

Ultrafeine Aerosole an Arbeitsplätzen

Konventionen und Beispiele aus der Praxis

G. Riediger, C. Möhlmann

1 Einleitung

Im Allgemeinen versteht man unter ultrafeinen Aerosolen Stäube, Rauche und Nebel, deren Partikeln kleiner als 100 nm sind. Diese ultrafeinen Partikeln scheinen bei gleicher Massenkonzentration eine stärkere biologische Wirksamkeit zu haben als größere kompakte und schwer lösliche Teilchen [1 bis 4]. So zeigten Inhalationsstudien, dass beispielsweise für ultrafeine TiO₂-Partikeln mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von ca. 20 nm eine inhalierte Masse von weniger als einem Zehntel der Masse von TiO₂-Partikeln einer mittleren Größe von ca. 250 nm ausreicht, um bei Ratten in Langzeituntersuchungen die gleiche Tumorraten hervorzurufen. Ähnliche Befunde erhielt man bei Versuchen mit Polytetrafluorethen (PTFE)-Rauchen: Bereits 50 µg/m³ frisch erzeugter inhalierter PTFE-Partikeln (mediane Größe etwa 18 nm) ergaben nach 15 bis 20 min Exposition bei Ratten schwere Entzündungsreaktionen der Lunge, Blutungen und hohe Mortalität, während PTFE-Rauche mit einer mittleren Partikelgröße von etwas über 100 nm ihre Toxizität praktisch eingebüßt hatten. Alle Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Maßzahl für die adäquate Beschreibung der Expositionskonzentration ultrafeiner Teilchen eher die Anzahlkonzentration oder die Oberflächenkonzentration sein dürfte und nicht die Massenkonzentration, wie es für den einatembaren und den alveolengängigen Staub der Fall ist. Zwar umfassen die einatembare und die alveolengängige Partikelfraktion auch die submikronen Partikeln [5], doch ist deren Beitrag zur Massenkonzentration am Arbeitsplatz meist vernachlässigbar. So entsprechen beispielsweise bei einer log-normalen Partikelgrößenverteilung mit der geometrischen Standardabweichung 3, für die 80 % der gesamten Teilchenzahl kleiner als 100 nm sind, weniger als 1 % der gesamten Teilchenmasse diesen 80 % der Teilchenzahl.

Ultrafeine Partikeln bilden sich in der Regel als Kondensationsprodukte bei thermischen und chemischen Reaktionen. So sind sie überall, wo Rauche entstehen, anzutreffen, also z. B. bei Verbrennungsvorgängen, beim Schweißen und Lötten, bei Materialbearbeitungen mit Laserstrahlen, in Metallrauchen, in Abgasen usw. Bei solchen Prozessen entstehen zunächst Primärpartikeln der Größe von einigen Nanometern, aus denen sehr schnell, zum Teil bereits in der Entstehungsphase, Aggregate durch Versintern und Agglomerate durch Koagulation entstehen können. Die Koagulationsrate steigt mit zunehmender Teilchenzahlkonzentration und mit der Beweglichkeit der Teilchen, d. h. mit abnehmender Teilchengröße. Daraus folgt, dass die Teilchengrößenverteilung und die Konzentration ultrafeiner Partikeln eine Funktion der Zeit nach Entstehen der Primärpartikeln sind.

Zusammenfassung Unter ultrafeinen Aerosolen werden Aerosole mit Partikeln der Größe unter 100 nm verstanden. Es gibt Hinweise darauf, dass von ihnen eine besondere Gesundheitsgefährdung ausgeht, wenn diese Partikeln schwer löslich oder unlöslich sind. Ultrafeine Teilchen entstehen insbesondere als Kondensationsprodukte bei thermischen und chemischen Reaktionen. Beispiele sind Schweißrauche, Metallrauche, technische Ruße, amorphe Kieselsäure oder partikelförmige Dieselmotoremissionen. Das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitssicherheit – BIA führt zusammen mit den gewerblichen Berufsgenossenschaften ein Messprogramm an ausgesuchten industriellen Arbeitsplätzen durch, um messtechnische Informationen über die bei verschiedenen Arbeitsverfahren auftretenden ultrafeinen Aerosole zu sammeln. Dazu werden die Partikelgrößenverteilungen zwischen ca. 10 nm und 500 nm und die Anzahlkonzentrationen dieser Aerosole mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) der Firma TSI bestimmt. Über den Stand dieses Messprogramms wird berichtet, interessante Messergebnisse werden vorgestellt. Dabei wird auf die bei solchen Messungen besonders zu berücksichtigenden Gegebenheiten näher eingegangen. Ein weiterer Aspekt beschäftigt sich mit der Schutzwirkung verschiedener filternder Atemschutzgeräte gegen ultrafeine Aerosole.

Ultrafine aerosols in workplaces – Conventions and practical examples

Abstract Ultrafine aerosols are aerosols with particles smaller than 100 nm. Such aerosols have been regarded as a tentative cause of specific health effects, if the particles are insoluble or only slightly soluble. Ultrafine particles are formed especially as condensates from thermic and chemical processes. Examples are welding fumes, metal fumes, carbon black, silica fumes or particulate diesel motor emissions. The institute for occupational safety – BIA in co-operation with the German Berufsgenossenschaften (institutions for statutory accident insurance and prevention) has started a campaign to measure ultrafine aerosols in selected industrial workplaces. For that purpose the number concentrations as well as the particle size distributions in the size range from approx. 10 nm to 500 nm are measured by using a scanning mobility particle sizer (SMPS, manufactured by TSI). The present state of these activities is presented and interesting findings are reported. Special attention is paid to specific conditions to be considered for measuring ultrafine aerosols in workplaces. Furthermore the efficiency of different respiratory particle filters against ultrafine particles is dealt with.

2 Konventionen für die Messung ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen

Da die medizinisch-toxikologischen Erkenntnisse für die Beurteilung ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen noch nicht ausreichen, gibt es hierfür noch keine Expositionsgrenzwerte und dementsprechend auch noch keine allgemein anerkannten Konventionen zur Messung. Um hier eine erste Hilfeleistung für die Messtechnik zu geben, haben sich die in **Tabelle 1** genannten Institutionen für Arbeitssicherheit in Abstimmung mit der deutschen MAK-Werte-Kommission bereits im Jahr 1998 auf die folgende vorläufige Konvention geeinigt [6]:

- Es wird nicht die Massenkonzentration, sondern die Teilchenzahlkonzentration gemessen.

Dr. phil. Günter Riediger, Dipl.-Phys. Carsten Möhlmann,
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA, Sankt Augustin.

Tabelle 1 Institutionen, die an der Erarbeitung vorläufiger Konventionen zur Messung ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen beteiligt waren [6].

- Arbeitslivsinstitutet (AI) National Institute of Occupational Health, Solna, Schweden
- Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien, Österreich
- Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA), Sankt Augustin, Deutschland
- Finish Institute of Occupational Health (FIOH), Regional Institute Tampere, Finnland
- Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Aerosolforschung (ITA), Hannover, Deutschland
- Institut für Inhalationsbiologie des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg, Deutschland
- Institut für Gefahrstoff-Forschung der Bergbau-Berufsgenossenschaft (IGF), Bochum, Deutschland
- Österreichische Staub-(Silikose-)Bekämpfungsstelle (ÖSBS), Leoben, Österreich
- Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Luzern, Schweiz
- Univerza v Ljubljani – Visja tehniska varnostna sola (VTVS) Ljubljana, Slowenien

• Die anzuwendende Messtechnik muss dem Umstand Rechnung tragen, dass die Abscheidewahrscheinlichkeit so kleiner Partikeln im Atemtrakt wesentlich durch die Diffusion, also ihre Beweglichkeit B

$$B = \frac{C}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d}$$

mit

C: Slipkorrektur,
 η : Gasviskosität,
 d: Partikelgröße

bestimmt wird. Das Verfahren muss in dem Teilchengrößenbereich von ca. 10 nm bis mindestens 200 nm (besser noch bis 500 nm) Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser eine Teilchengrößenanalyse ermöglichen und Teilchenzahlkonzentrationen bis zu etwa 10^8 Teilchen/cm³ zu messen erlauben. Mit dieser Information können Teilfraktionen ausgewertet und bei Bedarf auch die Teilchenoberflächenverteilung und -konzentration abgeschätzt werden. Der Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser entspricht dem Durchmesser einer Kugel, die im gleichen Dispersionsmittel (in diesem Fall Luft) die gleiche Beweglichkeit hat wie das untersuchte beliebig geformte Teilchen. Er hängt nur von der geometrischen Teilchengröße ab und nicht von der Masse, wie etwa der aerodynamische Durchmesser.

Ultrafeine Teilchen mit Durchmessern über etwa 20 nm deponieren bevorzugt im Alveolarbereich, Teilchen unter 1 nm werden wegen ihrer hohen Beweglichkeit fast ausschließlich bereits in den extrathorakalen Atemwegen deponiert.

3 Besonderheiten bei der Messung an Arbeitsplätzen

Ein Messsystem, das die oben genannten Anforderungen erfüllt, ist beispielsweise der Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS™) der Firma TSI [7]. Dieses System wird derzeit auch im Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit – BIA eingesetzt. Das physikalische Messprinzip ist, dass die Partikeln in einem Differential-Mobilitätsanalysator nach ihrer elektrischen Beweglichkeit sortiert und anschließend mit einem Kondensationspartikelzähler gezählt werden. Als Ergebnis erhält man die Teilchengrößenverteilung und die Teilchenzahlkonzentration in dem Bereich zwischen etwa 10 nm und 800 nm.



Bild 1 SMPS auf Transportwagen.

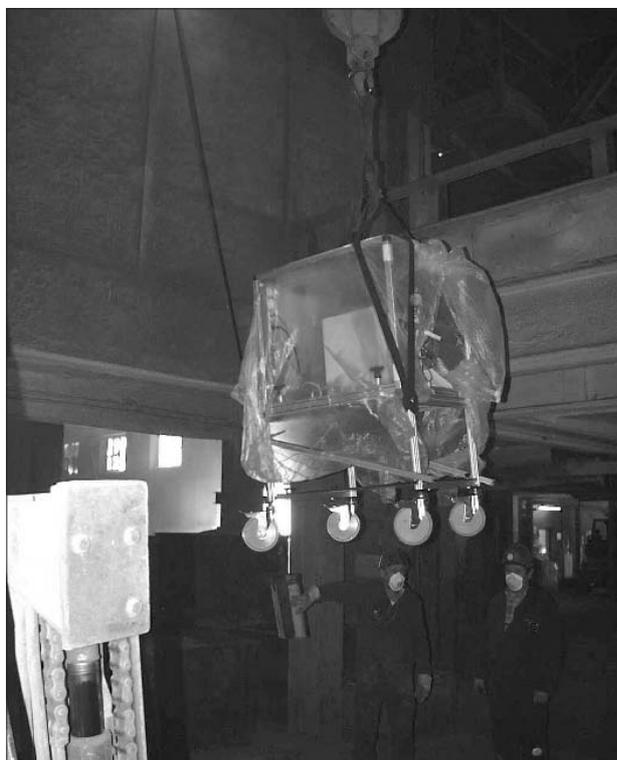


Bild 2 SMPS am Kranhaken.

Dieses System ist relativ groß und insgesamt fast 40 kg schwer, also zunächst für den Feldeinsatz recht unhandlich. Wir haben einen speziellen Wagen gebaut, der das System mit allem Zubehör aufnehmen kann (**Bild 1**). Er hat große Lenkrollen, damit er auch über Bodenebenheiten gut zu manövrieren ist. Das Untergestell des Wagens kann flach zusammengeklappt und zusammen mit dem SMPS und weiteren Messgeräten und Gepäck in einem Kombiwagen untergebracht werden. In dem Betrieb, in dem gemessen werden soll, kann es, wenn die Treppen zu eng sind, allerdings auch einmal nötig sein, das Gerät per Kran an den Messort zu bringen (**Bild 2**).

Für Expositionsmessungen muss man das Gerät möglichst nahe am Beschäftigten positionieren (**Bild 3**). Häufig ist dies schwierig, weil der Arbeitsablauf nicht behindert werden darf

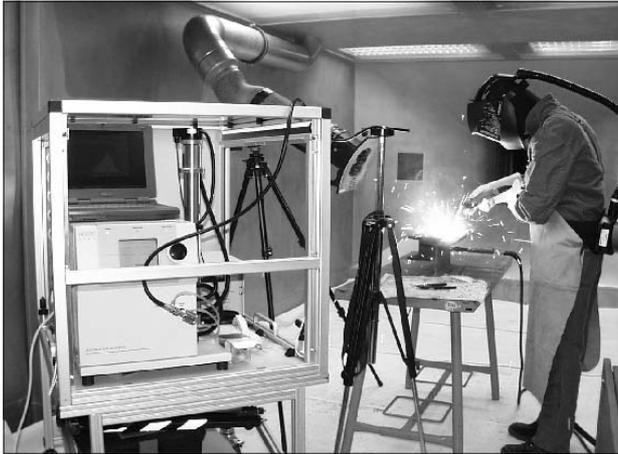


Bild 3 Messung ultrafeiner Aerosole beim Schweißen.

oder weil die Platzverhältnisse es nicht zulassen. Andererseits soll der Probenahmeschlauch möglichst kurz sein, um den Teilchenverlust durch Diffusion klein zu halten. Wir verwenden einen elektrisch leitfähigen Schlauch immer gleicher Länge von 1,7 m. Hierfür errechnen sich die Diffusionsverluste für Teilchen ab 30 nm zu unter etwa 10 %, für Teilchen von 100 nm zu 2 % [8].

Das SMPS erlaubt schnelle Messungen: Die Scanzeiten betragen wenige Minuten, wobei etwa 100 Kanäle abgescannt werden. Die Verweildauer für einen Kanal beträgt ca. 1 bis 2 s, was bei sehr niedrigen Konzentrationen allerdings den Nachteil einer schlechten Zählstatistik mit sich bringt. Man könnte die Scanzeiten zwar verlängern, bekäme dann aber zunehmend Schwierigkeiten mit der Nichtstationarität des Aerosols bei vielen Arbeitsverfahren, wie z. B. beim Handlöten oder beim Schweißen. Wenn sich bei einer zeitlich konstanten Teilchengrößenverteilung (**Bild 4a**) während des Scanvorganges die Konzentration ändert, etwa weil eine Rauchfahne vorbeizieht (**Bild 4b**), würde die gemessene Verteilung die vorliegende Verteilung verfälscht wiedergeben (**Bild 4c**) (eine mathematische Behandlung des allgemeinen Falls nicht stationärer Größenverteilungen wird von *Voutilainen* und *Kaipio* [9] angegeben). Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, führen wir an einem Messort wenigstens 10 bis zu 30 Einzelmessungen durch und versuchen bei der Auswertung, die typischen Merkmale herauszuarbeiten. Zusätzlich werden Messungen aus einem Puffervolumen von 2 l Inhalt, durch welches das Aerosol mit bis zu 2 l/min durchgeleitet wird, durchgeführt. So werden kurzzeitige Änderungen des Aerosols durch Mittelung geglättet und Artefakte weitgehend vermieden. **Bild 5a** zeigt Ergebnisse von Messungen unter quasistationären Bedingungen mit und ohne Verwendung des Puffervolumens. Erwartungsgemäß sind hier keine bedeutsamen Unterschiede festzustellen. Anders ist die Situation in **Bild 5b**: Hier sind für extrem instationäre Bedingungen beim Handlöten von Elektronikteilen Messserien mit (mM, Kurve 11:11 und Kurve 11:14) und ohne Verwendung des Puffervolumens (Kurve 11:17 und Kurve 11:20) wiedergegeben. Der glättende Einfluss des Puffervolumens ist deutlich zu erkennen.

Weitere Parameter, die bei Messungen mit dem SMPS zu beachten sind, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, sind in der Arbeit „Intercomparison of Mobility Particle Sizers (MPS)“ von *D. Dahmann* et al. in diesem Heft behandelt [10].

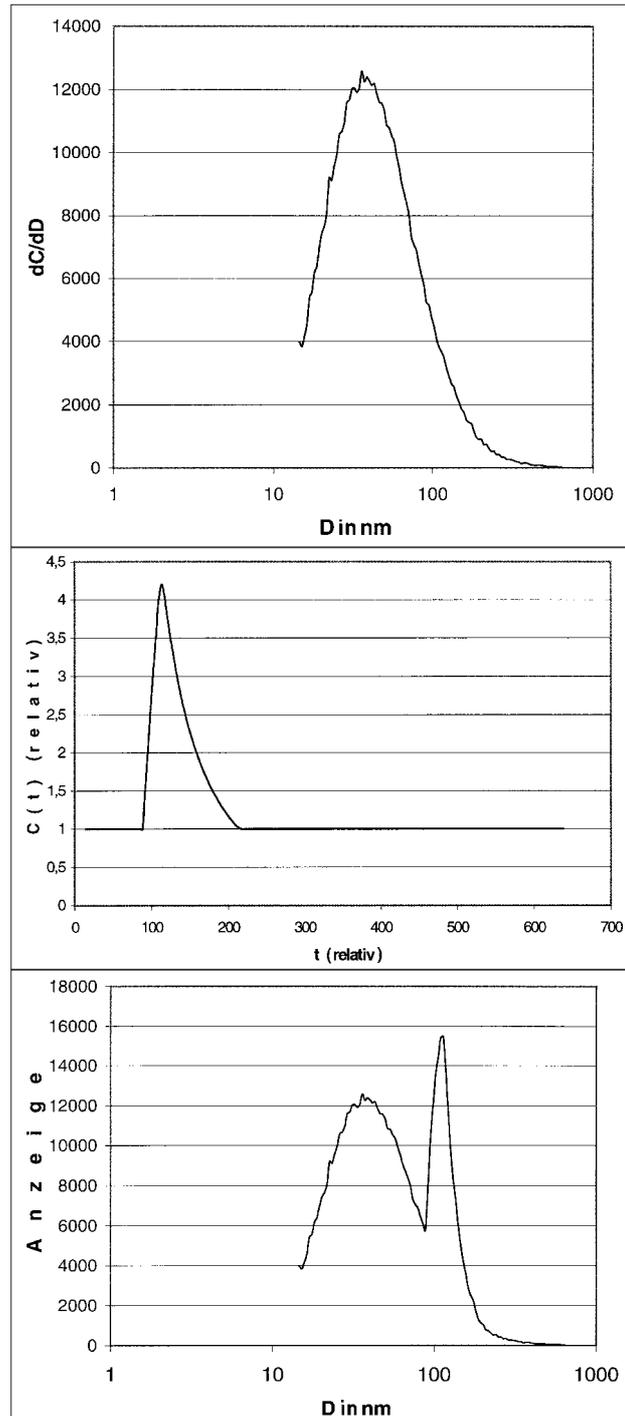


Bild 4 | a bis c (von oben nach unten): Einfluss einer Konzentrationsänderung während des Messvorgangs auf das Messergebnis.

4 Beispiele zu Arbeitsplatzmessungen

Das BIA führt gemeinsam mit den gewerblichen Berufsgenossenschaften in Deutschland ein Messprogramm an ausgesuchten Arbeitsplätzen durch, um messtechnische Informationen über die bei verschiedenen Arbeitsverfahren auftretenden ultrafeinen Aerosole zu sammeln.

Derzeit liegen erste Messergebnisse hauptsächlich für folgende Arbeitsverfahren vor:

- diverse Schweißverfahren einschließlich Laserstrahlschweißen,

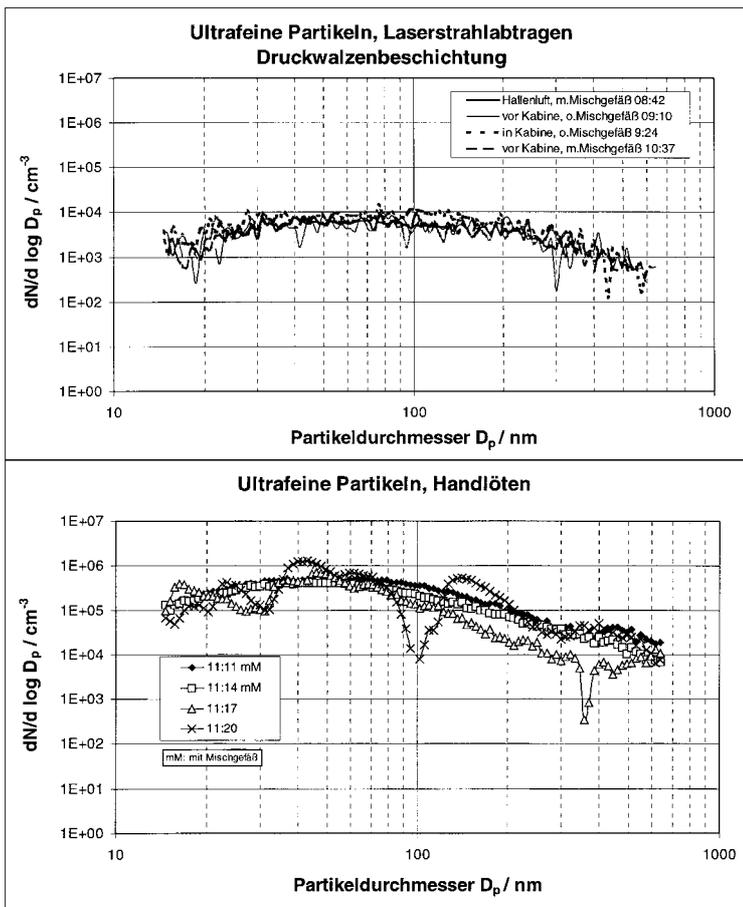


Bild 5 Messungen mit und ohne Verwendung eines Puffervolumens bei quasi-stationären (a, oben) und instationären Bedingungen (b, unten).

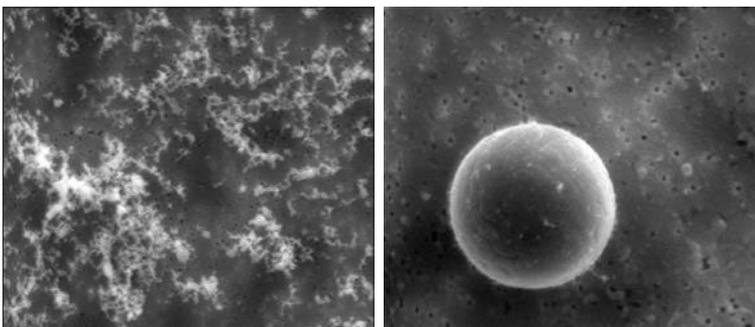


Bild 6 Schweißrauchpartikeln, a (links): Aggregate, b (rechts): Schweißperle.

Tabelle 2 Messergebnisse für ultrafeine Aerosole für verschiedene Schweiß- und Lötverfahren.

| Verfahren | Anzahlkonzentration | Median-/Modalwert der Partikelgröße in nm |
|------------------------------------|--|---|
| WIG CrNi (ohne Absaugung) | $10^5 - 10^6/cm^3$ | 60 - 100 |
| Leicht verölte Werkstoffoberfläche | $5,5 \cdot 10^6 - 8,5 \cdot 10^6/cm^3$ | 100 - 150 |
| MAG (ohne Absaugung) | $10^5 - 10^6/cm^3$ | 75 - 100 |
| MAG (mit Absaugung) | $20\ 000 - 10^6/cm^3$ | 70 - 170 |
| Handlöten (mit lokaler Absaugung) | $25\ 000 - 70\ 000/cm^3$ | 40 - 65 |
| Handlöten (in Rauchfahne gemessen) | $450\ 000/cm^3$ | 50 - 55 |

- Materialbearbeitung mit Laserstrahlen,
- Löten,
- Plasmaschneiden,
- Schleifen,
- Metallgießerei,
- Drehen und Fräsen bei Minimalmengenschmierung,
- Herstellen von Siliziumschmelze,
- Verarbeiten von Thermoplasten,
- Pulverbeschichten,
- Bitumenverarbeitung (im Labormaßstab).

Bei den Messungen hat sich herausgestellt, dass eine Verallgemeinerung von Messergebnissen nicht ohne weiteres zulässig ist, da die Bedingungen an den Arbeitsplätzen unterschiedlich sind. So hängen Ergebnisse davon ab, ob eine Absaugung am Arbeitsplatz vorhanden und in Betrieb ist und wie wirksam sie ist. Von Einfluss sind auch der Arbeitstakt, die Größe des bearbeiteten Werkstücks, das eingesetzte Material und seine Oberflächenbeschaffenheit, die eingesetzte Energiedichte bei der Bearbeitung usw.

Im Folgenden werden beispielhaft einige Messergebnisse mitgeteilt. Sie beziehen sich, sofern nichts anderes angegeben ist, auf das Messsystem SMPS 3936L25 (Basisgerät 3080 mit DMA 3081 mit CPC 3025 A-S von TSI) und den Messbereich von 14 nm bis 673 nm und auf die Probenahme so nahe aus dem Atembereich des Beschäftigten, wie es die Umstände zuließen.

Einen Schwerpunkt in dem Messprogramm stellen die verschiedenen Schweißverfahren dar: Schweißrauchpartikeln bilden die bekannten typischen kettenförmigen Aggregate (**Bild 6a**), außerdem gibt es auch hin und wieder mehr oder weniger große Schweißperlen (**Bild 6b**), die im Allgemeinen nicht zur ultrafeinen Partikelfraktion zählen. Beim WIG-Schweißen (Wolfram-Inertgas-Schweißen) von hochlegierten Chromnickel-Stählen ohne Absaugung fanden wir Konzentrationen ultrafeiner Partikel zwischen 10^5 und 10^6 Teilchen/cm³ mit Medianwerten und Modalwerten bei 60 bis 100 nm. Bei leicht verölte Werkstoffoberflächen fanden wir deutlich erhöhte Werte von $5,5$ bis $8,5 \cdot 10^6/cm^3$ und Median- und Modalwerte von 100 bis 150 nm. MAG-Schweißen (Metallaktivgasschweißen) ohne Absaugung ergab mit Konzentrationswerten von 10^5 bis $10^6/cm^3$ und Median-/Modalwerten von 75 bis 100 nm ähnliche Werte wie das WIG-Schweißen ohne Absaugung. Beim MAG-Schweißen mit lokaler Absaugung fanden wir Konzentrationen von 20 000 bis maximal $10^5/cm^3$ und Median-/Modalwerte bei 70 bis 170 nm.

Im Vergleich dazu fanden wir beim Handlöten von Elektronikteilen mit lokaler Absaugung im Atembereich 25 000 bis 70 000/cm³ mit Median-/Modalwerten bei 40 bis 65 nm; direkt in der Rauchfahne waren die Werte 450 000/cm³ und 50 bis 55 nm (vgl. **Tabelle 2**).

Beim Laserstrahlabtragen einer leitfähigen Glasbeschichtung (Nd:YAG-Laser, 80 W, gütegeschaltet) wurden 20 000 Teilchen/cm³ gefunden mit Median-/Modalwerten von 70 bis 100 nm. Beim Laserstrahlabtragen von Siliziumnitridkeramik (Nd:YAG-Laser, 40 Watt, gepulst), das unter Vollkapselung mit Absaugung und Reinluftückführung in den Raum stattfand, betragen die Werte 93 000/cm³ und etwas über 50 nm. Wurde die Absaugung abgeschaltet, stieg die Konzentration im Raum auf 266 000/cm³ mit dem Medianwert 150 nm (**Tabelle 3** und **Bild 7**). Auffallend ist hier, dass die Absaugung erst bei Partikelgrößen über ungefähr 70 nm Wirkung zu zeigen

scheint. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Laserstrahl-abtragen in einer geschlossenen Kabine ablief, die in dem eigentlichen Arbeitsraum stand. Die Kabinenabsaugung leitete die Abluft in den Arbeitsraum. Direkt in der Abluft wurde die in Bild 7 mit 15:04 bezeichnete Partikelgrößenverteilung mit dem Modalwert von etwa 50 nm bei einer Konzentration von 400 000/cm³ gemessen. Die im Raum vor der Kabine gemessene Verteilung (Kurve 14:44) war wegen der Abluftrückführung praktisch gleich. Bei abgeschalteter Absaugung gelangten Partikeln durch Undichtigkeiten der Bearbeitungskabine in den Raum davor. Jetzt zeigte sich eine breitere, zu größeren Partikeln hin verschobene Partikelgrößenverteilung, hervorgerufen durch Anlagerung der kleineren Teilchen an größere – der Modalwert ist nicht ausgeprägt und deutet sich schwach bei ca. 180 nm an.

In einer Eisengießerei fanden wir je nach Arbeitsbereich 3 · 10⁵ bis 6 · 10⁵ Teilchen/cm³ mit Medianwerten von 50 bis 80 nm (Tabelle 4).

Beim Erschmelzen von Silizium, und zwar beim Freistechen mit der Elektrolanze (Bild 8), wurden im SMPS-Messbereich von 18 nm bis 900 nm bis zu 180 000 Teilchen/cm³ gemessen mit Medianwerten zwischen 200 und 400 nm. Die Partikelgrößen reichten von unter 18 nm bis über 900 nm und zeigten keine ausgeprägten Modalwerte. Die alveolengängigen Staubkonzentrationen lagen in dem Bereich zwischen 4 mg/m³ und 8 mg/m³. Im Gegensatz zu den Schweißrauchern erscheinen die Agglomerate hier überwiegend nicht kettenförmig sondern diffus-wolkig (Bild 9); im Filterstaub der Absauganlage gibt es kugelige Agglomerate im Mikrometerbereich (Bild 10).

Aus der großen Zahl weiterer Ergebnisse soll noch ein Auszug aus Technikumsversuchen zum Mischen von verschiedenen im Straßenbau verwendeten Bitumensorten (Tabelle 5) angeführt werden. Die Sorte B 65 Standard, die bei 168 °C verarbeitet wird, erbrachte bei den Versuchen im Mischer Konzentrationen von 4,1 · 10⁶ bis 10,3 · 10⁶/cm³ mit Median-/Modalwerten im Bereich von 130 bis 200 nm. Eine Neuentwicklung einer Bitumensorte, die aus Energiegründen bei einer niedrigeren Temperatur von 142 °C verarbeitet wird (B 65 Z, temperaturreduziert), zeigte gegenüber den anderen untersuchten Bitumensorten mit 0,2 · 10⁶/cm³ bis 2,2 · 10⁶/cm³ deutlich geringere Konzentrationen, allerdings auch niedrigere Median- und Modalwerte von 70 bis 110 nm.

5 Atemschutz

Als Maßnahmen zur Expositionsminde rung gibt es außer der Kapselung der Emissionsquelle und der Absaugung noch den persönlichen Atemschutz. Wir haben uns in orientierenden Untersuchungen die Wirksamkeit von Atemfiltern gegen ultrafeine Aerosole angesehen. Als Testaerosol wurde ein Kochsalzaerosol verwendet, das durch Zerstäuben einer wässrigen Kochsalzlösung und anschließendes Trocknen gewonnen wurde. Die Partikeln waren polydispers und sämtlich kleiner als 1 µm (Bild 4a). Die Anzahlkonzentration des Testaerosols lag bei 5,5 · 10⁵/cm³. Diese vergleichsweise geringe Konzentration des Testaerosols wurde gewählt, um den Einspeichereffekt niedrig zu halten. Der SMPS-Messbereich erstreckte sich von 14 nm bis 673 nm.

Für ein typisches Glasfaserfilter der Filterklasse P3, der wirkungsvollsten Filterklasse im Atemschutz, haben wir als Durchlassgrad für die Partikelzahl 0,01 % gemessen, entsprechend 99,99 % Abscheidegrad. Unter diesen Bedingungen ist

Tabelle 3 | Messergebnisse für ultrafeine Aerosole beim Laserstrahlabtragen.

| Verfahren | Anzahlkonzentration | Median-/Modalwert der Partikelgröße in nm |
|--|-------------------------|---|
| Leitfähige Glasbeschichtung (Nd:YAG-Laser, 80 W, gütegeschaltet) | 20 000/cm ³ | 70 – 100 |
| Si ₃ N ₄ (Nd:YAG-Laser, 40 W, gepulst), mit Absaugung | 93 000/cm ³ | 50 |
| Si ₃ N ₄ (Nd:YAG-Laser, 40 W, gepulst), ohne Absaugung | 266 000/cm ³ | 150/- |

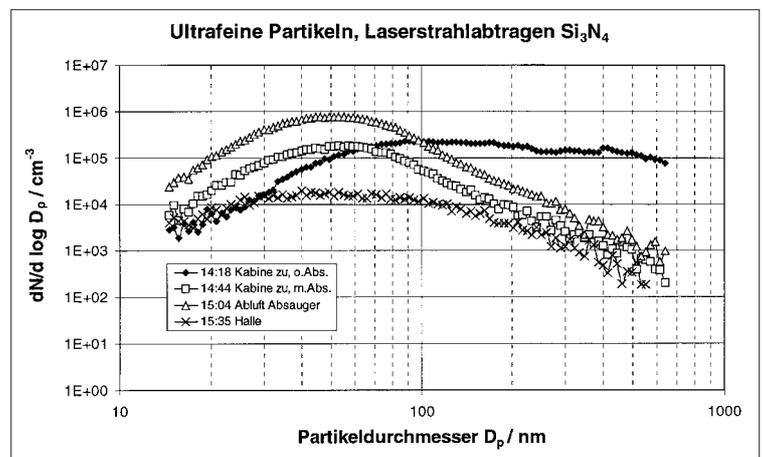


Bild 7 | Wirkung der Absaugung.

Tabelle 4 | Messergebnisse für ultrafeine Aerosole in einer Eisengießerei.

| Messort | Anzahlkonzentration | Median-/Modalwert der Partikelgröße in nm |
|------------------|-------------------------|---|
| Ofenbühne | 600 000/cm ³ | 50 – 60 |
| Probenehmerplatz | 300 000/cm ³ | 50 – 80 |



Bild 8 | Erschmelzen von Silizium – Freistechen mit Elektrolanze.

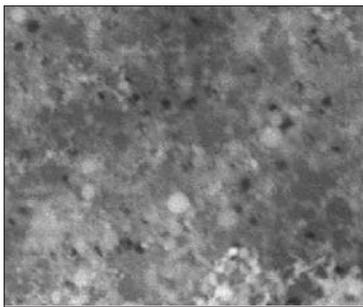


Bild 9 | Kieselrauchpartikeln.

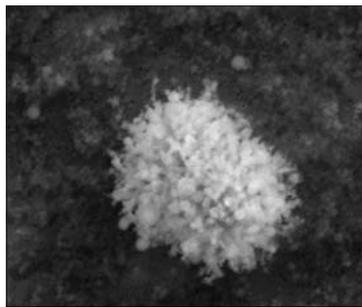


Bild 10 | Kieselrauchpartikeln - Agglomerat.

Tabelle 5 | Mischen von Bitumen (Technikumsversuche).

| Material | Anzahlkonzentration | Median-/Modalwert der Partikelgröße in nm |
|---|--|---|
| B 65 Standard, Verarbeitungstemperatur 168 °C (im Mischer) | $4,1 \cdot 10^6 - 10,3 \cdot 10^6/\text{cm}^3$ | 130 - 200 |
| B 65 Z temperaturreduziert, Verarbeitungstemperatur 142 °C (im Mischer) | $0,2 \cdot 10^6 - 2,2 \cdot 10^6/\text{cm}^3$ | 70 - 110 |

die Zählstatistik für die hinter dem Filter gemessenen Partikeln schlecht. Der 95%-Vertrauensbereich für den Durchlassgrad ergibt sich hier unter Zugrundelegung der Poisson-Statistik zu 0,005 % bis 0,02 %. Der Durchlassgrad für die Partikelmasse errechnet sich in diesem Fall im Mittel zu 0,002 %. Im Vergleich hierzu ergaben die Messungen mit einem hinsichtlich der Massenkonzentration kalibrierten Flammenfotometer Werte zwischen < 0,001 % und 0,002 %. Die mit dem SMPS gemessenen Durchlassgradwerte für die Partikelzahl lagen für ein gutes P2-Filter bei 0,2 % und für ein Filter der schwächsten Filterklasse P1 bei 5,2 % (Tabelle 6). Die hier mitgeteilten Werte wurden für die untersuchten Filtertypen gemessen. Eine Übertragung dieser Werte auf alle Filter der Klassen P1, P2 oder P3 ist nicht zulässig.

Da ultrafeine Partikeln hauptsächlich durch Diffusion abgeschieden werden, ist ihr Abscheidegrad um so höher, je länger ihre Aufenthaltsdauer im Filtermedium ist, also je kleiner

Tabelle 6 | Durchlassgrade von Atemfiltern für ultrafeine Partikeln (Beispiele).

| Filterklasse | Durchlassgrade von Atemfiltern für Partikel < 670 nm (nach Anzahl) |
|--------------|--|
| P3 | 0,01 % |
| P2 | 0,2 % |
| P1 | 5,2 % |

Tabelle 7 | Abhängigkeit der Filterwirksamkeit für ultrafeine Partikeln von der Luftdurchsatzrate.

| Filtertyp | Durchlassgrad für Partikeln < 98 nm (nach Anzahl) | |
|-----------|---|------------------|
| | - bei 47,5 l/min - | - bei 95 l/min - |
| A | 0,004 % | 0,044 % |
| B | 1,19 % | 2,92 % |

die Luftdurchsatzrate ist. Bei einem guten Filter (Tabelle 7: Filtertyp A) ist der Abscheidemechanismus durch Diffusion sehr ausgeprägt: Bei Verdoppelung der Luftdurchsatzrate erhöht sich der Partikeldurchlassgrad um mehr als den Faktor 10. Die Abhängigkeit der Filterwirksamkeit von der Durchsatzrate ist stärker als bei einem schlechteren Filter (Filtertyp B in Tabelle 7). Bei diesem Filtertyp erhöht sich der Durchlassgrad für ultrafeine Partikeln bei Verdoppelung der Luftdurchsatzrate lediglich um den Faktor von knapp 2,5.

6 Ausblick

Das BIA wird das in diesem Beitrag auszugsweise vorgestellte Messprogramm fortsetzen mit Vervollständigung um

weitere Arbeitsverfahren und Absicherung der Messergebnisse. Auf diese Weise sollen im Laufe der Zeit valide Messdaten für ultrafeine Aerosole an verschiedenen Arbeitsplätzen vorliegen, auf die zu gegebener Zeit zurückgegriffen werden kann, um im Rahmen der berufsgenossenschaftlichen Präventionsaufgabe zu einer sachdienlichen Diskussion der Thematik ultrafeine Aerosole an Arbeitsplätzen beitragen zu können.

Literatur

[1] Ultrafeine Aerosolteilchen, deren Agglomerate und Aggregate. Aerosole. Nachtrag 1998. In: Greim, H. (Hrsg.): Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten. 27. Lfg. 1998. Weinheim: Wiley-VCH 1972 - Losebl.-Ausg.
 [2] Heinrich, U.: Ultrafeine Partikeln. In: Symposium „Grenzwerte für chemische Einwirkungen an Arbeitsplätzen“. BIA-Report 4/98. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften - HVBG, Sankt Augustin (1998), S. 163-174.
 [3] Stone, V.; Donaldson, K.: Small particles - big problem. Aerosol Society Newsletter 33 (1998), S. 12-14.
 [4] Oberdörster, G.: Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. Int. Arch. Occup. Environ. Health 74 (2001), S. 1-8.
 [5] DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikeln. Berlin: Beuth 1993.
 [6] Ultrafeine Aerosolteilchen und deren Agglomerate und Aggregate (Kennzahl 0412/5). In: BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen 21. Lfg. X/98. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld: Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
 [7] Wang, S. C.; Flagan, R. C.: Scanning electrical mobility spectrometer. Hrsg.: California Institute of Technology, Division of Engineering and Applied Science, Pasadena, CA 91125 (1989), S. 138-178 und TSI-Produktinformation.
 [8] Hinds, W. C.: Aerosol Technology. New York: John Wiley & Sons 1999.
 [9] Voutilainen, A.; Kaipio, J. P.: Estimation of non-stationary aerosol size distributions using the state-space approach. Aerosol Sci. 32 (2001), S. 631-648.
 [10] Dahmann, D. et al.: Intercomparison of mobility particle sizers (MPS). Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft 61 (2001) Nr. 10, S. 423-428.