

Berechnung der Verdunstungseinflüsse auf die Aerosolmesstechnik bei der Bewertung von Kühlschmierstoffabscheidern

D. Nagel, R. Stockmann, K. Schaber

Zusammenfassung Am Beispiel von drei nicht wassermischbaren und einem wassergemischten Kühlschmierstoff wurden die Verdunstungseinflüsse auf die Aerosolmessung und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Berechnung von Abscheidegraden für Partikeln und Dampf in einem Aerosolabscheider berechnet. Die Tropfenverdunstung kann die Messung des Fraktionsabscheidegradverlaufs beeinflussen. Das untersuchte Esteröl und das untersuchte Weißöl sind allerdings so schwer flüchtig, dass der Verdunstungseinfluss auf den Fraktionsabscheidegradverlauf bei den betrachteten Betriebsbedingungen vernachlässigbar klein ist. Für die Messung der Dampfkonzentration muss die Tropfenphase mit einem Vorfilter entfernt werden. Feinstpartikeldurchtritt und Verdunstung der abgeschiedenen Flüssigkeit im Vorfilter können den Messwert der Dampfkonzentration erhöhen. Da im Rohgas eine größere Tropfenkonzentration als im Reingas vorhanden ist, kann die Erhöhung der gemessenen Dampfkonzentration im Rohgas größer sein als im Reingas. Dies kann sogar zur Messung einer Dampfabscheidung führen, obwohl in Wirklichkeit eine Dampfanreicherung stattfindet.

Calculation of the influence of evaporation on aerosol measurements for the characterization of oil mist separators

Abstract The influence of evaporation on the measurement of aerosols was simulated for three non water miscible and one water miscible metalworking fluid. The influence of evaporation on the calculation of separation efficiencies of an oil mist separator for droplets and vapour was calculated. Droplet evaporation can affect the determination of the fractional separation efficiency curve. The tested ester oil and the tested white oil have such a low volatility, that the influence of evaporation on the separation efficiency curve is negligibly small at all conditions of operation which were investigated. In order to measure the vapour concentration the droplets have to be removed by a prefilter. Penetration of fine particles through the prefilter and evaporation of the liquid inside the prefilter can increase the measured value of the vapour concentration. The droplet concentration in the raw gas is higher than in the clean gas. Therefore, the error of measurement in the raw gas can be higher than in the clean gas. This can even lead to the measurement of a vapour deposition in the oil mist separator while in fact the vapour concentration increases in the oil mist separator.

1 Einleitung

Aerosole sind feste oder flüssige Feinstpartikeln in einem Trägergas, das auch dampfförmige Komponenten enthalten kann, sodass von einer partikulären Phase und einer Dampfphase der Komponenten gesprochen werden kann. Der

Dipl.-Ing. Dominik Nagel,
Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Schaber,

Institut für Technische Thermodynamik und
Kältetechnik der Universität Karlsruhe.

Dipl.-Ing. Reinhard Stockmann,
BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen
Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin.

Stoffaustausch zwischen den beiden Phasen kann sowohl die Charakterisierung als auch die Abscheidung von Aerosolen erheblich erschweren. Das kann zu Fehleinschätzungen des Aerosolzustands, der Abscheidemechanismen und der Abscheideleistung untersuchter Geräte führen. Generell ist die Unterscheidung von Dampf und Partikeln in Aerosolen schwierig, da bei der Trennung der beiden Phasen Verschiebungen der Stofffracht auftreten können. Die Dampfphase passiert elektrostatische oder mechanische Feinstpartikelfilter, wie sie z. B. zur Abscheidung von Kühlschmierstoff(KSS)nebeln eingesetzt werden, weitgehend ungehindert. Dies kann zu erhöhter Arbeitsplatzbelastung führen, wenn die gereinigte Luft wieder in die Arbeitsatmosphäre zurückgeführt wird. Weltweit sind Millionen Arbeiter in KSS-belasteter Atmosphäre tätig.

Am Beispiel der KSS-Nebel aus Werkzeugmaschinen wurde der Prozess der Aerosolentstehung, Messung und Abscheidung modelliert und die Verdunstungseinflüsse auf die verschiedenen Messtechniken sowie die Auswirkungen auf die Bewertung von Abscheidern berechnet. Die Berechnungen wurden am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik der Universität Karlsruhe im Rahmen des BGIA-Projektes „Modellierung und Simulation von Partikelgrößenänderungen aufgrund thermodynamischer Effekte“ durchgeführt. Die Ergebnisse für KSS-Nebel gelten analog für alle Aerosole mit flüchtigen Komponenten, d. h. für alle Stoffe, deren Dampfdruck nicht vernachlässigbar ist und die sich nicht vollständig in der Gasphase befinden. Die partikuläre Phase der hier betrachteten KSS-Nebel besteht weitgehend aus Flüssigkeit, weshalb im Folgenden von einer Tropfenphase gesprochen wird.

2 Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln

KSS-Nebel entstehen beispielsweise in Bearbeitungszentren aus den eingesetzten KSS durch mechanische Zerstäubung oder durch Verdunstung an heißen Oberflächen und anschließende spontane Kondensation in der Umgebungsluft. In der Regel werden KSS-Nebel abgesaugt und in Aerosolabscheidern abgeschieden. Die gereinigte Luft wird entweder in die Werkhalle zurückgeführt (Reinlufrückführung) oder ins Freie geleitet. Durch moderne Entwicklungen in der Metallbearbeitung, z. B. Minimalmengenschmierung oder höhere Drehzahlen, steigen die Anforderungen an die KSS-Abscheider. Die Prüfnormen für Partikelfilter lassen sich nicht vollständig auf die Tröpfchenfiltration übertragen, da die Flüssigkeit auf den Filterfasern den Abscheidegrad maßgeblich beeinflussen kann. Um Abscheider weiterzuentwickeln und zu testen, muss daher ein geeignetes Prüfverfahren entwickelt werden. Dazu müssen realitätsnahe Aerosole mit einem Aerosolgenerator erzeugt werden. Im Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BGIA wurde ein Entwicklungsprüfstand für KSS-Abscheider

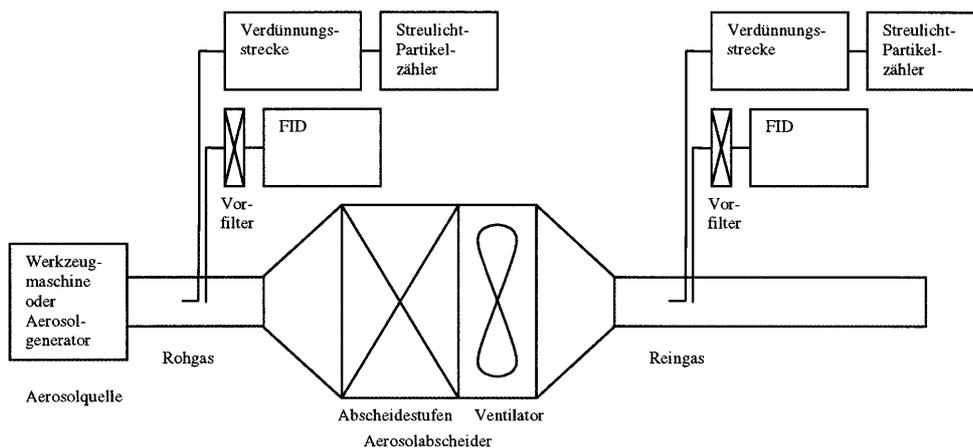


Bild 1. Entwicklungsprüfstand für Kühlschmierstoffabscheider.

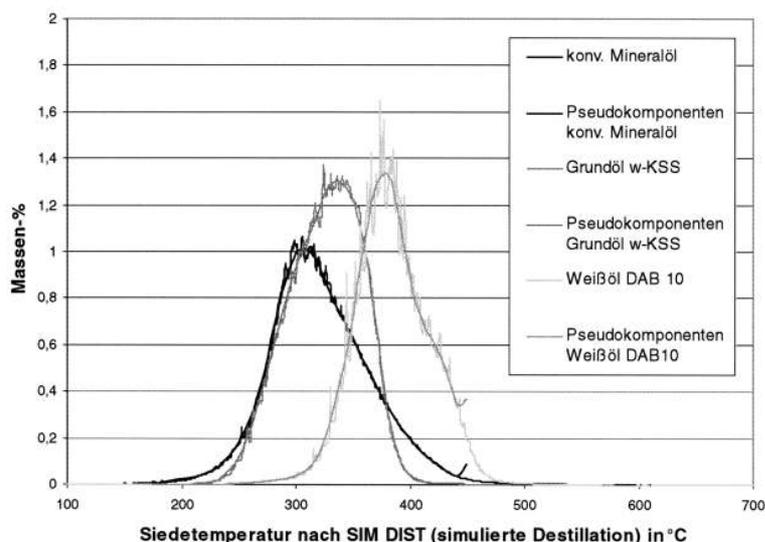


Bild 2. Siedekurven der Öle und der dazugehörigen Pseudokomponentenmischungen; w-KSS = wassergemischter KSS.

konzipiert und aufgebaut, der auch für Messungen an Werkzeugmaschinen verwendet wurde [1; 2]. Die Versuchsbedingungen des Entwicklungsprüfstands wurden durch Simulationsrechnungen nachgebildet. Vergleichend dazu wurden die Versuchsbedingungen von Messungen an einer Drehmaschine simuliert.

In Bild 1 ist das Schema des Entwicklungsprüfstands dargestellt. Das Aerosol wird aus einer Werkzeugmaschine abgesaugt oder mit einem Aerosolgenerator erzeugt. In der Rohgasmessstrecke werden Teilströme des Aerosols entnommen und in die verschiedenen Messgeräte geleitet. Der Aerosolabscheider besteht aus mehreren Abscheidestufen (Filtermatten oder elektrostatische Elemente) und einem Ventilator, der in das Abscheidergehäuse integriert ist. In der Reingasmessstrecke werden ebenfalls Probenmeströme abgesaugt und den Messgeräten zugeführt. Der Vergleich der Messwerte im Roh- und im Reingas ergibt die Abscheideleistung.

Die Vorgänge in den Messsystemen hängen vom Zustand des Aerosols ab. Daher muss der gesamte Weg des Aerosols von der Erzeugung bis zur Messung modelliert werden. Voraussetzung für die Modellierung ist die Kenntnis der Zusammensetzung der Aerosoltropfen bei der Entstehung. Vorwiegend wurde eine mechanische Aerosolerzeugung

angenommen, bei der die Tropfenzusammensetzung gleich der Zusammensetzung des ursprünglichen KSS ist.

3 Modellierung der Kühlschmierstoffzusammensetzung

Mineralöle bestehen aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffkomponenten unbekannter Zusammensetzung. Die Zusammensetzung von drei ausgewählten nicht wassermischbaren KSS 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 der Siedetemperatur 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 Bild 2 sind die Siedekurven des konventionellen nicht wassermischbaren KSS, im Folgenden Mineralöl genannt, des Weißöls DAB 10 und des Grundöls des wassergemischten KSS sowie der dazugehörigen Pseudokomponentenmischungen dargestellt. Der Siedeverlauf des esterbasierten verdampfungsarmen nicht wassermischbaren KSS, im Folgenden Esteröl genannt, ist durch scharfe Peaks von Reinstoffen gekennzeichnet und hier nicht dargestellt. Es wurde eine ideale Mischung der Pseudokomponenten in der flüssigen Phase angenommen. Tabelle 1 gibt die physikalischen Eigenschaften der Öle wieder.

4 Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewicht von Kühlschmierstoffen

Wird flüssiger KSS mit der Umgebungsluft in Kontakt gebracht, verdunstet ein Teil der Flüssigkeit, bis sich ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Dampf und Flüssigkeit einstellt. Die Luft ist dann mit Dampf gesättigt. Durch die Verdunstung verändert sich die Zusammensetzung der Flüssigkeit. Der Anteil der leicht flüchtigen Komponenten

Tabelle 1. Physikalische Eigenschaften der nicht wassermischbaren KSS.

Parameter	Mineralöl	Esteröl	Weißöl
Flammpunkt ISO 2592 in °C	155	220	195
Verdampfungsverlust nach Noack, DIN 51581-2 in %	74,2	24,7	40,3
Viskosität bei 40 °C, DIN 51562-1 in mm ² /s	9,4	9,8	15,5

verringert sich, während sich der Anteil der schwer flüchtigen Komponenten erhöht. In der Gasphase befinden sich vermehrt die leicht flüchtigen Komponenten. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist der Dampfdruck einer Komponente gleich dem Produkt aus dem Aktivitätskoeffizienten in der flüssigen Phase, dem Molenbruch in der flüssigen Phase und dem Satttdampfdruck der reinen Komponente (verallgemeinertes Gesetz von Raoult-Dalton: $p_i = \gamma_i \cdot x_i \cdot p_{0is}$). Die Dampfmenge hängt also sowohl von den Stoffeigenschaften der Komponenten als auch von der Zusammensetzung der flüssigen Phase ab. Je größer die Menge des eingesetzten KSS ist, desto größer ist das Reservoir an Leichterdieseln, das zur Verdunstung zur Verfügung steht. Das Mengenverhältnis von Flüssigkeit zu Luft ist daher entscheidend für die Dampfkonzentration. Die Gesamtmasse des KSS (Summe aus Dampf und Flüssigkeit) pro Betriebskubikmeter Trägergas wird im Folgenden als Gesamtkonzentration bezeichnet, die Masse des Dampfes pro Betriebskubikmeter Trägergas als Dampfkonzentration. Ergebnisse für den thermodynamischen Gleichgewichtszustand bei einer Temperatur von 25 °C und einem Druck von 1,01325 bar sind in Bild 3 dargestellt.

Bei Gesamtkonzentrationen unter ca. 125 mg/m³ hat Weißöl eine höhere Dampfkonzentration als Esteröl. Bei höheren Gesamtkonzentrationen ist es umgekehrt. Erst ab Gesamtkonzentrationen von ca. 100 g/m³ wird die maximale Dampfkonzentration annähernd erreicht. Dann ist die Flüssigkeitsmenge so groß, dass sich die Zusammensetzung der Flüssigkeit durch die Verdunstung nur wenig ändert.

Die drei untersuchten nicht wassermischbaren KSS enthalten so schwer flüchtige Komponenten, dass schon 1 µm KSS ausreicht, um 1 m³ Trägergas vollständig aufzusättigen. Der Sättigungsgrad der Gasphase sagt daher wenig über die Größe der Dampfkonzentration aus. Entscheidend ist, mit welchen Komponenten die Gasphase gesättigt ist.

5 Modellierung des Aerosolverhaltens

Das Simulationsprogramm AerSolve wurde zur Berechnung des Aerosolverhaltens in zwei- oder dreiphasigen polydispersen Mehrkomponentensystemen entwickelt [5]. Die Tropfen werden dabei in Tropfengrößenklassen eingeteilt, die im Stoffaustausch mit der sie umgebenden Gasphase stehen. Zusätzlich kann der Wärme- und Stoffaustausch der

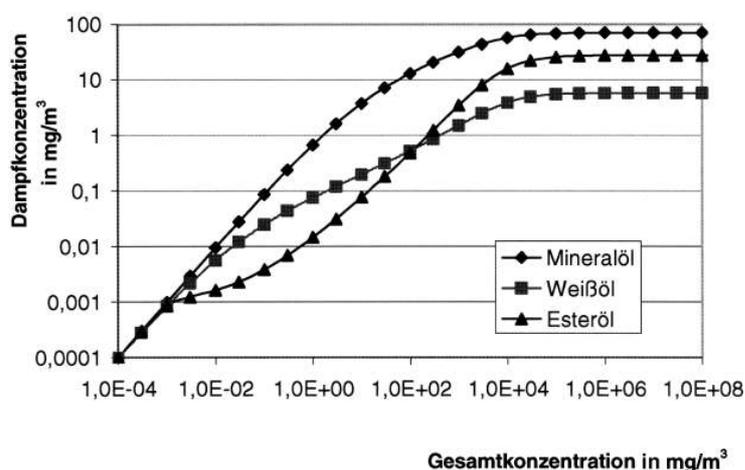


Bild 3. Dampfkonzentration bei 25 °C und 1,01325 bar im thermodynamischen Gleichgewicht.

Gasphase mit einer kontinuierlichen flüssigen Phase berechnet werden. In AerSolve werden der Kelvin-Effekt, d. h. die Erhöhung des Dampfdrucks kleiner Tropfen aufgrund der Oberflächenspannung und ein Knudsen-Korrekturfaktor [4] berücksichtigt. Bei nicht wassermischbaren KSS wird die Tropfentemperatur 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. Aus numerischen Gründen wurde je nach Simulationsbedingungen ein minimaler Tropfenradius zwischen 35 und 45 nm festgelegt.

5.1 Modellierung des Gesamtprozesses

In allen Anlagenteilen wurde der Aerosolstrom als ideale Pfropfströmung der Tropfen und des Trägergases modelliert. Dabei wurde der Stoffaustausch der einzelnen Tropfengrößenklassen mit dem Trägergas berechnet. Anlagenteile mit gleichen Prozessbedingungen wurden zu einem Berechnungsabschnitt zusammengefasst, indem die Verweilzeiten aufsummiert wurden. Im Roh- und im Reingas wurde sowohl das Verhalten des Aerosols bei der Messung der Tropfengrößenverteilung mit zwei Streulichtpartikelzählern (Welas) und vorgeschalteter Verdünnungsstrecke als auch das Aerosolverhalten während der Messung der Dampfkonzentration mit dem Flammenionisationsdetektor (FID, Gesamtkohlenwasserstoffanalysator) modelliert. Im Vorfilter des FID wurde zusätzlich der Stoffaustausch der flüssigen Phase auf den Filterfasern mit der Gasphase berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse des FID wurden umgerechnet auf Ergebnisse des IPS-PD-Messverfahrens des BGIA (Isokinetisches Probenahmesystem Partikel-Dampf) [5]. Vor der Streulichtmessung wurde das Aerosol im Verhältnis 1 : 9 mit Druckluft verdünnt.

5.2 Werkzeugmaschine

Im Innenraum einer Werkzeugmaschine mit Überflutungsschmierung findet ein intensiver Kontakt zwischen der Luft und dem verwendeten KSS statt. Der KSS wird durch Düsen auf das Werkzeug und das Werkstück aufgebracht, wo er teilweise zerstäubt wird, teilverdunstet wird oder als Flüssigkeitsfilm auf Spänen, Wänden und Bauteilen im Stoffaustausch mit der Gasphase steht. Nur ein sehr geringer Teil des KSS bildet Nebel, der Großteil fließt in das Flüssigkeitsreservoir zurück. Sowohl die KSS-Flüssigkeit als auch die Nebeltropfen emittieren Dampf. Die Dampfemission der KSS-Flüssigkeit muss abgeschätzt werden, die Dampfemission der Nebeltropfen ergibt sich aus der Simulationsrechnung. Für die vorliegende Arbeit wurde angenommen, dass 25 % der Luftströmung mit 50 g KSS – das entspricht 0,17 % des flüssigen KSS-Massenstroms – pro Betriebskubikmeter Luft im thermodynamischen Gleichgewicht stehen. Dieser Teilluftstrom wird mit 75 % vollständig unbelasteter Luft vermischt, woraus sich die Dampfbelastung an der Aerosolquelle ergibt. Die Größenverteilung des Aerosols an der Aerosolquelle wird vorgegeben. Es wurden sowohl gemessene Größenverteilungen als auch eine logarithmische Normalverteilung verwendet. Als Verweilzeit des Aerosols wurde die mittlere Verweilzeit vollständig luftgetragener Partikeln aus einer Strömungssimulation der Universität Stuttgart (IGE/HLK) [6] für das Schruppen mit einer Drehmaschine verwendet.

5.3 Prüfstand

Im Prüfstand wird die Flüssigkeit mithilfe eines Aerosolgenerators gezielt vernebelt. Das entstehende Aerosol ist daher ein Nichtgleichgewichtsaerosol, die Gasphase ist nicht mit Dampf vorbeladen.

Der Aerosolabscheider wird als Abscheider mit vorgegebenem Fraktionsabscheidegradverlauf modelliert. Der Stoffaustausch zwischen flüssiger Phase auf den Filterfasern und der Gasphase wird nicht berücksichtigt, da das thermodynamische Gleichgewicht im Aerosol aufgrund der hohen Verweilzeiten in der Werkzeugmaschine und im Abscheidergehäuse annähernd erreicht ist und der Druckverlust des verwendeten Filters bei den gewählten Betriebsbedingungen so gering ist, dass keine großen Verdunstungseinflüsse zu erwarten sind.

Die Verweilzeiten der einzelnen Berechnungsabschnitte sind in **Tabelle 2** aufgelistet. Für den elektrostatischen Abscheider wurde dieselbe Verweilzeitverteilung verwendet wie für den filternden Abscheider.

5.4 Versuchsbedingungen

Die nachfolgenden Ergebnisse für nicht wassermischbare KSS wurden für Prüfstandsbedingungen auf der Basis einer logarithmischen Normalverteilung der Tropfen bei der Erzeugung im Aerosolgenerator berechnet. Der volumetrisch gemittelte Tropfendurchmesser beträgt 1,0 µm, die Standardabweichung ist 0,9. Die Anzahlkonzentration der Tropfen wurde so gewählt, dass die Tropfenmassenkonzentration 100 mg/m³ beträgt (Mineralöl: 2,45 · 10⁵ Tropfen/cm³). Die Temperatur des Rohgases und der Verdünnungstrecken beträgt 25 °C, die Temperatur des Reingases ist aufgrund des Energieeintrags des Ventilators erhöht und wurde mit 25,5 °C angenommen.

6 Verdunstungseinflüsse auf die Messung der Partikelgrößenverteilung

Die Abscheideleistung eines Abscheiders kann durch die Ermittlung des Verlaufs des Fraktionsabscheidegrades bestimmt werden. Dafür werden die Tropfengrößenverteilungen im Rohgas und im Reingas mit zwei Streulichtpartikelzählern gemessen. Der Vergleich der Anzahlkonzentration einer Tropfengrößenklasse im Roh- und im Reingas ergibt den Fraktionsabscheidegrad

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

Die Verdunstung eines Teils der Tropfenmasse kann die Messung beeinflussen und so ein verändertes Bild des Fraktionsabscheidegrades ergeben.

Tabelle 2. Verweilzeiten der einzelnen Berechnungsabschnitte.

Berechnungsabschnitt	Gesamtverweilzeiten	
	Werkzeugmaschine in s	Prüfstand in s
I) Rohgas vor Verdünnung	4,04	1,21
II) Verdünnungstrecke Roh- oder Reingas	0,50	0,50
1) Gesamtverweilzeit Rohgas vor Partikelabscheidung	7,68	4,85
2) Partikelabscheidung	0	0
3) Reingas vor Ventilator	0,30	0,30
4) Reingas nach Ventilator vor Verdünnung	2,26	2,26

Durch den Stoffaustausch der Tropfen mit der sie umgebenden Gasphase verändern sich der Radius und die Zusammensetzung der Tropfen. In **Bild 4** ist die Verteilung der Anzahlkonzentration über dem Tropfenradius für Mineralöl bei den oben beschriebenen Prüfstandsbedingungen aufgetragen. Im Aerosolgenerator liegt das Maximum der Anzahlkonzentrationsverteilung der verwendeten logarithmischen Normalverteilung bei einem Tropfendurchmesser von ca. 300 nm. Durch Tropfenverdunstung verschiebt sich die Verteilung der Anzahlkonzentration nach links. Die Tropfengrößenverteilungen im Rohgas nach 0,5 s Verweilzeit und vor der Verdünnung, d. h. nach 1,21 s Verweilzeit, sind fast deckungsgleich. Durch die Aufsättigung der Gasphase und die Veränderung der Zusammensetzung im Tropfen verlangsamt sich die Verdunstung. Die Verdünnungstrecke bewirkt eine zusätzliche Verdunstung, da das Aerosol mit ungesättigter Druckluft verdünnt wird.

Durch die Simulation wird die Tropfengrößenverteilung bei der Rohgasmessung (**Bild 4**, Rohgas nach Verdünnung) und die Tropfengrößenverteilung bei der Reingasmessung (**Bild 4**, Reingas nach Verdünnung) berechnet. Der Vergleich beider Tropfengrößenverteilungen nach Gl. (1) ergibt den Verlauf des Fraktionsabscheidegrades, der durch Tropfenverdunstung zwischen den Messstellen und in den Verdünnungstrecken beeinflusst ist. Der Vergleich dieses berechneten Fraktionsabscheidegrades mit dem vorgegebenen Fraktionsabscheidegrad des Abscheiders ergibt den Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Messung des Fraktionsabscheidegrades. In **Bild 5** ist ein Beispiel für die berechneten Fraktionsabscheidegrade als Funktion des Tropfendurchmessers dargestellt. Nur das Mineralöl zeigt einen klar erkennbaren Verdunstungseinfluss auf den Fraktionsabscheidegrad. Die Differenz zwischen dem Fraktionsabscheidegrad ohne Verdunstung und dem verdunstungsbeeinflussten simulierten Fraktionsabscheidegrad des Mineralöls beträgt maximal 10 %.

Der Fraktionsabscheidegrad des Esteröls ist bei allen Versuchsbedingungen nahezu deckungsgleich mit dem Fraktionsabscheidegrad ohne Verdunstungseinfluss, die Differenz beträgt maximal 0,1 %. Der Verdunstungseinfluss des Weißöls beträgt maximal 1 %.

7 Einflüsse der Tropfen auf die Dampfmessung

Damit die Dampfphase eines Aerosols analysiert werden kann, muss vorher die Tropfenphase abgetrennt werden. Dies geschieht meist durch einen Vorfilter, z. B. einen Glasfaserfilter. Nicht abgeschiedene Aerosoltropfen gelangen in die Dampfphasenanalytik und beeinflussen so den Messwert. Auf den Filterfasern sammeln sich die abgeschiedenen

Aerosoltropfen und bilden eine flüssige Phase, die ihrerseits wieder in intensivem Stoffaustausch mit der Dampfphase steht. Dadurch kann sich der Zustand der Dampfphase im Vorfilter verändern, was in der Regel eine Erhöhung des Dampfmesswerts bewirkt. Die Größe dieser Veränderung hängt einerseits von den Eigenschaften des Vorfilters ab, wie z. B. dem Druckverlust, dem Abscheidegradverlauf und der Filterfläche. Andererseits hängt sie von

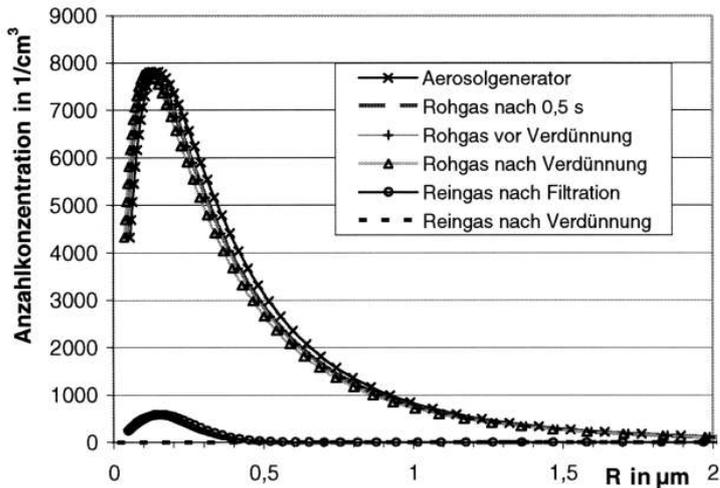


Bild 4. Simulation des Einflusses der Tropfenverdunstung für das Mineralöl.

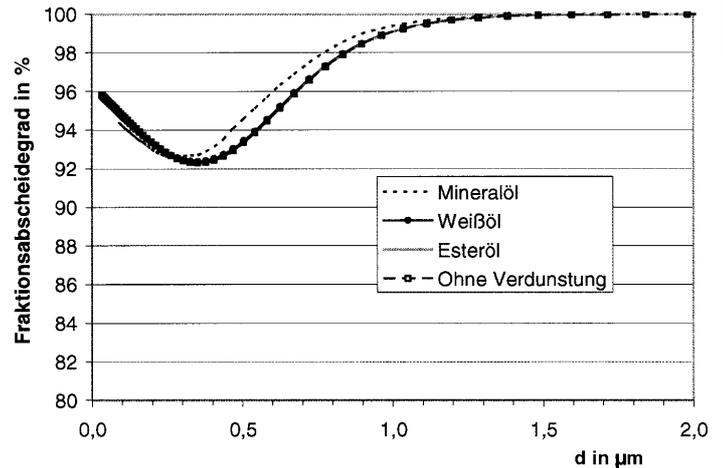


Bild 5. Fraktionsabscheidegradverläufe.

den Eigenschaften des Aerosols ab, z. B. von der Flüchtigkeit der Komponenten und davon, ob es sich um ein Gleichgewichtsaerosol handelt.

Da im Rohgas eine größere Tropfenkonzentration vorhanden ist als im Reingas, kann der Messwert der Dampfphase im Rohgas höher sein als im Reingas, obwohl die Dampfkonzentration im Prozess im Rohgas niedriger ist als im Reingas. Messtechnisch kann sich dadurch fälschlicherweise eine „Dampfabscheidung“ ergeben, obwohl in Wirklichkeit eine Dampfanreicherung stattfindet.

Die Problematik der Verdunstung von Flüssigkeit auf Filterfasern wird vielfach in der Literatur beschrieben [7 bis 9]. Die bisherigen Berechnungen beschränken sich jedoch auf die Verdunstung von Flüssigkeit, die sich bereits auf den Filterfasern befindet. In der Software AerSolve werden Verdunstungsvorgang und Abscheidung sowie die instationäre Aufsättigung des Filters mit Flüssigkeit erstmals simultan berechnet. Wenn der Aerosolzustand zeitlichen Schwankungen unterliegt, ist der Verdunstungseinfluss noch größer als im betrachteten stationären Zustand.

Für einen Glasfaservorfilter und für einen Sintermetallvorfilter wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, die nur in wenigen Fällen eine Abnahme der Dampfkonzentration aufgrund einer durch den Kelvin-Effekt übersättigten Gasphase gezeigt haben. In der Mehrzahl der Fälle bewirkte der Vorfilter eine Erhöhung der gemessenen Dampfkonzentration gegenüber der ursprünglichen Dampfkonzentration im Aerosol. Die Fehlereinflüsse sind stark von allen Prozessbedingungen abhängig.

7.1 Beispiel für ein Simulationsergebnis

Bei einer Simulation des Prüfstands mit Mineralöl und Glasfaservorfiltern (Druckverlust: 20 mbar) beträgt die Dampfkonzentration an der Rohgasmessstelle $9,13 \text{ mg/m}^3$, während die Tropfenkonzentration $90,87 \text{ mg/m}^3$ beträgt. Verdunstung im Vorfilter erhöht den Messwert der Dampfkonzentration um 20,58 % auf $11,01 \text{ mg/m}^3$ und verringert die gemessene Tropfenmasse um 2,09 % auf $88,98 \text{ mg/m}^3$. Der starke Einfluss der Tropfenverdunstung im Rohgas wird dadurch verursacht, dass das Aerosol aufgrund der kurzen Verweilzeit im Prüfstand bei der Rohgasmessung (1,21 s) noch nicht den thermodynamischen Gleichgewichtszustand erreicht hat; man kann von einem Nichtgleichgewichtsaerosol sprechen. Der Feinstpartikeldurchtritt durch den Vorfilter erhöht den Messwert der Dampfkonzentration dagegen nur

um 0,16 % auf insgesamt $11,03 \text{ mg/m}^3$. An der Reingasmessstelle beträgt die Dampfkonzentration $10,59 \text{ mg/m}^3$ und ist damit um 15,98 % höher als an der Rohgasmessstelle. Die Verdunstung im Vorfilter erhöht den Messwert der Dampfkonzentration im Reingas nur um 0,55 %, der Feinstpartikeldurchtritt nur um 0,12 % auf $10,66 \text{ mg/m}^3$. Damit ist der Messwert der Dampfkonzentration im Reingas um 3,63 % niedriger als im Rohgas, was fälschlicherweise als „Dampfabscheidung“ interpretiert werden könnte, obwohl dieser Effekt nur dadurch bewirkt wird, dass die Einflüsse der Tropfen auf die Dampfmessung im Reingas deutlich geringer sind als im Rohgas.

Um den gleichen Betrag, um den die Dampfkonzentration bei der Messung überschätzt wird, wird die Tropfenkonzentration z. B. bei der gravimetrischen Bestimmung der Tropfenmasse unterschätzt. Die Summe beider Messwerte ergibt die exakte Gesamtkonzentration. Daher eignet sich das IPS-PD-Messverfahren [5] für KSS-Nebel besonders gut, da beide Messwerte simultan erfasst werden.

Allerdings kann der Massenverlust durch Tropfenabscheidung in der Probenahmesonde nicht erfasst werden, sodass er nach Möglichkeit minimiert werden muss. Ideal wäre eine isokinische, isobare und isotherme Probenahme an einem repräsentativen Probenahmeort mit einer geraden Sonde ohne Querschnittsveränderung [10]. Dies ist nur durch die Umlenkung des Hauptstroms realisierbar. Die Isothermie ist besonders schwer zu erreichen, da die gebräuchlichen Probenahmestromströme von wenigen Litern pro Minute nur eine geringe Wärmekapazität haben, sodass ein kleiner Wärmeaustausch mit der Umgebung oder mit dem Messsystem die Temperatur des Probenahmestroms deutlich verändern kann. In Biegungen oder an Querschnittsänderungen des Probenahmesystems kann eine Tropfenabscheidung stattfinden, die ebenfalls zu Verdunstungseffekten führen kann.

8 Wassergemischte Kühlschmierstoffe

Wassergemischte KSS sind in der Regel Mikroemulsionen aus Öl in Wasser, die durch grenzflächenaktive Substanzen stabilisiert werden. Wasser ist deutlich flüchtiger als Öl, weshalb sich die Frage stellt, ob mit wassergemischten KSS aussagekräftige Messungen des Fraktionsabscheidegradverlaufs von KSS-Abscheidern durchgeführt werden können oder ob die Wasserverdunstung die Messungen nicht zu

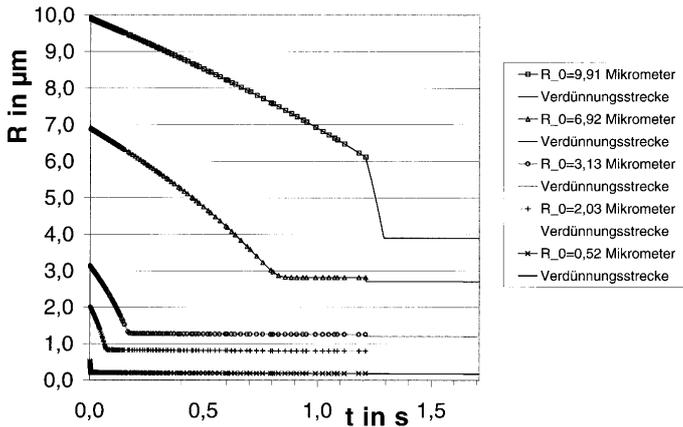


Bild 6. Bild 6: Radienverläufe im Rohgas (linker Kurventeil) und in der Verdünnungsstrecke (rechter Kurventeil) der Streulichtmessung im Rohgas.

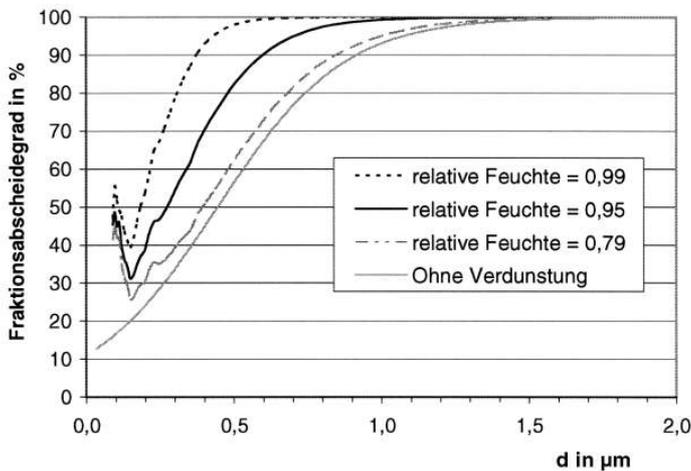


Bild 7. Fraktionsabscheidegradverläufe bei unterschiedlicher relativer Feuchte im Rohgas.

stark beeinflusst. Dazu wurde eine neue Variante des Simulationsprogramms AerSolve entwickelt, die den Solver LIMEX [11] verwendet, um die schnelle Verdunstungskinetik des Wassers numerisch zu beherrschen. Das Phasenverhalten der Mikroemulsion ist komplex [12; 15]. Manche Komponenten lösen sich vornehmlich in der wässrigen Phase, andere hauptsächlich in der Ölphase und andere sind stark an der Grenzfläche der beiden Phasen angereichert. Das thermodynamische Verhalten des Systems ist daher nicht exakt modellierbar und es wurden folgende vereinfachende Annahmen getroffen: Der Tropfen wurde als zweiphasiges System modelliert. Es besteht aus einer wässrigen Phase mit einer gelösten Schlüsselkomponente und aus einer Ölphase, die aus der schon für die nicht wassermischbaren KSS verwendeten Pseudokomponentenmischung (n-Alkane) besteht. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die wässrige Phase der kleinen Tropfengrößenklassen schnell ein thermodynamisches Gleichgewicht mit der Gasphase erreicht. Die Menge des Wasserdampfs in der Luft ist deutlich größer als die Menge des verdunstenden Wassers aus dem Aerosol, wodurch die relative Feuchte der Luft in der Regel unter 100 % bleibt. Die verbleibende Menge des Wassers in den Tropfen ist maßgeblich von der relativen Luftfeuchte abhängig. Sie ist bei niedriger Anfangsfeuchte

der Luft gering, sodass die verbleibenden Tropfen hauptsächlich aus Ölkomponten bestehen. Die Tropfenverdunstung kann daher in zwei Phasen eingeteilt werden: die vergleichsweise schnelle Wasserverdunstung und die Ölverdunstung. Die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse zeigen Prüfstandsbedingungen bei einer relativen Feuchte im Rohgaseintritt von 0,79 bei 22,9 °C. Die Temperatur der Verdünnungsstrecken beträgt 21,2 °C, die des Reingases nach dem Ventilator 24,2 °C.

In Bild 6 sind die zeitlichen Verläufe der Radien ausgewählter Tropfenklassen als Funktion der Verweilzeit im Rohgas und in der Verdünnungsstrecke der Streulichtmessung im Rohgas aufgetragen. Mit Ausnahme der Tropfengrößenklasse mit einem Anfangsradius von 9,91 µm ist die Phase der Wasserverdunstung in allen Tropfengrößenklassen schon vor der Verdünnungsstrecke im Rohgas abgeschlossen, da das thermodynamische Gleichgewicht des Wassers erreicht ist. Nach einer Verweilzeit von 1,21 s beginnt die Verdünnungsstrecke, wo wiederum ein Teil des im Tropfen befindlichen Wassers verdunstet, das mit trockener Druckluft verdünnt wird.

In Bild 7 sind die simulierten Messungen des Fraktionsabscheidegradverlaufs eines trägheitsdominierten Abscheiders bei unterschiedlicher relativer Feuchte im Rohgas aufgetragen. Je höher die relative Feuchte ist, desto höher ist der verbleibende Wasseranteil in den Tropfen und desto stärker ist der Verdunstungseinfluss auf die Messungen. Weitere Ergebnisse zeigen, dass der Verdunstungseinfluss unterhalb einer relativen Feuchte von 0,7 nahezu unabhängig von der relativen Feuchte ist. Dieser Verdunstungseinfluss wird durch die Ölkomponten verursacht.

9 Fazit

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 Leichter siedender enthalten können, die über einen langen Zeitraum hinweg in die Gasphase emittiert werden.

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass die Dampfkonzentration stark von der Gesamtmenge des eingesetzten KSS und von dessen Temperatur abhängig ist. Deshalb ist eine Kühlung des KSS wichtig.

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 den Probenahmestrom durch Verdunstung zusätzlich aufsättigen können. Der Druckverlust des Vorfilters untersättigt den Probenahmestrom und fördert dadurch die Verdunstung. Nicht abgeschiedene Feinstpartikeln gelangen in die Gasphasenanalytik, was zusammen mit der Verdunstung abgeschiedener Tropfen im Probenahmesystem eine deutliche Erhöhung der gemessenen Dampfkonzentration bewirken kann. Je größer die Tropfenkonzentration ist, desto stärker wird die gemessene Dampfkonzentration erhöht. Dadurch können im Rohgas von Abscheidern fälschlicherweise höhere Dampfkonzentrationen gemessen werden als im Reingase,

auch wenn der Abscheider die Gasphase in Wirklichkeit auf-sättigt. Messtechnisch ergibt sich dann eine „Dampfabscheidung“ im Abscheider, obwohl in Wirklichkeit eine Dampf-anreicherung stattfindet. Bei einer nicht übersättigten Gas-phase kann durch Filtration keine Dampfabscheidung er-reicht werden. Dampfabscheidung ist nur durch Kühlung oder Absorption möglich.

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

Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass sogar Ver-suchsstoffe mit geringer Flüchtigkeit die Messung des Frak-tionsabscheidegrades durch Verdunstung beeinflussen kön-nen. Bei Mehrkomponentengemischen haben die hoch sie-denden Komponenten einen stabilisierenden Einfluss auf die Tropfen. Alle Prozessbedingungen, wie Messort, Pro-benahmebedingungen, Art der Aerosolerzeugung, Verweil-zeit, Ölzusammensetzung, Tropfengrößenverteilung, An-zahlkonzentration, Temperatur, Druck etc., beeinflussen das Verdunstungsverhalten.

Das untersuchte Esteröl und das Weißöl sind allerdings so schwer flüchtig, dass der Verdunstungseinfluss auf die Mes-sung des Fraktionsabscheidegrades bei allen betrachteten Betriebsbedingungen vernachlässigbar klein ist. Bei dem untersuchten Mineralöl ist der Verdunstungseinfluss von den Betriebsbedingungen abhängig.

Wassergemischte KSS zeigen ein Verdunstungsverhalten in zwei Zeitskalen: Wasserverdunstung und Ölverdunstung. Die Wasserverdunstung ist bei kleinen Tropfen deutlich schneller abgeschlossen als die Ölverdunstung.

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass bei einer ausrei-chend geringen relativen Luftfeuchte, z. B. 70 % im Rohgas, ein Großteil des Wasseranteils kleiner Tropfen schon vor der Rohgasmessung verdunstet ist. Die verbleibenden Tropfen bestehen hauptsächlich aus Ölkomponenten. Daher ist das Verdunstungsverhalten maßgeblich durch den Dampfdruck der Ölkomponenten (alle Additive) bestimmt.

Der Verdunstungseinfluss auf die Messung des Fraktions-abscheidegrades wurde bisher unterschätzt. Er kann auch bei sehr geringer Flüchtigkeit der Stoffe auftreten. In der Praxis werden zum Teil Abscheidegradmessungen durchge-führt, bei denen ein Verdunstungseinfluss auftritt, der aber nicht erkannt wird, da die verwendeten Öle als schwer flüch-tig betrachtet werden. Besonders beim Einsatz von Messsys-temen, in denen das Aerosol verdünnt wird (z. B. differen-tielle Mobilitätsanalysatoren, SMPS), können auch schwer flüchtige Substanzen, wie z. B. Nonadecan, einen signifikanten Verdunstungseinfluss auf den berechneten Fraktions-abscheidegrad bewirken. Dieser Effekt ist bei Nanopartikeln besonders ausgeprägt. Kann ein Verdunstungseinfluss nicht ausgeschlossen werden, sollte auf Verdünnungssysteme möglichst verzichtet werden. Messverfahren mit starkem Druckverlust, wie z. B. Kaskadenimpaktoren, sind für Aero-sole mit flüchtigen Komponenten nur bedingt geeignet.

Ein häufig angewendetes Verfahren ist die Messung der Ge-samtmasse der Tropfen im Roh- und Reingas jeweils mit-

hilfe eines Filters. Aus den beiden Messwerten wird der Gesamtabscheidegrad berechnet. Beide Messwerte der Tropfenmasse sind zu niedrig, da Tropfenmassenverlust durch Verdunstung und Feinstpartikeldurchtritt im Messfil-ter auftritt und messtechnisch nicht erfasst wird. Der Ge-samtabscheidegrad wird dadurch verfälscht. Die Tropfen-emission wird systematisch unterschätzt.

Mit AerSolve steht erstmals ein Simulationsprogramm zur Verfügung, mit dem der Verdunstungseinfluss auf die Mes-sung des Fraktionsabscheidegrades, der Einfluss der Trop-fen auf die Dampfmesung und der Tropfenmassenverlust bei der Messung der gesamten Tropfenmasse berechnet werden können.

Literatur

- [1] *Stockmann, R.*: Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 411-416.
- [2] *Stockmann, R.*: Ermittlung der Emissionen aus Werkzeugmaschinen – Messungen und Ergebnisse. In: Absaugen und Abscheiden von Kühlschmierstoffemissionen. BGIA-Report 9/2006. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2006. www.hvbg.de/bgia, Webcode: 2319410
- [3] *Nagel, D.; Schaber, K.*: Abschlussbericht zum BWPLUS-Forschungsvorhaben „Charakterisierung und Abscheidung von Ölnebeln“. 2006. <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWI22010SBer.pdf>
- [4] *Raynor, P. C.; Cooper, S. J.; Leith, D.*: Evaporation of polydisperse multicomponent oil droplets. AIHA J. 57 (1996) Nr. 12, S. 1128-1136.
- [5] Isokinetisches Probenahmesystem (IPS) zur Messung der Konzentration partikel- und dampfförmiger Stoffe in strömender Luft durch Teilstrom-entnahme (Kennzahl 3110). In: BGIA-Arbeitsmappe Messung von Ge-fahrstoffen. 12. Lfg. IV/94. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA, Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.bgia-arbeitsmappedigital.de/3040
- [6] *Gu, B.; Schmid, J.*: Verbesserung der Stofffassung an Werkzeug-maschinen mittels Strömungssimulation. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 417-422.
- [7] *Simpson, A. T.; Groves, J. A.; Unwin, J.; Piney, M.*: Mineral oil metal working fluids (MWFs) – development of practical criteria for mist sam-pling. Ann. Occup. Hyg. 44 (2000) Nr. 3, S. 165-172.
- [8] *Park, D.; Kim, S.; Yoon, C.*: Loss of straight metalworking fluid samples from evaporation during sampling and desiccation. AIHA J. 64 (2003) Nr. 6, S. 837-841.
- [9] *Raynor, P. C.; Leith, D.*: Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters. Ann. Occup. Hyg. 43 (1999) Nr. 3, S. 181-192.
- [10] *Helsper, C.*: Probleme der Staubprobenahme bei der Filterprüfung. Filt. Sep. 9 (1995), Nr. 1, S. 5-13.
- [11] *Ehrig, R.; Nowak, U.; Oeverdieck, L.; Deuffhard, P.*: Advanced extra-polation methods for large scale differential algebraic problems. In: *Bungartz, H.-J.; Durst, F.; Zenger, C.* (Hrsg.): High Performance Scientific and Engineering Computing. Bd. 8. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, S. 233-244. Heidelberg: Springer 1999.
- [12] *Dörfler, H.-D.*: Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme. Heidelberg: Springer 2002.
- [13] *Cammenga, H. K.; Boehncke, A.*: Zur Wasserdampfflüchtigkeit von Tensiden. Tenside Detergents 21 (1984), S. 179-182.