenlängsdrehen.

		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/m ³	35 042	112 802
	Gesamtmassenkonzentration in mg/m ³	11,46	1,03

nw = nicht wassermischbar; KSS = Kühlschmierstoff; MMS = Minimalmengenschmierung; konv. Öl = konventionelles Öl

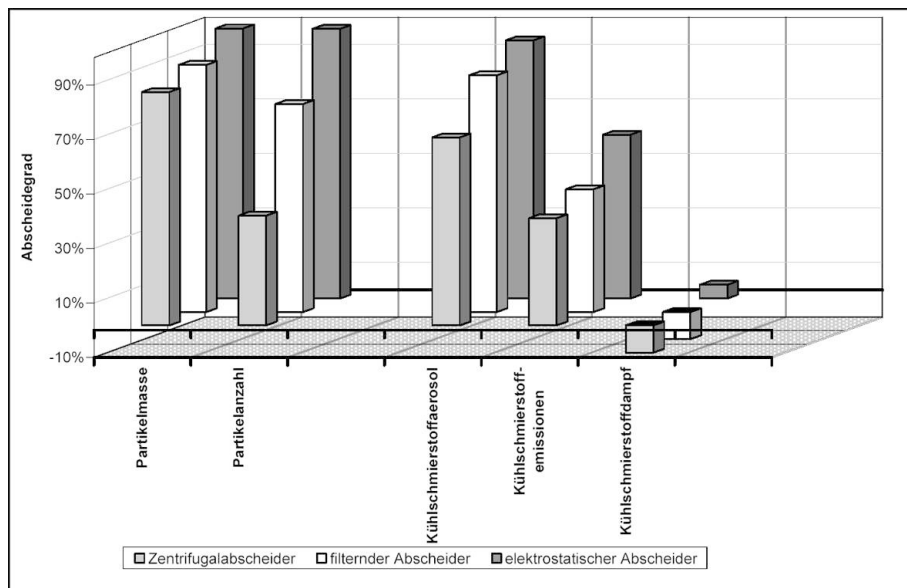


Bild 12. Abscheidegrade in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter.

gleich 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. Dies liegt darin begründet, dass sowohl der Zentrifugalabscheider als auch der filternde Abscheider im Wesentlichen kleine Partikel passieren lassen, während der elektrostatische Abscheider sie unter den vorgegebenen Randbedingungen noch abscheiden kann. Er ist allerdings für einzelne größere Partikel passierbar.

Eine Abscheidung des KSS-Dampfes konnte bei keinem der verwendeten Abscheider nachgewiesen werden. Sowohl der in Bild 12 dokumentierte positive wie negative Abscheidegrad für den KSS-Dampf beruht auf thermodynamischen Effekten in den Abscheidern und Probesystemen. Aufgrund der großen Oberflächen im filternden Abscheider und auch im Zentrifugalabscheider verschiebt sich das KSS-Aerosol-Dampf-Verhältnis in Richtung der höheren Gleichgewichtsdampfkonzentration, so dass rechnerisch die KSS-Dampfkonzentration im Reingas höher ist als im Rohgas. Durch die optimierten Abscheidebedingungen beim Einsatz des elektrostatischen Abscheiders ist eine sehr gute Aerosolabscheidung gegeben, so dass hinter dem Abscheider im Reingas nur noch sehr wenige Aerosole vorhanden sind, die den Messwert der KSS-Dampfkonzentration erhöhen können

und dadurch scheinbar eine KSS-Dampfabscheidung bewirken.

4 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 unterschiedlichen 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.

Literatur

- [1] Klocke, F.; Gerschwiler, K.; Maier, B.: Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Versuchsplanung und Durchführung. In: Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen. Zusammenfassung der Vorträge anlässlich einer Fachveranstaltung am 11. Mai 2006 in Bonn. BGIA-Report. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2006 (in Vorbereitung).
- [2] Nagel, D.; Schaber, K.: Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Charakterisierung von Kühlschmierstoffabscheidern. In: Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen. Zusammenfassung der Vorträge anlässlich einer Fachveranstaltung am 11. Mai 2006 in Bonn. BGIA-Report. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2006 (in Vorbereitung).