

Untersuchung der Exposition von Schweißern gegenüber ultrafeinen Partikeln im Schweißrauch bei Änderung der Schweißparameter und der arbeitsplatzspezifischen Faktoren mithilfe der PIMEX-Methode

Die Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln (UFP) im Schweißrauch war in den vergangenen Jahren wiederholt ein Schwerpunkt im Themenfeld „Schadstoffe in der Schweißtechnik“ des DGUV-Sachgebiets Oberflächentechnik und Schweißen, Fachbereich Holz und Metall (FBHM). In mehreren Fachbeiträgen in „Schweißen und Schneiden“ wurde über die Ergebnisse verschiedener Laboruntersuchungen und Sondermessprogramme berichtet, die sich inhaltlich mit der Charakterisierung von UFP im Schweißrauch auseinandersetzen.

Im vergangenen Jahr ergaben sich im FBHM weitere offene Fragen hinsichtlich der Exposition des Schweißers gegenüber UFP. Insbesondere der Einfluss verschiedener Schweißparameter und arbeitsplatzspezifischer Faktoren, zum Beispiel Spannung, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Körperhaltung, waren von besonderem Interesse. Dies war Anlass für weitere, nachfolgend beschriebene messtechnischen Untersuchungen, die mit der sogenannten PIMEX-Methode (picture mixed exposure) durchgeführt wurden. Das PIMEX-System bietet die Möglichkeit, die relevanten Einflussfaktoren für die UFP-Exposition systematisch zu betrachten. Das Untersuchungsziel war, hierdurch die Arbeitsbe-

dingungen und Einflussfaktoren zu optimieren und die Belastung durch UFP für die Schweißer zu minimieren.

Die vom FBHM initiierten und begleiteten Untersuchungen fanden wie bei den vorhergehenden Erhebungen mit Unterstützung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (GSI SLV) Hannover statt. Dazu gehörte die Bereitstellung des schweißtechnischen Labors, der Schweißgeräte sowie der Werkstoffe und Hilfsmittel. Die Schweißarbeiten wurden von einem im Labor tätigen Schweißlehrer durchgeführt. Die PIMEX-Observationen erstellten Fachleute der BGHM-Abteilung Gefährdungsermittlung/Messtechnik.

Beschreibung der verwendeten Messsysteme

Mithilfe von PIMEX können tätigkeitsbezogene Gefährdungen, beispielsweise durch Staub, Schweißrauche oder Lösemittel, visualisiert werden. Die vorliegende Belastung wird hierzu mit einem direktanzeigenden Messgerät erfasst und der Arbeitsablauf zeitgleich über mehrere Minuten mit einer Videokamera aufgezeichnet. Beide Signale werden über eine spezielle Software synchronisiert und nachbearbeitet. In Bild 1 ist diese prinzipielle Funktionsweise der PIMEX-Methode dargestellt.

Die Messdaten werden als Diagramme in den PIMEX-Videofilm eingebildet, somit ist parallel zum Video-Signal die Exposition während der Tätigkeit sichtbar. Die Observation ist jederzeit abrufbar und steht für eine nachträgliche Analyse zur Verfügung. Seit Kurzem sind auch die direktanzeigenden Partikelmesssysteme DISCmini (diffusion size classifier miniature) des Unternehmens Matter Aerosol und das FMPS (fast mobility particle sizer) Typ 3091 des Unternehmens TSI in das PIMEX-System integriert. Mit beiden Messsystemen können die Anzahlkonzentration und die Größe ultrafeiner Partikel mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s bestimmt werden. Neben der zeitgleichen Erfassung dieser Messgrößen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, sich die spezifische Partikeloberflächenkonzentration LDSA (lung deposited surface area) berechnen zu lassen. Diese beschreibt die „aktive“ Oberfläche der eingeatmeten UFP, die im alveolaren Bereich der Lunge abgeschieden werden.

Das kleinere DISCmini kann am Schweißer befestigt werden und ermöglicht mit Hilfe eines Schlauchs die Entnahme der Probe unter dem Schweißerschutzhelm. Das FMPS ist ein stationäres Messsystem, bei dem die Probenahme durch einen Schlauch an der Schweißrauchquelle durchgeführt wird, und das auch eine Messung der Hintergrundbe-



Bild 1 • Funktionsprinzip der PIMEX-Methode.

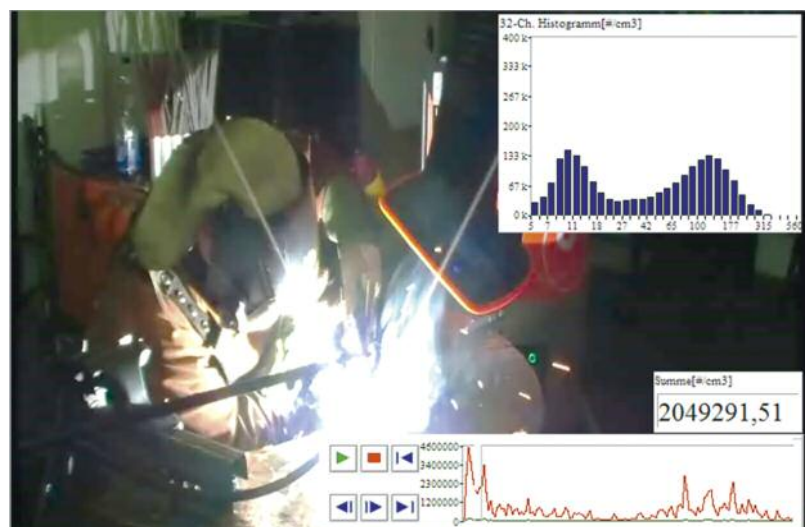


Bild 2 • Ausschnitt einer PIMEX-Observation (MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode; Messsystem FMPS).



Bild 3 • Untersuchter Schweißvorgang (MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode).



Bild 4 • Die MAG-Auftragschweißnähte.

lastung ermöglicht. In Bild 2 ist der Ausschnitt einer PIMEX-Observation während eines untersuchten Schweißvorgangs dargestellt. Die eingebetteten Diagramme zeigen die aktuelle Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung sowie den zeitlichen Verlauf der Partikelanzahlkonzentration.

Durchführung der Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurde das Metall-Aktivgas(MAG)-Auftragschweißen mit Massiv- und Fülldrahtelektrode ausgewählt. Beim Schweißen mit Massivdrahtelektrode wurden die Versuchsreihen für jede Lichtbogenart (Kurz-, Lang-, Sprühlichtbogen) durchgeführt. Beim Schweißen mit Fülldrahtelektrode wurde zwischen der Füllungsart (basisch, Rutil) unterschieden.

Jeder untersuchte Schweißvorgang dauerte 3 min. Dabei wurden in sitzender Position durchgehend mehrere Schweißraupen auf ein Stahlblech (300 mm x 125 mm x 10 mm) aufgetragen, Bild 3 und 4. Während des Schweißvorgangs wurde ein mobiles Schweißrauchabsauggerät des Unternehmens Kemper (Typ MaxiFil mit Schweißrauchabscheideklasse W3, mit IFA-Zertifikat) verwendet.

Für die messtechnischen Ermittlungen wurden in allen Versuchen beide UFP-Messsysteme (DISCmini, FMPS) gleichzeitig eingesetzt. Ein Messsystem kam im Rahmen der PIMEX-Observation zur Anwendung und war über eine Schnittstelle direkt mit dem PIMEX-Rechner verbunden. Mit dem anderen Messsystem wurde synchron dazu ebenfalls eine Messung durchgeführt, und die Messdaten wurden im Messgerät abgespeichert.

Nach jedem Messdurchgang wurde ein Schweißparameter oder ein arbeitsplatz-

spezifischer Faktor geändert und der Versuch wiederholt. Die anderen Parameter bzw. Faktoren wurden konstant gehalten. In Tabelle 1 sind die eingesetzten Lichtbogenarten, Werkstoffe, Hilfsstoffe und Varia-

tionen der Parameter und Faktoren zusammengefasst. Tabelle 2 zeigt die chemische Zusammensetzung der verwendeten Fülldrähte und Schweißrauche (laut Herstellerangaben).

Tabelle 1 • Lichtbogenarten, Werkstoffe, Hilfsstoffe und Parameter/Faktoren.

MAG-Auftragschweißen mit Massivdrahtelektrode	
<ul style="list-style-type: none"> Zusatzwerkstoff: Schweißdraht G4 Si1, Durchmesser 1 mm Grundwerkstoff: unlegiertes Stahlblech S235; EN ISO 14341-A-G46 Schutzgas: CO₂/Ar 18/82; 10 bis 12 l/min 	
Variation der Lichtbogenart:	
Kurzlichtbogen (KLB): 20 V; 5 m/min	
Langlichtbogen (LLB): 24,3 V; 8,7 m/min	
Sprühlichtbogen (SLB): 32 V; 11 m/min	
Variation des Schweißparameters	Spannung (zum Beispiel KLB: 20 V bis 20,5 V)
	Drahtvorschubgeschwindigkeit (zum Beispiel KLB: 7 m/min bis 7,5 m/min)
MAG-Auftragschweißen mit Fülldrahtelektrode	
<ul style="list-style-type: none"> Zusatzwerkstoffe: <ul style="list-style-type: none"> a) basischer Fülldraht OK Tubrod 15.06 (ESAB), Durchmesser 1,2 mm b) Rutilfülldraht OK Tubrod 15.13 (ESAB), Durchmesser 1,2 mm Grundwerkstoff: unlegiertes Stahlblech S235; EN ISO 14341-A-G46 Schutzgas: CO₂/Ar 18/82; 10 bis 12 l/min 	
Variation der Füllungsart (basisch, Rutil)	
Variation des Schweißparameters	Spannung (zum Beispiel für basische Füllung: 27 V bis 27,5 V)
	Drahtvorschubgeschwindigkeit (zum Beispiel für basische Füllung: 8 m/min bis 8,5 m/min)
Variation des arbeitsplatzspezifischen Faktors	Erfassungselement (Entfernung zur Schweißstelle, Form)
	Kopf-/Körperposition gegenüber Schweißrauchsäule (zum Beispiel in der Rauchsäule, außerhalb der Rauchsäule)

Tabelle 2 • Chemische Zusammensetzung der Zusatzwerkstoffe und Schweißrauche (MAG-Auftragschweißen mit Fülldrahtelektrode).

Zusatzwerkstoff (ZW)	chemische Zusammensetzung	
	Zusatzwerkstoff (ZW)	Schweißrauch
basischer Fülldraht: EN ISO 17632 A:T42 61 Ni BM1H5	2 bis 5% F-; 1 bis 2% Mn; < 1% Ni; > 90% Fe	0,5 % Ni; 15% Mn; 15 % F-; 50% Fe
Rutilfülldraht: EN ISO 17632 A:T42 2 P C1H5	2 bis 5% Mn; 5 bis 10% TiO ₂ ; 80 bis 90% Fe	15% Mn; 5 bis 10% TiO ₂ ; 5% F-; 45% Fe

Ergebnisse

Die detaillierte Auswertung der PIMEX-Observationen und Messdaten der zeitgleichen UFP-Messungen fand nachträglich statt. Dabei zeigte sich insbesondere bei den Messungen im Atembereich des Schweißers mit dem DISCmini, dass bei bestimmten Parametervariationen die gemessene Partikelanzahlkonzentration deutlich anstieg. Hieraus sind eindeutige Aussagen ableitbar. Bei anderen Parametern waren diese Konzentrationsunterschiede nicht nachweisbar oder nur als Tendenz erkennbar. Für genauere Erkenntnisse sind hier weitergehende Versuche notwendig.

Messungen im Atembereich des Schweißers (unter dem Schweißerschutzhelm)

Zu Beginn jedes Untersuchungstags wurde die Hintergrundbelastung im Raum bestimmt. Die Konzentration lag bei etwa 9×10^3 Partikel/cm³.

• MAG-Auftragschweißen mit Massivdrahtelektrode

Beim MAG-Auftragschweißen mit Massivdrahtelektrode zeigten sich Unterschiede in der Partikelanzahlkonzentration, je nachdem mit welcher Lichtbogenart geschweißt wurde. Die höchste Konzentration – mit Maximalwerten bis zu mehreren Millionen Partikel/cm³ – wurde beim MAG-Schweißen mit Sprühlichtbogen gemessen. Die niedrigste Konzentration wurde beim MAG-Schweißen mit Kurzlichtbogen ermittelt, hier lag die Konzentration im Mittel bei einigen Hunderttausend Partikel/cm³.

Eine höhere Schweißspannung (+ 0,5 V) sowie eine schnellere Geschwindigkeit des Drahtvorschubs (+ 0,5 m/min) führte bei den Verfahren mit Sprüh- und Langlichtbogen zu einer jeweils höheren Partikelanzahlkonzentration. Für die Variation der Drahtvorschubgeschwindigkeit ließ sich diese Korrelation deutlicher nachweisen. Bei diesen beiden Lichtbogenarten konnte zudem gezeigt werden, dass die Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit eine Abnahme der mittleren Partikelgröße von etwa 60 nm auf etwa 30 nm verursachte. In Bild 5 sind diese Unterschiede in den zeitlichen Verläufen für das MAG-Schweißen mit Sprühlichtbogen dargestellt. Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 11,5 m/min die Konzentration wiederholt auf bis zu 4 bis 8×10^6 Partikel/cm³ ansteigt. Im Gegensatz dazu bleibt die Konzentration bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 11

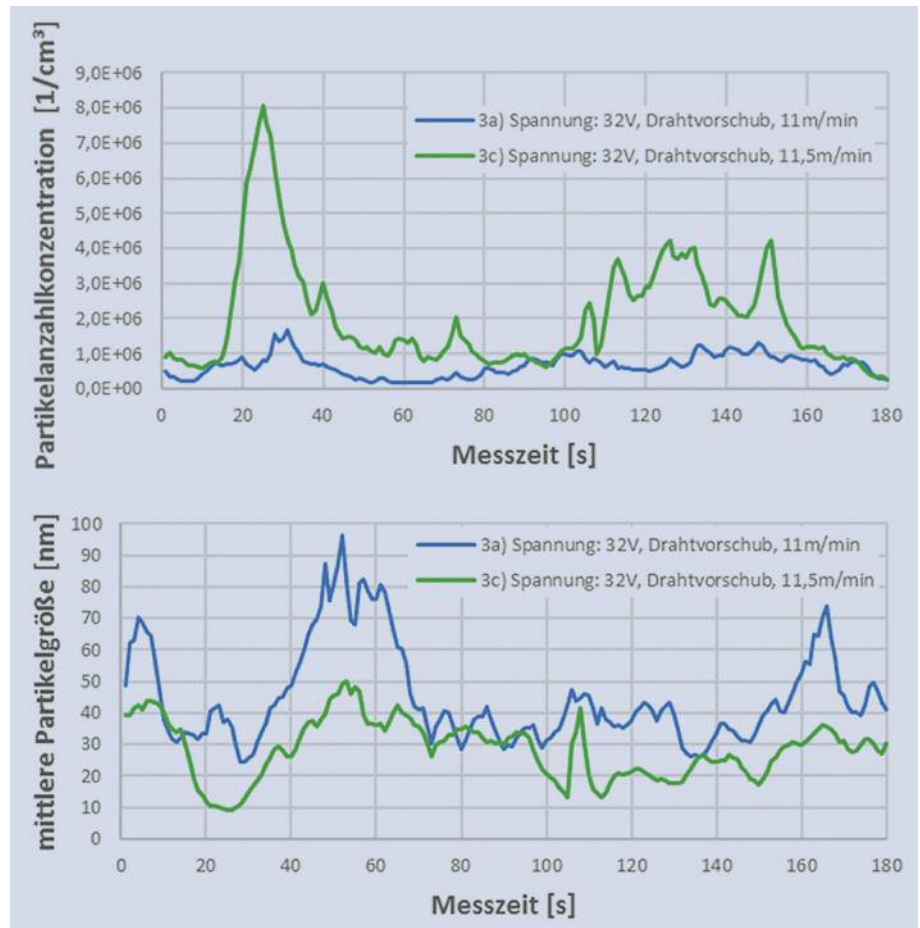


Bild 5 • Zeitliche Verläufe der Partikelanzahlkonzentration (oben) und mittleren Partikelgröße (unten) beim MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode (Sprühlichtbogen; UFP-Messsystem: DISCmini).

m/min relativ konstant und liegt größtenteils unter 1×10^6 Partikel/cm³. Beim MAG-Schweißen mit Kurzlichtbogen war ein Zusammenhang der Schweißspannung bzw. der Drahtvorschubgeschwindigkeit mit der UFP-Konzentration und -größe nicht eindeutig erkennbar.

• MAG-Auftragschweißen mit Fülldrahtelektrode

Beim MAG-Auftragschweißen mit Fülldrahtelektrode hatte die verwendete Füllungsart einen Einfluss auf die ermittelte Partikelanzahlkonzentration. Mit basischen Fülldrähten wurden höhere Konzentrationen gemessen als mit Rutilfülldrähten. Somit war der Einfluss der verwendeten Füllungsart auf die ermittelte Partikelanzahlkonzentration nachgewiesen.

Analog zum MAG-Auftragschweißen mit Massivdrahtelektrode konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass auch beim Schweißen mit Fülldrähten eine höhere Schweißspannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit zu einem Anstieg der Partikelanzahlkonzentration auf mehrere Mil-

lionen Partikel/cm³ führte. Eine Veränderung der Partikelgröße konnte jedoch nicht festgestellt werden. In Bild 6 sind die zeitlichen Verläufe der Partikelanzahlkonzentration beim MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode (basisch, Rutil) mit Variation der Schweißspannung bzw. der Drahtvorschubgeschwindigkeit abgebildet. Anhand der Grafik für die basische Fülldrahtelektrode, Bild 6 oben, kann abgeleitet werden, dass die Veränderung der Drahtvorschubgeschwindigkeit einen größeren Einfluss auf die Partikelanzahlkonzentration nimmt als die Veränderung der Schweißspannung. So wurden bei der Drahtvorschubgeschwindigkeit 8,5 m/min Expositionsspitzen von 1 bis 3×10^6 Partikel/cm³ gemessen. Bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 8 m/min (Spannung 27 V) waren hingegen keine größeren Ausreißer nach oben erkennbar, die gemittelte Partikelanzahlkonzentration lag nur bei 1×10^5 Partikel/cm³.

In Bild 7 sind die zeitlichen Verläufe der Oberflächenkonzentration LDSA bei Variation von Spannung bzw. Drahtvor-

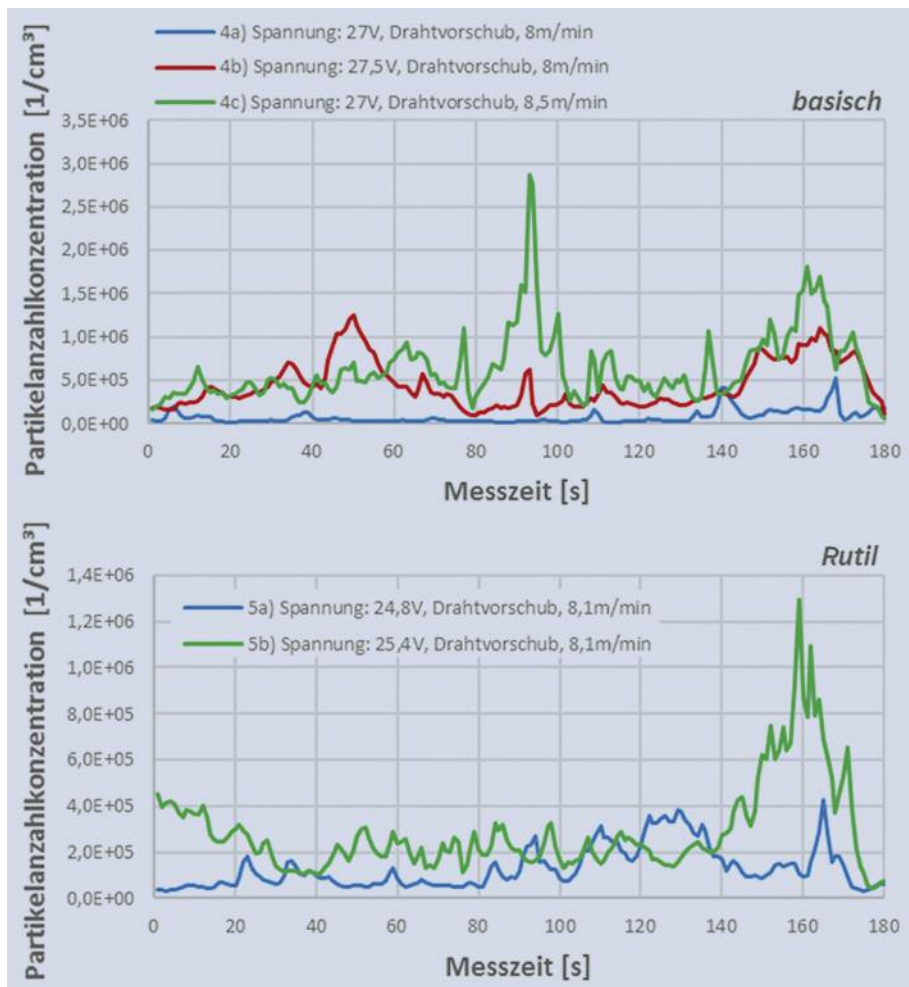


Bild 6 • Zeitliche Verläufe der Partikelanzahlkonzentration beim MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode (UFP-Messsystem: DISCmini); oben basische Fülldrahtelektrode, unten: Rutilfülldrahtelektrode.

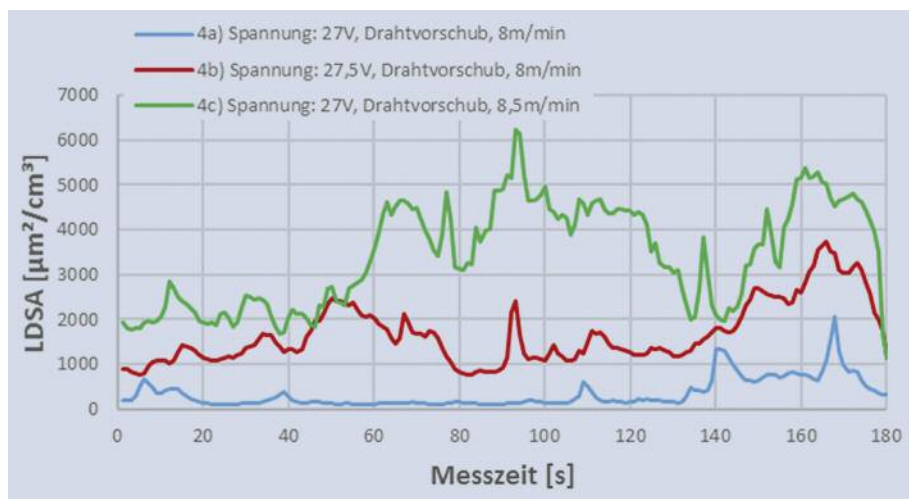


Bild 7 • Zeitliche Verlauf der Oberflächenkonzentration LDSA beim MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode (basisch; UFP-Messsystem: DISCmini).

schubgeschwindigkeit dargestellt. Eine Zunahme der Oberflächenkonzentration LDSA bei Änderung der Spannung oder der Drahtvorschubgeschwindigkeit ist sehr deutlich erkennbar.

Eine wesentliche Rolle für die Exposition des Schweißers spielte die Positionierung des Erfassungselements zur Schweißrauchquelle. So wurde anhand der PIMEX-Aufzeichnungen bestätigt, dass ein größerer Ab-

stand des Erfassungselements zur Rauchquelle mit einer höheren UFP-Exposition verbunden war. Im Atembereich des Schweißers war somit die Partikelanzahlkonzentration deutlich höher.

Ein Unterschied bei der Verwendung verschiedener Erfassungselemente (Trichter, Flansch) konnte bei dieser Untersuchung nur für das MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode festgestellt werden. Bei der Erfassung der Partikel mit einem Trichter lag die gemessene Partikelanzahlkonzentration höher als bei der Erfassung mit einem Flansch.

Auch die Kopf- bzw. Körperposition des Schweißers hatte Einfluss auf die Messergebnisse. Bei einem Messdurchgang wurde bewusst darauf geachtet, dass der Schweißer beim Schweißvorgang mit dem Kopf bzw. dem Körper möglichst weit entfernt von der Rauchsäule platziert war. Unter dem Schweißerschutzhelm war hierbei die gemessene Partikelanzahlkonzentration mit einigen Hunderttausend Partikel/cm³ wesentlich niedriger als bei den vorherigen Untersuchungen, bei denen sich der Atembereich häufig direkt in der Rauchsäule befand.

Stationäre Messungen im Bereich der Schweißrauchquelle (Abstand etwa 30 cm)

Die bei den Messungen an der Person im Atembereich des Schweißers festgestellten Abhängigkeiten der Partikelanzahlkonzentration von Lichtbogenart, eingestellter Spannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit wurden auch bei den stationären Messungen bestätigt. In Bild 8 sind exemplarisch einige zeitliche Konzentrationsverläufe von den PIMEX-Observationen (Messsystem: FMPS) beim MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode abgebildet. Anhand der Vorgänge ist erkennbar, dass die Konzentration von einigen zehntausend Partikel/cm³ kurzzeitig immer wieder auf mehrere Millionen Partikel/cm³ ansteigt. Die höchste Konzentrationsspitze wurde beim MAG-Schweißen mit Sprühlichtbogen mit 9×10^6 Partikel/cm³ gemessen. Beim MAG-Schweißen mit Kurzlichtbogen lag der Maximalwert bei $1,5 \times 10^6$ Partikel/cm³.

Fazit

Die Exposition des Schweißers gegenüber UFP hängt von vielen Einflussfaktoren ab. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Lichtbogenart und die Schweißparameter

„Spannung“ und „Drahtvorschub“ die Höhe der Partikelanzahlkonzentration und -größe beeinflussen. Einen maßgeblichen Einfluss hinsichtlich der UFP-Exposition hat die Schweißfachkraft selbst. Durch die richtige Positionierung des Erfassungselements so nahe wie möglich an der Schweißrauchquelle kann die eigene Belastung an UFP verringert werden. Darüber hinaus wird

durch eine entferntere Kopf-/Körperposition von der Schweißrauchsäule die Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln weiter reduziert. In Bild 9 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammenfassend grafisch veranschaulicht.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass für UFP die gleichen prozess- und arbeitsplatzspezifischen Faktoren gelten, die

auch für die Entstehung anderer partikel-förmiger Schadstoffe beim Schweißen verantwortlich sind. Somit kann das bisher erfolgreich angewendete Schutzmaßnahmenkonzept auch zur Reduzierung der Exposition durch ultrafeine Partikel angewendet werden. Weitere Versuche sollen vorgenommen werden, um die aktuellen Erkenntnisse zu verifizieren und um die Rolle weiterer Einflussfaktoren zu überprüfen. Anschließend sollen weitere Vorschläge für die Präventionsarbeit im Hinblick auf die Minimierung der UFP im Schweißrauch ausgearbeitet werden.

Dr.-Ing. V.-E. Spiegel-Ciobanu, FBHM, Themenfeld „Schadstoffe in der Schweißtechnik“ BGHM Hannover und R. Weiß, Gefährdungsermittlung/Messtechnik, BGHM, Mainz

Literatur

- [1] Pohlmann, G, u. a.: Vergleichende Untersuchungen zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Rauchen beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Teil 1: Grundlagen der Untersuchung. Schw. Schn. 64 (2012), H. 5, S. 267/74.
- [2] Pohlmann, G, u. a.: Vergleichende Untersuchungen zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Rauchen beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Teil 2: Ergebnisse und Diskussionen. Schw. Schn. 64 (2012), H. 6, S. 352/62.
- [3] Reigen, U., u. a.: Ermittlung von Schweißrauchdaten und Partikelkenngößen bei verzinkten Werkstoffen. Schw. Schn. 64 (2012), H. 12, S. 788/96.
- [4] Spiegel-Ciobanu, V. E. u. R. Weiß: Sondermessprogramm „Ultrafeine Partikel“. Schw. Schn. 66 (2014), H. 7, S. 371/79.
- [5] Spiegel-Ciobanu, V. E., Brand, P. u. a.: Charakterisierung der biologischen Wirkung ultrafeiner Partikel im Schweißrauch nach kontrollierter Exposition beim MIG-Schweißen von Aluminium, MIG-Löten und Widerstandspunktschweißen von zinkbeschichteten Werkstoffen. Schw. Schn. 66 (2014), H. 9, S. 530/37.
- [6] Brand, P., u. a.: Die Wirkung von kupfer- und zinkhaltigen Schweißrauchen auf den Menschen. Schw. Schn. 68 (2016), H. 7, S. 420/23.

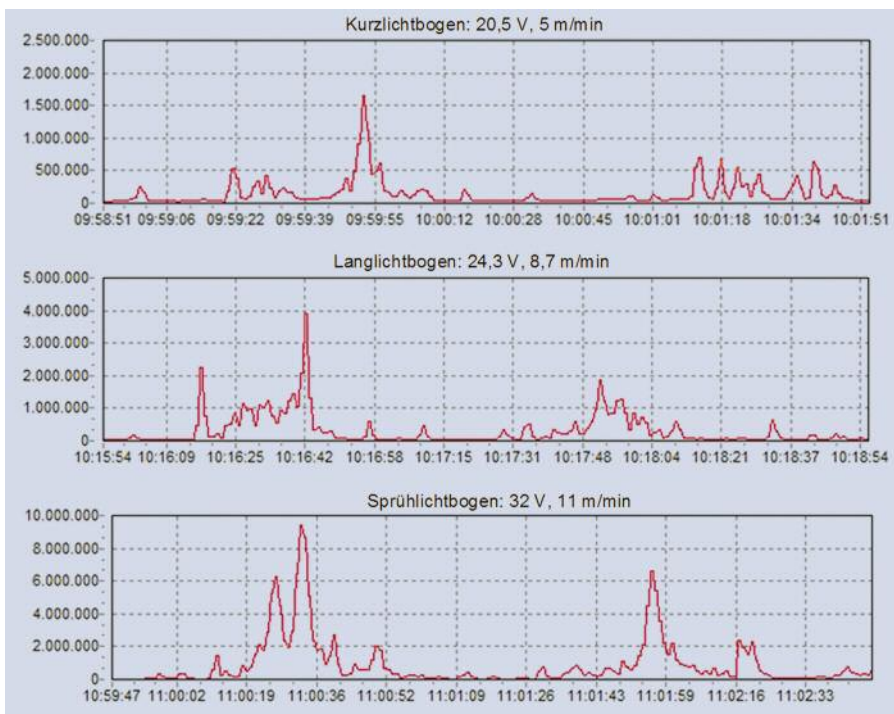


Bild 8 • MAG-Schweißen mit Massivdrahtelektrode (Kurz-, Lang- und Sprühlichtbogen (unterschiedliche Skalierung; UFP-Messsystem: FMPS).

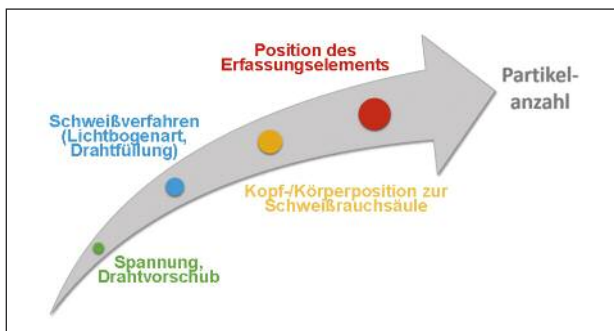


Bild 9 • Einflussfaktoren auf die Freisetzung/Exposition ultrafeiner Partikel.