

Bestimmung und Beurteilung von Emissionen bei der spanenden Metallbearbeitung mit Minimalmengenschmierung

H. Sefrin, A. Kiechle, G. Walker, W. Zielasko, C. Freiler, F. Thomas, I. Palm, G. Eisenblätter, D. Stäbler, D. Breuer, N. Lichtenstein, K. Quellmalz, M. Rocker, M. Wolf, A. Tigler

1 Einleitung

Der stete Wandel in der Gesetzgebung, die wachsende Anzahl von Haut- und Atemwegserkrankungen sowie der steigende Kostendruck haben dazu geführt, dass sich in der Metallbearbeitung neue Technologien als Alternative zur Überflutungsschmierung (Nassbearbeitung) durchsetzen. In den letzten Jahren kommt die Minimalmengenschmierung (MMS) vermehrt zur Anwendung und hat sich inzwischen in der spanenden Fertigung etabliert.

Im Gegensatz zur konventionellen Überflutungsschmierung bei der Nassbearbeitung zeichnet sich die MMS durch eine deutliche Verbrauchsreduzierung der eingesetzten Schmierstoffe aus. Bei der MMS bewirkt die gezielte Zufuhr des Schmierstoffes unmittelbar an die Wirkstelle die notwendige Schmierung der Reibstellen zwischen Werkzeug, Werkstück und Span. Je nach Zerspanverfahren, zu zerspanendem Material und den gewählten Einstellparametern beträgt die Schmierstoffmenge bei optimal eingestellten Systemen deutlich weniger als 50 ml/Prozessstunde [1]. Gegenüber der Nassbearbeitung erwartet man bei der MMS-Bearbeitung aufgrund der sehr geringen Schmierstoffmenge neben der Einsparung an Kosten für Wartung, Pflege, Lagerung und Entsorgung eine deutliche Verringerung des hautschädigenden Potenziales.

Bislang nicht untersucht blieb die Frage nach den frei werdenden Emissionen am Arbeitsplatz beim Einsatz der Minimalmengenschmierung. Insbesondere die Entstehung von Spalt- und Pyrolyseprodukten bei der Metallbearbeitung ist weitgehend ungeklärt [2]. Bedingt durch die geringe Menge an Schmierstoff werden hohe thermische Belastungen vermutet [3; 4].

2 Projekt Minimalmengenschmierung

Im Rahmen eines gemeinsamen Industrieprojektes unter Leitung der Süddeutschen Metall-Berufsgenossenschaft wurden Informationen und Erkenntnisse zur Beurteilung möglicher Gefährdungen bei der Minimalmengenschmierung erar-

Zusammenfassung In einem Projekt unter Leitung der Süddeutschen Metall-Berufsgenossenschaft in Zusammenarbeit mit Schmierstoffherstellern und Industrieunternehmen sowie mit Unterstützung des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BIA wurden Emissionen bei der Metallbearbeitung unter Einsatz der Minimalmengenschmierung (MMS) untersucht. Insbesondere die Entstehung von Spalt- und Pyrolyseprodukten war von Interesse. Zur Ermittlung eventuell auftretender Gefahrstoffe wurde eine Reihe von Schmierstoffen im Labor getestet. Auf einem Spindelprüfstand wurden die entstehenden Emissionen unter Variation der Schnittparameter sowie der Werkstoffe (Stahl-, Alu- und Gusswerkstoffe) ermittelt. Die Konzentration von Pyrolyseprodukten im Prüfstand konnte bei allen Versuchen als sehr gering eingestuft werden. Formaldehyd lag im Arbeitsraum an der Entstehungsstelle lediglich in Spuren vor. Insgesamt zeigte sich, dass zur emissionsarmen Metallbearbeitung mit MMS die richtige Auswahl des Schmierstoffes von entscheidender Bedeutung ist. Synthetische Esteröle und Fettalkohole mit hoher Viskosität, geringer Verdampfung, hohem Flammpunkt sowie toxikologischer Unbedenklichkeit haben sich in der Praxis besonders bewährt.

Determining and evaluating the emissions from metal cutting and machining with minimal quantity lubrication

Abstract The emissions resulting from processing metals with the use of minimal quantity lubrication were studied in a joint project of the institution for statutory accident insurance and prevention in the metal-working industry in southern Germany (SMBG, Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft), lubricant producers, industrial firms, and with support from the BG institute for occupational safety and health – BIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz). The creation of both cleavage and pyrolysis products was of particular interest. A series of lubricants was tested in the laboratory to determine whether any hazardous substances were emitted. The emissions produced were determined at a spindle lathe test bench while varying the cutting parameters and the processed materials (steel, aluminium, and cast metals). The concentration of the pyrolysis products was found to be very minimal in all tests. Formaldehyde at the source in the work area was only present in trace amounts. In general, it was found that when processing metals with minimal quantity lubrication, the correct selection of lubricants is decisive. Synthetic ester oils and fatty alcohols with a high viscosity, low evaporation rate, high flash point, and toxicological safety have proven themselves in practise over time.

Dipl.-Ing. Harald Sefrin, Dipl.-Chem. Michael Rocker, Dipl.-Ing. Michael Wolf, Dipl.-Ing. Adolf Tigler,

Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft, Mainz.

Dr. rer. nat. Dietmar Breuer, Dr. rer. nat. Norbert Lichtenstein, Klaus Quellmalz, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin.

Dipl.-Ing. Arno Kiechle, Gerrit Walker, Dr. Waldemar Zielasko, DaimlerChrysler, Stuttgart.

Dipl.-Ing. Carmen Freiler, Dipl.-Ing. Frank Thomas, Fuchs Europe Schmierstoffe, Mannheim.

Dr. Gerrit Eisenblätter, Dipl.-Ing. Ingo Palm, Heidelberger Druckmaschinen, Wiesloch.

Dipl.-Ing. Dierk Stäbler,

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfingsttal.

beitet. In Zusammenarbeit mit der Fa. Fuchs (Schmierstoffhersteller), dem Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) sowie den Anwenderfirmen Heidelberger Druckmaschinen und DaimlerChrysler wurden die Emissionen bei der Metallbearbeitung mit Minimalmengenschmierung untersucht [5]. Die zu untersuchenden Proben wurden im Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BIA analysiert.

In einer ersten Projektphase galt es, anhand von Grundlagenuntersuchungen die Neigung der Schmierstoffe zur

Tabelle 1 | Eigenschaften der Basisester.

Ester-Nr.	Viskosität bei 40 °C in mm ² /s	Flammpunkt in °C	Verdampfungsverlust (Noack) (250 °C; 1 h)
8	8,3	206	27,8
17	17	176	9,7
19	19	> 245	3,2
32	32	> 275	1,3
48	48,5	> 300	1
65	64,9	300	1
88	88	> 265	1
100	138	> 300	0,8

Tabelle 2 | Eigenschaften der Fertigprodukte.

Fertigprodukt Nr.	Viskosität bei 40 °C in mm ² /s	Flammpunkt in °C	Zusammensetzung – Bezeichnung aus Sicherheitsdatenblatt übernommen
1	2,3	112	Hochraffinierte Mineralöle mit Additiven
2	10,4	174	Zubereitung auf Basis von biologisch gut abbaubaren Esterkomponenten mit abgestimmten Additiven
3	12	220	Gemischte Glyceride von pflanzlichen Fettsäuren
4	20	150	Polare Verbindungen, Fettalkohole
5	20	> 190	Nichtwassermischbarer Kühlschmierstoff, Gemisch aus Pflanzenölen und Fettsäureestern
6	23	> 175	Kohlenwasserstoffsyntheseöhlhaltige Zubereitung mit derivatisierten Fettstoffen und produktspezifischen Wirkstoffen
7	27	180	Polare Verbindungen, Fettalkohole
8	27	180	Polare Verbindungen, Fettalkohole
9	30	> 275	Grundöl mineralölfrei mit Additiven
10	31	185	Zubereitung auf Basis von biologisch gut abbaubaren Esterkomponenten mit abgestimmten Additiven
11	32	190	Fettsäureester, wirkstoffhaltig
12	39	> 200	Zubereitung auf Basis pflanzlicher Öle
13	40	> 200	Zubereitung auf Basis von biologisch gut abbaubaren Esterkomponenten mit abgestimmten Additiven
14	47	265	Modifizierte Fettstoffe
15	50	165	Kohlenwasserstoffsyntheseöhlhaltige Zubereitung mit derivatisierten Fettstoffen sowie schwefelhaltigen Wirkstoffen
16	100	214	Zubereitung auf Basis pflanzlicher Öle

Bildung von Spalt- und Pyrolyseprodukten im Labor zu erforschen. Hierzu wurden die Schmierstoffe in synthetischer Luft pyrolysiert und die gebildeten flüchtigen Komponenten mittels Gaschromatografie bzw. Massenspektroskopie analysiert [6].

Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollten in einer zweiten Projektphase praxisnahe Zerspanversuche unter Einsatz der Minimalmengenschmierung mit innerer Zufuhr an einem Prüfstand des Fraunhofer ICT durchgeführt werden. Unter Variation der Schnittparameter sowie der Werkstoffe (Stahl, Aluminium und Guss) wurde das Emissionsverhalten verschiedener Schmierstoffe unter reproduzierbaren Bedingungen ermittelt. Die Emissionen konnten während der Zerspanung im Innern

der Prüfstandumhausung unmittelbar am Entstehungsort bestimmt werden.

2.1 Auswahl der Schmierstoffe

Die Auswahl der zu untersuchenden Schmierstoffe erfolgte im Hinblick auf die Entstehung möglicher Crackprodukte während des Zerspanprozesses. Es wurden zwei Schmierstoffgruppen getestet, um den Einfluss verschiedener Grundöleigenschaften und Additivierungen zu untersuchen und um die Ergebnisse auf praktische Anwendungen übertragen zu können.

Die erste Gruppe bildeten reine Ester (Basisester) ohne Zusatz von Additiven. Die Gruppe der Ester wurde ausgewählt, da diese Stoffe in modifiziertem Zustand häufig für die Minimalmengenschmierung eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch sehr gute Schmiereigenschaften, einen hohen Flammpunkt und eine geringe Verdampfungsneigung aus und gelten

als dermatologisch unbedenklich. Zur Charakterisierung des Viskositätseinflusses wurden Esteröle unterschiedlicher Molekül-Kettenlänge und damit unterschiedlicher Viskosität eingesetzt. **Tabelle 1** zeigt die wichtigsten Eigenschaften der eingesetzten Ester-Grundöle.

Die zweite Gruppe umfasst verschiedene marktgängige Schmierstoff-Fertigprodukte, welche bereits in der Praxis im Einsatz sind (**Tabelle 2**). Die Fertigprodukte bestehen aus verschiedenen Basisfluiden, versetzt mit anwendungsspezifischen Additiven.

In der Praxis bestimmen im Wesentlichen die technologischen Anforderungen des Zerspanprozesses die erforderlichen Fluideigenschaften und letztlich auch die notwendige Schmierstoffmenge am Zerspanort.

2.2 Pyrolyse der Schmierstoffe – Laboruntersuchungen

Im Labor des BIA erfolgte die Bestimmung der Pyrolyseneigung der Schmierstoffproben, um die bei thermischer Belastung auftretenden Gefahrstoffe zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden die

Schmierstoffe für die Minimalmengenschmierung in synthetischer Luft auf 400 °C bzw. auf 800 °C erhitzt, dabei pyrolysiert und die flüchtigen Komponenten mittels Gaschromatografie getrennt und massenspektroskopisch analysiert [6].

Bei einer Pyrolysetemperatur von 400 °C wurden qualitativ Spuren von gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen, Aldehyden und Ketonen, gesättigten und ungesättigten Estern (C₁₆ bis C₂₅) sowie höheren Alkoholen (> C₁₅) nachgewiesen. Bei 800 °C wurden qualitativ die gleichen Inhaltsstoffe wie bei 400 °C nachgewiesen. Allerdings konnte eine Zunahme der leicht flüchtigen Crackprodukte bei höheren Temperaturen festgestellt werden.

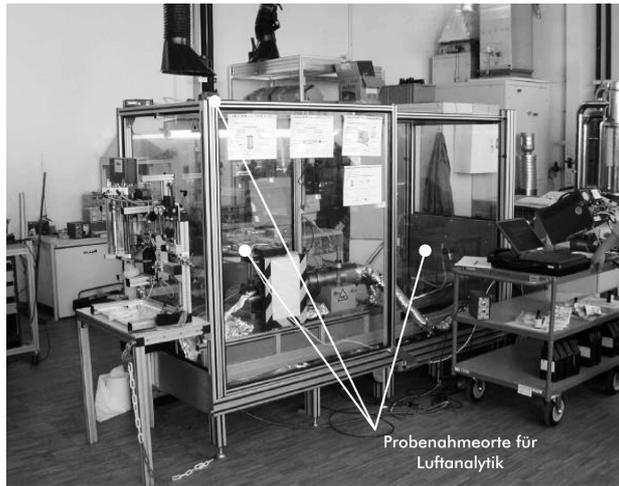
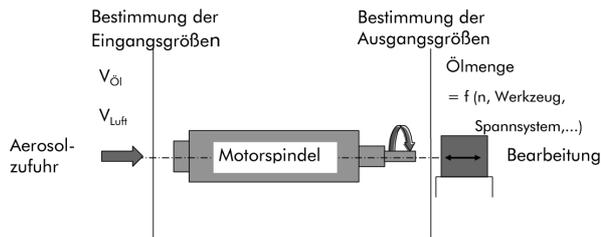


Bild 2 Probenahmeorte am Spindelprüfstand für Ölaerosol- und Öldampf, Pyrolyseprodukte und Staub.

Bild 1 Spindelprüfstand mit HSC-Motorspindel für die innere Aerosolzufuhr.

Weiterhin wurden bei einzelnen Schmierstoff-Fertigprodukten in Abhängigkeit von der Zusammensetzung die Stoffe H_2S , SO_2 , CO_2 , Propen, Buten, Isobutanol, Aromaten (Benzol, Toluol) und Kresole in Spuren nachgewiesen. Da die Analyse lediglich qualitativ durchgeführt wurde, konnten keine exakten Aussagen bezüglich der Mengenverhältnisse der nachgewiesenen Stoffe gemacht werden.

Inwieweit die Randbedingungen der Pyrolyse am Arbeitsplatz mit dieser Analysetechnik im Labor nachgestellt werden können, ist sehr schwer festzustellen. Während Bedingungen wie Temperatur, Pyrolysedauer usw. im Labor exakt eingestellt werden können, sind die Parameter am Arbeitsplatz meistens wesentlich komplexer und nur sehr schwer zu ermitteln. Somit haben die Laborergebnisse in der Regel nur orientierenden Charakter und dienen lediglich als Hinweis für gezielte Gefahrstoffmessungen am Arbeitsplatz. Die Ergebnisse wurden als Orientierung zur Auswahl geeigneter Probenahmesysteme für die nachfolgenden Zerspanversuche herangezogen.

3 Untersuchungen am Spindelprüfstand

Zur Bewertung der Emissionsneigung von Schmierstoffen für den Einsatz der Minimalmengenschmierung mit innerer Aerosolzufuhr wurde am Fraunhofer ICT ein spezieller Prüfstand errichtet. Dieser Spindelprüfstand ist mit einer HSK E-63 Werkzeugaufnahme ausgestattet (**Bild 1**) und ermöglicht Untersuchungen bis zu Drehzahlen von 30 000 U/min. Der Prüfstand beinhaltet weiterhin eine High-Speed-Cutting (HSC)-Motorspindel mit internem Aerosolkanal, einem einachsigen Verfahrtschicht zur Durchführung von Zerspanversuchen und einer Kraftmessplattform zur Erfassung der Schnittkräfte. Es können Messungen der Schmierstoffmenge durchgeführt werden, die unmittelbar am Werkzeughalter

bzw. an der Werkzeugschneide für die Schmierung des Zerspanprozesses zur Verfügung steht (**Bild 2**).

Zur besseren Erfassung der Luft für analytische Zwecke ist der Prüfstand gekapselt. Um mehrere Bearbeitungsgänge in Folge zu ermöglichen, kann das Werkstück mittels einer Vorschubeinheit bewegt werden. Mithilfe dieses Aufbaus konnten bis zu 20 Bohrungen in einer Serie ohne Öffnen der Umhausung gefertigt werden.

Für die Zerspanversuche wurde das Verfahren Bohren ausgewählt, da hier höchste Ansprüche an die Minimalmengenschmierung gestellt werden. Eingesetzt wurden spezielle MMS-Spiralbohrer mit zwei inneren Kühlkanälen (**Bild 3**). Die Kühlkanal-Querschnittsflächen sind bei beiden Spiralbohrern identisch, die Kühlkanal-Austrittsflächen sind durch entsprechenden Anschliff der Freifläche in den Spanraum erweitert.

Zur Bestimmung der Öldampf- und Ölaerosolkonzentration in der Luft des Prüfstand-Innenraumes wurde ein kombinierter Probenhalter vom Typ GGP (Gesamtstaub-Gas-Probenahmesystem) zur Sammlung der Aerosolphase mittels eines

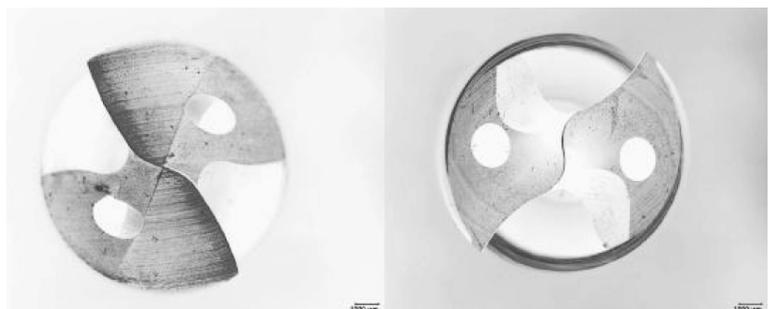


Bild 3 Eingesetzte Spiralbohrer für die Trockenbearbeitung in Stirnansicht.



Bild 4 Bestimmung der Emissionen an der Entstehungsstelle beim Bohren.

Glasfaserfilters sowie der Öldampfphase mittels eines XAD-2-Adsorberharzes eingesetzt [7] (**Bild 4**). Während der Probenahme wurde ein definierter Luftvolumenstrom von 3,5 l/min durch diese Filteranordnung gesaugt. Die analytische Bestimmung erfolgte infrarotspektrometrisch [8]. Eine Kalibrierung wurde jeweils mit dem eingesetzten Schmierstoff durchgeführt [9].

Die verwendeten Pumpen für die Probenahme entsprechen den Anforderungen an Pumpen für die Probenahme von Gefahrstoffen an Arbeitsplätzen nach [10]. Für die Erfassung weiterer Gefahrstoffe (Aldehyde und Ketone, Benzo[a]pyren, A-Staub, E-Staub etc.) wurden ebenfalls Systeme gemäß der BIA-Arbeitsmappe [11] eingesetzt.

Weiterhin wurden zur Beurteilung der Bildungstendenz von Aerosolen zwei direkt anzeigende Messgeräte (Streulichtphotometer TM Data und Respicon TM 3 F [12]) eingesetzt. Dadurch war es möglich, sowohl die Partikelzusammensetzung des Schmierstoffaerosols als auch den zeitlichen Verlauf der Partikelkonzentration im Prüfstand während der Zerspanversuche zu bestimmen.

4 Versuchsprogramm

Zur Bestimmung der Emissionsneigung der Schmierstoffe unter praxisnahen Bedingungen wurden unter Einsatz der Minimalmengenschmierung Zerspanversuche am Spindelprüfstand durchgeführt. Damit war es möglich, anhand der Variation der Schnittparameter sowie der Werkstoffe das Emissionsverhalten verschiedener Schmierstoffe unter reproduzierbaren Bedingungen zu erfassen und zu vergleichen.

Zur Durchführung der Zerspanversuche wurde der Vergütungsstahl Ck45k als Werkstoff gewählt. Ergänzende Versuche wurden auf Wunsch der beteiligten Firmen mit einer Aluminiumguss-

Tabelle 3 Ausgewählte Vorschubgeschwindigkeiten.

Schmierstoff	Vorschubgeschwindigkeit V_f in mm/min		Werkstoffmaterialien
	Extrembedingung	Übliche Bedingung	
Esteröle	200	800	Ck 45k (GG 20, GGG 40, AlSi9Cu3)
Fertigprodukte	200	1000	

legierung AlSi9Cu3 sowie mit den Gusseisen GG 20 und GGG 40 bei Einsatz der Schmierstoff-Fertigprodukte durchgeführt.

Die Bearbeitungsbedingungen der Zerspanversuche unter Normalbedingungen und Extrembedingungen sind in (**Tabelle 3**) dargestellt.

Die Schnittparameter zur Durchführung der Bohrversuche mit einer Schnittgeschwindigkeit von $V_c = 148$ m/min, einer Spindeldrehzahl von $n = 4\ 000$ min⁻¹ und hohen Vorschubgeschwindigkeiten von $V_f = 800$ und 1 000 mm/min entsprechen Einstellwerten aus der Praxis.

Ergänzende Versuche mit der geringsten Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 200$ mm/min erfolgten, um ungünstige Zerspanbedingungen (Fehlbedienung, Störung) zu simulieren. Durch die konstante Schnittgeschwindigkeit V_c bei minimaler Vorschubgeschwindigkeit V_f ist eine hohe Temperaturentwicklung und damit hohe thermische und mechanische Belastung des Schmierstoffes im Prozess zu erwarten.

4.1 Emissionen beim Bohren unter Normalbedingungen

Nachfolgend sind die über einen Zeitraum von 15 min gemessenen Ölaerosol- und Öldampfemissionen unmittelbar am Zerspanort sowie an der Druckausgleichsöffnung des Prüfstandes für die Esteröle unter praxisnahen Bedingungen (Vorschubgeschwindigkeit $V_f = 800$ mm/min) aufgeführt (**Bild 5**). Die niedrig viskosen Ester mit einer Viskosität $\eta < 32$ mm²/s

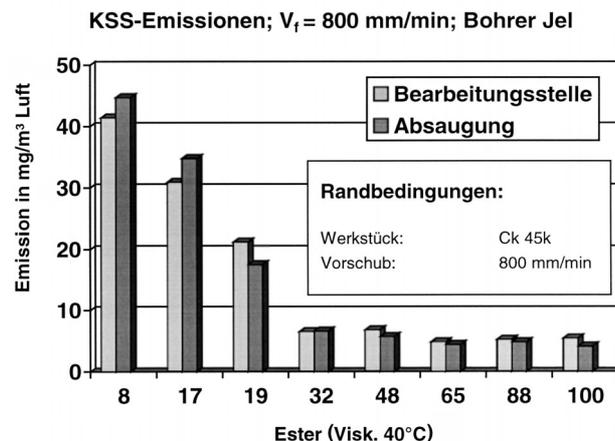


Bild 5 Ölaerosol- und Öldampfemissionen am Zerspanort sowie an der Druckausgleichsöffnung des Prüfstandes für die Gruppe der Basisester.

zeigen deutlich höhere Kühlschmierstoff-Emissionswerte als die höherviskosen Flüssigkeiten. Während der Zerspanversuche wurde insbesondere bei den dünnflüssigen, niedrigviskosen Schmierstoffen (< 10 mm²/s bei 40 °C) eine starke Rauch- und Nebelbildung festgestellt. Die höherviskosen Ester mit einer Viskosität $\eta > 20$ mm²/s bei 40 °C hingegen zeigen deutlich geringere Emissionswerte.

Die Quantifizierung der Partikelkonzentration erfolgte mithilfe eines Tyndallometers. Die niedrigviskosen Fluide zeigen generell eine höhere Partikelkonzentration und einen schnelleren Anstieg im Vergleich zu höherviskosen Stoffen.

Ab einer Viskosität von 32 mm²/s ist auch hier nur eine minimale Partikelkonzentration zu verzeichnen. Die Konzentration steigt während der Bearbeitungszeit an, während sie in der folgenden Probenahmezeit nur langsam zurückgeht. Aufgrund der geringen Teilchengröße ist die Verweildauer in der ruhenden Luft im Arbeitsraum groß und daher nur eine geringe Abscheidung infolge Sedimentation zu beobachten.

4.2 Zerspanversuche unter extremen Randbedingungen

Eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit beim Bohren wurde vorgenommen, um den Einfluss ungünstiger Schnittbedingungen mit hohen mechanischen und thermischen Belastungen an der Schneide auf das Emissionsverhalten der Schmierstoffe zu untersuchen.

Wird in der praktischen Anwendung eine falsche Einstellung der Zerspanparameter gewählt oder treten unvorhergesehene Umgebungseinflüsse auf, so ist durchaus mit hohen Emissionen zu rechnen.

Der Einfluss der Zerspanparameter auf das Emissionsverhalten der Esteröle ist in **Bild 6** für die Gruppe der Basisester exemplarisch für zwei Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde hierzu von $V_f = 800$ mm/min (Standard) auf $V_f = 200$ mm/min (extrem, ungünstig) bei gleich bleibender Schnittgeschwindigkeit reduziert.

Die Bearbeitung mit sehr ungünstigen Zerspanparametern lassen die Öldampf- und Ölaerosolemissionen sprunghaft ansteigen. Ursache hierfür ist die hohe Verweilzeit des Bohrers bei niedriger Vorschubgeschwindigkeit, verbunden mit erhöhter thermischer Belastung des Schmierstoffes.

Für niedrigviskose Fluide ist eine Erhöhung der Emissionswerte von Ölaerosol und Öldampf bei ungünstiger Bearbeitung, teilweise um den Faktor 10 gegenüber realen Schnittbedingungen, festzustellen. Auch hier ist die Höhe der Emissionswerte eindeutig von der Fluidviskosität abhängig und sinkt mit steigender Viskosität.

Es zeigt sich, dass die hochviskosen Schmierstoffe ($\eta > 50$ mm²/s bei 40 °C) aufgrund ihrer günstigeren Temperaturstabilität solche Störungen besser kompensieren können. Die gemessenen Aerosol- und Dampfemission in der Prüfstandsumhausung können direkt mit der Vorschubgeschwindigkeit in Relation gebracht werden.

4.3 Vergleich des Emissionsverhaltens von Esterölen und Mineralölen

Vergleichende Untersuchungen des Emissionsverhaltens von Mineralölprodukten zu esterbasierenden Minimalmengenschmierstoffen wurden im Rahmen des Projektes ergänzend durchgeführt. Dazu wurden Zerspanversuche bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 1\,000$ mm/min vorgenommen. Hierbei zeigte sich das in **Bild 7** dargestellte Emissionsverhalten im Vergleich zu den niedrigviskosen Esterölen Ester 8 und Ester 17. Aufgetragen ist jeweils die Höhe der Gesamtemission sowie bei den Mineralölprodukten der Anteil der Dampfemission.

Die untersuchten mineralölbasierenden Schmierstoffe führen zu höheren Emissionswerten als Esteröle vergleichbarer

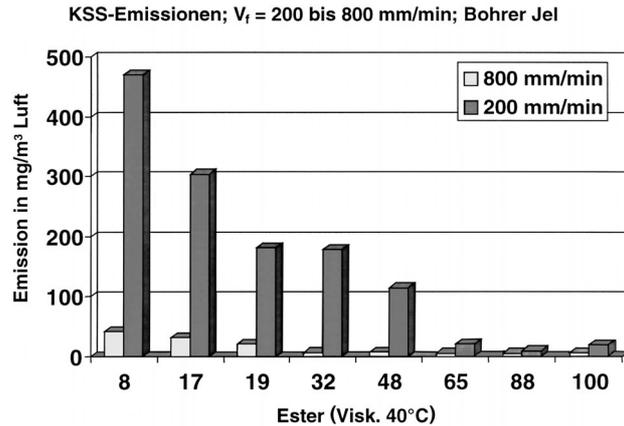


Bild 6 Emissionswerte von Ölaerosol und Öldampf bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit während der Bearbeitung für die Gruppe der Basisester.

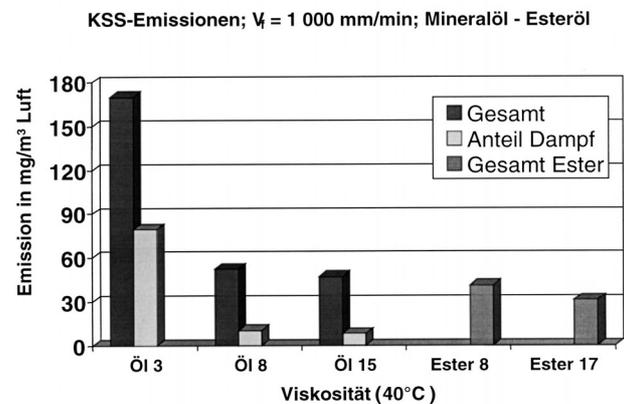


Bild 7 Vergleich der Emissionen von Ester- und Mineralölprodukten.

Viskosität. Die Dampfanteile der Emission sind beträchtlich, insbesondere das sehr niedrigviskose Öl 3 zeigt sehr hohe Emissionen, verbunden mit einem sehr hohen Dampfanteil. Bei den Esterölen hingegen konnte keine Dampfemission im Vergleich zur Gesamtemission ermittelt werden.

4.4 Einfluss der Bearbeitungsparameter auf das Emissionsverhalten

Wie entscheidend die Auswahl der geeigneten Schmierstoffe und der optimalen Bearbeitungsparameter für eine emissionsarme MMS-Bearbeitung sind, wird anhand folgender Versuche ersichtlich. Ein Schmierstoff wurde bei Zerspanversuchen jeweils mit drei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten V_f von 200, 800 und 1 000 mm/min eingesetzt. Die gemessenen Emissionswerte von Öldampf und -aerosol sowie die jeweils erzeugten Spanformen beim Bohren des Werkstoffes Ck 45k sind in **Bild 8** dargestellt.

Eine Variation der Zerspanparameter durch Änderung der Vorschubgeschwindigkeit zeigte deutlichen Einfluss auf die Höhe der Öldampf- und Ölaerosolemission. Hohe Vorschubgeschwindigkeiten wirkten sich positiv aus. Optimale Arbeitsbedingungen durch kurze Bröckelspäne, hohe Schnittleistung und lange Werkzeugstandzeit bewirkten gleichzeitig die geringsten Emissionen. Ungünstige Schnittbedingungen

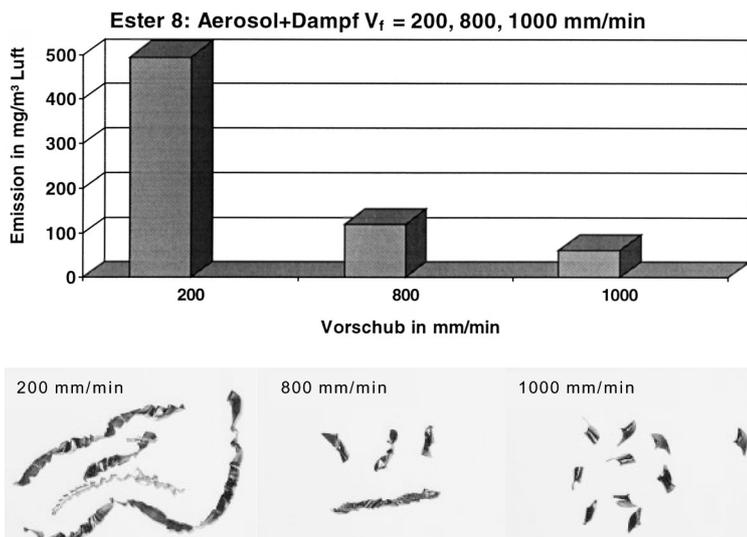


Bild 8 Emissionen bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit, Ester 8 mit entstehender Spanform.

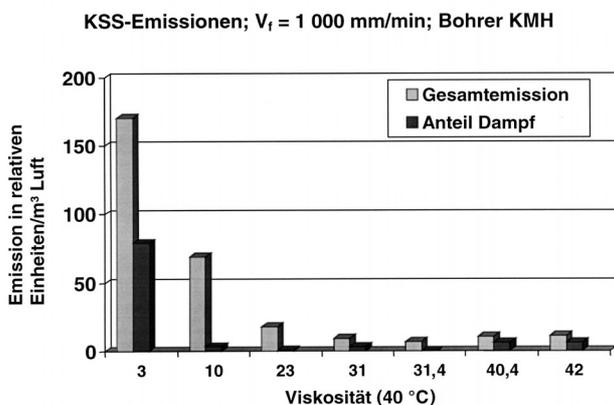


Bild 9 KSS-Emissionen Fertigprodukte; Vorschub: 1 000 mm/min.

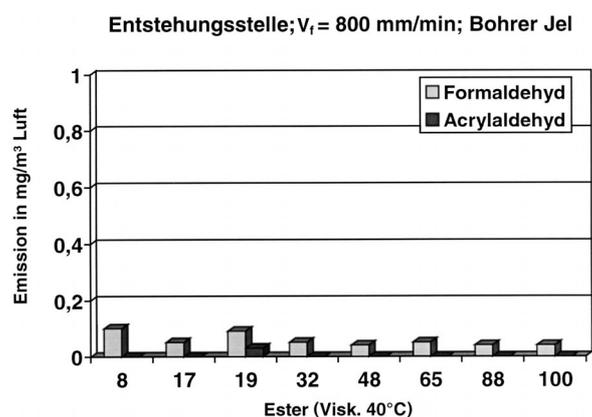


Bild 10 Pyrolyseprodukte bei der Zerspanung mit Fertigprodukten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 800$ mm/min.

hingegen (durch Versuche mit extrem reduziertem Vorschub) führten zu hohen Emissionen bei gleichzeitig ungünstigen Bearbeitungsbedingungen (hier durch lange Späne und hohen Werkzeugverschleiß).

4.5 Emissionsverhalten der Fertigprodukte

Mit den Schmierstoffen der zweiten Gruppe, den Fertigprodukten wurden ebenfalls Versuche im Spindelprüfstand beim Bohren durchgeführt. Die Fertigprodukte bestehen aus verschiedenen Basisfluiden, versetzt mit anwendungsspezifischen Additiven. Die verschiedenen Inhaltsstoffe und Additive führen zur Reibungsminderung und beeinflussen ebenfalls die Emission. Wie bei den reinen Esterölen erfolgte die Messung unmittelbar an der Entstehungsstelle im Innern der Werkzeugmaschine.

Die ermittelten Emissionen bewegten sich ähnlich wie bei den Esterölen im Bereich zwischen 10 mg/m^3 und 30 mg/m^3 . Eine Zuordnung der Höhe der Emissionswerte zur Viskosität des Schmierstoffes ist nur schwer möglich. Die Maximalwerte der Emission im Arbeitsraum von ca. 40 mg/m^3 liegen in der Größenordnung der Emissionen bei Einsatz des Esters 8, welcher die höchsten Emissionswerten aus der Gruppe der Basisester zeigte. Diese Emissionswerte an der Entstehungsstelle können als gering angesehen werden und sind positiv zu bewerten.

In jüngster Zeit ist zunehmend eine Tendenz festzustellen, sehr dünn flüssige Medien mit niedrigem Flammpunkt ($< 100 \text{ °C}$) einzusetzen, die nach der Bearbeitung möglichst rückstandsfrei verdampfen sollen. Um die Auswirkungen dieser Schmierstoffauswahl auf das Emissionsverhalten zu klären, wurde die Dampfentstehung als Teil der Emission gesondert betrachtet und ein Schmierstoff-Fertigprodukt mit sehr geringer Viskosität ($3 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40 °C) in die Versuche einbezogen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in **Bild 9** dargestellt.

Die Emissionen bei dem niedrigviskosen Öl übersteigen die Werte der herkömmlichen Produkte um ein Vielfaches. Hier wird deutlich, wie negativ sich niedrigviskose Produkte aufgrund ihrer sehr hohen Emissionen insbesondere wegen der hohen Dampfanteile auf die Gesamtsituation am Arbeitsplatz auswirken können. Höherviskose Produkte sollten daher bevorzugt eingesetzt werden.

4.6 Spalt- und Pyrolyseprodukte beim Bohren

Die Analyse der Spalt- und Pyrolyseprodukte des Zerspanprozesses erfolgte unter Zugrundelegen der Pyrolyseversuche an den Schmierstoffen im Labor. Die Probenahme erfolgte in unmittelbarer Nähe der Entstehungsstelle im Innenraum des Prüfstandes. Die Auswertung der Probenträger für die Gruppe der Esteröle bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 800 \text{ mm/min}$ ist in **Bild 10** dargestellt.

Formaldehyd sowie Acrylaldehyd (bei Ester 19) konnten während der Zerspanversuche in sehr geringer Konzentration nachgewiesen werden. Die Konzentrationen liegen jedoch selbst im Arbeitsraum in einer Größenordnung von max. $0,1 \text{ mg/m}^3$ und sind somit als unkritisch zu betrachten. Es zeigt sich, dass unter praxisrelevanten Schnittbedingungen nur geringste Konzentrationen an Pyrolyseprodukten festgestellt werden konnten.

Anhand ausgewählter Versuche wurden auch Emissionen bei starker thermischer Belastung des Schmierstoffes ermittelt. Dieser Zustand verbunden mit sehr hoher thermischer Belastung sollte einen Worst-case (Fehlbedienung, Störung) simulieren, welcher in der Praxis nur kurzzeitig auftritt.

Dabei treten höhere Konzentrationen von Pyrolyseprodukten auf, was auf eine höhere thermische Belastung des Schmierstoffes schließen lässt. Auch hier zeigten die hochvis-

Tabelle 4 Bohrversuche mit Gusswerkstoffen an einer Werkzeugmaschine mit Minimalmengenschmierung (Schn. = Anzahl der Bohrschnitten; mKK/oKK = Werkzeuge mit/ohne Kühlkanal).

Versuch Nr.	Werkstoff	Werkzeug	Drehzahl in U/min	Vorschub in mm/min	Bohrtiefe in mm	V _{öl}	Bearbeitungszeit	Bohrungsanzahl	Staudruck in bar
1	GG 20	Bohrer 3-Schn.; 19,8 mm oKK	3 230	250	35	–	5,52 min	20	–
2	GG 20	Reibahle 20H7	2 390	470	30	100 %	2,25 min	20	–
3	GG 20	Bohrer 3-Schn.; 11,7 mm oKK	4 900	350	35	–	3,20 min	30	–
4	GG 20	Reibahle 12K7	2 700	600	30	100 %	2,30 min	30	2,0
5	GG 20	Bohrer 3-Schn.; 11,7 mm oKK	4 900	350	Durchgang	–	7,03 min	30	–
6	GG 20	Reibahle 12K7	2 700	600	Durchgang	100 %	3,44 min	30	2,0
7	GGG 40	Bohrer 2-Schn.; 19,8 mm mKK	3 230	250	35	100 %	6,02 min	30	2,0
8	GGG 40	Reibahle 20H7	2 390	470	30	100 %	3,00 min	30	–
9	GGG 40	Bohrer 2-Schn.; 11,7 mm mKK	4 900	353	35	80 %	4,13 min	30	2,8
10	GGG 40	Reibahle 12K7	2 700	600	30	100 %	2,24 min	30	2,0

kosen Medien eine deutlich geringere Neigung zur Pyrolyse als dünnflüssige Schmierstoffe mit niedriger Viskosität. Die gemessenen Konzentrationen liegen jedoch selbst im Arbeitsinnenraum in einer Größenordnung von max. 1 mg/m³ und sind somit als unkritisch zu betrachten. Als mögliche Leitkomponente für Messungen am Zerspanort zeigte sich Formaldehyd als geeignet.

Messungen während der Zerspanung mit Fertigprodukten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 1\ 000$ mm/min zeigten im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den Basisestern keinerlei Pyrolyseprodukte. Auch die Entstehung von Formaldehyd konnte bei diesen Versuchen nicht nachgewiesen werden.

Bei Einstellung sehr ungünstiger Zerspanparameter mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 200$ mm/min wurden mit ausgewählten Schmierstoff-Fertigprodukten ergänzende Zerspanversuche durchgeführt. Die Konzentration der gemessenen Pyrolyseprodukte unter diesen extremen Bedingungen war jedoch ebenfalls gering.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei allen getesteten Schmierstoffen auch unter extremen Bedingungen bei starker thermischer Belastung im Prüfstand selbst an der Entstehungsstelle äußerst niedrige Konzentrationen von Pyrolyseprodukten gemessen wurden. Die Bildungstendenz von Pyrolyseprodukten bei der Minimalmengenschmierung kann daher als sehr gering eingestuft werden.

5 Emissionen beim Bohren und Reiben von Gusswerkstoffen

Um die Übertragbarkeit der Prüfstandsversuche auf praktische Bearbeitungsfälle zu überprüfen, wurden begleitend Zerspanversuche an einer Werkzeugmaschine DMU 60 E mit vertikaler Spindel und Minimalmengenschmierung mit innerer Zufuhr durchgeführt. Untersucht wurde das Bohren und Reiben von Gusseisen GG 20 und GGG 40 mit speziellen Trockenbearbeitungswerkzeugen.

Zur Durchführung dieser Versuche wurde das gleiche Minimalschmierstoffsystem wie bei den Prüfstandsversuchen eingesetzt. In **Tabelle 4** sind die Versuchsparameter zusammengestellt.

Entsprechend den Prüfstandsversuchen wurden die Partikelemissionen mit einem Streulichtphotometer innerhalb der Maschinenumhausung aufgezeichnet sowie die Öldampf-

Tabelle 5 Öldampf- und Ölaerosolkonzentration im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine während Zerspanversuchen mit Minimalmengenschmierung.

Versuch	Bearbeitung/Werkzeug	Werkstoff	Anzahl der Bohrungen	Konzentration ¹ in mg/m ³
1	Reiben/20H7	GG 20	20	8,9
2	Bohren/11,7	GGG 40	30	10,2
3	Reiben/12K7	GGG 40	30	8,1
4	Reiben/12K7	GG 20	30	5,2
5	Reiben/12K7	GG 20	30	12,2

¹ Die Konzentration wurde als Summe aus Dampf und Aerosol berechnet.

und Ölaerosolkonzentrationen mittels Abscheidung in Filtern bestimmt. In **Tabelle 5** sind die gemessenen Öldampf- und Ölaerosolkonzentrationen zusammengefasst.

Die ermittelten Emissionen traten im Wesentlichen in Form von Ölaerosol auf, es konnten keine nennenswerten Öldampfanteile ermittelt werden. Weiterhin konnten während der Zerspanung keine Pyrolyseprodukte nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann aus diesen Versuchen an einer Werkzeugmaschine mit innerer Schmierstoffzufuhr als Tendenz abgeleitet werden, dass die Zerspanung von GGG 40 zu geringfügig höheren Partikelemissionen, verglichen mit der Bearbeitung von GG 20 führt. Die Bearbeitung von Durchgangsbohrungen verursachte ebenso höhere Partikelemissionen verglichen mit Sackloch-Bearbeitungen. Beim Reiben zeigten sich ähnliche oder geringfügig höhere Partikelkonzentrationen im Vergleich zum Bohren. Ein zunehmender Kühlkanalquerschnitt der Werkzeuge führte zu einem Anstieg der Partikelkonzentration.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Gegenstand dieses Projektes sind Untersuchungen zur Beurteilung der frei werdenden Emissionen am Arbeitsplatz beim Einsatz der Minimalmengenschmierung. In einer ersten Projektphase konnten anhand von Laboruntersuchungen als Pyrolyseprodukte der Schmierstoffe Spuren von gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen, Aldehyden und Ketonen, gesättigten und ungesättigten Estern (C_{16} bis C_{25}) sowie Alkoholen ($> C_{15}$) nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse wurden orientierend zur Auswahl geeigneter Probenahme-

systeme für die nachfolgenden Zerspanversuche herangezogen.

In der zweiten Projektphase wurden unter Einsatz eines einkanaligen Minimalschmier-systems mit innerer Zufuhr Prüfstandsversuche durchgeführt, um das Emissionsverhalten verschiedener Schmierstoffe zu bestimmen. Zerspanversuche beim Bohren in CK 45k mit Esterölen zeigten geringe Emissionswerte bei mittleren bis hohen Viskositäten. Niedrigviskose Schmierstoffe (Viskosität < 15 mm²/min bei 40 °C) führten zu erhöhten Aerosolemissionen mit geringem Dampfanteil. Diese Versuche bestätigten, dass die Schmierstoffviskosität einen ausgeprägten Einfluss auf das Emissionsverhalten besitzt.

Eine Variation der Zerspanparameter durch Änderung der Vorschubgeschwindigkeit zeigte deutlichen Einfluss auf die Höhe der Öldampf- und Ölaerosolemission. Hohe Vorschubgeschwindigkeiten wirkten sich positiv aus. Optimale Arbeitsbedingungen durch kurze Bröckelspäne, hohe Schnittleistung und lange Werkzeugstandzeit bewirkten gleichzeitig die geringsten Emissionen. Ungünstige Schnittbedingungen, im Versuch realisiert durch extrem reduzierten Vorschub, führten zu hohen Emissionen bei gleichzeitig ungünstigen Bearbeitungsbedingungen, z. B. durch lange Späne und hohen Werkzeugverschleiß.

Anhand von Vergleichsuntersuchungen von niedrigviskosen Mineralölprodukten und esterbasierenden Minimalmengenschmierstoffen wurde deutlich, dass mineralölbasierende Schmierstoffe höhere Emissionswerte als Esteröle vergleichbarer Viskosität aufweisen. Die Dampfanteile der Emission bei Mineralölprodukten sind beträchtlich, während bei den Esterölen die Dampf-fraktion gering im Vergleich zur Gesamtemission ermittelt wurde.

Zerspanversuche unter Einsatz verschiedener Fertigprodukte zeigten geringe Emissionen bei allen bearbeiteten Werkstoffen auf. Es konnte kein ausgeprägter Einfluss der Viskosität auf die Emissionswerte wie bei den Esterölen festgestellt werden. Allerdings traten bei Schmierstoffen sehr niedriger Viskosität (3 mm²/min bei 40 °C) extrem hohe Emissionswerte mit gleichzeitig hohem Dampfanteil auf.

Die Konzentration von Pyrolyseprodukten konnte bei allen Versuchen, auch bei Messung direkt an der Entstehungsstelle, als sehr gering eingestuft werden. Unter praxisrelevanten Schnittbedingungen wurden nur geringste Konzentrationen von Pyrolyseprodukten festgestellt, während bei starker thermischer Belastung des Schmierstoffes etwas höhere Werte gemessen wurden. Als mögliche Leitkomponente zeigte sich die Entstehung von Formaldehyd. Unter diesen extremen Bedingungen ist die Konzentration der Pyrolyseprodukte als sehr niedrig einzustufen.

Messungen während der Zerspanung mit Fertigprodukten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $V_f = 1\ 000$ mm/min zeigten im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den Basisestern keinerlei Pyrolyseprodukte. Auch die Entstehung von Formaldehyd konnte bei diesen Versuchen nicht nachgewiesen werden.

In Anlehnung an Fertigungsbedingungen in der Praxis wurden Versuche zum Bohren und Reiben in Gusseisen (GG 20, GGG 40) an einer Werkzeugmaschine durchgeführt. Messungen der Öldampf- und Ölaerosolemission zeigten, dass auch in der Maschine nur geringe Konzentrationen auftreten. Die er-

mittelten Emissionen traten im Wesentlichen in Form von Ölaerosol auf. Es konnten keine Pyrolyseprodukte während der Zerspanung nachgewiesen werden.

Ausführliche Informationen finden sich im Projektbericht [5]. Weiterhin sind BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen beim Einsatz der Minimalmengenschmierung bei der Metallbearbeitung [13] erhältlich. Über die Ergebnisse verschiedener Expositionsmessungen in Arbeitsbereichen sowie der daraus resultierenden Inhalte der BG/BIA-Empfehlungen beim Einsatz der Minimalmengenschmierung wird eine weitere Publikation erscheinen.

Literatur

- [1] Klocke, F.; Eisenblätter, G.: Systeme, Werkzeuge und Medien für die Minimalmenge. Praxis der Trockenbearbeitung. VDI-Berichte 1458, S. 133-148. Düsseldorf: VDI 1999.
- [2] Wurster, B.: Wo steht die Minimalmengenschmierung? Steinbeis Transferzentrum für Umwelttechnik Konstanz. dima – die Maschine (2000) Nr. 12, S. 34-35.
- [3] Blaszkewicz, M.; Kleber, M.; Föllmann, W.; Lucas, S.: Methoden zur Erfassung der Expositionssituation von Menschen beim Umgang mit verschiedenen Kühlschmierstoffen. VDI Berichte 1458, S. xx. Düsseldorf: VDI 1999.
- [4] Hörner, D.: Kühlschmierstoffe für die Minimalmengenschmierung. VDI-Berichte 1339, S. 203-240. Düsseldorf: VDI 1997.
- [5] Stäbler, D.; Schönwald, M.; Sefrin, H.; Wolf, M.: Gefährdungsbeurteilung bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe. Projekt-Abschlussbericht der Süddeutschen Metall-Berufsgenossenschaft, Mainz März 2003. www.smbg.de/Sites/downloads/MMS%20Projektbericht%20170403.pdf.
- [6] Lichtenstein, N.; Quellmalz, K.: Gasförmige Schadstoffe bei der thermischen Verarbeitung von Kunststoffen. Staub – Reinhalt. Luft 43 (1983) Nr. 9, S. 379-382.
- [7] Geräte zur Probenahme der einatembaren Staubfraktion (E-Staub) (Kennzahl 3010). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 27. Lfg. X/01. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [8] Kühlschmierstoffe (Kennzahl 7750). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 19. Lfg. XI/97. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [9] Kühlschmierstoffe – und andere komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische, CD-ROM. 2. Aufl. Hamburg: Storck 2003.
- [10] Anforderungen an Pumpen für die Probenahme von Gefahrstoffen an Arbeitsplätzen (Kennzahl 0260). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 27. Lfg. X/01. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [11] Messverfahren für Gefahrstoffe. In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen (Kennzahl 6009 ff). Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [12] Empfehlungen vom Einsatz der Streulichtphotometrie im Rahmen der Arbeitsplatzüberwachung (Kennzahl 2600). Streulichtphotometrie zur Feinstaubmessung (Kennzahl 9080). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 11. Lfg. X/93 und 9. Lfg. X/92. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [13] BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen: Minimalmengenschmierung bei der Metallzerspanung (Kennzahl 1042). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 31. Lfg. X/03. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.