



3. TAGUNG

ADDITIVE MANUFACTURING

05. Oktober 2023
Halle (Saale)

VORTRAGSBAND



3. TAGUNG ADDITIVE MANUFACTURING

05. OKTOBER 2023 - HALLE (SAALE)

Erik Wöller, Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

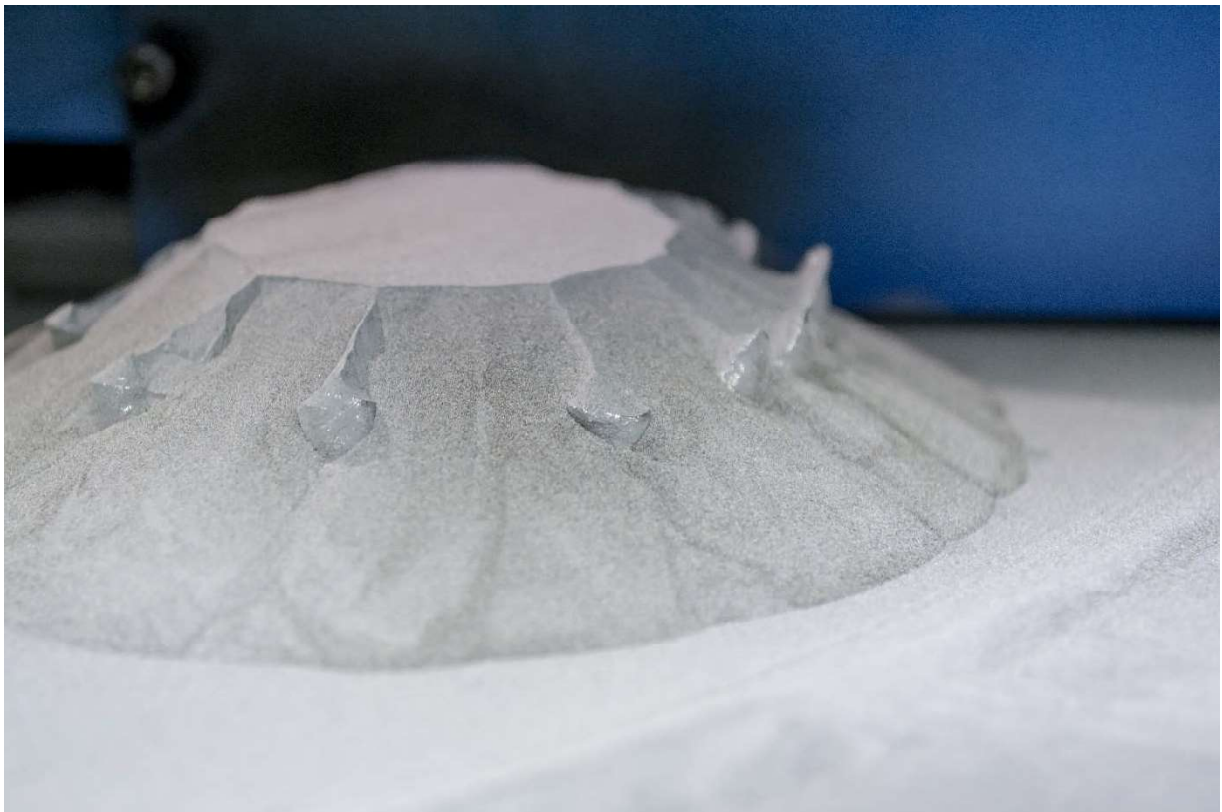
Pulverkontamination aus Arbeitsschutzperspektive - ein blinder Fleck im SLM und SLS?

Pulverkontamination aus Arbeitsschutzperspektive - ein blinder Fleck im SLM und SLS?

Erik Wöller MA, DermaPurge GmbH c/o Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden Germany

Pulverbettverfahren bieten in der additiven Fertigung viele Vorteile. Allerdings stellen die mikroskopisch kleinen Metall- und Kunststoffpartikel, aus denen die eingesetzten Pulver bestehen, auch ein erhebliches Gesundheitsrisiko für die Mitarbeiter dar. Es ist mittlerweile common sense und gute Arbeitsschutzpraxis, das Einatmen kleinster Partikel zu verhindern. Doch auch andere Aufnahmewege in den Körper sind problematisch: Kontakt mit der Haut und falsche Hautreinigungspraxis werden oft grundsätzlich unterschätzt.

Während die meisten Betriebe zurecht auf einen verantwortungsvollen und sicheren Umgang mit Kunststoff- und Metallpulvern setzen, ist dies bei Weitem nicht immer gegeben. Dieser Beitrag widmet sich genau diesem vermeintlich ‚blinden Fleck‘: Berichte aus der Praxis sprechen immer wieder von Beispielen, wo direkter Pulverkontakt ohne persönliche Schutzausrüstung, bspw. im T-Shirt, stattfindet oder auch Essen am Arbeitsplatz als unproblematisch angesehen wird. Daraus schließen sich zwei elementare Fragen an: Welche Gesundheitsrisiken bei Pulverkontakt sind zum heutigen Stand wissenschaftlich belegt bzw. für die Praxis im Arbeitsalltag relevant? Welche Möglichkeiten haben Anwender diese zu minimieren?



1. Die Unterscheidung zwischen Material- und Partikeltoxizität

Um die gesundheitlichen Risiken einer regelmäßigen Aufnahme von Pulver- und auch Staubpartikeln einzuschätzen und potentielle Gegenmaßnahmen evaluieren zu können, muss zwischen zwei grundlegenden Möglichkeiten unterscheiden werden auf welche Weise Materialien wie Metall oder Kunststoff gesundheitsschädlichen Einfluss auf den Körper haben können: Materialtoxizität und Partikeltoxizität. Für Materialtoxizität gibt es dutzende Beispiele, die auch außerhalb des Arbeitsschutzspektrums als gesundheitsschädlich von Außenstehenden erkannt werden. Blei, Arsen, Cobalt, Chrom sind bekannt. Allgemein sind materialtoxische Stoffe jene, die in direkter Weise mit Proteinen oder Enzymen des Körpers interagieren und dabei biochemische Abläufe stören bzw. zersetzend wirken. Vor allem die Materialtoxizität spielt bei der Bewertung eines Arbeitsplatzes aus dieser Warte eine wichtige Rolle. In den Sicherheitsdatenblätter der EU-Chemikalienschutzverordnung (REACH), welche u.a. Auskunft über gesundheitliche Risiken von Materialien wie bspw. Metallpulver geben sollen und damit maßgeblich die zu erfüllenden Schutzmaßnahmen vorgeben, basieren die H- und P-Sätze aktuell noch ausschließlich auf der Materialtoxizität. Umgesetzt werden diese Bewertung dann u.a. über eine ‚Maximale Arbeitsplatzkonzentration‘ (MAK), die angibt bis zu welcher Konzentration dieses Stoffes am Arbeitsplatz keine gesundheitliche Beeinträchtigung zu erwarten ist. Die MAK bezieht sich dabei ausschließlich auf die Luft am Arbeitsplatz. Eine MAK für Oberflächen, Kleidung, Haut und Haare der Mitarbeiter gibt es aktuell nicht.

Materialtoxizität spielt für die Arbeitsschutzvorgaben in der Additiven Fertigung besonders bei Metallpulvern eine Rolle. Die Berufsgenossenschaften für Holz und Metall (BGHM) sowie die für Rohstoffe und Chemische Industrie (BGRCl) haben gemeinsam ein Gefahrstoffinformationssystem mit eigenen Hinweisen und Datenblättern für die Arbeit mit Metallpulvern in der Additiven Fertigung veröffentlicht.¹ Auch wenn viele Informationen nicht mehr auf dem aktuellen Stand sind, da sich wissenschaftliche Erkenntnisse, Vorgaben, Materialien und nicht zuletzt Produktionstechnologie stetig weiterentwickeln, lassen sich hier die Unterscheidungen innerhalb der Metallpulver im Hinblick auf die Materialtoxizität gut ablesen. Die als karzinogen eingestuft Metalle Chrom-(VI), Cobalt und Nickel werden klar von anderen Metallen separiert betrachtet und mit strengeren Auflagen hinsichtlich des Umgangs und der MAK belegt, als jene, die nicht als karzinogen eingestuft werden. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass nahezu alle üblichen Metallpulver auch diese Metalle in den Legierungen beinhalten. Natürlich ist auch eine hohe Aufnahme von eher unkritisch betrachteten Metallen wie bspw. Aluminium problematisch. Sobald hier die Blutgrenzwerte erreicht werden, kann eine Neurotoxizität einsetzen.² Alarmierend scheint es, dass die Kontrolle von Blutgrenzwerten für die Arbeit mit Aluminiumpulver nicht verpflichtend ist. Kunststoffpulver auf der anderen Seite haben selbst eine geringe Materialtoxizität und gelten somit oft im Arbeitsalltag als weniger kritisch im Umgang. Dabei wird allerdings oft außer Acht gelassen, dass die im Kunststoff verarbeiteten Additive wie Flammschutzmittel oder Weichmacher selbst materialtoxisch sind und somit ein gesundheitliches Risiko darstellen, sobald diese an den Körper abgegeben werden.³



Silikose (Staublung): https://de.wikipedia.org/wiki/Silikose#/media/Datei:8.-_Miner's_lung_with_silicosis_and_tuberculosis.jpg

Wie beschrieben, ist Materialtoxizität relativ gut messbar und damit bewertbar. Dementgegen ist Partikeltoxizität sehr viel schwieriger zu greifen und wissenschaftlich zu untersuchen. Der Begriff bezeichnet das Phänomen, dass Kleinstpartikel aufgrund ihrer physikochemischen Eigenschaften wie

¹https://www.gischem.de/suche/uebersicht.htm?client_session_Dokument=7340&client_request_Suchklasse=Suchbegriff&view_Suchbegriff_OID=2507 (letzter Besuch am 10.08.23)

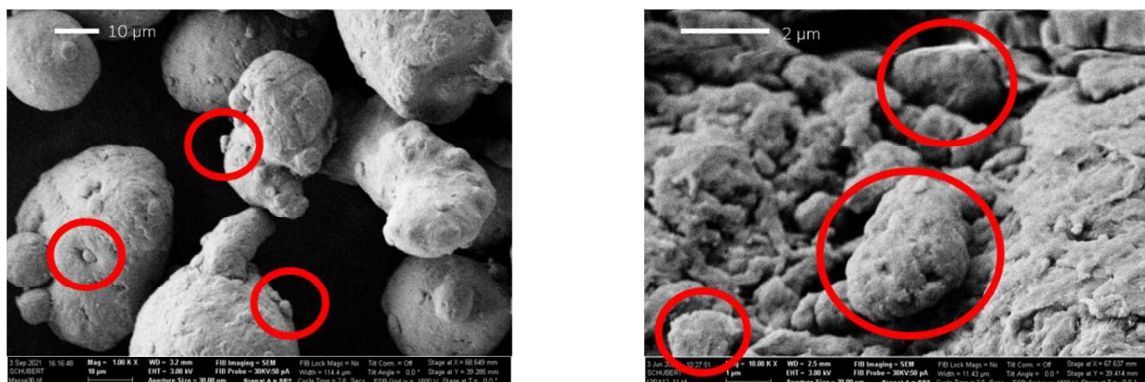
² Klotz et al., Dtsch Arztebl Int 2017; 114: 653-9; DOI: 10.3238/arztebl.2017.0653.

³ Khalid et. al., Environ. Sci.: Processes Impacts, 2022, 24, 17.

Größe, Ladung, Form, Löslichkeit, Bioabbaubarkeit oder Persistenz Schaden im Körper verursachen können, sobald diese aufgenommen worden sind. Ein bekanntes Beispiel für Partikeltoxizität ist die Aufnahme von Siliciumdioxid durch die Atemwege, bei der die Gefahr einer Staublung (Silikose) entsteht. Der Körper erkennt hier die sehr feinen Partikel als körperfremd und versucht diese erfolglos aufzulösen. Dabei wird eine Entzündungsreaktion ausgelöst. Da das Material nur schwer ausgeschieden werden kann, bleibt die Reaktion bestehen – eine Vorstufe zu Lungenkrebs. Aktuelle Studien zeigen überdies, dass auch bei einer oralen Aufnahme von Siliciumdioxid ein ähnlicher Effekt eintritt und damit das Darmkrebsrisiko stark ansteigt.⁴ Die für die Additive Fertigung mit Pulvern wichtigen Faktoren sind folglich die Lösbarkeit bzw. die Abbaubarkeit der Partikel im Körper. Je schwerer löslich ein Partikel ist, desto länger verbleibt dieser im Körper und kann dort Entzündungsreaktionen und Penetrationen der Blutbahnen hervorrufen. Das Risiko besteht bei allen aktuell in Pulverbettverfahren verwendeten Kunststoff- und Metallpulvern. Gleichzeitig spielt natürlich auch die Größe der Partikel eine tragende Rolle in der Risikobewertung, da sehr feine Partikel leichter in Zellen und Blutgefäße eindringen können sowie grundsätzlich von Mitarbeitern schwerer erkannt und als Gefahrenquelle wahrgenommen werden. Zusätzlich ist es aufwendiger und komplexer sich vor diesen Partikeln zu schützen. Bislang spielt die Partikeltoxizität bislang eine eher untergeordnete Rolle bei der institutionellen Gefährdungsbeurteilung für die dermale und orale Aufnahme von Materialien, obwohl die internationale Studienlage hierzu Anlass für ein stärkeres Augenmerk bietet.⁵ Ein Grund für diese Vernachlässigung könnte die sehr schwere Messbarkeit für die tatsächliche Belastung und darauf zurückzuführenden gesundheitlichen Auswirkungen sein.

2. Problem: Partikelgröße und Aufnahme

Inserer kennen die feine Pulverschicht, die sich auf Maschinen, Fensterbänke, Türrahmen und andere schwer erreichbare Orte legt. Selbst bei hohen Standards in der Sauberkeit und Arbeitssicherheit setzen sich die Kleinstpartikel im Pulver und Schleifstaub auf Oberflächen in der unmittelbaren Umgebung der Anlagen und den Arbeitsplätzen für die Nachbearbeitung. Viele Mitarbeiter in der Fertigung mit Pulverbettverfahren klagen in Gesprächen über Pulverreste, die sich, trotz persönlicher Schutzausrüstung und Absauganlagen, wie dünner Film auf Fingerkuppen, Handgelenke und Handinnenflächen legen. Dieses Phänomen lässt sich auch durch die Größe der Pulver – und Staubpartikel selbst erklären. Bei Messungen unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigt sich eine überraschende Verteilung der Partikelgrößen in den meisten gängigen Metall- und Kunststoffpulvern. Anders als oft angenommen, finden sich im Pulver nicht nur Partikel von 20 bis 60 µm (Metall) bzw. 20 bis 115 µm (Kunststoff) sondern auch viele deutlich kleinere Partikel, bis in den Nanobereich hinein. Einzelne Partikel unter 20 µm sind für das bloße menschliche Auge ausgeschlossen zu erkennen. Diese entsprechen im Vergleich etwa einem Drittel des Durchmessers eines menschlichen Haares.



Links: AISi10Mg Neupulver. Rechts: PA12 Neupulver – Bilder sind per REM im Vakuum aufgenommen

⁴ Di Cristo et al. Grouping Hypotheses and an Integrated Approach to Testing and Assessment of Nanomaterials Following Oral Ingestion. *Nanomaterials* **2021**, 11, 2623. <https://doi.org/10.3390/nano11102623>.

⁵ Choudhury et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 259 (2023) 115018; Barreau et al. *Particle and Fibre Toxicology* (2021) 18:26 <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00421-2>; Christo 2021.

Die Punkte an denen Mitarbeiter mit dem Pulver selbst direkt in Berührung kommen können, reichen von der Pulverlogistik und Pulvervorbereitung wie Neupulverzufuhr und Sieben, über die schlichte Bauteilentnahme, die Nachbearbeitung, Entpulverung, die Wartung der Anlagen und die Reinigung. Abhängig von den verwendeten Technologien, Maschinen und Unternehmensausrichtungen können die Punkte natürlich je nach Unternehmen unterschiedlich gewichtet sein, jedoch kommen Mitarbeiter in diesen Betrieben aktuell nicht komplett ohne direkten und indirekten Pulverkontakt aus. Bei der Arbeit an jedem dieser Schritte in der Prozesskette steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Kontamination.

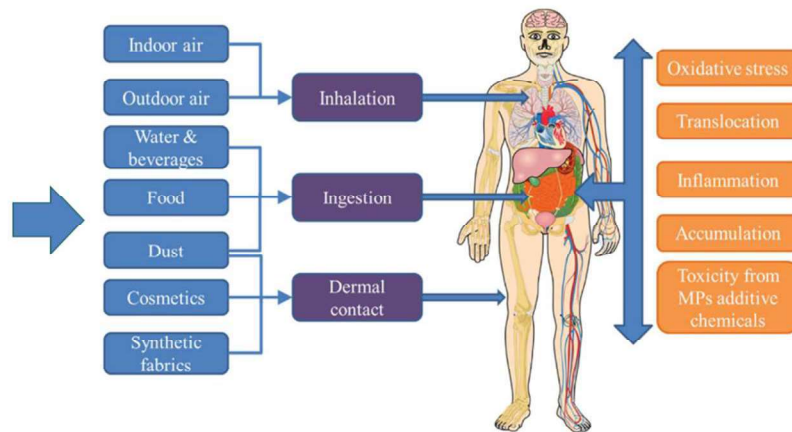


Fig. 1 Pathways of human exposure to MPs and associated risks.

Aufnahmewege für Partikel kleiner als 20 µm in den Körper. Hier speziell Kunststoff. Aus: H. Ageel, et al., Environ. Sci.: Processes Impacts, 2022, 24, 17.

Studien zeigen, dass Partikel wie Metalle und Kunststoffe unter 20 µm durch Schweißporen, Haarfollikel und beschädigte Haut in den Körper eindringen können, besonders wenn Mitarbeiter geschwitzt haben oder die Haut durch den Einsatz von Seife geschwächt ist. Unter 5 µm können Partikel unter Umständen direkt die Haut durchstoßen und sammeln sich nachweisbar in Organen wie Lymphdrüsen, Nieren, Milz, Leber und anderen an.⁶ Ein weiterer wichtiger Aufnahmeweg ist die Gefahr einer oralen Aufnahme durch eine Kontaminationsverschleppung, einerseits durch Nahrungszubereitung und -aufnahme, andererseits durch unbewussten Hand-Mund-Kontakt. Im Laufe eines Tages fasst sich jeder Mensch etwa 400 bis 800 Mal am Tag ins Gesicht.⁷ Diese Geste dient der Selbstberuhigung und Bestätigung. Sie lässt sich nur schwer bewusst machen. Studien mit Bleiarbeitern haben außerdem gezeigt, dass bis zu 40 % der Partikel, die in die Nähe des Mundraumes gelangen, auch oral vom Körper aufgenommen werden.⁸ Beide Umstände machen die orale Aufnahme zu einem wichtigen Thema im Arbeitsschutz.

3. Problem: Effektivität von Seife und Wash-in-Effekt

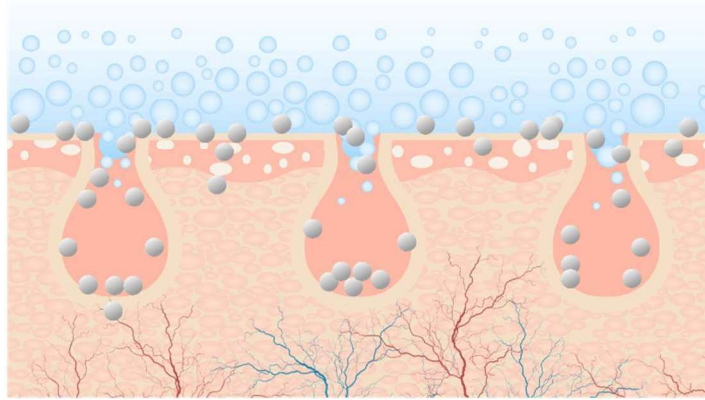
Während also bei Partikeln unter 20 µm das Risikobewusstsein der Mitarbeiter erwartbar sinkt und gleichzeitig das Risiko einer Aufnahme in den Körper steigt, lassen sich genau diese Partikel nur sehr schwer von der Haut entfernen. Als Faustregel gilt, dass je kleiner die Partikel sind und je hydrophober das Material ist, desto weniger effektiv ist die Reinigung mit Wasser und Seife.⁹ Aus betriebswirtschaftlichen Gründen und fehlendem Problembewusstsein greifen Betriebe oft zu Seife bzw. tensidhaltigen Mitteln, um die Haut der Mitarbeiter von Pulvern zu reinigen. Hier ist grundsätzlich Maß geboten: Eine Folge von zu häufiger Reinigung mit Seife können Kontaktdermatitis, Ausschläge, Allergien und dauerhafte Hautschädigungen sein, die zu langfristigen Ausfällen von Mitarbeitern führen können.

⁶ Ageel, et al., Environ. Sci.: Processes Impacts, 2022, 24.

⁷ Grunwald et al., Brain Research 1557 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2014.02.002>

⁸ Cherrie et al., Ann. Occup. Hyg., 50 (2006), No. 7. 693–704.

⁹ ebd.



Symbolbild Wash-in-Effekt: Durch Seife, Tenside und Lösungsmittel wird Talg aus den Poren gezogen und damit anfälliger für das Eindringen von Partikeln gemacht.

Darüber hinaus führt die Verwendung von Seife zu einem sogenannten *Wash-in*-Effekt. Dieser beschreibt, wie Seifen und Tenside die natürliche Hautbarriere schwächen, indem sie den schützenden Talg aus den Hautporen spülen. Dadurch können Gefahrstoffe einfacher die Haut durchdringen und schlussendlich in die Blutbahn gelangen. Hervorzuheben ist, dass viele Mittel und Waschpasten auch sogenannte *penetration enhancer* und Reibekörper enthalten, die die Hautbarriere noch zusätzlich schwächen. Die Problematik hat bereits Eingang in die ‚Technischen Regeln für den Umgang mit Gefahrstoffen‘ (TRGS401) gefunden, die Seifen, Tenside und Lösungsmittel explizit ausschließen, wenn mit solchen Stoffen gearbeitet wird.¹⁰

4. PSA ist nur ein Baustein

Guter Schutz ist daher sehr wichtig um die Gesundheitsrisiken für die Mitarbeiter minimieren. Die Additive Fertigung hat als Zukunftsbranche bereits erste Standards etablieren können. Die Praxis zeigt jedoch, dass nur ein Zusammenspiel verschiedener Bausteine die beste Lösung für die oben beschriebene Problematik bieten kann. Arbeitshandschuhe aus reinem Gewebe sind nicht partikeldicht. Hingegen schützen Einmal- oder Chemikalienschutzhandschuhe sehr gut vor einer direkten Kontamination der Hände, reißen jedoch auch häufig. Oft kommt es überdies beim An- und Ausziehen zur Exposition. Das ist besonders problematisch, da starkes Schwitzen unter den Handschuhen zu einer erhöhten Aufnahme von Partikeln führen kann. Ähnliches gilt auch für das Tragen von Norm-5 Vollschutzanzügen, die zugunsten der Atmungsaktivität Pulverpartikel einlassen können. Mit Absauganlagen und vermeintlich geschlossenen Systemen lässt sich die Partikelbelastung in der Luft zwar verringern, eine Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) zeigt jedoch, dass diese Vorrichtungen kaum Effekt auf die direkt Partikelbelastung auf der Haut haben.¹¹ Der Schluss liegt also nahe, dass ergänzend zur klassischen PSA und Absaugung eine effektive Hautreinigung stehen muss, die die Hautbarriere nicht belastet und sich einfach anwenden lässt.



Anwendung von powder-ex der Firma DermaPurge. Die enthaltene Aktivkohle bindet die Partikel.

¹⁰ Hier als Carrier-Effekt beschrieben: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-401.pdf?__blob=publicationFile (Version 5.6.2023)

¹¹ Walter; Prott et al., Expositionsermittlung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen bei additiven Fertigungsverfahren - Einsatz von Pulverbettverfahren. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021. DOI: 10.21934/baua:bericht20210121

5. Durchbruch aus der Nano-Technologie



- Für alle Partikel ab 4 nm
- Alle Pulver und Stäube
- Über 99% Reinigungsleistung
- Sehr ergiebig
- Seifenfrei

Die Firma DermaPurge, eine Ausgründung vom Leibniz-Institut für Polymerforschung in Dresden, hat für dieses Problem einen Durchbruch in der Entwicklung eines sehr effektiven Dekontaminationsmittel für den Arbeitsschutz mit Pulvern erzielt. Anders als herkömmliche Mittel enthält powder-ex keine Seife oder Penetrationsverstärker. So wird der *Wash-in* Effekt verhindert und die Hautbarriere bleibt intakt. Ursprünglich als Erste-Hilfe-Mittel für die Nano-Forschung im Laborumfeld entwickelt, basiert es auf dem Zusammenspiel von Aktivkohle und Schichtsilikaten, welche die Partikel umschließen, sodass diese mit kaltem Wasser von der Haut gewaschen werden können. Durch die Bindung der Partikel an die natürlichen Tonminerale und die Aktivkohle wird verhindert, dass Metalle und Kunststoffe in die Haut eindringen können. Zusätzlich hat die schwarze Farbe des Gels den Vorteil, dass Mitarbeiter sicher sein können, wo sie sich dekontaminiert haben, da keine Hautstelle ausgelassen wird. Das ist besonders bei Stellen wichtig, die oft im Arbeitsalltag vergessen werden, wie bspw. Handrücken, Zwischenräume der Finger und Handgelenke. Das Produkt ist als Pumpspenderinsatz oder als Tube beziehbar und damit sehr einfach und ohne große Investition zu implementieren.

Viele maßgeblichen Pulverhersteller und Dienstleister aus der Branche haben die Vorteile des Produktes gegenüber Seifen erkannt und setzen inzwischen voll auf powder-ex für die Dekontamination von Pulvern. Firmen wie BASF 3D Solutions, Protolabs, Rapidobject, Renishaw, Dick und Dick und viele andere zentralen Unternehmen der Branche geben hier Maßstäbe in der Standardisierung der Technologie vor. Nicht nur Firmen aus der Additiven Fertigung haben die Vorteile von powder-ex erkannt. Mittlerweile kommt das Dekontaminationsprodukt täglich in verschiedenen Industriezweigen zum Einsatz, insbesondere dort wo beim Gießen oder bei Beschichtung mit feinen Partikeln gearbeitet wird, bzw. diese beim Fräsen, Schleifen, Bohren, Schweißen oder Polieren entstehen. Die Firma bietet auch Beratungen zur Dekontamination im Arbeitsschutz mit Pulvern und Stäuben an.

Kontakt:

Erik Wöller
woeller@dermapurge.com
+49 1575 2127635

DermaPurge GmbH c/o Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Dresden

