

NANOMATERIALIEN IM GESUNDHEITSWESEN: RISIKEN UND PRÄVENTION BEI DER ARBEIT

Das Gebiet der Nanotechnologie entwickelt sich rasant, und Nanomaterialien werden immer häufiger eingesetzt. Wie in vielen anderen Wirtschaftszweigen nimmt der Einfluss der Nanotechnologie im Gesundheitswesen zu. Für Arbeitnehmer bedeutet das ein größeres Risiko im Hinblick auf die Exposition gegenüber Nanomaterialien an ihrem Arbeitsplatz. In Gesundheitsanwendungen können Nanotechnologie und Nanomaterialien verschiedene Vorteile bieten. So haben sich durch das Zusammenwirken von Miniaturisierungsverfahren und –konzepten mit der chemischen Synthese und Kontrolle molekularer Verbände interessante Möglichkeiten für die Prävention, Diagnose und Behandlung von Krankheiten eröffnet. 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.

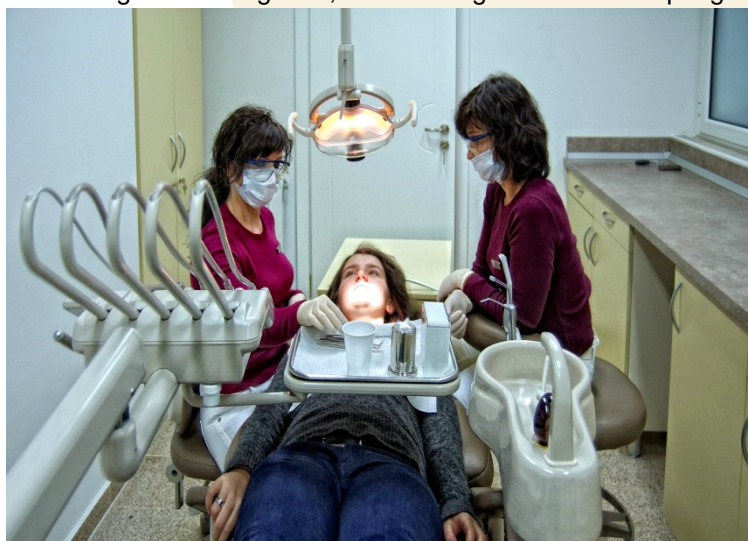
Im dem vorliegenden E-Fact wird erläutert, wie Arbeitnehmer im Gesundheitswesen bei ihren täglichen Tätigkeiten am Arbeitsplatz mit Nanomaterialien in Berührung kommen können. Zudem werden Maßnahmen beschrieben, mit denen potenzielle Expositionen vermieden werden können.

1 Einleitung

1.1 Das Gesundheitswesen

Ein großer Teil der EU-Erwerbsbevölkerung ist im Gesundheitswesen beschäftigt. Dem *Aktionsplan für Fachkräfte im europäischen Gesundheitswesen* [1] zufolge nehmen die Beschäftigungsmöglichkeiten infolge der zunehmend alternden Bevölkerung und der steigenden Anforderungen an das Gesundheitswesen zu.

Das Gesundheitswesen besteht aus Unternehmen und öffentlichen Diensten, die direkt oder indirekt verschiedene Arten von Gesundheitsdienstleistungen wie Diagnose, Behandlung oder Präventivpflege erbringen. Die Gesundheitsdienste haben unterschiedliche Einsatzorte etwa Krankenhäuser, Zahnkliniken, mobile medizinische Notversorgung und Heime. Der vorliegende E-Fact befasst sich hauptsächlich mit Menschen, die direkte medizinische Dienstleistungen erbringen (z. B. Ärzte, Krankenschwestern oder Apotheker), sowie mit Arbeitskräften im nahen Umfeld des Gesundheitswesens wie etwa Laboranten oder Reinigungspersonal. Verwaltungspersonal oder Arbeitskräfte, die medizinische Geräte herstellen, fallen nicht in den Rahmen des vorliegenden E-Fact und werden deshalb nicht erfasst.



Verfasserin: Raya Gergovska

1.2 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 Nanomaterialien im Gesundheitswesen stehen im Mittelpunkt des vorliegenden E-Fact.

Auch wenn Nanopartikel Agglomerate und Aggregate bilden, die größer als 100 nm sind, können sie leicht zerfallen und Nanopartikel freisetzen. Deshalb müssen solche Agglomerate/Aggregate bei der Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien ebenfalls berücksichtigt werden [3, 4].

Ein großer Teil der Nanomaterialien wird hergestellt und auf den Markt gebracht, weil sie bestimmte Eigenschaften und Verhaltensweisen besitzen, die überwiegend eine Folge ihrer geringen Größe und ihrer deshalb stark vergrößerten Oberfläche sind, oder weil sie andere Merkmale wie etwa modifizierte (beschichtete) Oberflächen oder eine besondere Morphologie (Partikelform) aufweisen. Der vorliegende E-Fact befasst sich ausschließlich mit hergestellten Nanomaterialien, die im Gesundheitswesen anzutreffen sind. Diejenigen, die eine unbeabsichtigte Folge menschlicher Aktivitäten sind, wie z. B. Nanopartikel in Dieselabgasen, werden nicht behandelt.

2 Nanomaterialien im Gesundheitswesen

Sobald Nanomaterialien in den Körper gelangt sind, können sie sich darin ausbreiten, indem sie in Blutgefäße wandern und diese wieder verlassen, und sie können in zahlreichen Bereichen des menschlichen Körpers in Zellen eindringen und mit Biomolekülen reagieren, die sich auf der Oberfläche der Zellen oder in ihrem Inneren befinden [5]. Dank dieser Fähigkeit bieten Nanomaterialien im Gesundheitswesen neue Möglichkeiten für die Erkennung von Krankheiten sowie für ihre Behandlung und Prävention.

Die wichtigsten therapeutischen Vorteile von Nanomaterialien sind: Löslichkeit (von sonst unlöslichen Medikamenten), Trägerfunktion für hydrophobe Einheiten, multifunktionale Kapazität, aktive und passive Zielausrichtung, Bildung von Liganden (Größenausschluss) und verminderte Toxizität [6]. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften können Nanomaterialien außerdem als diagnostische Hilfsmittel, als Kontrastmittel, in bildgebenden Verfahren sowie für Implantate und Konstrukte der Gewebezüchtung eingesetzt werden.

Die Eigenschaften und das Verhalten von Nanomaterialien ermöglichen deshalb die Diagnose, Überwachung, Behandlung und Prävention von Erkrankungen unterschiedlicher Art, wie etwa Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs, Muskel- und Skeletterkrankungen, Entzündungen, neurodegenerative und psychische Krankheiten, Diabetes und Infektionskrankheiten (z. B. bakterielle oder virale Infektionen wie etwa HIV (Humanes Immundefizienz-Virus)) [7].

Tabelle 1 enthält Einzelheiten zu Nanomaterialien, die im Gesundheitswesen bereits zur Anwendung kommen.

⁽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 Wettbewerbserwägungen dies rechtfertigen“.
- „Abweichend von Nummer 2 sind Fullerene, Graphenflochten und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem oder mehreren Außenmaßen unter 1 nm als Nanomaterialien zu betrachten“.

Tabelle 1: Die wichtigsten Arten von Nanomaterialien für Anwendungen im Gesundheitswesen

Art des Nanomaterials	Anwendungen im Gesundheitswesen
Metallische Partikel (z. B. Eisen(III)-oxid, Gold oder Silber)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hyperthermische Krebsbehandlung ▪ Selektive magnetische Bioseparation ▪ Beschichtet mit Antikörpern gegen zellspezifische Antigene zur Separation von der Umgebungsmatrix ▪ Studien zum Membrantransport ▪ Wirkstoffverabreichung ▪ Kontrastmittel für die Kernspintomografie
Silber-Nanopartikel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antimikrobieller Wirkstoff ▪ Bestandteil eines breiten Spektrums von Medizinprodukten, darunter Knochenzement, chirurgische Instrumente und OP-Masken
Nanopartikel mit Goldhülle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbessern die Löslichkeit von Medikamenten. ▪ Ermöglichen eine weitere Konjugation.
Kohlenstoff-Nanomaterialien [Fullerene und Kohlenstoff-nanoröhrchen (CNT)]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buckminster-Fullerene (fußballförmige Struktur aus 60 Kohlenstoffatomen) werden in Verabreichungssystemen für Heilmittel eingesetzt, um den optimalen Transport der Wirkstoffe zum gewünschten Ziel im Körper und ihre Freisetzung dort zu fördern [5]. ▪ Beschichtungen für Prothesen und chirurgische Implantate ▪ Funktionalisierte CNT: <ul style="list-style-type: none"> ○ zur therapeutischen Verabreichung ○ für biomedizinische Anwendungen wie vaskuläre Stents sowie neuronales Wachstum und neuronale Regeneration ○ für die Gentherapie, da ein DNA-Strang an ein Nanoröhrchen gebunden werden kann.
Quantenpunkte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Markierung mehrerer Biomoleküle zur Überwachung komplexer krankheitsbedingter zellulärer Veränderungen und Ereignisse ▪ Optik-Technologie [8] ▪ Technologien für die Diagnose und Früherkennung von Krankheiten
Dendrimere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polymerisierte Makromoleküle: hoch verzweigte Strukturen mit innenliegenden Nanokavitäten oder –kanälen, deren Eigenschaften sich von denen im Außenbereich unterscheiden ▪ Dient als Träger für unterschiedliche Wirkstoffe (gegen Krebs, Viren, Bakterien usw.) und kann die Löslichkeit und Bioverfügbarkeit von schlecht löslichen Wirkstoffen verbessern.
Nanopartikel auf Lipidbasis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Können mit der Zellmembran verschmelzen und Moleküle in die Zellen einschleusen.
Keramische Nanopartikel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anorganische Systeme, die als Wirkstoffträger (wenn sie porös und biokompatibel sind) und in kosmetischen Anwendungen eingesetzt werden (Zinkoxid, Titandioxid).
Nanoröhrchen, Nanodrähte und magnetische Nanopartikel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologien für die Diagnose und Früherkennung von Krankheiten, darunter das „Ein-Chip-Labor“ [8]

Zusammenstellung aus mehreren Quellen durch die Verfasser [5, 6, 8–11].

Die Zeitspanne von der Erfindung eines medizinischen Gerätes oder Medikaments bis zur Freigabe für die Verwendung ist außerordentlich lang. Bestimmte derzeit entwickelte nanotechnologische Anwendungen werden aber demnächst verfügbar sein. Ihr Ziel ist z. B. eine verbesserte medizinische Bildgebung [5], der Einsatz von subkutanen Chips zur kontinuierlichen Überwachung von Schlüsselparametern wie Puls, Temperatur und Blutzuckerwerten [5] sowie die Minimierung des Wachstums und der Übertragung von Pathogenen [8].

3 Risiken von Nanomaterialien für Arbeitnehmer im Gesundheitswesen

Nanomaterialien im Gesundheitswesen können Patienten zwar viele Vorteile bieten, Arbeitnehmer jedoch neuen Risiken aussetzen.

Die verfügbaren Daten zur Toxizität von hergestellten Nanomaterialien sind immer noch lückenhaft, sodass Gefährdungsbeurteilungen schwierig sind (Informationen zu Instrumenten für das Risikomanagement im Zusammenhang mit Nanomaterialien enthält E-Fact 72, abrufbar unter <https://osha.europa.eu/en/publications/e-facts/e-fact-72-tools-for-the-management-of-nanomaterials-in-the-workplace-and-prevention-measures/view>). Die größte Herausforderung besteht darin, die möglichen Gefahren zu verstehen, denen Arbeitnehmer im Gesundheitswesen ausgesetzt sein können, wenn sie mit hergestellten Nanomaterialien oder Nanosystemen arbeiten. Weil diese Materialien auf der Nanoskala einzigartige Eigenschaften besitzen – die hauptsächlich auf ihre geringe Größe, aber auch auf die Form der Partikel, ihre chemische Art und den Zustand der Oberfläche (z. B. die Größe der Oberfläche, ihre Funktionalisierung und ihre Behandlung) zurückzuführen sind [8, 12] –, ist zu erwarten, dass ihre Wechselwirkungen mit dem menschlichen Körper und folglich ihre gesundheitlichen Auswirkungen sich von denen unterscheiden, den dieselben Materialien in derselben Zusammensetzung auf der Makroskala haben. Deshalb bestehen Bedenken bezüglich der gesundheitlichen Auswirkungen, die sich aus berufsbedingten Expositionen gegenüber Nanomaterialien ergeben könnten.

Unter normalen Umgebungsbedingungen können Nanomaterialien Agglomerate oder Aggregate bilden, deren Größe 100 nm übersteigt, wobei sie ihre nanospezifischen Eigenschaften ändern (aber nicht notwendig verlieren). Aus schwach gebundenen Agglomeraten können Nanopartikel jedoch wieder freigesetzt werden, und unter bestimmten Bedingungen gilt dies auch für stärker gebundene Aggregate. Untersucht wird, ob dies nach Inhalation solcher Agglomerate oder Aggregate auch in Lungenflüssigkeit geschehen kann [8, 12]. Agglomerate und Aggregate, die Nanopartikel enthalten, sollten deshalb bei der Gefährdungsbeurteilung von Arbeitsplätzen mit berücksichtigt werden.

Der interne Expositionsmechanismus nach dem Eindringen von Nanomaterialien in den Körper könnte u. a. aus einer Folge von Absorption, Verbreitung und Verstoffwechslung bestehen. So wurden einige Nanomaterialien beispielsweise in Lungen, Leber, Nieren, Herz, Fortpflanzungsorganen, Föten, Gehirn, Milz, Skelett und Weichteilen nachgewiesen. 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 an Nanopartikel bindet und so in den Körper, in Organe oder in Zellen eindringt [14].

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 [8, 12].

Nanomaterialien, die gegebenenfalls ein Gesundheitsrisiko am Arbeitsplatz darstellen, können auf verschiedenen Wegen in den Körper gelangen:

- **Inhalation** ist der häufigste Expositionsweg für luftgetragene Nanopartikel am Arbeitsplatz [15, 16]. Inhalierte 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 Nanomaterial kommen, wenn inhalierte Partikel, die durch die mukoziliäre Klärfunktion aus den Atemwegen entfernt wurden, verschluckt werden [15, 16]. Einige eingenommene Nanomaterialien können das Darmepithel passieren, in den Blutkreislauf gelangen und so weitere Organe und Gewebe erreichen.
- Die **dermale Penetration** wird noch untersucht [15, 16]. Unverletzte Haut scheint eine gute Barriere gegen die Aufnahme von Nanomaterialien zu bilden [17]. Verletzte Haut scheint weniger wirksam, doch ist der Grad der Aufnahme wahrscheinlich geringer als bei der Inhalation. Dessen ungeachtet sollten auch dermale Kontakte vermieden und kontrolliert werden.

Nanomaterialien können auch auf parenteralem Wege ⁽²⁾ in den Körper gelangen, etwa durch eine versehentliche Nadelstichverletzung, durch Schnittwunden oder durch andere Hautverletzungen [15].

Bedenkt man die Tätigkeiten, die im Gesundheitswesen anfallen, ist die Wahrscheinlichkeit, Nanomaterialien ausgesetzt zu sein, besonders hoch bei Arbeitskräften, die Nanomedikamente zubereiten oder verabreichen, oder die in Bereichen arbeiten, in denen diese Medikamente eingesetzt werden, da sie mit diesen luftgetragenen Wirkstoffen leicht in Berührung kommen können (z. B. Apotheken- und Pflegepersonal, Ärzte, Umweltdienstleister sowie Personal im Versand und in der Warenannahme).

Weitere Situationen im Gesundheitswesen, in denen es zu Expositionen gegenüber Nanomaterialien kommen kann, sind [15]:

- Entsorgung der Exkremente von Patienten, die Nanomedikamente erhalten;
- Verschüttungen von Nanomaterial;
- Handhabung von Gegenständen, die mit Nanomaterialien kontaminiert sind,
- Verzehr von Speisen und Getränken, die mit Nanomedikamenten in Berührung gekommen sind;
- Reinigung und Instandhaltung von Bereichen, in denen mit Nanomedikamenten umgegangen wurde.

Potenzielle Expositionssituationen ergeben sich auch durch zahnmedizinische und chirurgische Eingriffe, bei denen eingesetzte medizinische Werkstoffe, die Nanomaterialien enthalten, gemahlen, gebohrt, geschliffen oder poliert werden. Ein Beispiel für eine solche Expositionssituation ist die zahnärztliche Behandlung von Karies, bei der üblicherweise Füllungen gelegt werden, die Nanomaterialien enthalten (z. B. nanokeramische Füllstoffe). Diese werden dann durch Schleifen mit Hochgeschwindigkeitswerkzeugen an die anatomischen Gegebenheiten angepasst. Bei dieser Behandlung besteht das Risiko, dass Nanopartikel in die Luft gelangen und vom Patienten sowie vom medizinischen Personal eingeatmet werden.

Einige der potenziellen Risiken für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit, die Nanomaterialien im Gesundheitswesen mit sich bringen, werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

⁽²⁾ Wird ein Medikament oder eine andere Substanz dem Körper parenteral zu geführt, so geschieht dies unter Umgehung des Verdauungstraktes auf anderem Wege (z. B. durch eine Injektion).

Tabelle 2: Beispiele für Nanomaterialien, die im Gesundheitswesen eingesetzt werden, sowie ihre potenziellen Gesundheitsgefährdungen und Risiken in Bezug auf Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit

Beispiele für Nanomaterialien	Potenzielle Gesundheitsgefährdungen und Risiken in Bezug auf Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit
Kohlenstoff-Nanomaterialien	Es gibt Belege dafür, dass einige Arten von Kohlenstoff-Nanomaterialien nach Inhalation zu Lungenerkrankungen führen können, darunter auch zu solchen, die den durch Asbest verursachten ähnlich sind [9].
Dendrimere	<p>Ungeachtet ihrer umfassenden Anwendbarkeit im pharmazeutischen Bereich (z. B. zur Verabreichung von Krebsmedikamenten) bleibt die Verwendung von Dendrimeren im menschlichen Körper wegen ihrer inhärenten Toxizität beschränkt [11].</p> <p>Nach Exposition gegenüber Dendrimeren wurde ein Fall von Erythema-multiforme-ähnlicher Kontaktdermatitis beobachtet [14].</p>
Silber-Nanopartikel	<p>Nach ENRHES [18] ist die Anwendung von Silber-Nanopartikeln mit einer potenziellen Gefährdung der menschlichen Gesundheit verbunden, doch steckt die Erforschung ihrer Toxizität noch in den Kinderschuhen. Der Wissenschaftliche Ausschuss der EU „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ ist um ein wissenschaftliches Gutachten zu den Auswirkungen auf Sicherheit, Gesundheit und Umwelt und zur Rolle von Nanosilber bei Resistenzen gegen antimikrobielle Wirkstoffe ersucht worden [19]. Silber-Nanopartikel können in hohen Dosen zu Gesundheitsbeeinträchtigungen wie z. B. Lungenödemen und Hautverfärbungen führen und werfen somit ernste Bedenken auf [3]. Die am häufigsten gemeldete Reaktion von Menschen auf eine längere Exposition gegenüber Nanosilber ist in der Tat Argyrie bzw. Argyrose (d. h. eine graue bis graublaue Verfärbung oder schwarze Pigmentierung von Haut, Nägeln, Augen, Schleimhäuten oder inneren Organen durch Silbereinlagerungen) [20]. Diese Erkrankungen sind irreversibel und unheilbar [20].</p> <p>Im Gesundheitswesen wurde Nanosilber als antibakterieller Wirkstoff in Wundverbänden eingesetzt, um Patienten mit schweren Verbrennungen vor Infektionen zu schützen. Daraus ergibt sich eines der bedeutendsten Expositionsrisiken für Arbeitnehmer im Gesundheitswesen. Außerdem bestehen Bedenken wegen indirekter Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit durch Nanosilber, weil es die Silberresistenz von Mikroorganismen erhöht [19].</p> <p>Wie Studien an Ratten zeigten, können Silber-Nanopartikel das Gehirn über die oberen Atemwege erreichen [12].</p>
Titandioxid (TiO ₂)	Inhalierter TiO ₂ -Partikel wurden von der Internationalen Krebsforschungsagentur (IARC) in Gruppe 2B, „möglicherweise krebserzeugend für den Menschen“, [21] eingestuft. In den Vereinigten Staaten hat das Nationale Institut für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (NIOSH) einen geringeren Expositionsgrenzwert für ultrafeine TiO ₂ -Partikel empfohlen: 0,3 mg/m ³ für TiO ₂ -Nanopartikel (<100 nm) gegenüber 2,4 mg/m ³ für Feinpartikel (>100 nm) [22].
Gold-Nanopartikel	Untersucht wurde die Toxizität von Gold-Nanopartikeln, die von Ratten eingeatmet wurden. Dabei zeigten sich Goldansammlungen in den Lungen und in den Nieren [23].

Quelle: Zusammenstellung durch die Verfasser.

Neben gesundheitlichen Risiken bestehen bei der Aerosolierung von Nanostäuben oder brennbaren Nanopartikeln auch Explosions- und Brandgefahr.

Um die Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer angemessen zu schützen, sind eine zutreffende Beurteilung der Risiken von Nanomaterialien für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit im Gesundheitswesen und ihr sachgerechtes Management von großer Bedeutung.

4 Prävention

Gemäß der EU-Richtlinie 89/391/EWG [24] 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 [25] strengere Bestimmungen zum Management von Gefährdungen durch Arbeitsstoffe bei der Arbeit, die auch für Nanomaterialien gelten, da diese unter die Begriffsbestimmung von „Arbeitsstoffen“ fallen.

Deshalb sind die obligatorischen Gefährdungsbeurteilungen von Arbeitsplätzen und die Hierarchie der Kontrollmaßnahmen [Vermeidung, Ersetzung, technische Maßnahmen an der Quelle, organisatorische Maßnahmen und als letztes Mittel die persönliche Schutzausrüstung (PSA)], die in den Richtlinien für den Arbeitnehmerschutz vorgeschrieben werden, auch für Arbeitsplätze im Gesundheitswesen und für Nanomaterialien verbindlich.

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 [26] zu beachten. In jedem Fall ist das einzelstaatliche Recht zu prüfen, das strengere Bestimmungen enthalten kann.

Ganz allgemein kann die Beurteilung der Gefährdung von Arbeitsplätzen durch Nanomaterialien aber eine Herausforderung darstellen, da derzeit in den folgenden Bereichen Einschränkungen bestehen:

1. Kenntnis der gefährlichen Eigenschaften von Nanomaterialien;
2. Verfügbarkeit von Verfahren und Geräten zur Bestimmung von Nanomaterialien und Emissionsquellen sowie zur Messung von Expositionsniveaus;
3. Informationen zum Vorhandensein von Nanomaterialien insbesondere in Gemischen oder Erzeugnissen und am Ende der Nutzerkette, wenn 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 [13, 27–29]. Einrichtungen sollten sich deshalb an den Hersteller wenden und nach weiteren Informationen fragen.

Da Nanomaterialien außerdem als Stoffe gelten, sind auch die REACH-Verordnung (Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) [30] und die CLP-Verordnung (Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen) [41], die Änderungen in Anhang II der REACH-Verordnung [31], dem Rechtsrahmen für die Sicherheitsdatenblätter, sowie die Leitlinien der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) zur Erstellung von Sicherheitsdatenblättern [32] von Bedeutung. Letztere enthalten Hinweise, wie die Eigenschaften von Nanomaterialien zu behandeln sind, und sollten die Informationsqualität der Sicherheitsdatenblätter verbessern. In E-Fact 72 (<https://osha.europa.eu/en/publications/e-facts/e-fact-72-tools-for-the-management-of-nanomaterials-in-the-workplace-and-prevention-measures>) werden verfügbare Leitlinien und Instrumente vorgestellt, die das Risikomanagement für Nanomaterialien im Umfeld der derzeitigen Einschränkungen und nach dem aktuellen Stand der Forschung erleichtern sollen. Bislang sind keine spezifischen Leitlinien für die Prävention von durch Nanomaterialien bedingte Risiken für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit im Gesundheitswesen verfügbar. Doch können Maßnahmen, die für andere Sektoren empfohlen werden (z. B. für Forschungslaboratorien [33]), teilweise angewendet und die wichtigsten Grundsätze und Konzepte auf das Gesundheitswesen übertragen werden.

4.1 Vermeidung und Ersetzung

Wie bei allen anderen Gefahrstoffen sollten Vermeidung und Ersetzung Vorrang vor allen anderen Präventionsmaßnahmen erhalten (das Ziel ist also, die Exposition aller Arbeitnehmer gegenüber Nanomaterialien zu verhindern). In vielen Fällen werden aber nanomaterialhaltige chemische Arbeitsstoffe, Medikamente oder Geräte wegen ihrer besonderen Eigenschaften und ihrer spezifischen Funktionen im Gesundheitswesen eingesetzt. Wenn in solchen Fällen von einem Nanomaterial Risiken für Arbeitnehmer im Gesundheitswesen ausgehen, ist die Vermeidung oder die Ersetzung durch eine weniger gefährliche Alternative gegebenenfalls keine realisierbare Option, weil diese Alternative nicht dieselben gewünschten Eigenschaften und (positiven) Auswirkungen hat. Doch sollte immer zwischen den gewünschten Eigenschaften und Auswirkungen einerseits und den Gesundheitsrisiken andererseits abgewogen werden. Vermeidungs- und Ersetzungsoptionen sollten sorgfältig geprüft werden. Gegebenenfalls bestehen noch folgende Möglichkeiten:

- Vermeidung von Nanomaterialien in einer Form, in der sie in die Luft gelangen können (wie Pulver oder Stäube) durch die Verwendung einer weniger gefährlichen Form (z. B. Lösung pulverförmiger Nanomaterialien in Flüssigkeiten, Pasten, Granulaten oder Verbindungen oder ihre Bindung an Feststoffe) und
- Minderung des Gefahrenpotenzials durch Veränderung der Oberfläche des Nanomaterials z. B. durch eine Beschichtung, mit der Staubigkeit, Löslichkeit und andere Eigenschaften abgestimmt werden können.

4.2 Technische Schutzmaßnahmen

Bedingt durch die Art der Tätigkeiten im Gesundheitswesen verfügen die meisten Arbeitsplätze wie Patientenzimmer in Krankenhäusern oder die Wohnungen der Patienten nicht über technische Systeme, die eine Exposition gegenüber Nanomaterialien an der Quelle reduzieren oder verhindern können, wie etwa geschlossene Systeme, die Personen und Nanomaterialien physisch voneinander trennen. Bei anderen Vorgängen sind technische Schutzmaßnahmen an der Quelle aber machbar, etwa bei der Herstellung von nanomaterialhaltigen Medikamenten wie etwa Tabletten oder Salben in Handschuhboxen.

Reinraumbänke mit Hochleistungsschwebstofffiltern (HEPA-Filter) sind eine weitere wirksame Maßnahme zur Risikoprävention bei Tätigkeiten wie der Zubereitung von Nanomedikamenten, bei der Arbeit mit Gewebeproben, Körperflüssigkeiten oder Exkrementen von Patienten, die Nanomaterialien enthalten könnten (wenn der Patient mit Nanomedikamenten behandelt wird), oder bei der Aufbereitung oder Analyse von Proben mit nanomaterialhaltigen Laborchemikalien. Die Exposition gegenüber Verschüttungen, Stäuben oder Dämpfen von Nanomaterialien aus Proben oder Aufbereitungsprodukten für Proben sollte durch den Einsatz einer Lüftungsanlage mit hohem Durchsatz in Verbindung mit einer persönlichen Schutzausrüstung, darunter insbesondere Handschuhe und Masken, kontrolliert werden (siehe Abschnitt 4.4).

Laborarbeitsplätze, OP-Räume, Hochsicherheitsbereiche (z. B. wegen Infektionsgefahr) und Lagerräume sind in der Regel mit lokalen Abluftsystemen ausgestattet. Solche Systeme können auch Nanomaterialien zurückhalten. Im Falle von Nanomaterialien wird aber der Einsatz normaler Mehrstufenfilter empfohlen, denen ein Schwebstofffilter (HEPA H14 oder ULPA) als letzte Stufe vor der Rückführung der Abluft nachgeschaltet werden sollte. Auf jeden Fall muss die Eignung des installierten Filtersystems geprüft werden.

4.3 Organisatorische Maßnahmen

An Arbeitsplätzen im Gesundheitswesen, an denen gefährliche Nanomaterialien zum Einsatz kommen, sind u. a. folgende Risikopräventionsmaßnahmen möglich:

- Besondere Bereiche oder Arbeitsplätze für die Handhabung von Nanomaterialien, die von anderen Arbeitsplätzen getrennt und durch geeignete Zeichen eindeutig ausgewiesen sind;
- Minimierung der Zahl der Arbeitnehmer, die Nanomaterialien ausgesetzt werden;

- Minimierung der Dauer der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber Nanomaterialien;
- Zugangsverbote für unbefugtes Personal sowie
 - regelmäßige Reinigung (feuchtes Abwischen) von Arbeitsflächen, auf denen Nanomaterialien verwendet oder gehandhabt werden, und
 - Überwachung der Immissionskonzentrationen z. B. im Vergleich zu den Hintergrundkonzentrationen, die sich einstellen, wenn keine Nanomaterialien gehandhabt werden.



Verfasser: Jim Holmes

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) [41] verfügbare Risiko- und Sicherheitssätze sowie auf Warnzeichen zurückgreift, um angemessene, sachdienliche und spezifische Informationen zu allen tatsächlichen oder möglichen Gesundheits- oder Sicherheitsrisiken bereitzustellen, die sich aus der Verwendung oder Handhabung von Nanomaterialien ergeben.

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

- Die Arbeitsplanung muss sich auf eine Gefährdungsbeurteilung stützen und die Arbeitnehmer einbeziehen. Wenn Arbeit an Arbeitsplätzen verrichtet wird, 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.
- Es sind ausreichende Schulungen durchzuführen, damit gewährleistet ist, dass die Arbeitnehmer über Fähigkeiten und Kenntnisse verfügen, mit denen sie sicher arbeiten und sich vor Expositionen gegenüber freigesetzten Nanomaterialien schützen können.
- Anweisungen und Informationen müssen immer alle Arbeitnehmer 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 (z. B. Reinigungspersonal oder studentische Hilfskräfte). Zu den Informationen zählen auch Schutzmaßnahmen beispielsweise für den sicheren Umgang mit Pharmazeutika oder Proben, die Nanomaterialien enthalten, für das Schleifen und Polieren von Füllungen und Oberflächen, die Nanomaterialien enthalten, und für die Entsorgung von Produkten. Diese Informationen müssen auch in den Arbeitsanweisungen dokumentiert werden.
- Wahl eines vorsichtigen Risikopräventionskonzepts für Nanomaterialien: Im Einklang mit der Hierarchie der Präventionsmaßnahmen müssen alle verfügbaren Maßnahmen umgesetzt werden, um die Freisetzung von Nanomaterialien zu reduzieren.

Arbeitnehmer, die potenziell gefährliche Nanomaterialien handhaben oder ihnen anderweitig ausgesetzt sind, sollten in Gesundheitsüberwachungsprogramme aufgenommen werden, wobei Expositionssituationen umfassend dokumentiert werden sollten.

4.4 Persönliche Schutzausrüstung (PSA)

Eine 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. Arbeitnehmer im Gesundheitswesen verwenden bei ihren Tätigkeiten wahrscheinlich schon wegen anderer Gesundheitsrisiken (z. B. biologische Arbeitsstoffe) eine PSA ⁽³⁾ [34]. Die PSA muss aber daraufhin überprüft werden, ob sie sich für Nanomaterialien eignet.

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. Das bedeutet, dass bei der Wahl einer PSA alle Gefahren am Arbeitsplatz berücksichtigt werden müssen. Alle PSA müssen das CE-Zeichen tragen und unverändert nach den Anweisungen des Herstellers verwendet werden.

4.4.1 Atemschutz

Bei Tätigkeiten, bei denen luftgetragene Nanomaterialien auftreten, also beispielsweise beim Schleifen, Schmirgeln oder Fräsen von Brücken oder Implantaten, die Nanomaterialien enthalten, sind lokale Abluftsysteme gegebenenfalls nicht ausreichend. In diesen Fällen sollte auch mit Atemschutz gearbeitet werden. HEPA-Filter, Atemschutzkartuschen und –masken mit faserförmigen Filtermaterialien sind gegen luftgetragene Nanomaterialien wirksam. Halb- oder Vollmasken mit P3/FFP3- oder P2/FFP2-Filtern gelten als wirksamer Schutz gegen solche Expositionen. Filter mit Schutzfaktor 3 bieten einen besseren Schutz als solche mit Schutzfaktor 2 [35, 36]. Gesichtsmasken müssen ausreichend dicht sein [36] — für alle Nutzer sollten regelmäßige Dichtsitzprüfungen durchgeführt werden.

Die Wahl eines Atemschutzgerätes hängt von folgenden Faktoren ab:

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

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

4.4.2 Handschuhe

Im Gesundheitswesen werden Handschuhe häufig verwendet. Gegen allgemeine chemische Gefahren dürfen nur Handschuhe eingesetzt werden, die den Anforderungen der Normenreihe EN 374 entsprechen ⁽⁴⁾. Bei Nanomaterialien haben sich Handschuhe aus synthetischen Polymeren wie Latex, Nitril oder Neopren als wirksam erwiesen [36]. Die Wirksamkeit von Handschuhen für ein bestimmtes Nanomaterial hängt von der Form ab, in der es am Arbeitsplatz auftritt (Stäube, Flüssigkeiten usw.); dies ist im Einzelfall mit dem Handschuhlieferanten zu klären. Ein wesentlicher Faktor für die Diffusionsrate des Nanomaterials ist die Dicke des Handschuhmaterials. Es wird deshalb empfohlen, zwei Paar Handschuhe übereinander zu tragen [37].

⁽³⁾ Die europäische Richtlinie 89/686/EWG regelt die Gestaltung und Verwendung der PSA und sorgt dafür, dass sie ihre beabsichtigte Funktion erfüllt, nämlich den Arbeitnehmer vor bestimmten Risiken zu schützen.

⁽⁴⁾ EN 374-1:2003: Schutzhandschuhe gegen Chemikalien und Mikroorganismen – Teil 1: Terminologie und Leistungsanforderungen, EN 374-2:2003: Schutzhandschuhe gegen Chemikalien und Mikroorganismen – Teil 2: Bestimmung des Widerstandes gegen Penetration und EN 374-3:2003: Schutzhandschuhe gegen Chemikalien und Mikroorganismen – Teil 3: Bestimmung des Widerstandes gegen Permeation von Chemikalien

4.4.3 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 [36].

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.

4.5 Explosions- und/oder Brandschutz

Wegen ihrer geringen Größe können pulverförmige Nanomaterialien explosionsgefährlich sein, ihre größeren Varianten jedoch nicht ⁽⁵⁾ [38]. Darauf ist zu achten, wenn Nanopulver hergestellt (z. B. durch Schleifen, Schmirgeln oder Fräsen von Brücken oder Implantaten, die Nanomaterialien enthalten) oder gehandhabt werden (z. B. beim Mischen, Reinigen oder Entsorgen solcher Pulver).

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 unter anderem:

- Apotheker beispielsweise sollten solche Materialien nur in Ex-Zonen verarbeiten und diese Arbeiten nach Möglichkeit unter Inertatmosphäre durchführen.
- Materialien sollten durch Befeuchtung des Arbeitsplatzes gelöst 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 Abwischen zu entfernen.
- Am Arbeitsplatz sind möglichst wenige explosive oder entflammbare Materialien zu lagern. Antistatische Beutel können verwendet werden.

4.6 Prüfung der Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit

Die Gefährdungsbeurteilung sollte regelmäßig aktualisiert 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 kontrolliert 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

⁽⁵⁾ 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. Bislang wurde aber noch keine Untergrenze ermittelt, unterhalb derer Explosionen ausgeschlossen werden können.

Wirksamkeit von technischen Präventionsmaßnahmen wie etwa Rauchversuche und/oder Messungen der Kontrollgeschwindigkeit können durchgeführt werden.

Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) für Nanomaterialien ⁽⁶⁾ [39, 40] werden voraussichtlich in Zukunft noch festgelegt. Das Hauptziel des Risikomanagements am Arbeitsplatz sollte jedoch die Expositionsminimierung sein, weshalb die bloße Einhaltung der AGW nicht ausreicht.

Quellenverweise

1. Europäische Kommission (EK), *Commission Staff Working Document on an Action Plan for the EU Health Workforce* (Arbeitspapier der Kommissionsdienststellen zu einem Aktionsplan für Fachkräfte im europäischen Gesundheitswesen), SWD(2012) 93 endgültig, Straßburg, 18. April 2012. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/dgs/health_consumer/docs/swd_ap_eu_healthcare_workforce_en.pdf
2. 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:EN:PDF>
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, 3. Oktober 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. Lauterwasser, C., *Small sizes 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>
6. Kale, S.N., *Nanomaterials and their Applications in Healthcare* (Nanomaterialien und ihre Anwendungen im Gesundheitswesen), Vortrag beim ICS-UNIDO, SISSA Workshop on Computer Design and Discovery of Potential Drugs for Developing Countries, 2009.
7. Filipponi, L., Sutherland, D., *Medicine and Healthcare. Module 2—Applications of Nanotechnologies* (Medizin und Gesundheitswesen. Modul 2—Anwendungen von Nanotechnologien), Interdisciplinary Nanoscience Centre (iNANO), 2010. Verfügbar unter: <http://nanoyou.eu/>
8. Ellis, J.R., *Nanomaterials and Their Potential in Therapy* (Nanomaterialien und ihr therapeutisches Potenzial), 2012. Verfügbar unter: <http://www.mddionline.com/blog/devicetalk/nanomaterials-and-their-potential-therapy> (abgerufen am 20. Oktober 2012).

⁽⁶⁾ 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).

9. 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).
10. Mody, V.V., Siwale, R., Singh, A., Mody, H.R., „Introduction to metallic nanoparticles“ (Einführung in metallische Nanopartikel), *Journal of Pharmacy & BioAllied Science*, 2012, 2(4): S. 282-289.
11. Jain, K., Kesharwani, P., Gupta, U., Jain, N.K., „Dendrimer toxicity: let’s meet the challenge (Toxizität von Dendrimeren – Stellen wir uns der Herausforderung)“, *International Journal of Pharmaceutics*, 2010, 394(1–2): S. 122–142.
12. Haase, A., Rott, S., Mantion, 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 (Auswirkungen von Nanopartikeln auf primär gemischte neurale Zellkulturen: Aufnahme, oxidativer Stress und akute Kalziumreaktionen)“, *Toxicological Sciences*, 2012, 126(2): S. 457–468.
13. 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). Verfügbar unter: <http://safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/Whatwedo/Publications/Pages/RP201006EvaluationOfMSDSAndLabels.aspx>
14. Toyama T., Matsuda H., Ishida I., Tani M., Kitaba S., Sano S., Katayama I., „A case of toxic epidermal necrolysis-like dermatitis evolving from contact dermatitis of the hands associated with exposure to dendrimers (Ein Fall von toxischer epidermaler nekrolyseartiger Dermatitis, entwickelt aus einer Kontaktdermatitis nach Exposition gegenüber Dendrimeren)“, *Contact Dermatitis*, 2008, 59(2): S. 122–123.
15. Murashov, V., „Occupational exposure to nanomedical applications (Berufsbedingte Exposition bei nanomedizinischen Anwendungen)“, *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 2009, 1: S. 203–213.
16. 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.
17. 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.
18. The ENRHES project, Europäische Kommission (EK), *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>
19. 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 seine Rolle bei antimikrobieller Resistenz), 2012. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_q_027.pdf
20. 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
21. 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>
 22. 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/>
 23. 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.
 24. 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. Juni 1989. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1989L0391:20081211:EN:PDF>
 25. 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). Verfügbar unter:
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0024:20070628:EN:PDF>
 26. 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). Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0037R%2801%29:EN:HTML>
 27. 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
 28. Borm, P., Houba, R., Linker, F., *Good Uses of Nanomaterials in the Netherlands* (Gute Nutzungen von Nanomaterialien in den Niederlanden), 2008. Verfügbar unter:
<http://www.nano4all.nl/Reporshortsummary.pdf>
 29. 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
 30. 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:en:NOT>
 31. 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 31.5.2010. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010R0453:EN:NOT>
32. Europäische Chemikalienagentur (ECHA), *Leitlinien zur Erstellung von Sicherheitsdatenblättern*, Dezember 2013. Verfügbar unter: http://echa.europa.eu/documents/10162/17235/sds_en.pdf
33. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), *General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories* (Allgemeine Sicherheitspraktiken für die Arbeit mit hergestellten Nanomaterialien in Forschungslaboratorien), DHHS (NIOSH) Publication No. 2012–147. Verfügbar unter: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2012-147/>
34. Richtlinie 89/656/EWG des Rates vom 30. November 1989 über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen durch Arbeitnehmer bei der Arbeit (Dritte Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) . Verfügbar unter: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/workplaces-equipment-signs-personal-protective-equipment/osh-directives/4>
35. 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
36. 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
37. 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
38. 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).
39. Sozialwirtschaftlicher Rat der Niederlande (SER), *Provisional Nano Reference Values for Engineered Nanomaterials* (Vorläufige Nanobezugswerte für hergestellte Nanomaterialien), 2012. Verfügbar unter: http://www.ser.nl/en/sitecore/content/Internet/en/Publications/Publications/2012/2012_01.aspx (abgerufen am 20. Oktober 2012).
40. Nanowerk, *SAFENANO Team, BSI British Standards, Guide to Safe Handling of Nanomaterials* (Leitfaden zur sicheren Handhabung von Nanomaterialien), 2012. Verfügbar unter: <http://www.nanowerk.com/news/newsid=4136.php> (abgerufen am 20. Oktober 2012)
41. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP-Verordnung), ABI. L 353 vom 31. Dezember 2008. Verfügbar unter: <http://echa.europa.eu/web/guest/regulations/clp/legislation>

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.saarbruecken.igbce.de/portal/binary/com.epicentric.contentmanagement.servlet.ContentDeliveryServlet/site_www.igbce.de/static_files/PDF-Dokumente/Schwerpunkthemen/Nanotechnologie/d343dc332c78e5258ecea71035bf21ca.pdf

Europäische Kommission (EK), *Commission staff working document on an Action Plan for the EU Health Workforce Accompanying the document communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions „Towards a job-rich recovery“* (Arbeitspapier der Kommissionsdienststellen zu einem Aktionsplan für Fachkräfte im europäischen Gesundheitswesen. Begleitdokument zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen „Einen arbeitsplatzintensiven Aufschwung gestalten“), Straßburg, 18. April 2012 SWD(2012) 93 endgültig.

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), *Gesundheitsschutz und Sicherheit von Beschäftigten im Gesundheitswesen*. Verfügbar unter: <http://osha.europa.eu/en/sector/healthcare>.