

# Erfahrungsaustausch und Ringversuch zur Messtechnik für ultrafeine Partikel

J. Pelzer, C. Monz

## 1 Einleitung

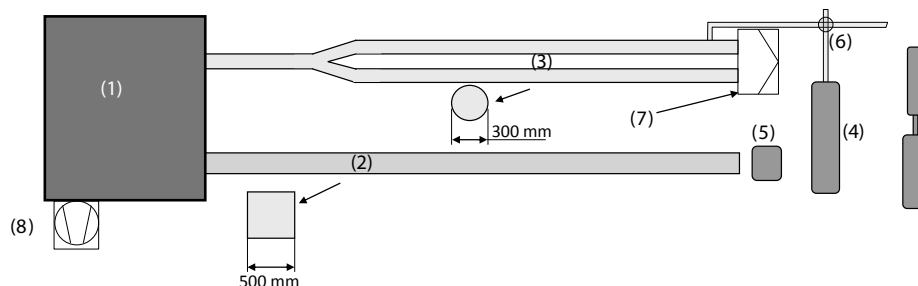
Auf Initiative der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) organisierte das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) im August 2014 einen Erfahrungsaustausch mit Ringversuch zur Messtechnik für ultrafeine Partikel (UFP). Durchgeführt wurden die Versuche am Nano Test Center des Instituts für Gefahrstoff-Forschung (IGF) der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI). Neben mehreren Unfallversicherungsträgern (UVT) waren auch die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) und die österreichische Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA) an einer Teilnahme interessiert – zu diesem Termin an dem Ringversuch aktiv teilnehmen konnten Vertreter der BGN, BG RCI, die Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) und die Verwaltungsberufsgenossenschaft (VBG). Ziel der Veranstaltung war es, sowohl die Einsatzgrenzen der im Messsystem Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU) verwendeten Messtechnik zu ermitteln als auch die einzelnen Vorgehensweisen der teilnehmenden UVT zu vergleichen. Zudem sollten weitere Schritte zum einheitlichen Vorgehen bei Messungen von UFP am Arbeitsplatz erarbeitet werden. Der Schwerpunkt lag somit auf der Anwendung der Messtechnik für Arbeitsplatzmessungen und geht über einen reinen Vergleich der Messtechnik [1; 2] hinaus.

## 2 Erfahrungsaustausch und Berichte aus der Praxis

Mit Vertreterinnen und Vertretern der BGN, BGHM, VBG, BG RCI und des IFA waren die Mehrzahl der UVT, die Geräte für die und somit auch Erfahrungen mit der Messung von UFP besitzen, bei Erfahrungsaustausch und Ringversuch vertreten. Je nach Branche unterscheiden sich die betrachteten Arbeitsprozesse und die durchgeführten Projekte deutlich. Beispiele sind das Passivrauch-Projekt und Tätigkeiten bei der Pulververarbeitung in der Lebens-

<sup>1)</sup> PVD = physical vapour deposition, physikalische Gasphasenabscheidung

**Dipl.-Ing. (FH) Johannes Pelzer,**  
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.  
**Dipl.-Ing. Christian Monz, M. Sc.,**  
Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Dortmund.



**Bild 1. Schematischer Aufbau des Staubprüfkamms im Technikum des IGF.** 1: Sedimentationskammer (22 m<sup>2</sup>), 2: Staubkanal (22 m), 3: Nanokanal (doppelt, 22 m), 4: Aerosolaufgabe (Generatoren und Dieselmotoren), 5: Staubaufgabe, 6: Dosiersteuerung, 7: ULPA-Filter, 8: Ventilator (maximal 6 000 m<sup>3</sup>/h).

mittelindustrie für die BGN, Schweißprozesse, Feuerverzinken und PVD<sup>1)</sup>-Beschichtung für die BGHM, Sprühvorgänge mit Trennmittel beim Pressen von Gläsern für die VBG und Pulververarbeitung und Messungen an Prüfständen für Nanomaterialien für die BG RCI [3; 4]. Im Rahmen zweier Messprogramme des MGU werden seit 2008, auch mit geliehener Messausrüstung aus dem IFA-Messgerätepool, Messungen durchgeführt und in MEGA, der gemeinsamen Expositionsdatenbank der UVT, gespeichert. Die ersten zusammenfassenden Auswertungen stellte das IFA den Teilnehmenden vor.

Neben dem Erfahrungsaustausch wurde zudem die Gelegenheit zu einem Ringversuch genutzt, bei dem alle Beteiligten ihre Erfahrungen und Probleme bei Messungen von UFP am Prüfstand praktisch unter kontrollierten Bedingungen untermauern und konkretisieren konnten. Dazu wurden alle zur Verfügung gestellten Partikelmessgeräte mit unterschiedlichen Aerosolen bei mehreren Konzentrationen beaufschlagt, um Unterschiede im spezifischen Verhalten der Gerätegruppen zu verdeutlichen.

## 3 Ringversuch

### 3.1 Die „Nano Test Facility“ im IGF-Technikum Dortmund

**Bild 1** zeigt den schematischen Aufbau des Staubkanalprüfstands am IGF-Technikum in Dortmund. Dieser besteht aus einer 22 m<sup>3</sup> großen Sedimentationskammer und zwei Staubkanälen. Ein Kanal ist für die Aufgabe von Staub der einatembaren oder alveolengängigen Staubfraktion und ein Kanal für UFP vorgesehen. In diesem Ringversuch wurde nur der Kanal für UFP verwendet. Um die Hintergrundbelastung möglichst gering zu halten, wird die in den Kanal einströmende Luft durch einen Ultra-Low-Particulate-Air (ULPA)-Filter gereinigt. Ein Ventilator erzeugt in der Sedimentationskammer einen Unterdruck, der zu dem gewünschten Aerosolstrom durch den Staubkanal führt. Vier verschiedene Partikelgeneratoren (Atomizer, Funken-generator, Plasmaflamngenerator und Dieselmotor) können zur Erzeugung des Aerosols verwendet werden; diese sind teilweise auch kombinierbar (**Bild 2**).



Bild 2. Partikelgeneratoren und Staubkanäle.

### 3.2 Eingesetzte Messgeräte

Im MGU werden drei verschiedene Geräte für die Messung von UFP standardmäßig eingesetzt. Dabei handelt es sich um portable akkubetriebene Messgeräte: der Kondensationspartikelzähler CPC 3007 und der Diffusionsauflader Aerotrak 9000, beide von der Fa. TSI, Aachen, sowie der Diffusionsauflader DiSCmini von der Fa. Testo, Lenzkirch. Diese Geräte sollten auch für den Ringversuch verwendet werden. Als Referenzgeräte wurden der stationäre Kondensationspartikelzähler CPC 5.403 der Fa. Grimm, Ainring, und ein Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) von TSI verwendet [5].

Kondensationspartikelzähler (CPC) messen die Partikelanzahlkonzentration eines relativ großen Partikelgrößenbereichs (ca. 10 bis 1 000 nm), während Diffusionsauflader die Partikeloberflächenkonzentration ermitteln. Bei Letzteren ist der Messbereich stärker vom verwendeten Modell abhängig. Durch das Messprinzip bedingt haben CPC ihre Stärke bei niedrigeren Partikelkonzentrationen. So können auch einzelne Partikel im Messvolumen nachgewiesen werden. Hohe Konzentrationen, beim Modell 3007 in Höhe von ca. 100 000 cm<sup>-3</sup>, führen zu Koinzidenz und somit zu falschen Ergebnissen. Bei stationären CPC wird unter Verwendung weiterer Messprinzipien der Messbereich zu hohen Konzentrationen erweitert. Diffusionsauflader haben aufgrund der verwendeten Elektrometer eine vom Signal-Rausch-Verhältnis abhängige untere Messbereichsgrenze von einigen Hundert Partikeln pro Kubikzentimeter.

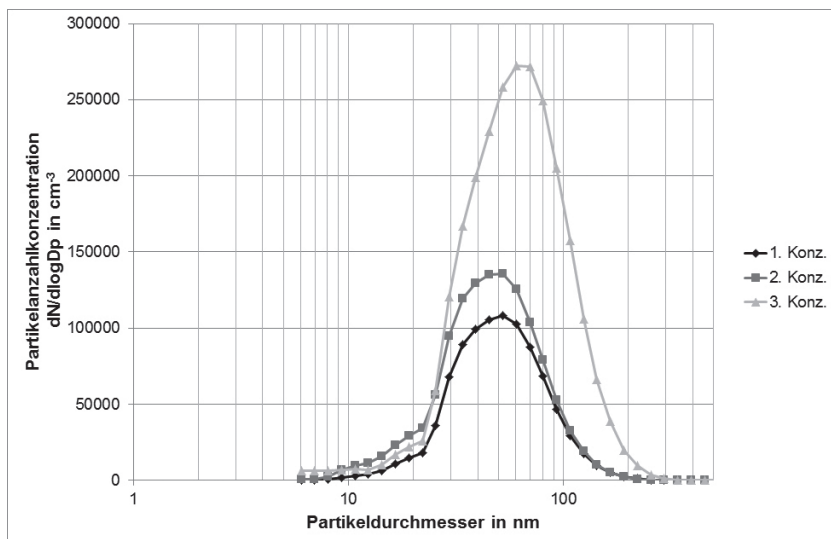


Bild 3. Partikelgrößenverteilung der NaCl-Aerosole.

Vorteil dieser Geräte gegenüber CPC ist die höhere obere Messbereichsgrenze, z. B. 1 000 000 cm<sup>-3</sup> für das Gerät DiSCmini. Dieses System gibt neben der Partikeloberfläche auch die berechnete Partikelanzahl und den mittleren Partikeldurchmesser an. Der Schwerpunkt des Ringversuchs lag auf der Partikelanzahlkonzentration, da diese Messgröße deutlich häufiger bei Arbeitsplatzmessungen betrachtet wird.

### 3.3 Versuchsbeschreibung und Durchführung

#### 3.3.1 Kochsalz als Aerosol

Im ersten Versuch wurde eine Konzentrationsreihe von drei Konzentrationen gefahren. Mit einem Atomizer wurde eine Natriumchlorid(NaCl)-Lösung zerstäubt und durch Vermischung mit trockener Luft ein Aerosol mit festen NaCl-Partikeln erzeugt. Die Partikelanzahlkonzentrationen betragen ca. 55 000, 100 000 und 165 000 Partikel pro Kubikzentimeter. Die Konzentrationen wurden so gewählt, dass sie in Bereichen liegen, die auch an Arbeitsplätzen vorkommen können. Zusätzlich kann das Verhalten des CPC 3007 bei Konzentrationen um seine obere Messbereichsgrenze untersucht werden. Der Modalwert der Partikelgrößenverteilung lag zwischen 50 und 70 nm bei einer unimodalen Verteilung (Bild 5). Der Graph ist auf die Klassenbreite der Partikelgröße (dN/dlogDp) normiert, wodurch die Partikelanzahlkonzentration mit einem gerätespezifischen Faktor skaliert. Bild 4 zeigt den Gerätevergleich bei der niedrigsten Partikelanzahlkonzentration von NaCl-Partikeln. Zieht man als Referenz das stationäre System Grimm CPC 5.403 heran, das im Vergleich zu den Handgeräten die höchste Genauigkeit aufweist, kann die Referenzkonzentration mit ca. 55 000 cm<sup>-3</sup> angegeben werden. Die portablen CPC-3007-Geräte zeigen Konzentrationen zwischen 48 000 und 57 000 cm<sup>-3</sup> an. Dies ist im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit von ± 20 %. Alle DiSCmini-Geräte zeigten deutlich höhere Werte an, diese bewegten sich zwischen 70 000 und 80 000 cm<sup>-3</sup> (Bild 5). Der Messbereich der Partikelanzahlkonzentration des DiSCmini ist abhängig von der Partikelgröße. Doch sowohl die Partikelgröße als auch die Partikelanzahlkonzentration liegen innerhalb der vom Hersteller angegebenen Einsatzgrenzen. Für beispielsweise 100 nm große Partikel reicht der Messbereich von ca. 500 bis 500 000 cm<sup>-3</sup>, bei noch kleineren

Partikeln wird der Messbereich zu größeren Werten verschoben. Das heißt, weder die Konzentration noch die Partikelgröße können die Unterschiede zwischen DiSCmini und CPC erklären.

#### 3.3.2 Zinkoxid als Aerosol

Um deutlich höhere Konzentrationen zu erreichen, musste ein anderer Partikelgenerator verwendet werden. Mit einem Plasmaflamngenerator wurden Zinkoxid (ZnO)-Partikel in einer Plasmaflamme erzeugt [6]. Mit diesem Generator konnten Partikelanzahlkonzentrationen von ca. 300 000 und von über 6 000 000 Partikel pro cm<sup>3</sup> erzeugt werden. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung lag bei 30 nm bei der niedrigeren und bei 20 nm bei der höheren Konzentration (Bild 6). In den Versuchen mit der höheren Konzentration zeigt sich, dass die Mess-

ergebnisse des CPC 5007 schon beim Erreichen der vom Hersteller angegebenen Messbereichsgrenze von  $100\ 000\ \text{cm}^{-3}$  nicht mehr so gut mit den Referenzgeräten übereinstimmen und bei noch höheren Konzentrationen die Abweichungen immer größer werden. Dabei wird weder angezeigt, dass die gemessene Konzentration außerhalb des Messbereiches liegt, noch erfolgt eine Fehlermeldung.

Die DiSCmini-Geräte zeigten auch bei den Versuchen mit höherer Konzentration eine deutliche Abweichung der Messwerte nach oben, im Vergleich mit den Referenzgeräten. Teilweise sind die Messwerte mehr als 50 % höher als die der Referenzgeräte.

Bei über 1 Millionen Partikeln pro  $\text{cm}^3$  zeigen beide Referenzgeräte (TSI FMPS und Grimm CPC) so große Unterschiede, dass kein Referenzwert mehr bestimmt werden konnte. Der CPC zeigte 1,6 Millionen Partikel pro  $\text{cm}^3$ , das FMPS 6,7 Millionen Partikel pro  $\text{cm}^3$  an.

Bei der Betrachtung der in der Lunge deponierten Oberfläche (Lung Deposit Surface Area, LDSA) wurden zwei Gerätetypen direkt miteinander verglichen; dies waren Aero-Trak 9000 und DiSCmini. Zu Beginn des Versuchs, bei relativ niedrigen Konzentrationen, lagen die Unterschiede der Messwerte innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit von  $\pm 20\ %$  (Bild 7). Bei sehr hohen Partikelkonzentrationen im letzten Teil des Versuchs überschritten die Abweichungen einzelner Geräte 50 % des Messwertes, obwohl diese Konzentration noch innerhalb des Messbereichs der Geräte liegt.

### 3.3.3 Dieselmotoremissionen und Kupferaerosole

Im zweiten Versuch wurden Dieselmotoremissionen (DME), ein Gemisch aus DME und nanoskaligen Kupfer(Cu)-Partikeln sowie Cu-Partikel gemessen, um das Verhalten der Geräte bei der Beaufschlagung mit einem Aerosolgemisch zu beobachten. Zu Beginn des Versuchs wurde mit einem Dieselmotor ein DME-Aerosol erzeugt. Nach einer Einlaufphase stellte sich eine konstante Partikelkonzentration in der Kammer ein. Die gemessene Referenzkonzentration betrug  $100\ 000\ \text{cm}^{-3}$ . Nach 25 min wurde ein Funkengenerator zur Erzeugung von Cu-Partikeln zugeschaltet. Die Gesamtpartikelanzahlkonzentration erhöhte sich innerhalb von 10 min auf ca.  $127\ 000\ \text{cm}^{-3}$ . Das generierte Misch-aerosol hatte wie erwartet eine bimodale Größenverteilung (Bild 8, Kurve mit Kreismarkierung), wobei DME die höhere Partikelanzahlkonzentration aufwies. Die Partikelgrößenverteilung zeigte einen Modalwert für das Cu-Aerosol von ca. 10 nm; für die DME-Partikel lag dieser bei ca. 60 nm.

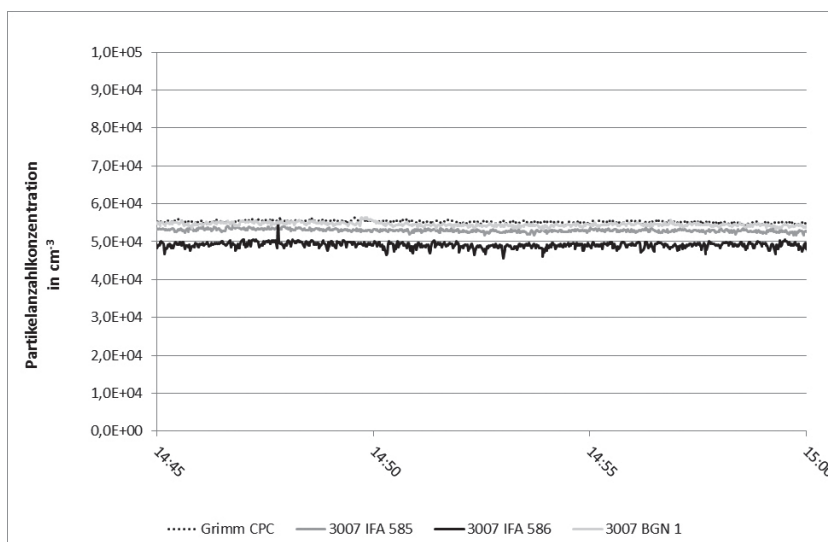


Bild 4. Gemessene Partikelanzahlkonzentrationen, verschiedene Messgeräte (NaCl-Aerosol, niedrige Konzentration).

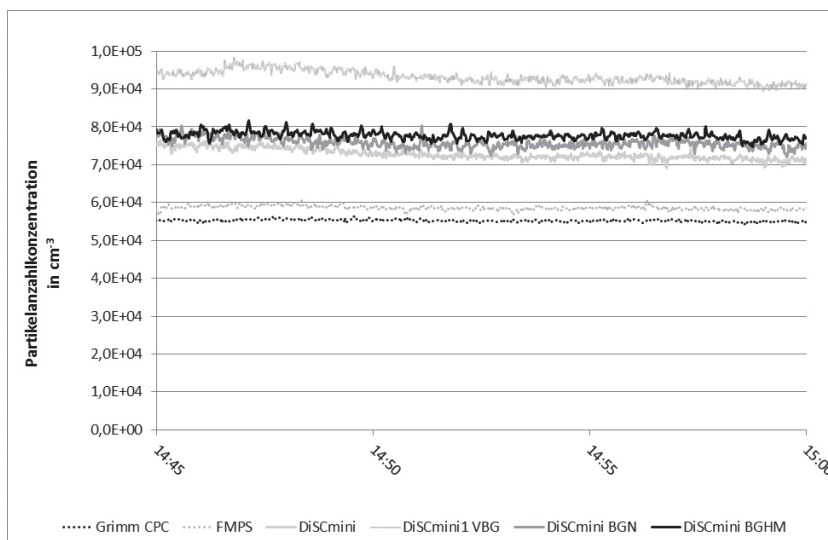


Bild 5. Gemessene Partikelanzahlkonzentrationen, DiSCmini (NaCl-Aerosol, niedrige Konzentration).

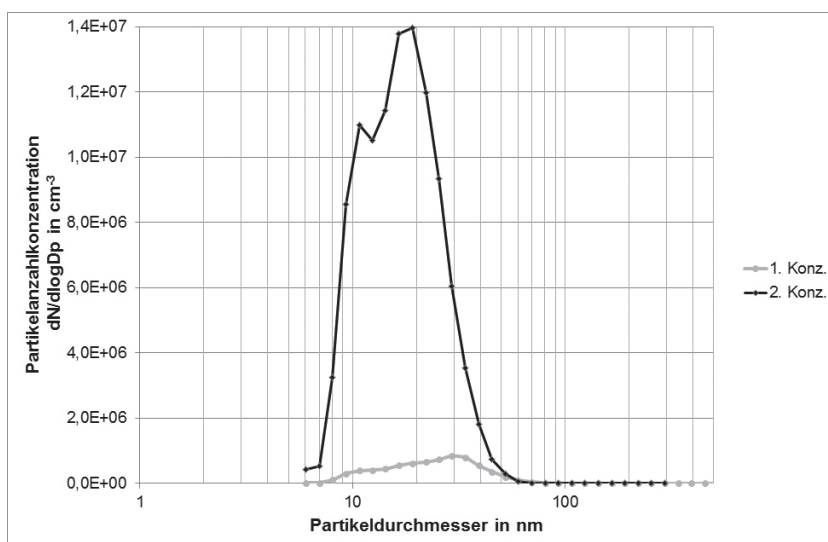


Bild 6. Partikelgrößenverteilung der ZnO-Aerosole.

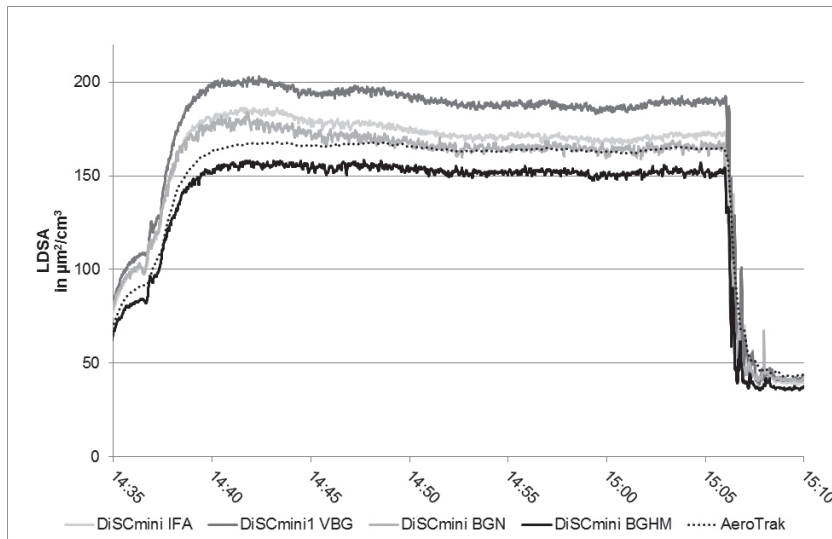


Bild 7. In der Lunge deponierte Oberfläche ultrafeiner Partikel, verschiedene Messgeräte (ZnO-Aerosol).

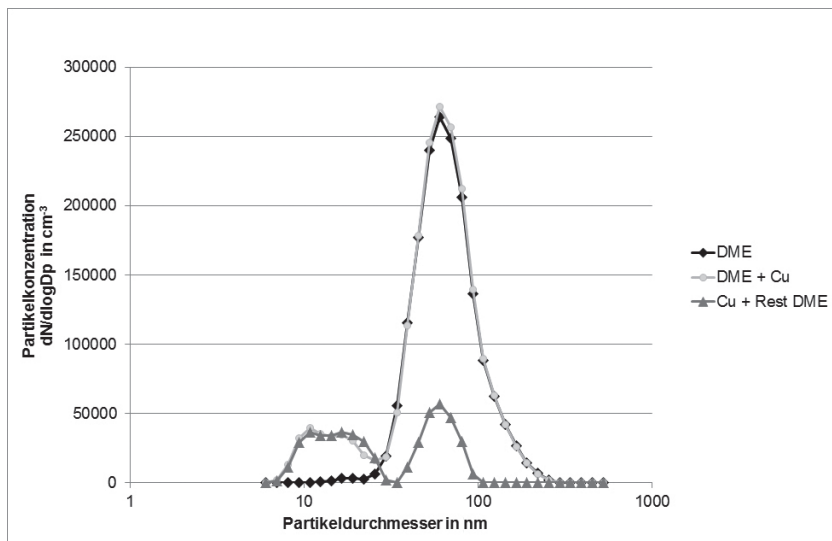


Bild 8. Partikelgrößenverteilung der Dieselmotoremissionen (DME) und Cu-Aerosole.

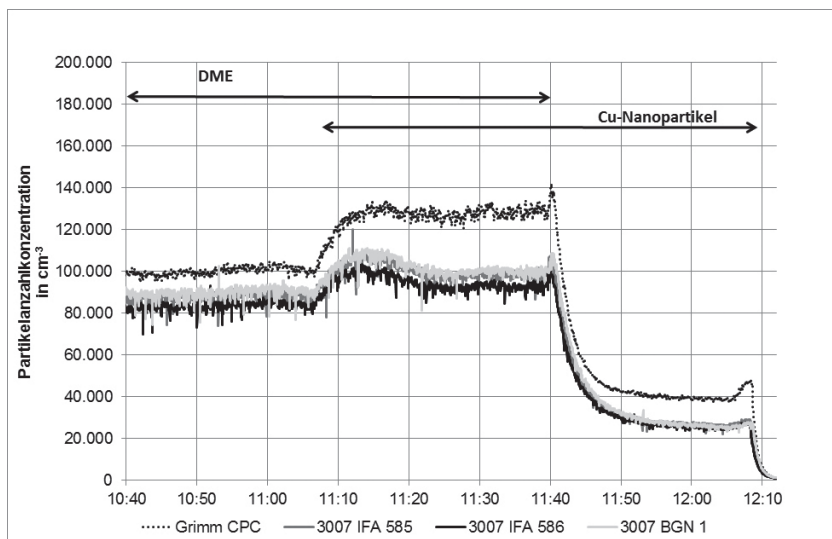


Bild 9. Gemessene Partikelanzahlkonzentrationen, verschiedene Messgeräte (DME und Cu-Aerosol).

Nach einer Stunde wurde der Dieselmotor abgestellt, sodass nur noch Cu-Partikel in die Kammer strömten. Daraufhin fiel die Konzentration auf  $40\ 000\ \text{cm}^{-3}$  ab (Bild 9 und 10). Um 12:08 Uhr wurden alle Partikelgeneratoren abgestellt und die Kammer mit gefilterter Luft gespült.

In diesem Versuch lagen alle Messwerte der CPC 3007 kontinuierlich unter dem Referenz-CPC. Eine Unterbewertung der Konzentration erfolgte schon bei DME – also unterhalb der oberen Messbereichsgrenze – und wurde im Verlauf der Messung noch größer. Die Unterbewertung der Cu-Partikel ist mit der Partikelgrößenverteilung zu erklären: Die Partikelgröße von 10 nm liegt außerhalb des Messbereiches des CPC 3007. Somit gibt es einen zweiten Punkt, der bei Messungen von UFP mit dem CPC 3007 zu beachten ist, um Unterbewertungen zu vermeiden.

Die Mehrzahl der DiSCmini zeigten für DME und den Mischstaub aus DME und Cu-Partikeln eine um ca. 20 % zu hohe Partikelkonzentration an. Ein Gerät jedoch ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzgeräten: Bei reinem Cu-Aerosol zeigten alle DiSCmini eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzgeräten. Ob die DiSCmini bei hohen Konzentrationen generell überbewerten oder die Ergebnisse von der Partikelart, -größe oder -form abhängen, müsste durch weitere Versuche geklärt werden.

Ein weiterer Diskussionspunkt war der Unterschied zwischen der Summe der beiden Einzelkonzentrationen für DME und Cu-Partikel einerseits und dem Mischstaub DME-Cu andererseits sowie die Verteilung der Partikel. Die Diskrepanz zwischen dem zu erwartenden Wert von  $140\ 000\ \text{cm}^{-3}$  und dem beobachteten Wert von  $127\ 000\ \text{cm}^{-3}$  für den Mischstaub könnte ein Maß für Agglomerations- und Koagulationseffekte sein. Zudem konnte auch nach Abschalten des Dieselmotors weiterhin die Verteilung von DME beobachtet werden. Wodurch diese Verschleppung des DME-Aerosols zustande kommt, konnte noch nicht geklärt werden. Vorversuche ließen jedenfalls auf geringe Verweilzeiten der Aerosole in der Kammer schließen.

#### 4 Fazit

Als Ergebnis sowohl des Ringversuchs als auch des Erfahrungsaustauschs zeigte sich, dass die Einsatzgrenzen besonders eines Gerätetyps (CPC 3007) besser beachtet werden müssen, da es außerhalb dieser Einsatzgrenzen zu einer Unterbewertung der Partikelkonzentration kommen kann. Besondere Aufmerksamkeit muss hier auf die Messbereichsgrenzen, sowohl bei der Partikel-

konzentration als auch bei der Partikelgröße, gelegt werden. Die Partikelkonzentration von maximal 100 000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  darf nicht überschritten werden und die zu erwartende Partikelgröße muss stets beachtet oder entsprechend ermittelt werden. Problematisch sind Arbeitsplatzmessungen mit höherer Exposition, da hier schnell der Messbereich überschritten werden kann und dann keine Warn- oder Fehlermeldung erfolgt, sondern lediglich deutlich zu niedrige Messwerte angezeigt werden. Daraus ergeben sich bei Arbeitsbereichen mit hohen Partikelanzahlkonzentrationen deutlich zu niedrige Mittelwerte einer Messung. Eine mögliche Lösung wäre der Einsatz eines Verdünners, ein passendes Gerät ist jedoch momentan nicht auf dem Markt verfügbar.

Mit dem DiSCmini-Gerät wurden bei hohen Konzentrationen häufig nach oben abweichende Messwerte im Vergleich zu den Referenzgeräten gefunden. Im Sinne der Prävention im Arbeitsschutz ist dies zwar nicht so gravierend wie die mögliche Unterbewertung beim CPC 3007, die Abweichungen dieses Gerätetyps sind aber in der Regel größer als beim CPC. Während des Erfahrungsaustauschs trat die Frage auf, ob eine breite Größenverteilung des Aerosols auch zu einer Überbewertung der Partikelkonzentration durch den DiSCmini führt. Dies konnte im Rahmen dieses Ringversuches nicht beantwortet werden. Daher ist vorgesehen, einen weiteren Ringversuch mit dem Schwerpunkt auf der Betrachtung von Aerosolen, die nicht nur UFP, sondern auch Partikel der alveolengängigen Fraktion enthalten, durchzuführen.

Um sicherzustellen, dass die Einsatzgrenzen beachtet werden und auch ein einheitliches Vorgehen bei der Auswertung erreicht wird, ist eine UVT-weite Fortführung des Austausches und Abgleichs der Vorgehensweisen sowie die Evaluation der eingesetzten Messtechnik zu empfehlen. Dies und die Erarbeitung gemeinsamer Handlungsanleitungen werden von den Teilnehmenden des Ringversuches gewünscht. Um auf möglichst breit gestreuten Erfahrungen als Basis für ein standardisiertes Vorgehen bei UFP-Messungen am Arbeitsplatz aufzubauen, sollte beispielsweise das Interesse von AUVa und Suva genutzt werden und Institutionen außerhalb des MGUs in den Prozess eingebunden werden.

## 5 Geforderte Maßnahmen

Aus Erfahrungsaustausch und Ringversuch ergaben sich folgende Anforderungen, die im Rahmen des MGU umgesetzt werden sollten:

- detaillierte Handlungsanweisungen zu jedem Messgerät bzw. jeder Anwendung,
- einheitliche Auswertung der im MGU eingesetzten direkt anzeigenden Messgeräte,
- Erarbeitung einheitlicher Auswertestrategien in Bezug auf Ergebnisinterpretationen und Bewertungsmaßstäbe,
- Verbesserung der Messtechnik durch Optimierungen bestehender oder neuer Geräte

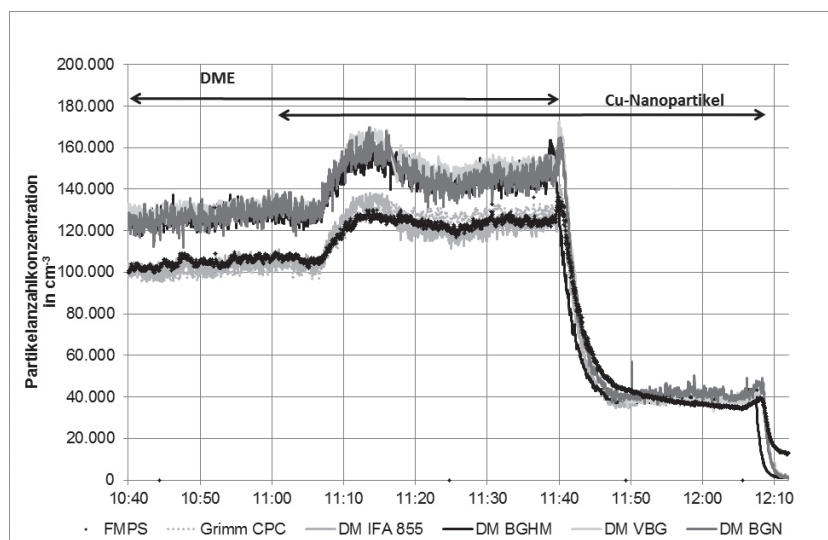


Bild 10. Gemessene Partikelanzahlkonzentrationen, DiSCmini (DME und Cu-Aerosol).

- Verbesserungen und Vereinfachungen der Datenerfassung im MGU
- Fortführung des Erfahrungsaustauschs (zweiter Ringversuch).

## Danksagung

Für die gute und effiziente Zusammenarbeit danken wir herzlich den Beteiligten des Erfahrungsaustauschs, Frau Hacke (BGN), Herrn Böhm (VBG), Herrn Klein, Herrn Weiß, Herrn Flockenhaus (alle BGHM) und Frau Vossen (IFA).

## Literatur

- [1] Asbach, C.; Kaminski, H.; von Barany, D.; Kuhlbusch, T. A.; Monz, C. et al.: Comparability of portable nanoparticle exposure monitors. *Ann. Occup. Hyg.* 56 (2012) Nr. 5, S. 606-621.
- [2] Kaminski, H.; Kuhlbusch, T. A. J.; Rath, S.; Götz, U.; Sprenger, M. et al.: Comparability of mobility particle sizers and diffusion chargers. *J. Aerosol Sci.* 57 (2013), S. 156-178.
- [3] Möhlmann, C.: Vorkommen ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 65 (2005) Nr. 11/12, S. 469-471.
- [4] Pelzer, J.; Lehnert, M.; Lotz, A.; Möhlmann, C.; Van Gelder, R.: Messungen der Anzahlkonzentration feiner und ultrafeiner Partikel im Schweißrauch. Vergleich mit gravimetrisch ermittelten Massekonzentrationen im Rahmen des WELDOX-Projekts. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 71 (2011) Nr. 9, S. 389-392.
- [5] Pelzer, J.; Bischof, O.; van den Brink, W.; Fierz, M.; Gnewuch, H. et al.: Geräte zur Messung der Anzahlkonzentration von Nanopartikeln – Aktueller Überblick über die Messtechnik. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 70 (2010) Nr. 11, S. 469-477.
- [6] Monsé, C.; Monz, C.; Dahmann, D.; Asbach, C.; Stahlmecke, B.; Lichtenstein, N.; Buchwald, K.-E.; Merget, R.; Bünger, J.; Brüning, T.: Vorbereitungen zur Untersuchung gesundheitlicher Effekte von Zinkoxidpartikeln. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 73 (2013) Nr. 4, S. 144-148.