

Messungen der Anzahlkonzentration feiner und ultrafeiner Partikel im Schweißrauch

Vergleich mit gravimetrisch ermittelten Massekonzentrationen im Rahmen des WELDOX-Projekts

J. Pelzer, M. Lehnert, A. Lotz, C. Möhlmann, R. Van Gelder, A. Goebel, M. Berges, T. Weiss, B. Pesch, T. Brüning

Zusammenfassung Ultrafeine Partikel erhalten im Arbeitsschutz wachsende Beachtung. Daher sollte das Vorkommen dieser Partikelfraktion an realen Schweißere Arbeitsplätzen genauer untersucht werden. Zur Bewertung der Exposition gegenüber den verschiedenen Partikelgrößenfraktionen des Schweißrauchs wurde neben den etablierten massebezogenen Messverfahren an ausgewählten Schweißere Arbeitsplätzen auch größen aufgelöst die Anzahlkonzentration von ultrafeinen Partikeln und deren Aggregaten und Agglomeraten bestimmt. Inwieweit die unterschiedliche Metrik Einfluss auf die Bewertung der Messergebnisse hat, war eine Fragestellung des Projekts. Es zeigte sich, dass hohe Massekonzentrationen nicht unbedingt mit hohen Gesamtanzahlkonzentrationen korrespondieren. Eine Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße von der Massekonzentration konnte jedoch nachgewiesen werden. Somit muss die Partikelgrößenverteilung als weitere wichtige Größe bei der Messung ultrafeiner Partikel im Schweißrauch beachtet werden.

Measurements of the number concentration of fine and ultrafine particles in welding fumes – comparison with the gravimetrically obtained mass concentrations in connection with the WELDOX project

Abstract Growing attention is being devoted to ultrafine particles in occupational safety and health. The presence of this particle fraction has therefore been investigated more closely at real welding workplaces. To assess exposure to the various particle size fractions of welding fumes, the established mass-related measurement methods were supplemented with the size-resolved determination of the number concentration of ultrafine particles and their aggregates and agglomerates at selected welding workplaces. One of the aims of the project was to determine the extent to which the different measuring methods affect the assessment of the measurement results. It was shown that high mass concentrations do not necessarily correlate with high total number concentrations. Nevertheless, the dependence of mean particle size on mass concentration was demonstrated. This means that attention must be given to the particle size distribution as a further important variable when measuring ultrafine particles in welding fumes.

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Pelzer, Dipl.-Phys. Carsten Möhlmann, Dipl.-Chem. Rainer Van Gelder, Dipl.-Ing. Arno Goebel, Dr. rer. nat. Markus Berges, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dr. med. Martin Lehnert, Dipl.-Stat. Anne Lotz, Dr. rer. nat. Tobias Weiss, Priv. Doz. Dr. rer. medic. Beate Pesch, Prof. Dr. med. Thomas Brüning, Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA), Bochum.

1 Einleitung

Während des Schweißprozesses können, sowohl bezogen auf die Masse als auch auf die Partikelanzahl, große Mengen an Rauchen entstehen. Diese Schweißrauche bestehen größtenteils aus submikrometer großen Partikeln [1]. In den letzten Jahren treten diese Partikelfraktionen immer mehr in den Fokus des Arbeitsschutzes. Weiterentwicklungen in der Messtechnik und -strategie ermöglichen genauere Charakterisierungen der Schweißrauche [2; 3]. Im Rahmen des WELDOX-Projekts wurden Expositionsmessungen der ultrafeinen und alveolengängigen Staubfraktion (A-Fraktion) des Schweißrauchs durchgeführt, um die gesamte Bandbreite der Partikelgröße erfassen zu können. Die Partikelanzahlkonzentration, Partikelgröße und die Massekonzentration wurden verglichen sowie die Abhängigkeit vom verwendeten Schweißverfahren dargestellt.

Ziel der gesamten Querschnittstudie WELDOX [4; 5] war die Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen granulären biobeständigen Stäuben bzw. Metallen im Schweißrauch und biologischen Effekten. Betrachtet wurden jeweils die ultrafeine, die alveolengängige (A-Fraktion) und die einatembare (E-Fraktion) Staubfraktion des Schweißrauchs. Dazu wurden die Exposition gegenüber Schweißrauch insbesondere auch an stark belasteten Arbeitsplätzen gemessen und mögliche Einflüsse der Umgebungsbedingungen untersucht.

2 Methode

Personengetragene Messungen der einatembaren und alveolengängigen Fraktion [6] des Schweißrauchs erfolgten bei 243 Schweißern während einer Arbeitsschicht. Als Messsysteme wurden das PGP-GSP-System und das PGP-EA-System mit je 3,5 l/min eingesetzt [7 bis 9]. Die Probenräger wurden wenn möglich am Schweißerschutzschirm montiert, um den Atembereich der Probanden hinter dem Schirm zu erfassen. Aus den gravimetrisch ermittelten Staubmassen und den Probenahmevolumina wurden die A- und E-Staubkonzentrationen berechnet. Die Arbeitsbedingungen wurden u. a. fotografisch dokumentiert.

Neben den beschriebenen personengetragenen Messungen wurden für diese Studie bei 33 Schweißere Arbeitsplätzen parallel stationär die einatembare und alveolengängige Staubfraktion mit den Systemen GSP 10 und FSP 10 [7; 10] gemessen. Mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) [11] wurden die größen aufgelöste Partikelanzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel und deren Agglomerate und Aggregate bestimmt. Der eingestellte Messbereich des SMPS reichte von 14 bis ca. 650 nm, sodass die von europäischen Arbeitsschutzinstituten getroffene Konvention zur Messung ultrafeiner Partikel [12] erfüllt wird. Die Probenahme für das

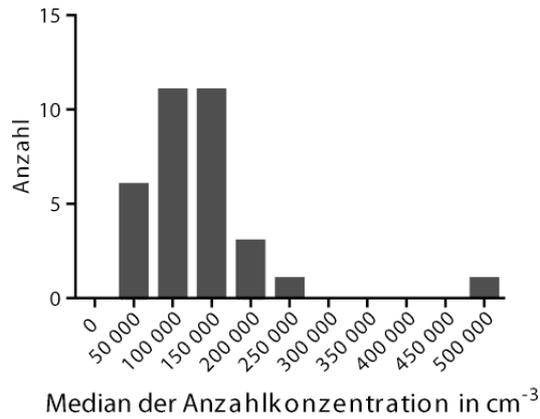


Bild 1. Häufigkeitsverteilung der Partikelanzahlkonzentration (2-h- bis 4-h-Mittelwerte).

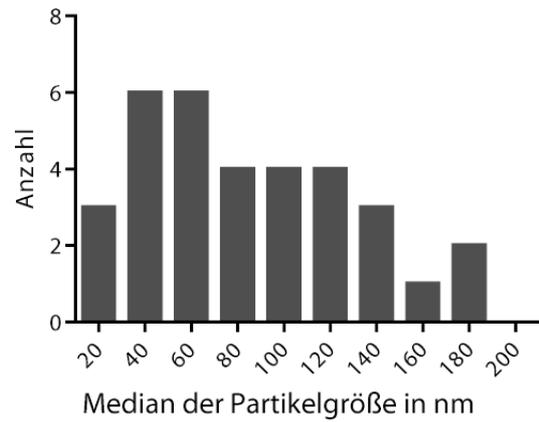


Bild 3. Häufigkeitsverteilung des Medians der Partikelgröße (elektrischer Mobilitätsäquivalentdurchmesser).

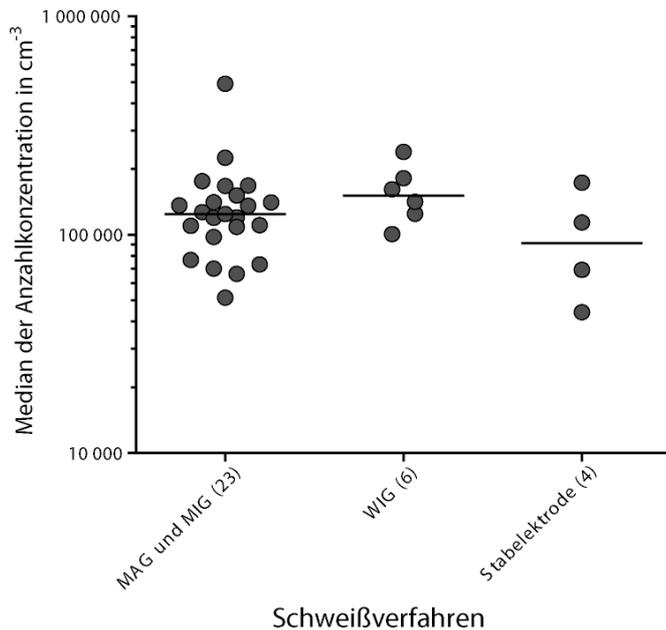


Bild 2. Messwerte der Partikelanzahlkonzentration je Schweißverfahren (2-h- bis 4-h-Mittelwerte).

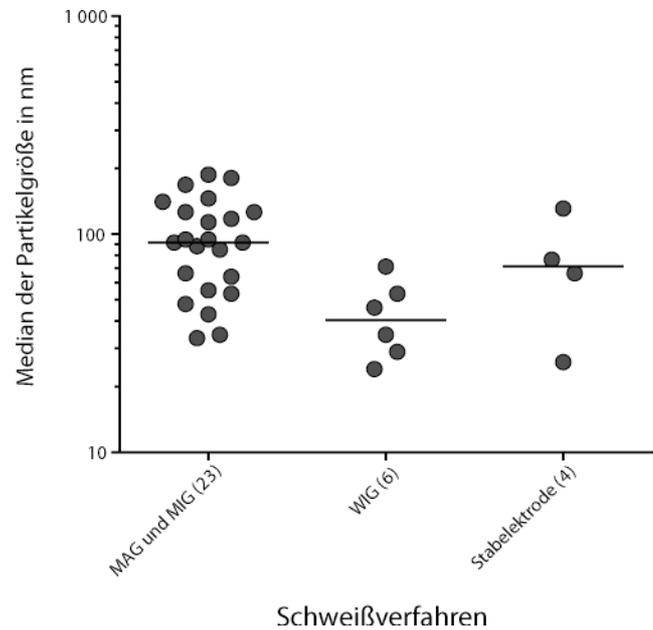


Bild 4. Messwerte des Partikeldurchmessers je Schweißverfahren.

SMPS erfolgte direkt neben den stationären gravimetrischen Messungen; so waren die Probenahmebedingungen für beide Verfahren vergleichbar. Die Messdauer betrug jeweils mindestens zwei und bis zu vier Stunden. Somit konnten mehr als 25 Partikelgrößenverteilungen je Arbeitsplatz aufgenommen werden, aus denen dann wiederum ein Mittelwert gebildet wurde. Aufgrund der Umgebungsbedingungen an Schweißerarbeitsplätzen konnte das SMPS nur diskontinuierlich eingesetzt werden, nach der Aufnahme einer Größenverteilung (Scanzeit 120 s) musste immer eine Pause (105 s) folgen.

3 Ergebnisse der Partikelanzahlmessungen

Von den 35 Messungen der ultrafeinen Partikelfraktion fanden 14 in Werften, die übrigen in Betrieben des Anlagen-, Maschinen- und Werkzeugbaus statt. **Bild 1** zeigt die Häufigkeitsverteilung der gemittelten Anzahlkonzentrationen. Etwa 90 % aller Messungen weisen einen Median der Partikelanzahlkonzentration zwischen 50 000 und 200 000 Partikel/cm³ auf. Trotz der stark variierenden Bedingungen, wie Lichtbogenzeit, Lüftung, Raumgröße und vor allem Abstand

zwischen Messsystem und Schweißpunkt führten die langen Mittelungsintervalle zu dieser schmalen Häufigkeitsverteilung der Anzahlkonzentrationen. Das IFA-Handbuch gibt Beispiele für die Variabilität der Anzahlkonzentration bei tätigkeitsbezogenen Messungen [15].

Eine deutliche Abhängigkeit des Medians der Partikelanzahlkonzentration vom Schweißverfahren konnte nicht gezeigt werden. **Bild 2** zeigt den Median der Anzahlkonzentrationen der einzelnen Messungen, aufgetragen über dem jeweils verwendeten Schweißverfahren.

Das Maximum der Häufigkeitsverteilung der Partikelgröße lag zwischen 40 und 60 nm (**Bild 3**). Die dargestellte Partikelgröße beschreibt den Median des vom SMPS ermittelten elektrischen Mobilitätsäquivalentdurchmessers.

Im Gegensatz zur Partikelanzahl zeigte sich bei der Partikelgröße eine tendenzielle Abhängigkeit vom eingesetzten Schweißverfahren (**Bild 4**). Während der Median des Partikeldurchmessers bei MAG- und MIG-Schweißverfahren (Metall-Aktivgas, Metall-Inertgas) bei ca. 90 nm liegt, konnte während des WIG-Schweißens (Wolfram-Inertgas) ein Median des Partikeldurchmessers von ca. 40 nm bestimmt werden.

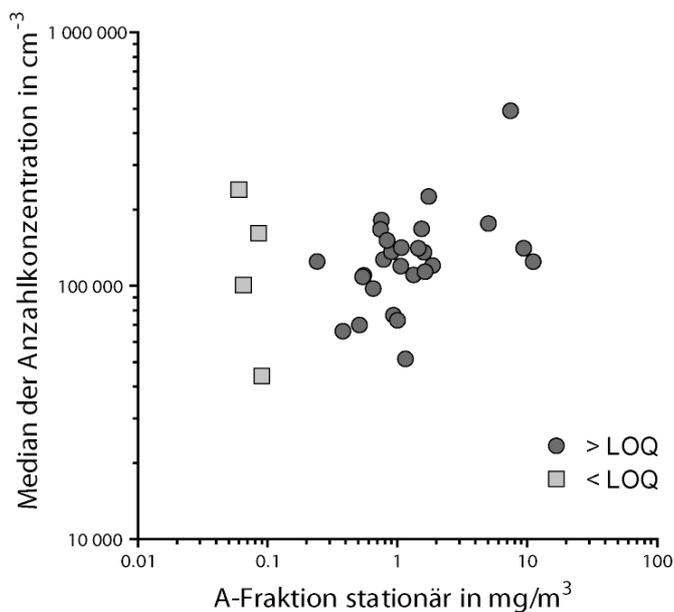


Bild 5. Anzahlkonzentration in Partikel pro cm^3 (gemessen mit SMPS) aufgetragen über der Massenkonzentration in mg pro m^3 (gemessen mit FSP 10, gravimetrisch). LOQ: Limit Of Quantitation/Bestimmungsgrenze

Von Interesse ist der Vergleich der bisher üblichen gravimetrischen Messung der A-Fraktion des Schweißbrauchs mit den Ergebnissen der Partikelanzahlmessung. Da sich beide Verfahren im Hinblick auf das Spektrum der berücksichtigten Partikelgrößen deutlich unterscheiden (Messbereich des SMPS: 14 bis 650 nm, A-Fraktion < 11 000 nm), könnte die Aussagekraft des Vergleichs jedoch begrenzt sein. In Bild 5 ist die mit dem SMPS gemessene Partikelanzahlkonzentration gegen die gravimetrisch bestimmte Massenkonzentration aufgetragen. Eine deutliche Korrelation ist hier nicht zu erkennen ($R^2 = 0,25$).

Wird jedoch die Partikelgröße (elektrischer Äquivalentdurchmesser) gegen die Massenkonzentration aufgetragen (Bild 6) und eine Modellierungsgleichung verwendet, die den geometrischen Zusammenhang zwischen Partikeldurchmesser und Partikelvolumen bzw. Massen beinhaltet, erkennt man mit einem R^2 von 0,81 eine deutlich bessere Korrelation zwischen der größen aufgelösten Anzahl- und der gravimetrisch gemessenen Massenkonzentration in der A-Staub-Fraktion. Die Modellierungsgleichung

$$y = a \cdot \sqrt[3]{x} + b$$

spiegelt die physikalische Abhängigkeit von Masse x und Durchmesser y wider.

Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass man bei den untersuchten Schweißverfahren mit einfachen Partikelzählern, die nur eine Anzahlkonzentration bestimmen, nicht auf die Massenkonzentration schließen kann. Ebenso ist es nicht möglich, nur aus der Massenkonzentration alter Datenbestände eine Anzahlkonzentration abzuleiten. Ob über den Median der Partikelgröße eine direkte Ableitung der Massenkonzentration möglich ist, müsste eine weitere Studie nachweisen.

4 Diskussion und Ausblick

Die WELDOX-Studie zeigt, dass größen aufgelöste Expositionsmessungen der Partikelanzahlkonzentration mittels

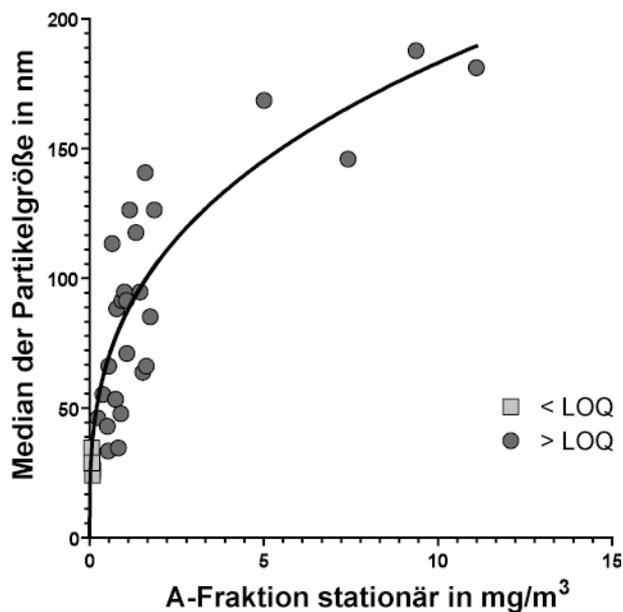


Bild 6. Partikelgröße über Massenkonzentration aufgetragen.

SMPS auch an realen Schweißere Arbeitsplätzen möglich sind. Die hohen und schnellen Konzentrationsschwankungen führen jedoch zu systembedingten Ungenauigkeiten der Messmethode, wie sie auch von *Plitzko* et al. beschrieben sind [14], und erfordern Mittelungsintervalle und somit lange Messzeiten. Die Zuverlässigkeit des Messsystems (SMPS 3936 L, Fa. TSI) hat sich auch unter erschwerten Bedingungen z. B. auf Werften erwiesen. Die Einsatzgrenzen des Gerätes, besonders in Bezug auf die zulässigen Temperaturen (10 bis 35 °C), müssen beachtet werden, da es sonst zum Ausfall des SMPS kommen kann. Durch die Größe des Gerätes ist eine personennahe Messung schwierig und nicht immer möglich.

Die Bestimmung der Anzahlkonzentration allein reicht nicht aus, um Vergleiche mit den bisher üblichen gravimetrischen Messungen abzuleiten, da für die Ableitung einer Korrelation zwischen Anzahl- und Massenkonzentration die Partikelgrößenverteilung des Aerosols die relevante Größe ist. Im Zusammenhang mit der Diskussion einer partikulären Wirkung ultrafeiner Aerosole sollte man die hohen Anzahlkonzentrationen bei gleichzeitig geringen Partikeldurchmessern, die beim WIG-Schweißen entstehen, weiter beachten. Insbesondere ist die Massenkonzentration dieser Stäube aufgrund der geringen Partikelgröße niedriger als bei anderen Schweißverfahren [15]. Welcher Parameter (Partikelanzahlkonzentration, die Massenkonzentration oder gar die Oberflächenkonzentration) in Zukunft auch im Hinblick auf die biologische Wirksamkeit die relevante Messgröße sein wird, ist noch unklar [16].

Danksagung

Die Autoren danken allen Mitgliedern der WELDOX-Projektgruppe für ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Stephenson, D.; Seshadri, G.; Veranth, J. M.: Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHA J.* 64 (2003) Nr. 4, S. 516-521.
- [2] Brouwer, D. H.; Gijsbers, J. H. J.; Lurvink, M. W. M.: Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: Exploring sampling techniques and strategies. *Ann. Occup. Hyg.* 48 (2004) Nr. 5, S. 439-453.
- [3] Zimmer, A. T.; Biswas, P.: Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes. *Aerosol Sci.* 32 (2001), S. 993-1008.
- [4] Weiß, T.; Pesch, B.; Spickenheuer, A.; Gutwinski, E.; Lehnert, M.; Raulf-Heimsoth, M.; Kendzia, B.; Brüning, T.: Der Zusammenhang zwischen innerer und äußerer Belastung mit Metallen beim Schweißen niedrig- und hochlegierter Stähle – Ergebnisse aus der WELDOX-Studie. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* (2011) Nr. 3, S. 140.
- [5] Lehnert, M.; Pesch, B.; Spickenheuer, A.; Kendzia, B.; Weiss, T.; Punkenburg, E.; Pelzer, J.; Heinze, E.; Hartwig, A.; Brüning, T.: Schweißrauchexpositionen in der WELDOX-Studie. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* (2011) Nr. 3, S. 148.
- [6] DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel. Berlin: Beuth 1993.
- [7] Riediger, G.: Geräte zur Probenahme der einatembaren Staubfraktion (E-Staub) (Kennzahl 3010). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 27. Lfg. X/2001. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditigital.de/3010
- [8] Georg, H.; Heimann, M.: Vergleichsmessungen mit Personal Air Samplern zur Erfassung der einatembaren Partikelfraktion (Kennzahl 3014). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 29. Lfg. IX/2002. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditigital.de/3014
- [9] Möhlmann, C.: Simultane personenbezogene Probenahme der E- und A-Fraktionen in Schweißrauchen (Kennzahl 3025). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 37. Lfg., X/2006. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditigital.de/3025
- [10] Siekmann, H.: Geräte zur Probenahme der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staub) (Kennzahl 3020). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 21. Lfg. X/1998. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditigital.de/3020
- [11] Pelzer, J.; Bischof, O.; van den Brink, W.; Fierz, M.; Gnewuch, H.; Isherwood, H.; Kasper, M.; Knecht, A.; Krinke, T.; Zerrath, A.: Geräte zur Messung der Anzahlkonzentration von Nanopartikeln – Aktueller Überblick über die Messtechnik. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 70 (2010) Nr. 11/12, S. 469-477.
- [12] Möhlmann, C.: Ultrafeine (Aerosol)-Teilchen und deren Agglomerate und Aggregate (Kennzahl 412/5). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 38. Lfg. IV/2007. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditigital.de/0412.5
- [13] Möhlmann, C.: Ultrafeine Aerosole am Arbeitsplatz. Sicherheitstechnisches Informations- und Arbeitsblatt (Kennzahl 120130). In: IFA-Handbuch Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz. 2. Aufl. Lfg. 2, IX/2007. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt 2003 – Losebl.-Ausg. www.ifa-handbuchdigital.de/120130
- [14] Plitzko, S.; Wehner, B.; Johnen, A.: Qualitative und quantitative Erfassung von Schweißrauchen als Grundlage für die Bewertung der inneren Manganbelastung (Biomonitoring). *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 66 (2006) Nr. 1/2, S. 25-32.
- [15] Berufsgenossenschaftliche Informationen: Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren (BGI 593). S. 62 ff. Hrsg.: Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (VMBG), Düsseldorf 2008.
- [16] Oberdörster, G.: Toxicology of ultrafine particles. *In vivo studies.* *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 358 (2000), S. 2719-2740.