

NANOMATERIALIEN BEI INSTANDHALTUNGSARBEITEN: RISIKEN UND PRÄVENTION BEI DER ARBEIT

Das Gebiet der Nanotechnologie entwickelt sich rasant, und immer häufiger werden Nanomaterialien sowohl im Alltagsleben wie auch an unseren Arbeitsplätzen eingesetzt. Das bedeutet, dass mehr Arbeitnehmer, die Instandhaltungsarbeiten durchführen, Nanomaterialien ausgesetzt sein können. Trotz laufender Forschung entwickelt sich das Gebiet der Nanotechnologie aber schneller als der Wissensstand in Bezug auf die Gesundheits- und Sicherheitsaspekte von Nanomaterialien. Angesichts der vielen noch verbleibenden Ungewissheiten stellt sich die Frage, wie die Risiken für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (OSH) bewertet werden können.

In dem vorliegenden E-Fact wird erläutert, wie Arbeitnehmer bei Instandhaltungsarbeiten mit Nanomaterialien in Berührung kommen und potenzielle Expositionen vermieden werden können.

1 Einleitung

1.1 Was sind Nanomaterialien?

Nanomaterialien sind Materialien, die Partikel enthalten, deren Maße in mindestens einer Dimension zwischen 1 und 100 nm liegen ⁽¹⁾; dies ist eine Größenordnung, die mit der von Atomen und Molekülen vergleichbar ist. Sie können natürlicher Herkunft sein (etwa in Vulkanaschen) oder die unbeabsichtigte Folge menschlicher Aktivitäten (etwa in Dieselabgasen). Eine große Anzahl von Nanomaterialien wird aber absichtlich hergestellt und auf den Markt gebracht. Diese stehen im Mittelpunkt des vorliegenden E-Fact.

Auch wenn Nanopartikel Agglomerate und Aggregate bilden, die größer als 100 nm sind, können diese leicht zerfallen und Nanopartikel freisetzen. Deshalb müssen solche Agglomerate/Aggregate bei der Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien ebenfalls berücksichtigt werden.

Die besonderen (neuartigen) Eigenschaften von hergestellten Nanomaterialien bringen für zahlreiche Anwendungen viele Vorteile mit sich. Hergestellte Nanomaterialien können entweder allein oder in Kombination mit anderen Stoffen eingesetzt werden, um beispielsweise Folgendes zu erreichen:

1. Miniaturisierung (z. B. von elektronischen Geräten),
2. Gewichtsreduzierung (als Folge der höheren Materialeffizienz) und
3. verbesserte Funktionsmerkmale von Werkstoffen (z. B. längere Haltbarkeit, höhere Leitfähigkeit, bessere thermische Stabilität, höhere Löslichkeit oder verminderte Reibung).

Die Arten der hergestellten Nanomaterialien, die an einem Arbeitsplatz gegebenenfalls anzutreffen sind, hängen von der Art der laufenden Prozesse, der Art der hergestellten Produkte und von den verwendeten Einsatz- oder Verarbeitungshilfsstoffen ab.

⁽¹⁾ In der Empfehlung der Europäischen Kommission [1] heißt es:

- „1. Nanomaterial ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 % der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben. Die Anzahlgrößenverteilung wird dargestellt als Anzahl der Objekte in einem gewissen Größenbereich geteilt durch die Gesamtzahl von Objekten“.
- „2. In besonderen Fällen kann der Schwellenwert von 50 % für die Anzahlgrößenverteilung durch einen Schwellenwert zwischen 1 % und 50 % ersetzt werden, wenn Umwelt-, Gesundheits-, Sicherheits- oder Wettbewerbsbeträgungen dies rechtfertigen“.
- „Abweichend von Nummer 2 sind Fullerene, Graphenflöcken und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem oder mehreren Außenmaßen unter 1 nm als Nanomaterialien zu betrachten“.

1.2 Instandhaltung

Eine regelmäßige Instandhaltung ist unverzichtbar, wenn Geräte, Maschinen, Gebäude, Konstruktionen (z. B. Brücken oder Tunnel) sowie das Arbeitsumfeld sicher und zuverlässig bleiben sollen. Instandhaltungsarbeiten schließen verschiedene Tätigkeiten ein, die sehr unterschiedlichen



Verfasser: Dovile Cizaite

Branchen und Arten von Arbeitsumfeldern zuzuordnen sind. Zu typischen Tätigkeiten zählen Pflege, Reparatur, Inspektion, Prüfung sowie Einstellung oder Austausch von Teilen; dies kann wiederum Folgendes umfassen: das Öffnen geschlossener Produktionssysteme, den Austausch von Filtern, das Entfernen von Lackschichten, Sandstrahlen, Schleifen, Schmirgeln, Spachteln, Lackieren, Isolieren und Reparieren einer Strom-, Gas- oder Wasserversorgung. Da ein gewisses Maß an Instandhaltung in allen Branchen und an allen Arbeitsplätzen durchgeführt wird, ist Instandhaltungspersonal mit höherer Wahrscheinlichkeit einem breiten Spektrum berufsbedingter Gefahren ausgesetzt als andere Arbeitnehmer.

Instandhaltung kann proaktiv (Prävention des Ausfalls von Maschinen oder Konstruktionen und von unsicheren Bedingungen am Arbeitsplatz), oder reaktiv (Reparatur von Geräten oder Gebäudeteilen) sein. Daher können Instandhaltungstätigkeiten Teil der täglichen Routine eines Arbeitnehmers sein (z. B. Reinigung und Prüfung einer Spritzpistole am Ende des Arbeitstages) oder besondere Tätigkeiten umfassen, die durchzuführen sind, wenn ein Gerät oder eine Maschine nicht einwandfrei funktioniert. Für Bauarbeiter können Instandhaltungsarbeiten die Haupttätigkeit darstellen.

Nützliche Informationen zu Instandhaltung und Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit finden Sie auf der Website der EU-OSHA unter <https://osha.europa.eu/de/topics/maintenance>.

1.3 Nanomaterialien bei Instandhaltungsarbeiten

Auch wenn die Nanotechnologie ein vergleichsweise junger Industriezweig ist, werden Nanomaterialien aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften bereits für zahlreiche Anwendungen genutzt. Dies bedeutet, dass eine mögliche Exposition gegenüber Nanomaterialien bei Instandhaltungsarbeiten in einer wachsenden Zahl von Branchen und Arbeitsplätzen zu berücksichtigen ist.

Tatsächlich nimmt die Anzahl an Produkten zu, die Nanomaterialien enthalten. Somit steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass Arbeitnehmer Instandhaltungsarbeiten an solchen Produkten durchführen müssen und dabei möglicherweise Nanomaterialien ausgesetzt werden. Beispiele für Produkte, die Nanomaterialien enthalten, sind Kraftfahrzeuge, Reifen mit geringem Rollwiderstand, elektrische und elektronische Geräte, wie hocheffiziente Sensoren und Elektronik, sowie Energie erzeugende Anlagen wie aufladbare Hochleistungsbatteriesysteme oder intelligente Dünnschicht-Solarzellen. Auch Gebäude selbst können Nanomaterialien enthalten.

Außerdem ist eine wachsende Zahl von Instandhaltungsprodukten am Markt, die hergestellte Nanomaterialien enthalten und bei Instandhaltungsarbeiten eingesetzt werden, wie etwa Schmiermittel, Beschichtungen oder Klebstoffe. Wenn keine angemessenen Präventionsmaßnahmen vorhanden sind, können auch sie zur Exposition von Arbeitnehmern führen.

Vom Standpunkt der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit können bestimmte Anwendungen von hergestellten Nanomaterialien für Instandhaltungspersonal jedoch auch von großem Nutzen sein, wie zum Beispiel intelligente Lacke zur Erkennung von Rissen oder Korrosionsschäden auf lackierten Oberflächen. Intelligente Lacke enthalten Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die elektrischen Strom leiten. Ihre Leitfähigkeit ändert sich bei Oberflächendefekten, und so können diese Lacke für die Fernerkennung von mikroskopischen Strukturproblemen etwa bei

Brücken oder Windturbinen eingesetzt werden. Dadurch kann die Überprüfung solcher Strukturen in großer Höhe vermieden werden.

2 Durch Nanomaterialien bedingte Sicherheits- und Gesundheitsgefährdungen für Instandhaltungspersonal

Obwohl Nanomaterialien zahlreiche Vorteile bieten, können einige die Gesundheit und Sicherheit von Instandhaltungspersonal gefährden [2–4].

2.1 Gefahren und Expositionswege

Sicherheitsrisiken können sich aus der hohen Explosionsfähigkeit und Entflammbarkeit und dem katalytischen Potenzial einiger Nanopulver (pulverförmige Nanomaterialien), insbesondere metallischer Nanopulver, ergeben.

Nanomaterialien können ein breites Spektrum von potenziellen toxischen Wirkungen aufweisen, selbst wenn diese bei denselben Materialien in makroskopischer Form nicht auftreten. Dies ist hauptsächlich auf ihre geringe Größe zurückzuführen, hängt aber auch von der Form, der chemischen Art der Partikel, dem Zustand der Oberfläche (z. B. Umfang, Funktionalisierung und Behandlung der Oberfläche) und dem Aggregations-/Agglomerationszustand ab. [3, 4].

Unter normalen Umgebungsbedingungen können Nanomaterialien Agglomerate oder Aggregate bilden, deren Größe 100 nm übersteigt, wobei sie ihre nanospezifischen Eigenschaften ändern (aber nicht unbedingt verlieren). Aus schwach gebundenen Agglomeraten können Nanopartikel jedoch wieder freigesetzt werden, unter bestimmten Bedingungen auch aus stärker gebundenen Aggregaten. Untersucht wird, ob dies nach Inhalation solcher Agglomerate oder Aggregate auch in Lungenflüssigkeit geschehen kann [3, 4]. Agglomerate und Aggregate, die Nanopartikel enthalten, müssen deshalb bei der Gefährdungsbeurteilung von Arbeitsplätzen ebenfalls berücksichtigt werden.

Der interne Expositionsmechanismus nach dem Eindringen von Nanomaterialien in den Körper könnte u. a. Absorption, Verbreitung und Verstoffwechslung umfassen. So wurden einige Nanomaterialien beispielsweise in Lunge, Leber, Nieren, Herz, Fortpflanzungsorganen, Föten, Gehirn, Milz, Skelett und Weichteilen nachgewiesen [5]. Zur Bioakkumulation von Nanomaterialien und zu den Mechanismen ihrer Elimination aus Zellen und Organen gibt es noch ungeklärte Fragen. Ein weiteres Problem ist, dass ein an sich nicht toxisches Nanomaterial als trojanisches Pferd agieren kann, indem ein toxischeres Material daran bindet und so in die Organe oder Zellen des Körpers eindringt [6].

Besonders gravierende Auswirkungen von Nanomaterialien betreffen die Lunge; Beispiele sind Entzündungen, Gewebeschäden, oxidativer Stress, chronische Toxizität, Zytotoxizität, Fibrose und die Bildung von Tumoren. Einige Nanomaterialien können auch das Herz-Kreislauf-System angreifen. Die potenziell gefährlichen Eigenschaften von hergestellten Nanomaterialien sind Gegenstand laufender Untersuchungen [3, 4].

Beispiele für Nanomaterialien, denen Instandhaltungspersonal ausgesetzt sein kann, und die damit verbundenen Gesundheitsrisiken zeigt Tabelle 1. Diese Nanomaterialien sind für die Instandhaltung von besonderer Bedeutung, da sie in Lacken, Desinfektionsmitteln, Reinigungsmitteln oder anderen Produkten verwendet werden, die bei Instandhaltungsarbeiten häufig zum Einsatz kommen.

Tabelle 1: Beispiele für Nanomaterialien, denen Instandhaltungspersonal ausgesetzt sein kann, und ihre potenziellen Gesundheitsgefährdungen

Art des Nanomaterials	Gesundheitsgefährdungen
Silber-Nanopartikel	Die Anwendung von Silber-Nanopartikeln ist mit einer potenziellen Gefährdung der menschlichen Gesundheit verbunden [8], und der Wissenschaftliche Ausschuss der EU „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ ist um ein wissenschaftliches Gutachten zu ihren Auswirkungen auf Sicherheit, Gesundheit und Umwelt und zur Rolle von Nanosilber bei Resistenzen gegen

Art des Nanomaterials	Gesundheitsgefährdungen
	<p>antimikrobielle Wirkstoffe ersucht worden [9].</p> <p>Es bestehen Bedenken, dass Silber-Nanopartikel zu Gesundheitsbeeinträchtigungen führen können. Hierzu zählen Allergien [10], Lungenödeme [11] und die Argyrie oder Argyrose (d. h. eine graue bis graublaue Verfärbung oder schwarze Pigmentierung von Haut, Nägeln, Augen, Schleimhäuten oder inneren Organen durch Silbereinlagerungen), die irreversibel und unheilbar sind [12]. Wie bei Ratten gezeigt wurde, können Silber-Nanopartikel das Gehirn auch über die oberen Atemwege erreichen [13].</p>
Titandioxid- (TiO ₂ -) Nanopartikel	<p>Inhalierter Titandioxidpartikel wurden von der Internationalen Krebsforschungsagentur (IARC) als möglicherweise krebserzeugend für Menschen (Karzinogen der Gruppe 2B) eingestuft [14]. In den Vereinigten Staaten hat das Nationale Institut für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (NIOSH) einen geringeren Expositionsgrenzwert für ultrafeine TiO₂-Partikel empfohlen: 0,3 mg/m³ für TiO₂-Nanopartikel (<100 nm) gegenüber 2,4 mg/m³ für Feinpartikel (>100 nm) [15].</p>
Siliciumdioxid-Nanopartikel	<p>Die Untersuchungen, die zur Toxizität von Nanosiliciumdioxid verfügbar sind, stützen sich auf die gesundheitlichen Auswirkungen von Siliciumdioxid nach akuter oder subakuter Exposition über die Atemwege. Zu den beobachteten gesundheitlichen Auswirkungen gehören Lungenentzündungen sowie die Bildung von Granulomen und fokalen Emphysemen [16].</p>

Am Arbeitsplatz gibt es im Wesentlichen drei Wege der Exposition gegenüber Nanomaterialien [2, 3, 6, 17–19]:

- **Inhalation** ist der häufigste Expositionsweg für luftgetragene Nanopartikel am Arbeitsplatz. Inhalierter Nanopartikel können sich je nach ihrer Form und Größe in den Atemwegen und in den Lungen ablagern. Nach der Inhalation können sie das Lungenepithel passieren, in den Blutkreislauf gelangen und weitere Organe und Gewebe erreichen. Bei einigen Nanomaterialien wurde außerdem nachgewiesen, dass sie über den Riechnerv in das Gehirn gelangen.
- Zu einer **Ingestion** kommt es durch die unabsichtliche Hand-zu-Mund-Übertragung von kontaminierten Oberflächen, durch den Verzehr von kontaminierten Lebensmitteln oder durch das Trinken von kontaminiertem Wasser. Zu einer Ingestion kann es auch nach der Inhalation von Nanomaterialien kommen, wenn inhalierter Partikel, die durch die mukoziliäre Klärfunktion aus den Atemwegen entfernt wurden, verschluckt werden. Einige eingenommene Nanomaterialien können das Darmepithel passieren, in den Blutkreislauf gelangen und so weitere Organe und Gewebe erreichen.
- Die **dermale Penetration** wird noch untersucht [2, 18]. Unverletzte Haut scheint eine gute Barriere gegen die Aufnahme von Nanomaterialien zu bilden [20]. Verletzte Haut scheint weniger wirksam, doch ist der Grad der Aufnahme wahrscheinlich geringer als bei der Inhalation [20]. Dessen ungeachtet sollten auch dermale Kontakte vermieden und kontrolliert werden.

Das Expositionspotenzial hängt daher hauptsächlich von der Wahrscheinlichkeit ab, ob Nanomaterialien in die Luft gelangen, wobei das Risikopotenzial von Pulvern oder Sprays größer ist als das von Suspensionen in Flüssigkeiten, Pasten, granularen Materialien oder Verbundstoffen. Nanomaterialien in Flüssigkeiten stellen ihrerseits ein größeres Risikopotenzial dar als gebundene oder fixierte Nanostrukturen wie etwa solche in einer Polymermatrix [21].

2.2 Instandhaltungstätigkeiten mit Expositionsrisiko gegenüber Nanomaterialien

Eine Exposition des Instandhaltungspersonals gegenüber hergestellten Nanomaterialien ist in folgenden Situationen möglich:

- bei der Verwendung von Instandhaltungsprodukten, die Nanomaterialien enthalten;
- bei der Instandhaltung von Anlagen, in denen Nanomaterialien vorkommen (beispielsweise eine Produktionslinie, in der Nanomaterialien oder nanomaterialhaltige Produkte verwendet oder verarbeitet werden, wenn sich diese Nanomaterialien beispielsweise auf den Oberflächen der gewarteten Anlage abgelagert haben);
- wenn der Instandhaltungsprozess selbst (etwa durch Schleifen oder Polieren) Nanomaterialien erzeugt.

Tabelle 2 führt Beispiele von Produkten an, die von Instandhaltungspersonal gegebenenfalls verwendet, gehandhabt oder verarbeitet werden, und die Nanomaterialien enthalten, denen es bei seiner Arbeit ausgesetzt werden kann.

Tabelle 2: Beispiele nanomaterialhaltiger Produkte für die Instandhaltung

Wichtigste Arten von Nanomaterialien	Beispiele von Produkten für die Instandhaltung
Titandioxid (TiO ₂)	Lacke, antibakterielle Beschichtungen, Reinigungsprodukte, Zemente, Fliesen, Wandfarben, Schmutz abweisende Fensterbeschichtungen, Autolacke (alle diese Produkte nutzen die sterilisierenden, deodorisierenden, beschlaghemmenden und selbstreinigenden Eigenschaften, die TiO ₂ im Nanomaßstab besitzt; und in Glas wegen seiner Fähigkeit, bei Lichtexposition die Farbe zu wechseln [6, 22–24].
Siliciumdioxid (SiO ₂)	Lacke, Beton und Reinigungsprodukte [6, 23]
Silber-Nanopartikel	Werden in Farben/Lacken und Polituren, Polymeren, Spülbecken und Sanitärkeramik als Biozide eingesetzt, außerdem in verschiedenen „Verbraucheranwendungen“ wie Desinfektions- und Reinigungsmitteln [6].
Kohlenstoff-Nanoröhrchen	Lacke [23] und Leichtbaukonstruktionen
Ruß	Pigmente
Karbide (z. B. WC, TiC, SiC), Nitride (z. B. TiN, CrN), Metalle (z. B. W, Ti, Mo) oder Keramiken (z. B. Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃)	Tribologische Beschichtungen, die auf die Oberfläche eines Bauteils aufgebracht werden, um dessen Reibung und Verschleiß zu kontrollieren [25].
Eisenoxide	Klebstoffadditive; Rezepturen, die eine schaltbare Adhäsion ermöglichen (Bonding und Debonding) [25].
Zirkondioxid	Zement- und Kunststoffadditive
Kupferoxide	Holzschutzmittel
Gold-Nanopartikel	Kraftfahrzeuge und Schmiermittel [26]

Zu den Instandhaltungstätigkeiten, bei denen Arbeitnehmer Nanomaterialien ausgesetzt werden können, zählen u. a.:

- **Verwendung von flüssigen Produkten, die Nanomaterialien enthalten:**
 - Handhabung von flüssigen Produkten (z. B. Schmiermittel, Lacke, Beschichtungen und Klebstoffe) oder Beseitigung von Verschüttungen; beides kann zur dermalen Exposition ungeschützter Haut führen.

- Unter bestimmten Umständen müssen für Instandhaltungstätigkeiten flüssige Produkte vorbereitet werden; hierzu können bewegungsintensive Gieß- und Mischvorgänge zählen, bei denen Aerosole entstehen, die inhaliert (und dann teilweise verschluckt) werden oder sich auf ungeschützter Haut ablagern, wo sie zu einer dermalen Exposition führen.
- Spritzen beispielsweise von isolierenden Nanobeschichtungen oder Nanolacken kann zur Inhalation, Ingestion oder dermalen Exposition führen.
- Spritzen von flüssigen brennbaren Nanomaterialien erhöht außerdem die Explosions- oder Brandgefahr.
- **Verwendung von pulverförmigen Nanomaterialien**
 - Die Handhabung (z. B. Wiegen, Schütten oder Mischen) von nanomaterialhaltigen Pulvern zur Herstellung von Produkten, die für Instandhaltungsarbeiten benötigt werden, kann luftgetragene Nanomaterialien erzeugen und zur dermalen Exposition, Inhalation und Ingestion von Nanomaterialien führen.
- **Verwendung von gebundenen oder fixierten Nanostrukturen (Polymermatrix):**
 - Fräsen, Sandstrahlen, Bohren oder andere die Matrixstruktur schädigende Tätigkeiten können zur Freisetzung von Nanopartikeln in die Luft führen, und dies wiederum zur dermalen Penetration, Inhalation oder Ingestion von Nanopartikeln. Die in der abgetragenen Matrix enthaltenen Nanomaterialien werden nicht notwendigerweise als Primärpartikel freigesetzt, da sie an andere Partikel des Aerosols binden können, das in diesem Prozess entsteht; allerdings besteht die Möglichkeit, dass diese gebundenen Nanomaterialien ihre Bindung an die Aerosolpartikel verlieren, nachdem sie inhaliert wurden, und deshalb im Körper freigesetzt werden.
- **Instandhaltung von Anlagen zur Produktion oder Verarbeitung von Nanomaterialien oder nanomaterialhaltigen Produkten:**
 - Kann zur (in einigen Fällen versehentlichen) Freisetzung von Nanomaterialien mit dem potenziellen Risiko dermalen Exposition, Inhalation und Ingestion führen.
- **Reinigung von Entstaubungseinrichtungen, die zum Auffangen von Nanomaterialien eingesetzt werden:**
 - Kann Arbeitnehmer hoch konzentrierten abgelagerten oder luftgetragenen Nanomaterialien aussetzen und zur dermalen Exposition, Inhalation und Ingestion führen.
- **Beseitigung verschütteter Nanomaterialien:**
 - Kann zur dermalen Exposition, Inhalation und Ingestion führen.
- **Beförderung und Entsorgung von nanomaterialhaltigen Abfällen:**
 - Kann zur dermalen Exposition, Inhalation und Ingestion führen.

Außerdem können in Luft dispergierte Nanopulver die Explosions- oder Brandgefahr erhöhen. Das Expositionsniveau steigt, wenn die Tätigkeiten ohne angemessene Kontrollmaßnahmen in beengten Räumen wie Tanks durchgeführt werden.

3 Prävention

Gemäß der EU-Richtlinie 89/391/EWG [5] müssen Arbeitgeber die am Arbeitsplatz bestehenden Gefahren regelmäßig evaluieren und angemessene Präventionsmaßnahmen einleiten. Dies gilt auch für die potenziellen Risiken von Nanomaterialien am Arbeitsplatz. Zudem enthält die Richtlinie 98/24/EG über chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit [27] strengere Bestimmungen zum Management von Gefährdungen durch Arbeitsstoffe bei der Arbeit, die auch für Nanomaterialien gelten, da diese unter die Begriffsbestimmung von „Arbeitsstoffen“ fallen. Ist ein Nanomaterial oder das Makromaterial derselben Zusammensetzung karzinogen oder mutagen, ist außerdem die Richtlinie 2004/37/EG über Karzinogene und Mutagene bei der Arbeit [28] zu beachten. In jedem Fall ist das einzelstaatliche Recht zu prüfen, das strengere Bestimmungen enthalten kann.

Da Nanomaterialien als Stoffe gelten, sind die REACH-Verordnung (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) [29] und die CLP-Verordnung (Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen) [30] gleichermaßen von Bedeutung.

3.1 Herausforderungen bei der Prävention von nanomaterialbedingten Gefährdungen bei der Instandhaltung

Die Beurteilung der Gefährdung von Arbeitsplätzen durch Nanomaterialien kann aufgrund der Einschränkungen in den folgenden Bereichen eine Herausforderung darstellen:

1. Geringe Kenntnis der gefährlichen Eigenschaften von Nanomaterialien;
2. Beschränkungen der Verfahren und Geräte zur Bestimmung von Nanomaterialien und Emissionsquellen sowie zur Messung von Expositionsniveaus;
3. fehlende Informationen zum Vorhandensein von Nanomaterialien insbesondere in Gemischen oder Erzeugnissen und weiter unten in der Nutzerkette, in der Nanomaterialien oder nanomaterialhaltige Produkte verwendet oder verarbeitet werden.

Die Sicherheitsdatenblätter, die eine wichtige Informationsquelle zur Vermeidung von Risiken durch Gefahrstoffe am Arbeitsplatz darstellen, enthalten in der Regel nur wenige oder gar keine Informationen zum Vorhandensein von Nanomaterialien und deren Eigenschaften, zu den Risiken für Arbeitnehmer und zur Prävention [31–34]. Weiter unten in der Liefer- bzw. Auftragskette ist dies besonders problematisch. So wissen beispielsweise 75 % der Arbeitnehmer und Arbeitgeber im Baugewerbe nicht, dass Nanoprodukte an ihrem Arbeitsplatz vorhanden sind [35]. Unternehmen sollten sich deshalb direkt an den Hersteller wenden und nach weiteren Informationen fragen. Es gibt auch eine Reihe von nützlichen Datenbanken, die Informationen zu nanomaterialhaltigen kommerziellen Produkten enthalten [36–38]. Außerdem sollten Änderungen in Anhang II der REACH-Verordnung [39], dem Rechtsrahmen für die Sicherheitsdatenblätter, sowie die Leitlinien der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) zur Erstellung von Sicherheitsdatenblättern [40] mit weiteren Hinweisen, wie die Eigenschaften von Nanomaterialien zu behandeln sind, dazu führen, dass sich die Informationsqualität der Sicherheitsdatenblätter verbessert.

E-Fact Nr. 72 (<https://osha.europa.eu/en/publications/e-facts/e-fact-72-tools-for-the-management-of-nanomaterials-in-the-workplace-and-prevention-measures>) stellt verfügbare Leitlinien und Instrumente vor, die das Risikomanagement für Nanomaterialien im derzeitigen Umfeld erleichtern sollen. Doch kann es im Hinblick auf das Risikomanagement von Nanomaterialien und den Schutz von Arbeitnehmern bei Instandhaltungsarbeiten noch besondere zusätzliche Herausforderungen geben.

Die Untervergabe von Instandhaltungsarbeiten ist sehr stark verbreitet. Auftragnehmer arbeiten häufig in Einrichtungen, mit denen sie nicht vertraut sind, und wenn sie nicht richtig eingewiesen wurden, können sie Nanomaterialien ausgesetzt sein, ohne sich dessen bewusst zu sein. Fehlen Informationen über die Nanomaterialien, die in den zu wartenden Maschinen (z. B. Produktionslinien, in denen Nanomaterialien oder nanomaterialhaltige Produkte verwendet oder verarbeitet werden), Anlagen (z. B. Abgasabsauganlagen) oder Gebäuden (z. B. Flächen, die mit nanomaterialhaltigen Farben gestrichen wurden) vorkommen, ist eine angemessene Beurteilung und Prävention der Gefährdungen schwierig. Solche Situationen entstehen hauptsächlich, wenn Arbeitsplanung, Arbeitsorganisation und Kommunikation in beiden Richtungen der Auftragskette mangelhaft sind.

Eine weitere Herausforderung hängt damit zusammen, dass Instandhaltungsarbeiten häufig mit nicht normalen Betriebsbedingungen und Geräteeinsätzen verbunden sind. Bei Instandhaltungsarbeiten werden in manchen Fällen Risikokontrollmaßnahmen deaktiviert, wenn z. B. ein geschlossenes System geöffnet wird, um Arbeitnehmern die Instandhaltung einer Maschine zu ermöglichen, die Nanomaterialien herstellt oder verarbeitet, oder wenn die technische Risikokontrollvorrichtung selbst gewartet wird. Die Leitlinien, die zur Prävention von durch Nanomaterialien bedingten Gefährdungen in Bezug auf Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit verfügbar sind, gelten in der Regel für normale Betriebsbedingungen, doch könnte die Exposition der Arbeitnehmer unter diesen „nicht normalen“ Betriebsbedingungen signifikant verschieden sein. Sind für Instandhaltungsarbeiten keine angemessenen Kontrollmaßnahmen vorhanden, gefährdet dies natürlich das Instandhaltungspersonal, möglicherweise aber auch die Arbeitnehmer des Kundenunternehmens.

Potenzielle Risiken in Verbindung mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz müssen ordnungsgemäß ermittelt, beurteilt und vermittelt werden, bevor Instandhaltungsarbeiten geplant und durchgeführt (oder an Unterauftragnehmer vergeben) werden [41]. Wichtig ist die angemessene Information des Instandhaltungspersonal über das Vorhandensein, die Eigenschaften, möglichen Risiken und geeigneten Präventionsmaßnahmen im Zusammenhang mit Nanomaterialien, die an den Arbeitsplätzen verwendet, gehandhabt oder verarbeitet werden, an denen Instandhaltungsarbeiten durchzuführen sind, wie dies auch für jegliche andere Gefahren am Arbeitsplatz gilt. Eine angemessene Schulung und Unterweisung der Arbeitnehmer ist ebenfalls unerlässlich.

3.2 Präventionsmaßnahmen

Die Wahl der Präventionsmaßnahmen muss sich auf eine Gefährdungsbeurteilung des Arbeitsplatzes stützen und die Hierarchie der Kontrollmaßnahmen beachten: Vorrang haben Vermeidung und Ersetzung, dann folgen technische Maßnahmen an der Quelle, organisatorische Maßnahmen und als letztes Mittel die persönliche Schutzausrüstung (PSA). Bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Risiken von Nanomaterialien, ist bei der Wahl der Präventionsmaßnahmen dem Vorsorgeprinzip zu folgen, um Expositionen zu vermeiden.

3.2.1 Vermeidung und Ersetzung

Möglichkeiten zur Vermeidung und Ersetzung von gefährlichen Nanomaterialien sind gemeinsam mit dem Unternehmen zu ermitteln, für das die Instandhaltungsarbeiten ausgeführt werden sollen. Wird die Instandhaltung an Arbeitsplätzen durchgeführt, an denen Nanomaterialien hergestellt oder verwendet werden, weil ihre Nanoeigenschaften nützlich sind, oder werden Gebäudestrukturen instand gehalten, die bereits Nanomaterialien enthalten, sind Vermeidung und Ersetzung gegebenenfalls keine Option. Es sollte jedoch immer zwischen den gewünschten Eigenschaften und Auswirkungen einerseits und den Gesundheitsrisiken andererseits abgewogen und Vermeidungs- und Ersetzungsoptionen sollten sorgfältig geprüft werden. Werden Produkte, die gefährliche Nanomaterialien enthalten, beispielsweise zu Reinigungs- oder Reparaturzwecken eingesetzt, ist die Verfügbarkeit weniger gefährlicher Alternativen zu prüfen.

Auf jeden Fall sollten Nanomaterialien in einer Form, in der sie in die Luft gelangen können (wie Pulver) vermieden und durch gelöste oder flüssige Formen, Granulate oder Pasten oder auch durch Nanomaterialien ersetzt werden, die an Feststoffe gebunden sind. Die Verwendung von Pulvern ist zu vermeiden, wann immer dies möglich ist.

Gegebenenfalls kann das Gefahrenpotenzial eines Nanomaterials auch durch seine Veränderung gemindert werden, etwa durch eine Beschichtung, mit der Staubigkeit, Löslichkeit und andere Eigenschaften eingestellt werden können.

Es gibt spezielle webgestützte Informationsprogramme (z. B. Stoffenmanager [42] oder GISBAU [43]), die bei der Suche nach Ersatzlösungen helfen können.

3.2.2 Technische Schutzmaßnahmen

Technische Präventionsmaßnahmen sollten an der Emissionsquelle von Nanomaterialien umgesetzt werden. Die effizienteste technische Schutzmaßnahme an der Quelle ist ein Einschluss durch die Nutzung geschlossener Systeme und Anlagen. Geeignete lokale Abluftsysteme mit Hochleistungsschwebstofffiltern (HEPA oder ULPA) sind ebenfalls ein wirksames Mittel, um Nanomaterialien an der Quelle aufzufangen, wenn ein Einschluss unmöglich ist.

In manchen Fällen kann die Instandhaltungsarbeit aber gerade in der Inspektion und Reparatur dieser technischen Schutzmaßnahmen bestehen, wobei deren Schutzfunktion gegebenenfalls ausgeschaltet werden muss. Wird beispielsweise ein Produktionsbehälter (normalerweise ein geschlossenes System) für Instandhaltungsarbeiten geöffnet und das Abluftsystem deshalb abgeschaltet, ist das Instandhaltungspersonal auf seine persönliche Schutzausrüstung angewiesen (siehe Abschnitt 3.2.4).

Lokale (mobile) Abluftsysteme können besonders nützlich sein, um Arbeitnehmer bei der Instandhaltung vor Expositionen zu schützen, beispielsweise bei der Entfernung von Lacken von Oberflächen, bei der sich Partikel bilden. Die Auffangeffizienz des lokalen Abluftsystems für Nanomaterialien ist nicht geringer als die für Grobstoffe. Werden mobile Abluftgeräte eingesetzt, ist darauf zu achten, dass sich die Atemzonen der Arbeitnehmer nicht im Luftstrom zwischen der potenziellen Nanomaterial-Emissionsquelle und dem Abluftsystem befinden.

Lüftungsanlagen zur Kontrolle der Exposition gegenüber Nanomaterialien müssen mit einem Mehrstufenfilter ausgestattet sein, dem als letzte Stufe ein HEPA- (H14) oder ULPA-Filter nachzuschalten ist. Untersuchungen zur Wirksamkeit von Filterstoffen bei Nanopartikeln und Aerosolen haben gezeigt, dass herkömmliche Filter aus Glasfasern und Elektretfilter in vielen Fällen auch bei Nanopartikeln und Aerosolen allgemein wirksam sind.

In beengten Räumen muss die abgesaugte Luft durch Frischluft ersetzt werden.

3.2.3 Organisatorische Maßnahmen

Organisatorische Maßnahmen sind ein wichtiger Teil der Prävention. Wegen der großen Vielfalt von Instandhaltungsorten und –aufgaben sind eine geeignete Ablaufplanung und andere organisatorische Maßnahmen von entscheidender Bedeutung. Zu diesen Maßnahmen gehören:

- Festlegung besonderer Bereiche für die Durchführung von Instandhaltungsarbeiten, bei denen Nanomaterialien freigesetzt werden könnten (entweder aus den Instandhaltungsprodukten oder aus den zu wartenden Objekten). Diese Bereiche müssen isoliert oder beispielsweise durch Wände von anderen Arbeitsplätzen getrennt und durch geeignete Zeichen klar kenntlich gemacht werden;
- Minimierung der Zahl der Arbeitnehmer, die Nanomaterialien ausgesetzt werden könnten, und der Dauer der Exposition gegenüber Nanomaterialien;
- Zugangsverbot für unbefugtes Personal zu dem Bereich, in dem die Instandhaltungstätigkeit ausgeführt wird, beispielsweise durch Aufstellen von Schildern oder Absperren des Bereichs;
- regelmäßige Reinigung (feuchtes Wischen) von Arbeitsflächen, auf denen Nanomaterialien verwendet oder gehandhabt werden;
- Überwachung der Immissionskonzentrationen z. B. im Vergleich zu den Hintergrundkonzentrationen, wenn keine Nanomaterialien gehandhabt werden.

Da es derzeit kein standardisiertes Konzept für die Verwendung von Sicherheitszeichen oder die Kennzeichnung von Arbeitsplätzen oder Behältern mit Nanomaterialien gibt, sollte eine umsichtige Vorgehensweise gewählt werden, die auf in der EU-Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP) [30] verfügbare Risiko- und Sicherheitssätze sowie auf Warnzeichen zurückgreift, um angemessene, sachdienliche und spezifische Informationen zu allen tatsächlichen oder möglichen Gesundheits- oder Sicherheitsgefährdungen bereitzustellen, die sich aus der Verwendung oder Handhabung von Nanomaterialien ergeben.

Bei Instandhaltungsabläufen sollten einige allgemeine Grundsätze beachtet werden, die auch gelten, wenn keine Nanomaterialien beteiligt sind:

- Die Planung der Instandhaltungsarbeiten muss sich auf eine Gefährdungsbeurteilung stützen und die Arbeitnehmer einbeziehen. Wenn Instandhaltungsarbeiten an Arbeitsplätzen verrichtet werden, an denen Nanomaterialien gehandhabt werden, deren Toxizität und Eigenschaften unbekannt sind, muss dies berücksichtigt werden. Beim Risikomanagement sollte nicht nur bekannten Risiken Priorität eingeräumt werden, sondern auch der Beurteilung und dem Management von Nanomaterialien an Arbeitsplätzen, wenn Gefahren- und Expositionsinformationen fehlen, unvollständig oder unsicher sind.
- Zeitdruck ist zu vermeiden, d. h. es sollte ausreichend Zeit für die Umsetzung und Durchführung der Instandhaltungsarbeiten eingeplant werden.
- Es sind ausreichende Schulungen durchzuführen, damit gewährleistet ist, dass das Instandhaltungspersonal über Fähigkeiten und Kenntnisse verfügt, mit denen es sicher arbeiten und sich vor Expositionen gegenüber freigesetzten Nanomaterialien schützen kann.
- Anweisungen und Informationen zur Instandhaltung müssen immer das gesamte Instandhaltungspersonal erreichen; dies gilt insbesondere, wenn Arbeitnehmer nur für eine Aufgabe eingestellt werden und/oder mit den Risiken von chemischen Stoffen im Allgemeinen und denen von Nanomaterialien im Besonderen nicht vertraut sind. Diese Informationen müssen auch in den Arbeitsanweisungen dokumentiert werden.
- Für Nanomaterialien sollte ein vorsorgliches Risikopräventionskonzept gewählt werden. Im Einklang mit der Hierarchie der Präventionsmaßnahmen müssen alle verfügbaren Maßnahmen umgesetzt werden, um die Freisetzung von Nanomaterialien zu reduzieren.
- Nach Abschluss der Instandhaltung sollten der Arbeitsplatz gereinigt und der gesamte Instandhaltungsablauf dokumentiert werden.

Arbeitnehmer, die bei Instandhaltungsarbeiten gefährlichen Nanomaterialien ausgesetzt sind, sollten in Gesundheitsüberwachungsprogramme aufgenommen werden, wobei Expositionssituationen umfassend dokumentiert werden sollten.

3.2.4 Persönliche Schutzausrüstung

Eine persönliche Schutzausrüstung (PSA) sollte nur als letztes Mittel eingesetzt werden, wenn die Exposition durch die oben angeführten Maßnahmen nicht wirksam genug reduziert werden kann. Wenn sich eine PSA nach der Gefährdungsbeurteilung als notwendig erweist, sollte ein PSA-Programm erstellt werden. Ein gutes PSA-Programm besteht aus den folgenden Elementen: Wahl einer geeigneten PSA, Anpassung, Schulung und Instandhaltung der PSA.

Die Empfehlungen zur Schutzausrüstung gegen Nanomaterialien sind derzeit dieselben wie diejenigen, die für die Prävention von Expositionen gegenüber Stäuben und Aerosolen oder, je nach Art der betreffenden Exposition, von dermalen Expositionen gelten [44]. Es wird davon ausgegangen, dass diese Schutzmaßnahmen bei Nanomaterialien gleichermaßen wirksam sind.

Das Arbeitstempo und die medizinische Tauglichkeit des PSA-Trägers müssen geprüft werden, um sicherzustellen, dass die PSA ausreichenden Schutz bietet und angemessen verwendet werden kann. Durch Versuche mit der PSA ist zu gewährleisten, dass die Nutzer ihre Arbeit mit angelegter PSA sicher durchführen und gleichzeitig noch andere erforderliche Ausrüstungsgegenstände (z. B. Brillen) oder Werkzeuge bedarfsgerecht verwenden können. Zu beachten ist, dass das Schutzniveau der PSA abnehmen kann, wenn mehrere PSA gleichzeitig eingesetzt werden. Auch können neben Nanomaterialien weitere Gefahren bestehen und die Wirksamkeit der PSA herabsetzen. Deshalb müssen bei der Wahl einer PSA alle Gefahren am Arbeitsplatz berücksichtigt werden. Alle PSA müssen das CE-Zeichen tragen und unverändert nach den Anweisungen des Herstellers verwendet werden.

Das Instandhaltungspersonal muss gegebenenfalls eine PSA tragen, auch wenn diese während des Normalbetriebs am Arbeitsplatz, an dem die Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden, nicht notwendig ist. Wird beispielsweise ein Produktionsbehälter geöffnet, in dem nanomaterialhaltiger Lack gemischt wird, muss der Arbeitnehmer eine Atemschutzmaske mit externer Luftversorgung tragen, um die Inhalation von Nanomaterialien zu verhindern. Im Normalbetrieb bleibt der Behälter geschlossen, und ein Atemschutzgerät ist nicht erforderlich.

▪ **Atemschutz**

Wenn die Exposition gegenüber luftgetragenen Nanomaterialien durch die in den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.3 beschriebenen Präventionsmaßnahmen nicht verhindert werden kann, wird das Tragen eines für die Situation geeigneten Atemschutzes empfohlen. Dabei kann es sich um Halb- oder Vollmasken mit Filtern der Schutzstufen P3/FFP3 oder P2/FFP2, um Atemschutzhelme mit Gebläse und Partikelfilter (TH2P oder MH3P) oder um Voll- oder Halbmasken mit Gebläse und Partikelfilter (TM2P und TM3P) handeln ⁽²⁾ [45].

HEPA-Filter, Atemschutzkartuschen und –masken mit faserförmigen Filtermaterialien gelten als wirksamer Schutz gegen luftgetragene Nanomaterialien.

Die Wahl eines Atemschutzgerätes hängt von folgenden Faktoren ab:

- Art, Größe und Konzentration des luftgetragenen Nanomaterials;
- Schutzfaktor des Atemschutzgerätes (berücksichtigt die Filtereffektivität und die Dichtigkeit des Sitzes am Gesicht);
- Arbeitsbedingungen.

Die Filterwirkung von Atemschutzgeräten und Filtern ist ein wichtiger Faktor für die Bewertung der PSA. Andere Faktoren wie die Gesichtspassform, die Tragedauer und die ordnungsgemäße Instandhaltung können die Expositionsminderung ebenfalls beeinflussen. In Bezug auf die Filterwirkung haben sich Halbmasken mit mangelhafter Dichtung zwischen Gesicht und Maske als dominanter Risikofaktor erwiesen [44]. Die Expositionsminderung sollte immer als eine Kombination aus Filtereffizienz und Nutzungsmerkmalen des Atemschutzgerätes gesehen werden und wird in einigen Ländern als Schutzfaktor des Atemschutzgerätes angegeben.

² Untersuchungen zufolge werden P2-Filter zu 0,2 % und P3-Filter zu 0,011 % von Nanopartikeln aus Kaliumchlorid penetriert. Tests mit Graphitpartikeln unterschiedlicher Größe ergaben eine Penetration von maximal 8 %. Dies deutet auf eine höhere Schutzwirkung von P3-Filtern hin, doch können die Ergebnisse nicht auf alle Nanopartikel angewandt werden (siehe [45]).

Deckt ein Atemschutzgerät die Augen nicht ab, sollte zusätzlich ein Augenschutz getragen werden (dicht sitzende Schutzbrille).

▪ **Schutzkleidung**

Nicht gewebte Textilien (luftdichte Stoffe) wie Polyethylen hoher Dichte (geringe Staubrückhaltung und geringe Staubfreisetzung) sind gewebten vorzuziehen, und das Tragen von Schutzkleidung aus Baumwollgewebe sollte vermieden werden [44].

Wird wiederverwendbare Schutzkleidung (z. B. Overalls) verwendet, sollte für regelmäßige Wäsche und die Vermeidung von Sekundärexpositionen gesorgt werden. Es sollten geeignete Vorkehrungen getroffen werden, sodass saubere Overalls und Schutzkittel angelegt und schmutzige in einer Weise entfernt werden können, die eine Kontamination der Personen oder des allgemeinen Arbeitsumfeldes ausschließt.

▪ **Handschuhe**

Handschuhe sind bei Instandhaltungsarbeiten besonders wichtig, da Arbeitnehmer häufig direkten Kontakt mit Nanomaterialien haben, die entweder aus den von ihnen verwendeten Produkten oder den Objekten und Materialien stammen, die sie instand halten. Wie für Chemikalien gilt generell, dass die Wirksamkeit des Schutzmaterials von den besonderen Merkmalen der Nanomaterialien abhängt. Besondere Empfehlungen des Herstellers zu einem Nanomaterial, wie sie etwa dem Sicherheitsdatenblatt zu entnehmen sind, müssen berücksichtigt werden. Bei Titandioxid- und Platinpartikel haben sich Nitril, Latex und Neopren als wirksam erwiesen [44]. Ein wesentlicher Faktor für die Diffusionsrate des Nanomaterials ist die Dicke des Handschuhmaterials. Es wird deshalb empfohlen, zwei Paar Handschuhe übereinander zu tragen [46].

Dies soll jedoch einer Beurteilung, ob Handschuhe für die Handhabung von Flüssigkeiten oder Kolloiden geeignet sind, nicht vorgreifen. Ob Handschuhe für ein bestimmtes Nanomaterial in der Form, in der es am Arbeitsplatz auftritt (Stäube, Flüssigkeiten usw.), wirksam sind, ist im Einzelfall mit dem Handschuhlieferanten zu klären.

3.3 Explosions- und/oder Brandschutz

Wegen ihrer geringen Größe können pulverförmige Nanomaterialien explosionsgefährlich sein, ihre größeren Varianten jedoch nicht ⁽³⁾ [47]. Darauf ist zu achten, wenn Nanopulver gehandhabt oder hergestellt werden (z. B. durch Schleifen, Schmirgeln oder Polieren von Werkstoffen, die Nanomaterialien enthalten).

Die Präventionsmaßnahmen für pulverförmige Nanomaterialien sind im Wesentlichen dieselben, die für sonstige explosive und entzündliche Grobstoffe und explosive Staubwolken gelten, und müssen den Anforderungen der Richtlinie 99/92EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können, entsprechen. Zu solchen Maßnahmen zählen:

- Die Handhabung sollte möglichst nur in speziellen Ex-Zonen und unter Inertatmosphäre erfolgen.
- Materialien sollten durch Befeuchtung des Arbeitsplatzes gebunden werden (Verhinderung von Stäuben).
- Am Arbeitsplatz sollten Geräte mit unzureichendem Funkenschutz und andere Zündquellen entfernt und Zustände beseitigt werden, die eine elektrostatische Entladung fördern; stattdessen sollten nach Möglichkeit eigensichere Geräte eingesetzt werden (deren Signal- und Steuerschaltungen mit niedrigen Strömen und Spannungen betrieben werden).
- Staubablagerungen sind durch feuchtes Wischen zu entfernen.
- Explosive oder entflammbare Materialien sollten am Arbeitsplatz nur in möglichst geringen Mengen gelagert werden. Die Verwendung antistatischer Beutel ist zulässig.

⁽³⁾ Die Explosionsfähigkeit der meisten organischen und vieler metallischer Stäube wächst mit abnehmender Partikelgröße. 500 µm scheinen eine Obergrenze für die Partikelgröße in einer explosionsfähigen Staubwolke zu sein. Bisher wurde aber noch keine Untergrenze ermittelt, unterhalb derer Explosionen ausgeschlossen werden können (siehe [47]).

3.4 Prüfung der Präventionsmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit

Die Gefährdungsbeurteilung sollte regelmäßig aktualisiert werden, und die Auswahl und Umsetzung der Risikopräventionsmaßnahmen sollten regelmäßig kontrolliert und auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Es sollte also sichergestellt werden, dass alle Schutzvorrichtungen wie Reinraumbänke oder Laminarstromkabinen ordnungsgemäß funktionieren. Alle Lüftungsanlagen und ihre jeweiligen Filtersysteme sollten regelmäßig überprüft werden. Außerdem muss die PSA auf ihre Eignung geprüft und bei Bedarf auf den neuesten Stand gebracht werden.

Ergänzend kann die Wirksamkeit einer Risiko mindernden Maßnahme beurteilt werden, indem die Luftkonzentrationen der Nanomaterialien vor und nach ihrer Einführung analysiert werden. Die Expositionsniveaus, die nach Einführung der Risikomanagementmaßnahmen gemessen werden, dürfen sich nicht signifikant von den Hintergrundkonzentrationen unterscheiden, die sich ohne eine Quelle von hergestellten Nanomaterialien einstellen. Auch andere indirekte Messungen der Wirksamkeit von technischen Präventionsmaßnahmen wie etwa Rauchversuche und/oder Messungen der Kontrollgeschwindigkeit können durchgeführt werden.

Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) für Nanomaterialien ⁽⁴⁾ [48] werden voraussichtlich in Zukunft festgelegt. Das Hauptziel des Risikomanagements am Arbeitsplatz sollte jedoch die Expositionsminimierung sein, weshalb die bloße Einhaltung der AGW nicht ausreicht.

Quellenverweise

1. Empfehlung der Europäischen Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien, ABl. L 275, S. 38-40. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:DE:PDF>
2. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *Approaches to Safe Nanotechnology—Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials* (Konzepte für sichere Nanotechnologien—Umgang mit Gesundheits- und Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit hergestellten Nanomaterialien), Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, Publication No. 2009–125, 2009.
3. Europäische Kommission (EK), *Commission Staff Working Paper: Types and Uses of Nanomaterials, Including Safety Aspects. Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee on the Second Regulatory Review on Nanomaterials* (Arbeitspapier der Kommissionsdienststellen: Arten und Verwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien, einschließlich der Sicherheitsaspekte. Begleitdokument zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss – Zweite Überprüfung der Rechtsvorschriften zu Nanomaterialien), SWD(2012) 288 endgültig, Brüssel, 2012. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2012:0288:FIN:EN:PDF>
4. Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), *Workplace Exposure to Nanoparticles* (Nanopartikelexposition am Arbeitsplatz), Europäische Beobachtungsstelle für Risiken, Literaturstudie, 2009. Verfügbar unter: http://osha.europa.eu/en/publications/literature_reviews/workplace_exposure_to_nanoparticles
5. Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit, ABl. L183 vom 29. Jun. 1989. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31989L0391:DE:NOT>
6. Senjen, R., „Nanomaterials - Health and Environmental Concerns (Nanomaterialien – Gesundheits- und Umweltbedenken)“, *Nanotechnologies in the 21st century*, European Environmental Bureau, Ausgabe 2, Juli 2009. Verfügbar unter: <http://www.eeb.org/?LinkServID=540E4DA2-D449-3BEB-90855B4AE64E8CE6&showMeta=0>

⁽⁴⁾ Siehe beispielsweise den Sozialwirtschaftlichen Rat der Niederlande (SER) (2012), Provisional nano reference values for engineered nanomaterials (Vorläufige Nanobezugswerte für hergestellte Nanomaterialien), und Nanowerk (2012), SAFENANO Team, BSI British Standards, Guide to Safe Handling of Nanomaterials (Leitfaden zur sicheren Handhabung von Nanomaterialien).

7. Nanowerk, *Introduction to Nanotechnology* (Einführung in die Nanotechnologie), 2012. Verfügbar unter: http://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction_to_nanotechnology_1.php (abgerufen am 19. Oktober 2012).
8. The ENRHES project, *Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety (ENRHES – Hergestellte Nanopartikel: Übersicht über die Sicherheit für Gesundheit und Umwelt)*, 2009. Verfügbar unter: <http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/whats-new/enhres-final-report> (abgerufen am 29. April 2013).
9. Wissenschaftlicher Ausschuss „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ (SCENIHR), *Request for a Scientific Opinion on Nanosilver: Safety, Health and Environmental Effects and Role in Antimicrobial Resistance* (Ersuchen um ein wissenschaftliches Gutachten über Nanosilber: Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltauswirkungen und Rolle bei antimikrobieller Resistenz), 2012. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_q_027.pdf
10. Bundesministerium für Gesundheit (BMG), *Nanosilber in Kosmetika, Hygieneartikeln und Lebensmittelkontaktmaterialien - Produkte, gesundheitliche und regulatorische Aspekte*, Wien, 2010. Verfügbar unter: http://bmg.gv.at/cms/home/attachments/9/7/2/CH1180/CMS1288805248274/bmg_nanosilber_fassung_veroeffentlichung_final_mit_deckblaetter1.pdf
11. Europäische Kommission (EK), *Commission Staff Working Paper: Types and Uses of Nanomaterials, Including Safety Aspects. Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee on the Second Regulatory Review on Nanomaterials* (Arbeitspapier der Kommissionsdienststellen: Arten und Verwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien, einschließlich der Sicherheitsaspekte. Begleitdokument zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss – Zweite Überprüfung der Rechtsvorschriften zu Nanomaterialien), SWD(2012) 288 endgültig, Brüssel, 3. Oktober 2012. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2012:0288:FIN:EN:PDF>
12. Luoma, S.N., *Silver Nanotechnologies and the Environment: Old Problems or New Challenges?* (Silber-Nanotechnologien und die Umwelt: Alte Probleme oder neue Herausforderungen?), the Pew Charitable Trust and the Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2008. Verfügbar unter: http://www.nanotechproject.org/process/assets/files/7036/nano_pen_15_final.pdf
13. Haase, A., Rott, S., Manton, A., Graf, P., Plendl, J., Thünemann, A.F., Meier, W.P., Taubert, A., Luch, A., Reiser, G., 'Effects of silver nanoparticles on primary mixed neural cell cultures: uptake, oxidative stress and acute calcium responses', *Toxicology Sciences*, 2012, 126(2): S. 457–468.
14. Weltgesundheitsorganisation (WHO), Carbon Black, Titanium Dioxide and Talc (Ruß, Titandioxid und Talk), IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 93, 2010. Verfügbar unter: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol93/mono93.pdf>
15. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), „Occupational exposure to titanium dioxide (Berufsbedingte Exposition gegenüber Titandioxid)“, *Current Intelligence Bulletin* 63, 2011. Verfügbar unter: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-160/>.
16. Napierska, D., Thomassen, L.C.J., Lison, D., Martens, J.A., Hoet, P.H., „The nanosilica hazard: another variable entity (Das Risiko von Nanosiliciumdioxid: eine weitere variable Größe)“, *Particle and Fibre Toxicology*, 2010, 7: S. 39.
17. Lauterwasser, C., *Small Size that Matter: Opportunities and Risks of Nanotechnologies* (Auch kleine Größen zählen: Chancen und Risiken der Nanotechnologien), Bericht des Allianz Center for Technology und der OECD, ohne Datum. Verfügbar unter: <http://www.oecd.org/dataoecd/32/1/44108334.pdf>
18. Murashov, V., „Occupational exposure to nanomedical applications (Berufsbedingte Exposition bei nanomedizinischen Anwendungen)“, *WIREs Nanomed Nanobiotechnol*, 2009, 1: S. 203–213.
19. Hanson, N., Harris, J., Joseph, L.A., Ramakrishnan, K., Thompson, T., *EPA Needs to Manage Nanomaterial Risks More Effectively* (Die EPA muss mit den Risiken von Nanomaterialien effektiver umgehen), U.S. Environmental Protection Agency, Bericht Nr. 12-P-0162, 2011. Verfügbar unter: <http://www.epa.gov/oig/reports/2012/20121229-12-P-0162.pdf>

20. Gratieri, T., Schaefer, U.F., Jing, L., Gao, M., Kostka, K.H., Lopez, R.F.V., Schneider, M., „Penetration of quantum dot particles through human skin (Penetration von Quantenpunktpartikeln durch die menschliche Haut)“, *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 2010, 6(5): S. 586–595.
21. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories* (Allgemeine Sicherheitspraktiken für die Arbeit mit hergestellten Nanomaterialien in Forschungslaboratorien), Department Of Health And Human Services, Publication Number 2012–147, 2012.
22. Elvin, G., *Nanotechnology for Green Building* (Nanotechnologie für ökologisches Bauen), Green Technology Forum, 2007. Verfügbar unter: http://esonn.fr/esonn2010/xlectures/mangematin/Nano_Green_Building55ex.pdf
23. Responsible Nano Forum, *Nano Products - Where and How Nanotechnologies are Used Now* (Nanoprodukte – Wo und wie werden heute Nanotechnologien genutzt), ohne Datum. Verfügbar unter: <http://www.nanoandme.org/nano-products/> (abgerufen am 19. Oktober 2012).
24. United States Government Accountability Office Nanotechnology (GAO), *Improved Performance Information Needed for Environmental, Health, and Safety Research* (Bedarf an besseren Verhaltensinformationen für die Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsforschung) (2012). Verfügbar unter: <http://www.gao.gov/assets/600/591007.pdf> (abgerufen am 19. Oktober 2012).
25. Observatory NANO, *Coatings, Adhesives and Sealants for the Transport Industry* (Beschichtungen, Klebstoffe und Dichtmittel für das Verkehrswesen), 2010. Verfügbar unter: http://www.observatorynano.eu/project/filesystem/files/NOB_coating_adhesives_sealants_transport_final.pdf (abgerufen am 19. Oktober 2012).
26. Sung, J.H., Ji, J.H., Park, J.D., Song, M.Y., Song, K.S., Ryu, H.R., Yoon, J.U., Jeon, K.S., Jeong, J., Han, B.S., Chung, Y.H., Chang, H.K., Lee, J.H., Kim, D.W., Kelman, B.J., Yu, I.J., „Subchronic inhalation toxicity of gold nanoparticles (Toxizität von Gold-Nanopartikeln bei subchronischer Inhalation)“, *Particle and Fibre Toxicology*, 2011, 8: S. 16.
27. Richtlinie 98/24/EG des Rates vom 7. April 1998 zum Schutz von Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit (vierzehnte Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABl. L 131 vom 5. Mai 1998. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0024:20070628:DE:PDF>
28. Richtlinie 2004/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit (Sechste Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG des Rates), ABl. L 158 vom 30. April 2004. Verfügbar unter: [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0037R\(01\):DE:NOT](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0037R(01):DE:NOT)
29. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, ABl. L 396 vom 30. Dezember 2006. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006R1907:de:NOT>
30. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP-Verordnung), ABl. L 353 vom 31. Dezember 2008. Verfügbar unter: <http://echa.europa.eu/web/guest/regulations/clp/legislation>
31. Schneider, T., Jansson, A., Jensen, K.A., Kristjansson, V., Luotamo, M., Nygren, O., Skaug, V., Thomassen, Y., Tossavainen, A., Tuomi, T., Wallin, H., „Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles (Bewertung und Kontrolle von durch Nanopartikel bedingten Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz)“, *TemaNord* 2007: 581, Nordic Council of Ministers, Kopenhagen, 2007. Verfügbar unter: http://www.norden.org/da/publikationer/publikationer/2007-581/at_download/publicationfile

32. Borm, P., Houba, R., Linker, F., *Good Uses of Nanomaterials in the Netherlands* (Gute Nutzungen von Nanomaterialien in den Niederlanden), Vorstellung und Vertrieb durch Nano4All, 15. Oktober 2008.
33. Österreichisches Zentral-Arbeitsinspektorat, *Umgang mit Nano im Betrieb*, 2009. Verfügbar unter: http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/592E7E96-E136-453F-A87B-3C393FC039E1/0/Nano_Untersuchung.pdf
34. SafeWork Australia, *An Evaluation of MSDS and Labels associated with the use of Engineered Nanomaterials* (Bewertung von Sicherheitsdatenblättern und Zeichen im Zusammenhang mit der Verwendung hergestellter Nanomaterialien). <http://safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/Whatwedo/Publications/Pages/RP201006EvaluationOfMSDSAndLabels.aspx>.
35. van Broekhuizen, F.A., van Broekhuizen, J.C., *Nanotechnology in the European Construction Industry— State of the art 2009 - Executive Summary* (Nanotechnologie in der europäischen Bauwirtschaft – *Stand der Dinge 2009 – Zusammenfassung*), European Federation of Building and Wood Workers (EFBWW), European Construction Industry Federation (FIEC), Amsterdam, 2009. Verfügbar unter: <http://www.efbww.org/pdfs/Nano%20-%20GB%20Summary.pdf>
36. The European Consumers' Organisation (ANEC/BEUC), *Inventory of Products Claiming to Contain Nano-silver Particles Available on the EU Market* (Verzeichnis von Produkten, die angeblich Nanosilberpartikel enthalten und auf dem EU-Markt verfügbar sind), 2012. Verfügbar unter: <http://www.beuc.org/beucnoframe/Common/GetFile.asp?PortalSource=2530&DocID=24222&mfd=off&pdoc=1> (abgerufen am 19. Oktober 2012).
37. National Library of Medicine, Consumer Product Information Database, *The Household Products Database* (Datenbank der Haushaltsprodukte), 2011. Verfügbar unter: <http://hpd.nlm.nih.gov/about.htm> (abgerufen am 19. Oktober 2012).
38. Europäische Kommission (EK), *Commission Staff Working Paper: Types and uses of nanomaterials, including safety aspects. Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee on the Second Regulatory Review on Nanomaterials* (Arbeitspapier der Kommissionsdienststellen: Arten und Verwendungsmöglichkeiten von Nanomaterialien, einschließlich der Sicherheitsaspekte. Begleitdokument zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss – Zweite Überprüfung der Rechtsvorschriften zu Nanomaterialien), SWD(2012) 288 endgültig, Brüssel, 2012. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2012:0288:FIN:EN:PDF>
39. Verordnung (EU) Nr. 453/2010 der Kommission vom 20. Mai 2010 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), ABl. L 133 vom 31. Mai 2010.
40. Europäische Chemikalienagentur (ECHA), Leitlinien zur Erstellung von Sicherheitsdatenblättern, Dezember 2013. Verfügbar unter: http://echa.europa.eu/documents/10162/13643/sds_de.pdf
41. Nunes, I.L., „*The nexus between OSH and subcontracting* (Zusammenhang zwischen Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit und Unterauftragsvergabe)“, *Arbeit: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 2012, 41, supplement 1: S. 3062–3068.
42. Dutch Ministry of Social Affairs and Employment, *Stoffenmanager 4.5*, ohne Datum. Verfügbar unter: <https://www.stoffenmanager.nl/> (Niederländisch, Englisch und Finnisch) (abgerufen am 3. Dezember 2012).
43. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), *Gefahrstoff-Informationssystem der BG BAU - GISBAU*. Verfügbar unter: <http://www.gisbau.de/index.html>.
44. Golanski, L., Guillot, A., Tardif, F., *Are Conventional Protective Devices such as Fibrous Filter Media, Respirator Cartridges, Protective Clothing and Gloves also Efficient for Nanoaerosols?* (Sind herkömmliche Schutzvorrichtungen wie Faserfiltermedien, Atemschutzkartuschen, Schutzkleidung und Handschuhe auch bei Nanoaerosolen wirksam?), DR-325/326-200801-1, Nanosafe2, 2008. Verfügbar unter: http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR1_s.pdf

45. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, „Sichere Verwendung von Nanomaterialien in der Lack- und Farbenbranche - Ein Betriebsleitfaden“, *Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech*, Band 11, 2009. Verfügbar unter: www.hessen-nanotech.de
46. Klenke, M., *First Results for Safe Procedures for Handling Nanoparticles* (Erste Ergebnisse zu Sicherheitsverfahren für die Handhabung von Nanopartikeln), DR-331 200810-6, Nanosafe2, 2008. Verfügbar unter: http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR6_s.pdf
47. Dyrba, B., *Explosionsschutz: Handlungsbedarf bei Nanostäuben*, ohne Datum. Verfügbar unter: <http://www.arbeitssicherheit.de/de/html/fachbeitraege/anzeigen/337/Explosionsschutz-Nanostaub/> (abgerufen am 3. Dezember 2012).
48. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (OAW ITA), *Industrielle Selbstverpflichtungen und freiwillige Maßnahmen im Umgang mit Nanomaterialien*, 2010. Verfügbar unter: <http://epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier016en.pdf> (abgerufen am 10. Juni 2011).

Weiterführende Lektüre

- Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), *Online-Datenbank Fallstudien*, 2012. Verfügbar unter: http://osha.europa.eu/en/practical-solutions/case-studies/index_html/practical_solution?SearchableText=&is_search_expanded=True&getRemoteLanguage=en&keywords%3Alist=nanotechnology&nace%3Adefault=&multilingual_thesaurus%3Adefault=&submit=Search (abgerufen am 23. Juli 2012).
- Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IGBCE), *Nanomaterialien—Herausforderung für Arbeits- und Gesundheitsschutz*, Hauptvorstand, 2011. Verfügbar unter: <http://www.igbce.de/download/15044-15052/2/nanomaterialien.pdf>
- Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), *Safe Maintenance in Practice* (Sichere Instandhaltung in der Praxis), 2010. Verfügbar unter: <http://osha.europa.eu/en/publications/reports/safe-maintenance-TEWE10003ENC/view>
- Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), *Magazin 12. – Healthy Workplaces. A European Campaign on Safe Maintenance* (Gesunde Arbeitsplätze. Europäische Kampagne zur sicheren Instandhaltung), 2011. Verfügbar unter: <http://osha.europa.eu/en/publications/magazine/12/view>
- Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), *Sichere Instandhaltung - Für Arbeitgeber, Sicherheit für alle spart auch Geld*, Facts 89, 2011. Verfügbar unter: <https://osha.europa.eu/en/publications/factsheets/89>
- Health and Safety Executive (HSE), *Risk Management of Carbon Nanotubes* (Risikomanagement für Kohlenstoff-Nanoröhrchen), Crown, 2009. Verfügbar unter: www.hse.gov.uk/pubns/web38.pdf (abgerufen).