

Jean Schmitt*, Gudrun Lettner

Zusammenfassung

Der Markt für *Engineered Nanomaterials* (ENMs, technisch hergestellte Nanomaterialien) wächst deutlich. Das führt dazu, dass immer mehr Arbeitnehmer:innen (AN) in ihrem beruflichen Alltag in Kontakt mit ENMs kommen. Diese Stoffe sind in vielen Produkten enthalten, von Elektronikartikeln bis Lebensmitteln.

Während Konsument:innen hauptsächlich durch Hautkontakt oder orale Aufnahme mit ENMs in Berührung kommen, ist die Belastung für sie im Vergleich zu AN, die regelmäßig mit diesen Stoffen hantieren, in der Regel kürzer und weniger intensiv. Diese sind nicht nur dem Endprodukt ausgesetzt, sondern auch Zwischenprodukten, die während des Herstellungsprozesses durch diverse Bearbeitungsschritte freigesetzt werden. Das Einatmen von Nanopartikeln und Fasern ist der häufigste Weg der beruflichen Exposition.

Aufgrund ihrer extrem kleinen Dimensionierung können Nanopartikel tief in die Lunge eindringen, Entzündungen auslösen und das Risiko für Krebs oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöhen. Zusätzlich können sie in den Blutkreislauf und andere Organe gelangen.

Die große Vielfalt an ENMs, die sich in Größe, Form, chemischer Zusammensetzung und Oberflächenfunktionalisierung unterscheiden, macht die Festlegung von Arbeitsplatzgrenzwerten zu einer besonders schwierigen und ressourcenintensiven Aufgabe. Diese Komplexität erfordert eine gründliche toxikologische Bewertung jedes einzelnen Materials. Regulatorische Maßnahmen müssen den Schutz der AN gewährleisten und gleichzeitig die Innovation bei der Entwicklung neuer Nanomaterialien fördern.

Dieses NanoTrust-Dossier bietet einen Überblick über Arbeitsplatzgrenzwerte von ENMs in Europa. Es verdeutlicht die Herausforderungen bei der Festlegung dieser Grenzwerte sowie dem wirksamen Schutz am Arbeitsplatz in einem sich rasant entwickelnden Bereich, und stellt Initiativen zur Beschleunigung der Toxizitätsbewertung von Nanomaterialien vor.

* Korrespondenzautor

Arbeitsplatzgrenzwerte für Nanomaterialien

Regulierung, Herausforderungen, und Ausblick

Einleitung

Nanomaterialien werden aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften, wie bspw. erhöhte mechanische Festigkeit, optische Charakteristika und verbesserte elektrische Leitfähigkeit, zunehmend in einer Vielzahl von Industriesektoren eingesetzt. Zu den wichtigsten Sektoren gehören Kosmetik, Gesundheitswesen, Textilien und Elektronik. Der weltweite Markt für Nanomaterialien, der im Jahr 2020 einen Wert von ca. 9 Milliarden Euro einnahm, wird bis 2029 voraussichtlich 30 Milliarden Euro überschreiten.¹ Laut dem französischen Nanomaterialregister *R-nano*² gehören Siliziumdioxid, Ruß, Titandioxid, Calciumcarbonat und Aluminiumoxid zu den am häufigsten verwendeten Nanomaterialien.

Obwohl Daten zur Anzahl der exponierten Arbeitnehmer:innen kaum verfügbar sind, lässt die rapide Expansion des Marktes auf eine wachsende Zahl von Personen, die an ihrem Arbeitsplatz mit ENMs in Kontakt kommen, schließen. Das wirft Fragen hinsichtlich ihres Schutzes vor gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf. Die berufliche Exposition ist in der Regel höher als die Exposition der Öffentlichkeit, da Nanomaterialien häufig während der Produktherstellung (bspw. durch Beschichtung, Lackierung, oder Einbettung von Nanomaterialien in eine Matrix) behandelt werden, auch wenn das Endprodukt sie nicht in freier Form enthält. Die häufigsten Expositionswege sind inhalative und orale Aufnahme, sowie Resorption über die Haut oder die Augen. Dieses Dossier fokussiert auf die Inhalation, die den häufigsten Expositionsweg darstellt und die Hauptursache für potenzielle gesundheitsschädliche Auswirkungen ist.

Die Begriffe *Engineered Nanomaterials* (ENMs) und *Nanomaterialien* werden in diesem Dossier gleichbedeutend verwendet und beziehen sich auf Materialien mit einer nanoskaligen äußeren Dimension oder einer nanoskaligen Innen- oder Oberflächenstruktur (gemäß ISO/TS 80004). Der Begriff *nanoskalig* bezeichnet Dimensionen zwischen 1 und 100 nm. Der Ausdruck *engineered* bedeutet, dass diese Materialien gezielt aufgrund ihrer Eigenschaften hergestellt werden. Damit

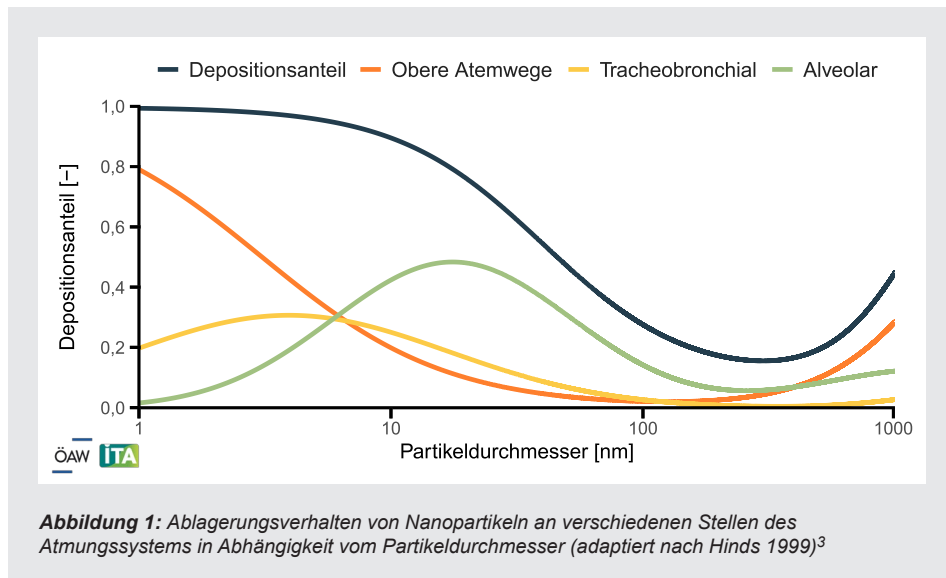
werden ENMs von natürlich vorkommenden oder prozessbedingt entstandenen Nanomaterialien, die typischerweise aus Verbrennungsprozessen oder mechanischer Verarbeitung von Stoffen resultieren, unterschieden.

Ablagerung in der Lunge

Luftgetragene Partikel kleiner als 1 µm werden als vollständig inhalierbar betrachtet, während die Inhalationswahrscheinlichkeit größerer Partikel mit zunehmendem Durchmesser abnimmt. Nanopartikel (1-100 nm) bilden Agglomerate, die größer sind als der Primärdurchmesser der Partikel. Nach dem Einatmen folgen Partikel und Agglomerate dem Luftstrom durch die Atemwege und gelangen in den Alveolarbereich. Ein Teil der eingeatmeten Partikel wird wieder ausgeatmet, ohne sich festzusetzen oder weiterhin mit der Lunge zu interagieren. Der Rest wird an verschiedenen Stellen entlang des Atmungssystems abgelagert, darunter in der Nasenhöhle, der Luftröhre, den Bronchien und den Lungenbläschen, wobei das Ablagerungsverhältnis von der Größe des Agglomerats bzw. Partikels abhängt (siehe Abbildung 1). Obwohl alle Nanopartikel inhalierbar sind, lagern sich nur bis zu 40 % der aufgenommenen Dosis in den Alveolen ab (grüne Linie in Abbildung 1). Diese Partikel haben gesundheitsschädliche Wirkungen, und sind für die Festlegung von Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW, auch häufig OELs abgekürzt – von engl. *Occupational Exposure Limits*) wichtig. Die Festlegung der AGW berücksichtigt das Ablagerungsverhalten in den Atemwegen sowie die Risiken durch die alveoläre Exposition.

Gesundheitsauswirkungen

Dieselben Eigenschaften, die Nanomaterialien ihre besonderen Fähigkeiten verleihen, wie ihre extrem geringen Dimensionen und ihre hohe spezifische Oberfläche, sind auch für ihre negativen gesundheitlichen Auswirkungen verantwortlich. Kleinere Fasern und Partikel, auch als lungengängiger Staub bezeichnet, dringen tief in die Lunge ein und gelangen bis in den Alveolarbereich.



sen der Produktentwicklung zu integrieren, insbesondere angesichts des hohen Innovations tempos in der Entwicklung von neuartigen Materialien, was eine vollständige toxikologische Bewertung eines jeden neu entwickelten Materials kaum durchführbar macht. Ein Beispiel ist das von der EU-Kommission geförderte Rahmenwerk *Safe-and-Sustainable-by-Design* (siehe [Nano-Trust Dossier Nr. 067](#)), das Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekte über den gesamten Produktlebenszyklus integriert.

Bestehende Arbeitsplatzgrenzwerte

Derzeit gibt es in der EU keine expliziten, verbindlichen Arbeitsplatzgrenzwerte, die spezifisch für Nanomaterialien festgelegt sind. Stattdessen wird die Exposition durch generische Schwellenwerte wie Staubgrenzwerte geregelt, die allgemein für Partikel in der Luft gelten, einschließlich Nano- und Mikropartikel sowie Fasern, die in die Atemwege gelangen können.

Nanomaterialien fallen in der EU unter den allgemeinen Rechtsrahmen für Chemikalien, der auf drei wichtigen Richtlinien basiert. Die *Richtlinie 89/391/EWG* legt Mindestanforderungen für Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz fest, wobei es den Mitgliedstaaten unbenommen bleibt, strengere Vorschriften zu erlassen.

Die *Richtlinie 98/24/EG* definiert Mindestanforderungen für den Schutz von Arbeitnehmer:innen vor der Exposition gegenüber chemischen Arbeitsstoffen (nicht spezifisch für Nanomaterialien). Schließlich legt die *Richtlinie 2004/37/EG* über Karzinogene und Mutagene Vorschriften zum Schutz von Arbeitnehmer:innen vor der Exposition gegenüber karzinogenen und mutagenen Stoffen am Arbeitsplatz fest. Diese Richtlinie enthält Grenzwerte für die berufliche Exposition gegenüber zufällig vorkommenden Nanomaterialien, wie z. B. Dieselabgasen ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Chrom-VI-Verbindungen ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oder alveolgängigem kristallinem Siliziumdioxidstaub ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Arbeitgeber:innen müssen eine Risikobewertung für gefährliche Stoffe, die nicht in der Richtlinie über Karzinogene und Mutagene abgedeckt sind, durchführen und bspw. Richtwerte wie den allgemeinen Staubgrenzwert heranziehen. Dieser Grenzwert ist jedoch weitaus weniger restriktiv als materialbezogene AGW: In Österreich liegt der allgemeine Staubgrenzwert für eine langfristige Exposition bei $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ für den inhalierbaren, und bei $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ für den alveolgängigen Anteil (die Grenzwerte verdoppeln sich bei einer kurzzeitigen Exposition).¹⁰ Spezifische Arbeitsplatzgrenzwerte bieten klare Vorgaben zur Begrenzung der Exposition.

reich, wo sie eine Entzündungsreaktion auslösen, die proportional zu ihrer Oberfläche ist: Kleinere Partikel führen bei ähnlicher Massenkonzentration zu einer stärkeren Reaktion als größere Partikel. Partikelinduzierte Entzündungen stehen im Zusammenhang mit Lungenkrebs, Fibrose und Herz-Kreislauf-Krankheiten.⁴

Je nach Löslichkeit der Partikel im Flüssigkeitsfilm des Lungenepithels können sie sich in der Lunge auflösen oder anreichern. Die Partikelabscheidung ist in der Alveolarregion viel langsamer als in den oberen Atemwegen, was bedeutet, dass kleinere unlösliche Partikel länger in der Lunge verbleiben. Von den Atemwegen aus können Nanopartikel in den Blutkreislauf und in sekundäre Organe wie Leber, Gehirn und Nieren gelangen, wo sie sich im Laufe der Zeit ansammeln.^{5,6} Nanopartikel können das weitere Zellen beschädigen und somit das langfristige Krebsrisiko erhöhen.⁷

Wurde ein Material aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung als toxisch eingestuft, dringt seine Nanoform in der Regel schneller in den Körper ein als die Makroform und verbleibt dort länger. Selbst Stoffe, die in Makroform als nicht toxisch gelten, können aufgrund ihrer erhöhten spezifischen Oberfläche, Morphologie oder Oberflächenreaktivität im Nanobereich dennoch Lungenentzündungen oder oxidativen Stress verursachen. Die Toxizität von Nanomaterialien hängt stark von mehreren physikochemischen Eigenschaften ab, darunter Partikelgrößenverteilung, Geometrie, chemische Zusammensetzung und Oberflächenmodifikationen.

Obwohl bislang zahlreiche Hinweise auf gesundheitsschädliche Auswirkungen von Nanomaterialien vorliegen, sind die Toxizitätsmechanismen unzureichend erforscht und werden derzeit weiter untersucht.

Asbest und die Regulierung berufsbedingter Exposition

Asbest bezeichnet eine Gruppe mikroskaliger Mineralfasern, die aufgrund ihrer thermischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften in zahlreichen Anwendungen eingesetzt wurden. Das Einatmen von Asbestfasern hat schwerwiegende Auswirkungen auf die Lunge, verursacht Fibrose (auch als Asbestose bekannt) und erhöht das Risiko für Lungenkrebs. Die Asbestexposition ist das am besten dokumentierte Beispiel für schwerwiegende Gesundheitsfolgen durch berufliche Exposition gegenüber luftgetragenen Fasern. Im Jahr 2021 war Asbestexposition für mehr als 200.000 Todesfälle weltweit verantwortlich, und machte damit 70 % aller arbeitsbedingten Krebstodesfälle aus.⁸ Gesundheitliche Auswirkungen der Asbestexposition wurden bereits in den 1930er-Jahren dokumentiert, doch verbindliche Arbeitsplatzgrenzwerte und Verbote der Verarbeitung des Stoffes folgten erst in den 1990er-Jahren.⁹

Die Asbest-Krise spielte eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung moderner Arbeitsschutzpraktiken, darunter die systematische Bewertung der Exposition, die Umsetzung von Maßnahmen zur Expositionsreduzierung und die Festlegung von Arbeitsplatzgrenzwerten. Sie verdeutlichte die Notwendigkeit eines proaktiven Vorgehens bei der Regulierung neuer Materialien durch frühzeitige toxikologische Bewertungen und ein strukturiertes Risikomanagement. Außerdem zeigte sie, wie wichtig die Zusammenarbeit zwischen den wichtigsten Akteuren aus den Bereichen Arbeitsschutz, Wissenschaft, Herstellung und Regulierung ist.

Laufende Initiativen zielen darauf ab, diese Erkenntnisse und darüber hinaus Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte in die frühen Pha-

Die Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA) spielt eine zentrale Rolle bei der Förderung von Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz, indem sie Informationen sammelt und zur Verfügung stellt, Aufmerksamkeit auf diese Themen lenkt und eine evidenzbasierte Politikgestaltung unterstützt.

Angesichts der zunehmenden Verwendung von ENMs und der Notwendigkeit eines gezielteren Arbeitnehmer:innenschutzes veröffentlichte die EU-Kommission 2014 ihre *Guidance on the protection of the health and safety of workers from the potential risks related to nanomaterials at work*.¹¹ Dieses Dokument enthält eine Zusammenfassung vorläufiger AGW für einige der in Europa am häufigsten verwendeten Nanomaterialien (siehe Tabelle 1).

Laufende Diskussionen auf europäischer Ebene¹² erkennen die Relevanz einer Intensivierung der Forschung zur Erzeugung robuster toxikologischer und epidemiologischer Daten, einer Voraussetzung für die Festlegung gesundheitsbezogener Arbeitsplatzgrenzwerte. Die Vielfalt der ENMs und ihre physikochemischen Eigenschaften machen es jedoch schwierig, einheitliche AGW festzulegen.

Festlegung von Arbeitsplatzgrenzwerten

Die Festlegung von AGW erfordert umfangreiche wissenschaftliche Daten, um gesundheitsschädliche Wirkungen zu identifizieren und quantifizieren. Dieser Prozess lässt sich anhand der Festlegung eines gesundheitsbezogenen Arbeitsplatzgrenzwertes für Titandioxid-Nanopartikel (TiO₂-NP), insbesondere die P25-Form mit einem Primärdurchmesser (ohne Berücksichtigung der Agglomerate) von 20-25 nm, durch die französische Behörde für Lebensmittelsicherheit, Umweltschutz und Arbeitsschutz (ANSES)¹³, skizzieren. Die Ableitung eines AGWs erfolgt in der Regel in mehreren Schritten.

Am Beginn steht die umfassende Überprüfung der wissenschaftlichen Literatur zu potenziellen Toxizitätsmechanismen bei Mensch und Tier:

- **Toxikokinetik**, die beschreibt, wie lange Partikel in der Lunge bleiben, bevor sie ausgeschieden werden, ob sie in den Blutkreislauf gelangen und sich in sekundären Organen anreichern;
- **akute und chronische Toxizität**, einschließlich kurz- und langfristiger Auswirkungen auf das Atmungs-, Herz-Kreislauf-, Immun- und Nervensystem sowie auf Organe, in denen sich NP ansammeln können;
- **Reproduktionstoxizität, Genotoxizität und Karzinogenität**.

Da mehrere Mechanismen zur Toxizität beitragen können, wird derjenige, der bei der niedrigsten Konzentration die schwerwiegendsten Folgen mit sich bringt, als kritischer Wirkmechanismus ausgewählt. Die Studie, die die tatsächlichen Expositionsbedingungen (z. B. Konzentration, Dauer) am besten widerspiegelt, wird zur Ableitung einer *kritischen Dosis* herangezogen. Diese ist definiert als die höchstmögliche Dosis, bei der keine signifikanten schädlichen Wirkungen beobachtet wurden.

Für Stoffe, für die kein sicherer Expositionswert festgelegt werden kann (z. B. bekannte Karzinogene), wird auf Grundlage eines akzeptablen Risikos ein Expositionsgrenzwert ohne Schwellenwert definiert. Asbest wird bspw. nach diesem Ansatz reguliert. Anschließend müssen Risikomanagementmaßnahmen umgesetzt werden, um die Exposition weiter zu minimieren. Für Stoffe, bei denen keine Hinweise auf karzinogene Wirkungen bei niedrigen Dosen vorliegen, wird ein Expositionsgrenzwert festgelegt, unterhalb dessen keine schädlichen Auswirkungen zu erwarten sind.

Schließlich werden Korrekturfaktoren angewendet, um Unsicherheiten wie Unterschiede zwischen Mensch und Versuchstier, Variabilität innerhalb der menschlichen Population, oder Unterschiede zwischen den Expositionsszenarien in Studien und denen, die am Arbeitsplatz zu erwarten sind (z. B. ein 8-Stunden-Arbeitstag), auszugleichen. Der resultierende Wert wird als empfohlener Arbeitsplatzgrenzwert festgelegt.

Herausforderungen

Die Festlegung von Arbeitsplatzgrenzwerten erfordert umfangreiche toxikologische Untersuchungen, die mehrere potenzielle Toxizitätswege sowie materialspezifische Eigenschaften abdecken. Die Gewinnung solcher Daten ist sowohl zeit- als auch ressourcennintensiv und gerade deshalb besonders schwierig, weil ENMs sich nicht nur in ihrer chemischen Zusammensetzung (z. B. Kohlenstoff, Silber, Metalloxide) unterscheiden,

sondern auch in Morphologie (z. B. mehrwandige und einwandige Kohlenstoffnanoröhren, kugelförmige Partikel), Größenverteilung, Aggregationspotenzial (die Tendenz, Cluster zu bilden, die manchmal aus verschiedenen Materialien bestehen) und Oberflächenmodifikation (Beschichtungen, Funktionalisierungen). Jeder dieser Faktoren hat einen starken Einfluss darauf, wie Nanomaterialien mit biologischen Systemen interagieren.

Pragmatisch wäre, Ressourcen auf die toxikologische Bewertung der am meisten verwendeten Nanomaterialien zu fokussieren. Dieser Ansatz würde jedoch dazu führen, dass man hinter den wissenschaftlichen und industriellen Entwicklungen zurückbleibt, da Grenzwerte erst dann festgelegt werden, wenn ein Material bereits weit verbreitet ist. Darüber hinaus sind Informationen über die Verwendung von ENMs in Europa schwer zugänglich, da keine einheitlichen Register oder Mechanismen zur Meldung der Nutzung von Nanomaterialien existiert, obwohl es nationale Initiativen gibt. Andererseits würde eine präventive Beschränkung oder ein Verbot von Nanomaterialien aufgrund mangelnder Daten die Innovation behindern und der Gesellschaft die positiven Aspekte von ENMs verwehren; Aspekte, bei denen davon auszugehen ist, dass sie die negativen Folgen bei weitem übertreffen werden.¹⁴

Die aktuellen Diskussionen spiegeln diese Herausforderungen wider und zielen darauf ab, den Schutz der Arbeitnehmer:innen zu gewährleisten bei gleichzeitiger Förderung von Innovation und technologischem Fortschritt. Allgemein wird das Vorsorgeprinzip verfolgt, um die Exposition gegenüber Stoffen mit unbekannter Toxizität zu minimieren, während parallel dazu Methoden entwickelt werden, um die Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Gesundheit voranzutreiben. Diese Bemühungen zielen darauf ab, die Festlegung evidenzbasierter AGW zu beschleunigen und sicherzustellen, dass die Regulierung mit den Innovationen in der Materialwissenschaft Schritt hält.^{15,16}

Tabelle 1:

Vorgeschlagene Arbeitsplatzgrenzwerte für häufig verwendete Nanomaterialien (Stand 2014)¹¹

Substanz	Art der AGW	Wert
Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren [MWCNTs]	Langzeitbelastung	50 µg/m ³
Kohlenstoffnanoröhren [CNTs] und Nanofasern	Zeitgewichteter 8-Stunden-Mittelwert Keine Angabe	1 µg/m ³ 0,01 Fasern/mL
Fullerene	Chronische Inhalation	270 µg/m ³
Silber [18-19 nm]	Abgeleitete Exposition, unterhalb derer keine Wirkung eintritt [DNEL]	98 µg/m ³
Titandioxid [10-100 nm]	10 h/Tag – 40-Stundenwoche	300 µg/m ³

Strategien zur Entwicklung von Arbeitsplatzgrenzwerten

Arbeitsplatzgrenzwerte für verbreitete Nanomaterialien werden derzeit vorwiegend auf nationaler Ebene entwickelt, und basieren auf Meta-Analysen der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur. Laut einer Studie des *Niederländischen Gesundheitsrats*¹⁷ würde eine langfristige Exposition gegenüber einer Konzentration von 0,011 µg/m³ elementarem Kohlenstoff, einem Indikator für Dieselabgaspartikel, zu einer überdurchschnittlichen Todesrate durch Lungenkrebs von 4 pro 100.000 Betroffenen führen. Das dänische *Nationale Forschungszentrum für Arbeitsmedizin* kommt zu ähnlichen Analyseergebnissen für Dieselabgas¹⁸, TiO₂-Nanopartikel¹⁹, Kohlenstoffnanoröhren²⁰, und Ruß²¹. In Frankreich empfiehlt die ANSES für P25-Titandioxid-Nanopartikel Langzeit- und Kurzzeit-AGW von 0,80 µg/m³ bzw. 4 µg/m³.¹³ Dieser Wert liegt um mehrere Größenordnungen unter den 2013 von der Europäischen Kommission für Titandioxid-Nanopartikel vorgeschlagenen 300 µg/m³ (siehe Tabelle 1).

Anstatt jedes Material einzeln zu bewerten, können Nanomaterialien anhand von Schlüsselmerkmalen, die Auswirkungen auf die Gesundheit haben – z. B. faserartige Morphologie, Dichte und Biopersistenz (d. h. Auflösungs geschwindigkeit in der Lunge) – klassifiziert und gruppiert werden. Das *Niederländische Nationale Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt* (RIVM) schlägt eine solche Klassifizierung zur Ableitung von AGW vor²², die in Tabelle 2 dargestellt ist.

Basierend auf diesem Konzept hat eine Expertengruppe die Methode zur Ableitung von Arbeitsplatzgrenzwerten für ENMs weiterentwickelt.²³ Ziel war, die maßgeblichen Ursachen der Toxizität zu identifizieren, genauer gesagt morphologiebedingte Toxizität (*particle-effect*) oder inhärente Toxizität des Bulkmaterials. Darauf aufbauend folgte eine Einordnung der Nanomaterialien in sechs Gruppen, die auf der Toxizität des Bulkmaterials, der Biopersistenz in der Lunge und der Morphologie basiert. Die Kategorien lassen sich grob in faserartige Materialien, lösliche kugelförmige Materialien, und nicht lösliche (biopersistente) kugelförmige Materialien einteilen.

Die **erste** Gruppe umfasst starre, faserartige und biopersistente Materialien, die ähnliche Gesundheitsrisiken wie Asbest aufweisen. Für diese Gruppe gelten dieselben AGW wie für Asbest.

Die **zweite** Gruppe enthält andere, nicht in der ersten Gruppe erfasste, faserartige Materialien, (z. B. flexible Kohlenstoffnanoröhren und -fasern), für die mehr toxikologische Daten erforderlich sind, um AGW ableiten zu können.

Die **dritte** Gruppe besteht aus löslichen kugelförmigen Nanomaterialien, deren Toxizität auf ihrer chemischen Zusammensetzung beruht. Deren AGW sollten auf der Bulk- oder Ionenform beruhen.

Die **vierte** Gruppe umfasst biopersistente kugelförmige Partikel mit unbekannter substanzspezifischer Toxizität. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um festzustellen, ob die Toxizität durch die chemische Zusammensetzung (Einstufung in die **fünfte** Gruppe) oder durch die Morphologie (Einstufung in die **sechste** Gruppe) bedingt ist.

Die **fünfte** Gruppe enthält biopersistente kugelförmige Partikel mit einer nachgewiesenen stoffspezifischen Toxizität. Hierfür wird von den Expert:innen die Anwendung eines Skalierungsfaktors auf den AGW des Bulkmaterials empfohlen. Damit sollen Partikeleffekte berücksichtigt und gleichzeitig sichergestellt werden, dass der resultierende Wert restriktiver ist als der Grenzwert für Materialien der **sechsten** Gruppe.

Schließlich umfasst die **sechste** Gruppe biopersistente kugelförmige Partikel mit relativ geringer substanzspezifischer Toxizität. Diese ist hauptsächlich durch die Morphologie bedingt. AGW für diese Gruppe können aus Referenzmaterialien abgeleitet werden.

Zusätzlich zu diesen Kategorien sollten Modifikationen wie Beschichtungen, Oberflächenfunktionalisierungen und das Vorhandensein reaktiver Gruppen von Fall zu Fall separat bewertet werden, da sie die Eigenschaften von Nanopartikeln und damit auch deren Auswirkungen auf die Gesundheit erheblich beeinflussen können.

Auf europäischer Ebene fördert die EU-Kommission durch die Forschungsprogramme *Horizon 2020* und *Horizon Europe*²⁴ Projekte, die darauf abzielen, Gesundheitsrisiken von ENMs zu minimieren. Die Forschung fokussiert auf (1) die Beschleunigung der toxikologischen Bewertung neuer Materialien, inkl. In-Silico-Methoden teilweise mit KI-Unterstützung, durch Projekte wie *CompSafeNano*, *nanoPASS*, *EU-ToxRisk*, *Smart-NanoTox*, *MACRAMÉ* oder *iCare*; und (2) die frühestmögliche Einbeziehung von Gesundheits- und Sicherheitsaspekten in den Entwicklungsprozess neuer Materialien, bspw. in Projekten wie *SUNSHINE*, *INTEGRANO* oder *ACCORDs*. Diese Initiativen beschränken sich nicht auf Nanomaterialien, sondern umfassen potenziell alle bestehenden und zukünftigen Materialien.

Nanotoxikologische Studien basieren häufig auf Tierversuchen. Laufende Forschungsprojekte konzentrieren sich auf die Entwicklung tierversuchsfreier Testmethoden, wie bspw. die Projekte *nanoPASS* und *EU-ToxRisk*. Obwohl diese Projekte nicht spezifisch auf Arbeitsplatzgrenzwerte ausgerichtet sind, wird davon ausgegangen, dass sie die Ableitung von AGW für Nanomaterialien deutlich erleichtern werden.

Auswahl passender Kennzahlen

Arbeitsplatzgrenzwerte werden in der Regel in Massenkonzentration in der Luft angegeben, typischerweise in µg/m³ oder mg/m³. Diese Einheiten eignen sich gut für konventionelle Chemikalien, bei denen die Auswirkungen auf die Gesundheit weitgehend proportional zur eingeatmeten Masse sind. Bei Nanomaterialien wird dieser Ansatz jedoch zunehmend in Frage gestellt, insbesondere wenn die Toxizität eher durch die spezifische Oberfläche, die Partikelmorphologie oder die Oberflächenmodifikationen, als durch die chemische Zusammensetzung des Materials bedingt ist.

Alternative Kennzahlen wie die Partikelanzahlkonzentration (Partikel pro m³) oder die Oberflächenkonzentration (m² Partikeloberfläche pro m³ Luft) korrelieren möglicherweise besser mit den

Tabelle 2: Klassifizierung von Nanomaterialien und entsprechende vorgeschlagene Arbeitsplatzgrenzwerte gemäß dem „Niederländischen Nationalen Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt“

Kategorie	Beschreibung	Materialdichte	Vorgeschlagener Wert
1	Starre, biopersistente Nanofasern, bei denen asbestähnliche Wirkungen nicht ausgeschlossen werden können	–	0,01 Fasern/cm ³ [10.000 Fasern/m ³]
2a	Biopersistente, granuläre Nanomaterialien im Bereich von 1 bis 100 nm	> 6.000 kg/m ³	20.000 Partikel/cm ³
2b	Biopersistente, granuläre und fibröse Nanomaterialien im Bereich von 1 bis 100 nm	< 6.000 kg/m ³	40.000 Partikel/cm ³
3	Nicht biopersistente, granuläre Nanomaterialien im Bereich von 1 bis 100 nm	–	Aktueller Grenzwert des Bulkmaterials

beobachteten gesundheitlichen Auswirkungen. Es gibt jedoch keine einheitliche Kennzahl, die für alle Kategorien von Nanomaterialien universell anwendbar ist, und die Wahl dieser Kennzahl ist nach wie vor Thema wissenschaftlicher und regulatorischer Debatten.²⁵

In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen Massen-, Oberflächen-, und Partikelanzahlkonzentrationen für zwei Partikelgrößenverteilungen von durchschnittlich 25 nm und 75 nm dargestellt. Während beide Verteilungen ähnliche Massenkonzentrationen aufweisen, sind die entsprechenden Oberflächen- und Partikelanzahlkonzentrationen für die größeren Partikel wesentlich geringer. Wenn gesundheitsschädigende Konsequenzen eher mit der Oberfläche oder Partikelanzahl als mit der Masse korrelieren, ist davon auszugehen, dass durch massenbasierte AGW das tatsächliche Risiko nur unzureichend erfasst werden kann.

Neben der toxikologischen Relevanz wird die Wahl der Expositionsmetrik durch die Verfügbarkeit und Praktikabilität von Messinstrumenten, die Partikelkonzentrationen unterhalb des Arbeitsplatzgrenzwerts zuverlässig nachweisen können, eingeschränkt: Massenbasierte Konzentrationen lassen sich mit gängigem Instrumentarium in der Regel leichter messen. Die Instrumente müssen außerdem in der Lage sein, ENMs von Hintergrundpartikeln (z. B. Pollen, Verkehrsemissionen, Staub) zu unterscheiden, vor Ort (i. e. für die Arbeitsplatzüberwachung) einfach zu bedienen, und darüber hinaus kostengünstig sein.

Risikomanagement

Bestehende Sicherheitsvorschriften für Chemikalien, wie bspw. für krebserregende oder genotoxische Stoffe, inkludieren auch ENMs. In der EU sind durch die *Richtlinie 89/391/EWG* die Pflichten der Arbeitgeber:innen zum Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer:innen festgehalten, die uneingeschränkt auch für ENMs gelten. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Nanomaterialien werden jedoch durch ihre große spezifische Oberfläche im Vergleich zur Bulkform desselben Materials verstärkt.²⁶ Daher müssen Risikomanagementstrategien in Abwesenheit von AGW die spezifischen Risiken berücksichtigen, die mit der Exposition gegenüber Nanomaterialien verbunden sind.

Arbeitgeber:innen müssen Strategien implementieren, um Risiken zu identifizieren, zu quantifizieren und zu reduzieren. Die entsprechenden Maßnahmen umfassen die Substitution gefährlicher Stoffe durch sicherere Alternativen, die Reduktion von Emissionen, die Expositionsverringern durch ausreichende Belüftung und den Einsatz von Luftfiltern, die Schulung der Mitarbeiter:innen, sowie die Bereitstellung von Schutzausrüstung wie Gesichtsmasken oder Schutzkleidung.

Institutionen wie die EU-Kommission^{11,27,28}, die Weltgesundheitsorganisation (WHO)²⁹ und nationale Behörden^{30,31} entwickeln Richtlinien zum Risikomanagement für ENMs, die typischerweise wie folgt strukturiert sind: Identifizierung der Nanomaterialien (Quelle, Form, z. B. in einer Matrix gebunden oder in Lösung), Bewertung des Gefährdungspotenzials (physikochemische Ei-

genschaften des Nanomaterials, Toxizität) und der Exposition der Mitarbeiter:innen (Expositionswege und -dauer), Charakterisierung des Risikos (Quantifizierung des Risikos auf Grundlage der Gefahr und Exposition) und Management des Risikos (Substitution des ENM, Einbeziehen kritischer Prozesse, Bereitstellung von Schutzausrüstung).

Dieses strukturierte Vorgehen stellt sicher, dass Arbeitgeber:innen auch ohne materialspezifische Arbeitsplatzgrenzwerte die Verantwortung dafür tragen, die mit ENMs verbundenen Risiken für Arbeitnehmer:innen zu minimieren.

Anmerkungen und Literaturhinweise

All Links wurden am 22. Januar 2026 überprüft.

1. Nanotechnology knowledge base – Market, *NanoData – European Chemicals Agency*. <https://euon.echa.europa.eu/nanodata/sectors/manufacturing/overview/market>.
2. R-Nano.fr, *Ministère de la Transition Écologique*. <https://www.r-nano.fr/?locale=en>.
3. W. C. Hinds, *Aerosol Technology*. New York: John Wiley & Sons, **1999**.
4. D. E. Schraufnagel, The health effects of ultrafine particles, *Experimental & Molecular Medicine*, 52, 3, 311–317, **2020**. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
5. M. R. Miller et al., Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease, *ACS Nano*, 11, 5, 4542–4552, **2017**. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b08551>.
6. H. S. Choi et al., Rapid translocation of nanoparticles from the lung airspaces to the body, *Nature Biotechnology*, 28, 12, 1300–1303, **2010**. <https://doi.org/10.1038/nbt.1696>.
7. K. Schröder, C. Pohlenz-Michel, N. Simetska, J.-U. Voss, S. Escher, and I. Mangelsdorf, Carcinogenicity and Mutagenicity of Nanoparticles, Umweltbundesamt, (UBA-FB) 001725/E, **2014**.
8. Key facts on Asbestos, *World Health Organization*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asbestos>.
9. C. A. Barlow, J. Sahmel, D. J. Paustenbach, and J. L. Henshaw, History of knowledge and evolution of occupational health and regulatory aspects of asbestos exposure science: 1900–1975, *Critical Reviews in Toxicology*, 47, 4, 286–316, **2017**. <https://doi.org/10.1080/10408444.2016.1258391>.
10. RIS – Grenzwertverordnung 2025 – Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 20.01.2026, *Rechtsinformationssystem des Bundes*. <https://www.ris.bka.gv.at/geltendefassung.wxe?abfrage=bundesnormen&gesetzesnummer=20001418>.
11. Guidance on the protection of the health and safety of workers from the potential risks related to nanomaterials at work, European Commission, **2014**. <https://euon.echa.europa.eu/guidance-and-tools-for-workers>.

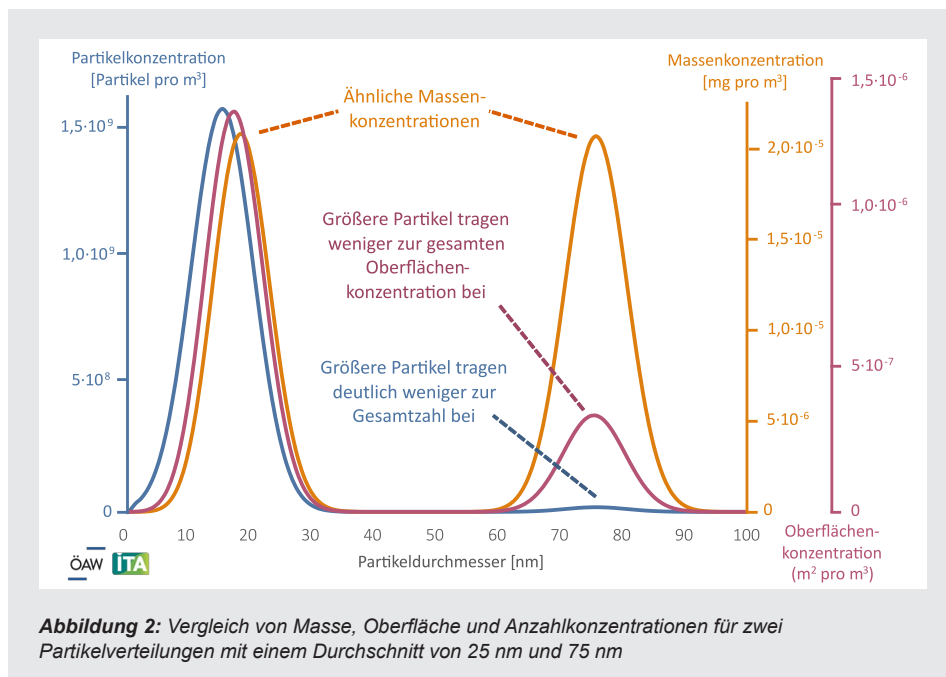


Abbildung 2: Vergleich von Masse, Oberfläche und Anzahlkonzentrationen für zwei Partikelverteilungen mit einem Durchschnitt von 25 nm und 75 nm

Fazit

Nanomaterialien stellen ein erhebliches Gesundheitsrisiko für Arbeitnehmer:innen, die ohne adäquaten Schutz mit ihnen operieren, dar. Die laufenden Anstrengungen zur Festlegung gesundheitsbasierter Arbeitsplatzgrenzwerte für häufig verwendete sowie unbeabsichtigt entstandene Nanomaterialien heben das erhöhte Risiko für Lungenkrebs und andere gesundheitsschädliche Wirkungen bei Konzentrationen, die weit unter dem Grenzwert für lungengängigen Staub liegen, hervor. Arbeitgeber:innen müssen die Exposition der Arbeitnehmer:innen minimieren, indem sie potenzielle Quellen für Nanopartikel in der Luft identifizieren, den Einsatz gefährlicher Stoffe reduzieren, und Schutzmaßnahmen wie eine ausreichende Belüftung und Luftfilterung sowie die Verwendung persönlicher Schutzausrüstung umsetzen.

ENMs wirken als Katalysatoren für den wissenschaftlichen Fortschritt: einerseits, indem sie die Entwicklung von Materialien mit neuartigen Eigenschaften ermöglichen, andererseits durch das Forcieren notwendiger Fortschritte in der Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltbewertung, um ihre sichere und verantwortungsvolle Nutzung zu gewährleisten. Instrumente wie künstliche Intelligenz können bestehende In-silico-Methoden zur Vorhersage der Toxizität von Nanomaterialien basierend auf ihren physikochemischen Eigenschaften unterstützen³² und damit sichere Innovation bei gleichzeitiger Reduktion der Notwendigkeit von Tierversuchen fördern. Nichtsdestoweniger stellen ENMs aufgrund der erschwerten Detektion und Identifikation, sowie ihrer großen Vielfalt den Arbeitnehmer:innenschutz vor neue Herausforderungen.

Regulierungsbehörden arbeiten an der Standardisierung der Methoden zur Klassifizierung, Erkennung und Charakterisierung von Nanomaterialien, um zuverlässige Messungen zu ermöglichen und die Umsetzung evidenzbasierter AGW zu unterstützen. Diese Initiativen erfolgen auf mehreren Ebenen und inkludieren ISO-^{33,34} und CEN-Normen³⁵ ebenso wie Aktivitäten der OECD-Arbeitsgruppe *Working Party on Manufactured Nanomaterials* (WPMN)³⁶.

Entscheidungssträger:innen sollten einen kontinuierlichen Dialog zwischen allen Interessengruppen (Forscher:innen, Aufsichtsbehörden, Arbeitnehmer:innen und Arbeitgeber:innen) fördern, um die effiziente Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in kohärente Rechtsvorschriften zu gewährleisten, und damit die Einführung von Schutzmaßnahmen und Arbeitsplatzgrenzwerten zu beschleunigen. Die Verbesserung der Datenerhebung zur industriellen Verwendung von Nanomaterialien ist von entscheidender Bedeutung für die Bewertung der Exposition von Arbeitnehmer:innen, um so Risikobewertung und Schutzstrategien wirksam zu lenken. Abschließend ist es essenziell, Ressourcen zu Aufklärung und Information über die mit ENMs verbundenen Risiken bereitzustellen, und Arbeitgeber:innen, insbesondere KMU, bei der Ermittlung von Risiken sowie der Umsetzung geeigneter Überwachungs- und Schutzmaßnahmen zu unterstützen..

12. Safer and Healthier Work for All – Modernisation of the EU Occupational Safety and Health Legislation and Policy, European Commission, Brussels, Commission Staff Working Document, 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017SC0010>.
13. Le dioxyde de titane sous forme nanométrique (TiO₂ NP, P25), ANSES, Maisons-Alfort, 2019-SA-0109 „nTiO₂ OEL“, 2020. <https://www.anses.fr/system/files/VSR2019SA0109Ra.pdf>.
14. Synthetische Nanomaterialien: Auswirkungen und Sicherheitsaspekte, Schweizerischer Nationalfonds, 2017. https://nanoscience.unibas.ch/fileadmin/user_upload/nanoscience/04_Ueber Uns/Nanowissenschaften/Risiken/white_paper_nfp64_d.pdf.
15. Safe handling of nanomaterials and other advanced materials at workplaces, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, NanoValid – project F2268, 2015. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Kooperation/NanoValid>.
16. OSH Wiki on Nanomaterials, European Agency for Safety and Health at Work, 2022. <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/nanomaterials>.
17. Diesel Engine Exhaust – Health-based recommended occupational exposure limit. https://www.healthcouncil.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2019/03/13/diesel-engine-exhaust/Diesel+Engine+Exhaust_E.pdf.
18. A. T. Saber, N. Hadrup, S. S. Poulsen, N. R. Jacobsen, and U. Vogel, Diesel Exhaust Particles: Scientific Basis for Setting a Health-Based Occupational Exposure Limit, National Research Centre for the Working Environment. <https://www.ft.dk/samling/20191/almdel/beau/bilag/101/2130136.pdf>.
19. A. T. Saber, S. S. Poulsen, N. Hadrup, K. S. Hougaard, N. R. Jacobsen, and U. Vogel, Titanium Dioxide Nanomaterials: Scientific Basis for Setting a Health-Based Occupational Exposure Limit, National Research Centre for the Working Environment. <https://www.ft.dk/samling/20191/almdel/BEU/bilag/101/2130137.pdf>.
20. S. S. Poulsen, N. R. Jacobsen, N. Hadrup, K. S. Hougaard, A. T. Saber, and U. Vogel, Carbon Nanotubes: Scientific Basis for Setting a Health-Based Occupational Exposure Limit, National Research Centre for the Working Environment. https://nfa.elsevierpure.com/ws/portalfiles/portal/4990316/Poulsen_SS_Carbon_nanotubes_Scientific_basis_2018.pdf.
21. N. R. Jacobsen, N. Hadrup, S. S. Poulsen, K. S. Hougaard, A. T. Saber, and U. Vogel, Carbon Black Nanomaterials: Scientific Basis for Setting a Health-Based Occupational Exposure Limit, National Research Centre for the Working Environment. https://nfa.elsevierpure.com/ws/portalfiles/portal/4990316/Poulsen_SS_Carbon_nanotubes_Scientific_basis_2018.pdf.
22. Voorlopige nanoreferentiewaarden voor synthetische nanomaterialen, Commissie Arbeidsomstandigheden, 2012. <https://www.ser.nl/-/media/ser/downloads/adviezen/2012/voorlopige-nanoreferentievoorwaarden.pdf>.
23. M. Visser et al., Towards health-based nano reference values (HNRVs) for occupational exposure: Recommendations from an expert panel, *NanoImpact*, 26, 100396, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100396>.
24. CORDIS – EU research results, *European Commission*, 2025. <https://cordis.europa.eu/>.
25. M. Hull, A. J. Kennedy, C. Detzel, P. Vikesland, and M. A. Chappell, Moving beyond Mass: The Unmet Need to Consider Dose Metrics in Environmental Nanotoxicology Studies, *Environmental Science & Technology*, 46, 20, 10881–10882, 2012. <https://doi.org/10.1021/es3035285>.
26. F. Liao et al., The size-dependent genotoxic potentials of titanium dioxide nanoparticles to endothelial cells, *Environmental Toxicology*, 34, 11, 1199–1207, 2019. <https://doi.org/10.1002/tox.22821>.
27. European Commission. Directorate General for Employment, Social Affairs and Inclusion. Working safely with manufactured nanomaterials: non binding guide for workers., European Commission, Luxembourg, 10.2767/28405, 2019. <https://data.europa.eu/doi/10.2767/28405>.
28. European Commission. Directorate General for Employment, Social Affairs and Inclusion. Working safely with manufactured nanomaterials: non binding guide for employers and health and safety practitioners., European Commission, Luxembourg, 10.2767/0812, 2019. <https://data.europa.eu/doi/10.2767/0812>.

29. World Health Organization, WHO guidelines on protecting workers from potential risks of manufactured nanomaterials, World Health Organization, Geneva, 978-92-4-155004-8, 2017. <https://iris.who.int/handle/10665/259671>.
30. SUVA, Grenzwerte am Arbeitsplatz, SUVA, Luzern, 1903.d, 2025. <https://www.suva.ch/de-ch/download/richtlinien-und-gesetze/grenzwerte-am-arbeitsplatz/standard-variante--1903.D>.
31. AFSSET, Les Nanomatériaux – Sécurité au travail, AFSSET, Maisons-Alfort, 2006/006, 2008. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2006et0006Ra.pdf>.
32. D. Zouraris et al., CompSafeNano project: NanoInformatics approaches for safe-by-design nanomaterials, *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 29, 13–28, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.12.024>.
33. ISO/TC 229 – Nanotechnologies, ISO. <https://www.iso.org/committee/381983.html>.
34. ISO/TR 18637:2016, ISO. <https://www.iso.org/standard/63096.html>.
35. CEN Technical Bodies – CEN/TC 352. https://standards.cencenelec.eu/ords/f?p=205:7:::::FSP_ORG_ID:508478&cs=129920725B8E35381B86DF91207AC29CD.
36. K. Rasmussen, H. Rauscher, P. Kearns, M. González, and J. Riego Sintes, Developing OECD test guidelines for regulatory testing of nanomaterials to ensure mutual acceptance of test data, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 104, 74–83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.02.008>.

Danksagung

Die Autor:innen danken Ulla Birgitte Vogel vom Dänischen Nationalen Forschungszentrum für Arbeitsumwelt und Sabine Lehr vom Zentralen Arbeitsinspektorat für ihre wertvollen Kommentare und Vorschläge.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Bäckerstraße 13, A-1010 Wien; www.oew.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung sowie seiner Kooperationspartner:innen im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt: epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 069, Februar 2026:
epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier069.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de