

# Nanomaterialien: Arbeitsschutzaspekte





# Nanomaterialien: Arbeitsschutzaspekte

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Ulrich Wurster Gerhard Ott Dr. Gabriele Wehrle
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Arbeitsgemeinschaft der LUBW (ARGE Nano), Leitung: U. Wurster
BEZUG	Die Broschüre ist kostenlos erhältlich Download unter <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
STAND	Oktober 2009
SATZ	Agentur & Druckerei Murr GmbH
BILDNACHWEIS	Nano-Zinkoxid (Quelle: BASF)

1	ZUSAMMENFASSUNG	5
2	AUSGANGSLAGE	6
3	PARTIKELGRÖSSEN – FESTLEGUNG VON STAUBFRAKTIONEN	8
4	VORKOMMEN UND VERWENDUNG	11
5	GESETZLICHE REGELUNGEN	16
6	GEFÄHRDUNG AM ARBEITSPLATZ	18
7	MESSUNG	21
8	EMPFEHLUNGEN ZUM SCHUTZ VON ARBEITNEHMERN	26
9	LITERATUR UND QUELLEN	29



# 1 Zusammenfassung

Die Nanotechnologie ist ein rasch wachsendes Forschungs- und Entwicklungsgebiet mit zunehmender Bedeutung für Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft. Es ist daher wichtig, neben den Chancen auch mögliche Risiken umfassend und frühzeitig zu untersuchen und – falls nötig – Maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt zu ergreifen. Fehlinvestitionen und Folgekosten für Gesellschaft und Wirtschaft können so vermieden werden. Im Vordergrund der Risikodiskussion stehen die in der Nanotechnologie verwendeten synthetischen Nanomaterialien.

Industrie und Gewerbe sind verpflichtet, ihre Produkte und Anwendungen im Rahmen der bestehenden Bestimmungen zur Selbstkontrolle zu beurteilen und nötigenfalls risikoreduzierende Maßnahmen zu treffen und ihre Kunden über solche zu informieren. Arbeitgeber müssen alle erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer treffen – sie sind gesetzlich verpflichtet, für den Schutz der Gesundheit ihrer Arbeitnehmenden zu sorgen, indem die in ihrem Betrieb auftretenden Risiken beurteilt und die zu deren Beherrschung nötigen Maßnahmen getroffen werden. Über das Ausmaß der Risiken von synthetischen Nanomaterialien ist jedoch noch wenig bekannt und für die Abschätzung möglicher Auswirkungen am Arbeitsplatz bestehen keine etablierten Verfahren. Dennoch wird in Betrieben bereits mit synthetischen Nanopartikeln umgegangen.

Aufgrund von Wissenslücken zur Abschätzung der Risiken von Nanomaterialien ist in absehbarer Zeit nicht mit regulatorischen Ansätzen zu rechnen. Derzeit wird dem Prinzip der Eigenverantwortung gefolgt (Verantwortung, Transparenz, Dialogbereitschaft mit Interessengruppen und nachgeschalteten Anwendern, Risikomanagement). REACH bietet grundsätzlich die administrative Möglichkeit, auch nanoskalige Stoffe zu bewerten und zu autorisieren – hierzu sind jedoch weitere Detailanforderungen notwendig.

Für Nanopartikel existieren derzeit keine spezifischen Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW). Für die Messung gibt es verschiedene Möglichkeiten, es fehlt bisher allerdings ein standardisiertes Verfahren, das einen direkten Vergleich von Messergebnissen erlaubt.

Folgende hierarchische Gliederung der Schutzmaßnahmen für das Arbeiten mit Stoffen unbekanntes Risikos (z.B. neue Chemikalien oder pharmazeutische Wirkstoffe) ist etabliert und hat sich bewährt:

1. Ersatz problematischer Stoffe (Substitution)
2. Technische Schutzmaßnahmen (Kollektivschutz)
3. Organisatorische Schutzmaßnahmen
4. Personenbezogene Schutzmaßnahmen (Individualschutz)

Solange keine Regulierungsansätze vorhanden sind, kann dieser Ansatz auch für synthetische Nanopartikel übernommen werden (wobei die Nutzung der speziellen nanoskaligen Eigenschaften die Möglichkeit der „Substitution“ zunächst ausschließt). Im Rahmen des vorsorgenden Arbeitsschutzes dürften langfristig verlässliche Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) bzw. Expositionsszenarien nach REACH auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse nötig werden – dieses Ziel ist aufgrund fehlender toxikologischer Daten jedoch noch weit entfernt.

Darüber hinaus gibt es keine Meldepflicht für Hersteller bzw. Anwender von synthetischen Nanomaterialien. Mit zunehmender Produktion und Verwendung ist eine steigende Belastung am Arbeitsplatz zu erwarten – die derzeitige Expositionssituation ist jedoch völlig unübersichtlich. Deshalb könnte auch beispielhaft die systematische Erfassung aller Hersteller sowie gewerblicher Anwender von synthetischen Nanopartikeln in einem Bundesland wie Baden-Württemberg in Erwägung gezogen werden.

## 2 Ausgangslage

Die Nanotechnologie ist ein Thema der neuesten Technologiedebatte, das mehr und mehr in das Bewusstsein der Öffentlichkeit rückt. Neben vielen anderen Literatur-Veröffentlichungen hat auch die LUBW im Juli 2007 in einer Zusammenstellung „Anwendung von Nanopartikeln“ über allgemeine Grundlagen, Anwendungen, Entwicklungen und Auswirkungen von Nanopartikeln auf den Arbeits-, Umwelt- und Gesundheitsschutz berichtet [LUBW, 2007]. Dabei ist die Nanotechnologie ungeachtet ihres Namens weniger eine Technologie als vielmehr ein Überbegriff für eine Vielzahl von Anwendungen und Produkten, die kleinste Partikel enthalten und dadurch ganz spezielle Eigenschaften bekommen. Nanotechnologie gilt als Querschnittstechnologie und beeinflusst zunehmend viele Bereiche der Biologie, der Medizin, der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Material- und Ingenieurwissenschaften. Synthetische, d.h. gezielt hergestellte Nanomaterialien weisen gegenüber konventionellen Materialien häufig andere, neue Eigenschaften auf – sie ermöglichen in verschiedensten Bereichen eine neue Generation von Produkten mit großem wirtschaftlichen Potential [SWISS RE, 2004].

Bereits heute ist eine Vielzahl von Produkten auf der Basis von synthetischen Nanomaterialien auf dem Markt. Kosmetikartikel, extrastabile Kompositmaterialien oder Lebensmittelverpackungen, die eine längere Haltbarkeit erlauben, sind Beispiele hierfür. Verschiedene nanotechnologische Anwendungen in der Forschung versprechen, auch Beiträge zur Ressourceneffizienz zu leisten, wie z.B. in den Bereichen Energienutzung/Energiegewinnung und Rohstoffverbrauch. In der Medizin werden neue Verabreichungsformen von pharmazeutischen Wirkstoffen entwickelt, die zu besseren Therapiemethoden führen [NANOROAD, 2008].

Synthetische Nanomaterialien bieten große Chancen und vielfältigen Nutzen, von ihnen können aber auch Gefahren ausgehen. Mögliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit, die Umwelt und die Gesellschaft müssen so früh wie möglich erkannt und ihren Folgen muss entgegengewirkt werden. Nur auf der Basis einer soliden Risikoabschätzung lassen sich Gesellschaft und Wirtschaft vor unnötigen Folge-

kosten und Fehlinvestitionen schützen und das große Chancenpotential der Nanotechnologie nutzen. Eine abschließende Bewertung ist derzeit nicht möglich [BUNDESRAT DER SCHWEIZ, 2008].

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene wird geprüft, wie nanotechnologische Produkte und Anwendungen künftig zu behandeln sind. Die Empfehlungen der EU-Kommission für einen „Verhaltenskodex für verantwortungsvolle Forschung im Bereich der Nanowissenschaften und -technologien“ [EU-KOMMISSION, 2008] setzen hierbei auf Freiwilligkeit und Verantwortungsbewusstsein. Auf nationaler Ebene führt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit den „Nano-Dialog“ [BMU, 2008], in dessen Rahmen diskutiert wird, wie nanoskalige Materialien behandelt werden sollen. Neben den Vertretern der staatlichen Stellen nehmen Industrievertreter, Wissenschaftler, Behörden, Verbände und Nichtregierungsorganisationen (NGOs) teil – so soll ein verantwortungsvoller Umgang mit Nanomaterialien festgeschrieben werden.

Auch an Arbeitsplätzen werden synthetische Nanopartikel und Nanotechnologie vermehrt eingesetzt. Im vorliegenden Bericht sollen deshalb ausschließlich die Arbeitsschutzaspekte von gezielt hergestellten (synthetischen) Nanomaterialien näher betrachtet werden, da derzeit eine mögliche Gefährdung nicht sicher ausgeschlossen werden kann. Arbeitgeber müssen alle erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer treffen. Sie sind gesetzlich verpflichtet, für den Schutz der Gesundheit ihrer Arbeitnehmenden zu sorgen, indem die in ihrem Betrieb auftretenden Risiken beurteilt und die zu deren Beherrschung nötigen Maßnahmen getroffen werden. Über das Ausmaß der Risiken von synthetischen Nanomaterialien ist jedoch noch wenig bekannt und für die Abschätzung möglicher Risiken am Arbeitsplatz bestehen noch keine etablierten Verfahren. An Arbeitsplätzen ergeben sich nach heutigem Kenntnisstand Expositionen gegenüber synthetischen Nanopartikeln vor allem durch Prozesse, die ungebundene Nanopartikel als Ausgangsstoffe nutzen oder bei denen diese als Nebenprodukte erzeugt werden.

Der bekannte Grundsatz zur Beurteilung einer Arbeitsplatzexposition gilt auch für synthetische Nanopartikel: „Stoffe mit unbekanntem Eigenschaften sind als potentiell gefährlich zu behandeln“.

Die etablierte Schutzstrategie beruht dabei auf hierarchisch geordneten Maßnahmen: der Substitution gefährlicher Stoffe durch weniger gefährliche; den technischen Maßnahmen; den organisatorischen Maßnahmen und als letztes den personenbezogenen Schutzmaßnahmen. Bezüglich der Effizienz von technischen Schutzsystemen und persönlicher Schutzausrüstung bestehen noch große Unsicherheiten, insbesondere für Nanopartikel mit geringer Neigung zur Agglomeration. Durch deren spezifische physikalische und chemische Eigenschaften können neben direkten Gesundheitsrisiken auch unerwartet große technische Risiken wie Feuer- und Explosionsgefahr oder katalytische Aktivität auftreten [SUVA, 2007].

Daher besteht ein deutlicher Handlungsbedarf im Bereich der Entwicklung und Anwendung von angepassten Schutzmaßnahmen. Empfehlungen zu bestehenden oder anerkannten Schutzstrategien müssen konkretisiert und breit kommuniziert werden, damit entsprechende Schutzmaßnahmen in Betrieben angewendet werden [BAUA, 2007].

Für Nanomaterialien existieren derzeit keine spezifischen Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) – mit zunehmendem Einsatz von synthetischen Nanomaterialien ist jedoch zu erwarten, dass es vermehrt zu erhöhten Belastungen am Arbeitsplatz kommen wird. Damit dürfte sich langfristig ein Bedarf an AGWs für bestimmte synthetische Nanopartikel ergeben.

Die derzeitigen Empfehlungen für den Umgang mit synthetischen Nanopartikeln basieren fast ausschließlich auf Analogieüberlegungen zu Partikeln im Mikrometerbereich. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen und Methoden muss überprüft werden. Bis zum Vorliegen entsprechender Erkenntnisse sind die anerkannten Schutzstrategien für Stoffe mit unbekanntem Gefahrenpotential anzuwenden, wobei die potentielle Exposition von Arbeitnehmenden durch technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen so gering wie möglich zu halten ist.

Die vorliegende Zusammenstellung informiert nach heutigem Wissensstand über Arbeitsschutzaspekte bei Tätigkeiten mit synthetischen Nanopartikeln und zeigt konkrete Schutzmaßnahmen auf, die es beim Umgang am Arbeitsplatz zu beachten gilt.

### 3 Partikelgrößen – Festlegung von Staubfraktionen

Im Zusammenhang mit der Nanotechnologie und der Herstellung, Verarbeitung und Freisetzung von Nanopartikeln herrscht derzeit eine Begriffsvielfalt im Hinblick auf die Bezeichnung einzelner Partikel und die Definition von Staubfraktionen. Zur Verdeutlichung einige Begriffe:

**Nanotechnologie** beinhaltet die gezielte Herstellung, Untersuchung und Anwendung von nanoskaligen Strukturen und Materialien (typischerweise Partikeln). Sie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Größenordnung auftreten [BUNDESRAT DER SCHWEIZ, 2008]. Als nanoskalig gilt dabei der Größenbereich von 1 - 100 Nanometern. Ein Nanometer (nm) entspricht einem Milliardstel Meter und liegt damit in der Nähe des Größenbereichs von einzelnen Atomen.

**Nanomaterialien** sind absichtlich hergestellte Materialien mit strukturellen Bestandteilen (Kristallite, Fasern, Partikel), die in mindestens einer äußeren oder inneren Dimension nanoskalig sind – mit speziellen Eigenschaften oder spezieller Zusammensetzung, typischerweise zwischen 1 und 100 nm [BUNDESRAT DER SCHWEIZ, 2008].

**Nano-strukturierte Materialien** sind Materialien mit nanoskaliger Oberfläche und werden u.a. auch in Verbundwerkstoffen eingesetzt.

**Nano-Objekte** sind definiert als ein Material mit einer, zwei oder drei äußeren Dimensionen im Bereich zwischen 1 und 100 nm. Sie können im Vergleich mit größeren Teilchen derselben Zusammensetzung wesentlich veränderte physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen [DIN/CEN/ISO, 2008].

**Synthetische Nanopartikel** sind gezielt hergestellte Nano-Objekte, welche in allen drei Dimensionen zwischen 1 und 100 nm groß sind. **Nanoplättchen, -fasern, -drähte oder -stäbchen** sind typischerweise nur in einer bzw. zwei Dimensionen zwischen 1 und 100 nm groß. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Begriffe Nanomaterialien, Nano-Objekte und Nanopartikel oft synonym verwendet.

**Ultrafeinstaub** umfasst alle Teilchen, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 100 nm (0,1 µm) beträgt. In dieser Größenordnung liegen zum Beispiel Reifenabrieb und Viren. Für die einzelnen Staubpartikel dieser Fraktion werden die Begriffe Nanopartikel (nanoskalige Partikel) und ultrafeine Partikel derzeit teilweise synonym verwendet. Als Nanopartikel im engeren Sinne sollten nach hiesiger Auffassung nur Partikel < 100 nm bezeichnet werden, die nanotechnologisch gezielt synthetisch hergestellt wurden. In diesem Sinne wird der Begriff „Nanopartikel“ in diesem Bericht auch verwendet. Wird von Partikeln < 100 nm im Allgemeinen gesprochen, so werden die Begriffe „ultrafeine Partikel“ oder „Ultrafeinstaub“ benutzt.

**Partikel:** Festes oder flüssiges Teilchen mit definierten physikalischen Grenzen und einer Partikelgröße zwischen 0,001 und 100 µm.

**Aerodynamischer Durchmesser:** Durchmesser eines kugelförmigen Partikels aus einem Material mit der Dichte 1000 kg/m<sup>3</sup>, das in ruhender Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit besitzt wie das zu beschreibende Partikel.

Neben dem Ultrafeinstaub gibt es im Arbeits- und Umweltschutz eine Anzahl weiterer Staubfraktionen [MAT-TENKLOTT, 2009] (siehe auch Abb. 1, 2).

Partikel natürlichen Ursprungs sowie als Nebenprodukt/Schadstoff oder Abfall freigesetzte Partikel sollten als ultrafeine Partikel bezeichnet werden. Sie entstehen beispielsweise bei Verbrennungsvorgängen als primäre Kohlenstoffpartikel und sind ca. 100 nm groß (s. Abb. 1). Diese Primärpartikel wachsen in der Regel zu größeren Agglomeraten (Akkumulationspartikeln) an. Ultrafeine Partikel kommen in sehr großer Anzahl im Umweltstaub vor und entsprechen ca. 70% der Gesamtzahl der Umweltpartikel. Aufgrund des geringen Durchmessers besitzen sie eine extrem kleine Masse, so dass sie mit nur ca. 1% zur Gesamtmasse des Umweltstaubes beitragen.

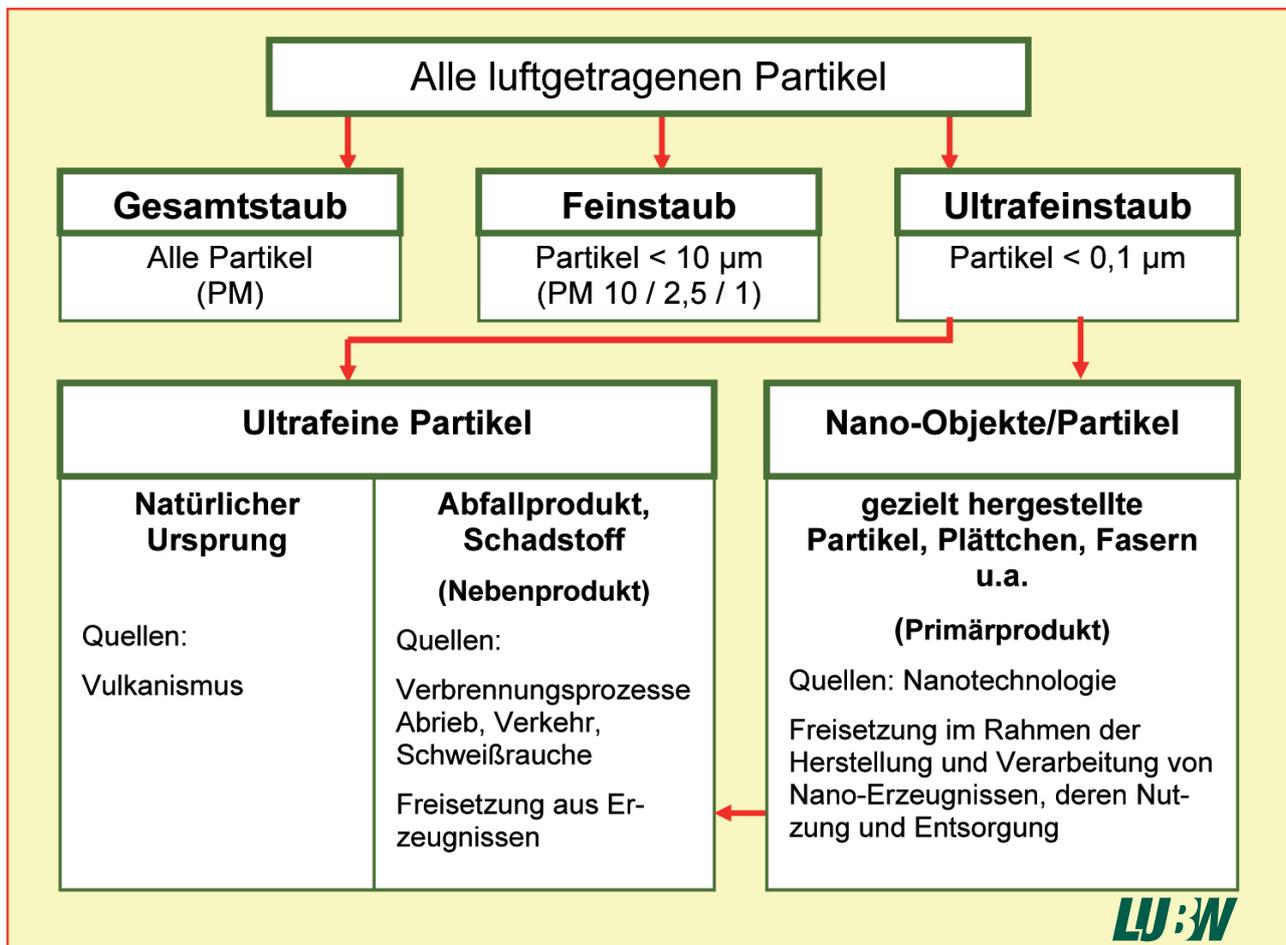


Abb. 1: Übersicht zur Einteilung von Staubpartikeln

#### STAUBFRAKTIONEN IM ARBEITSSCHUTZ:

Im Arbeitsschutz werden derzeit nach DIN EN 481 „Festlegung von Konventionen von Partikelgrößenfraktionen zur Messung von Schwebstoffen am Arbeitsplatz“ [DIN/EN, 1993] mehrere Staubfraktionen unterschieden:

- Einatembare Staubfraktion (E-Staub, früher Gesamtstaub, englische Bezeichnung „Particulate Matter“ (PM)), der Massenanteil aller Schwebstoffe in der Luft, der durch Mund und Nase eingeatmet wird. Bei der Probenahme werden Partikel bis 100 µm erfasst.
- Alveolengängige Fraktion (A-Staub, früher Feinstaub), der Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der bis in die nicht-cilierten Luftwege (Lungenbläschen) vordringt. Bei der Probenahme werden Partikel bis 15 µm erfasst.
- Thorakale Fraktion (Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus vordringt), extrathorakale Fraktion (Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der nicht über den Kehlkopf hinaus vordringt) und tracheobronchiale Fraktion (Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus vordringt, aber nicht bis in die nicht-cilierten Luftwege gelangen) sind weitere Staubfraktionen, die in der Praxis allerdings keine Rolle spielen.

E- und A-Staub sind die einzigen Staubfraktionen, für die Arbeitsplatzgrenzwerte existieren.

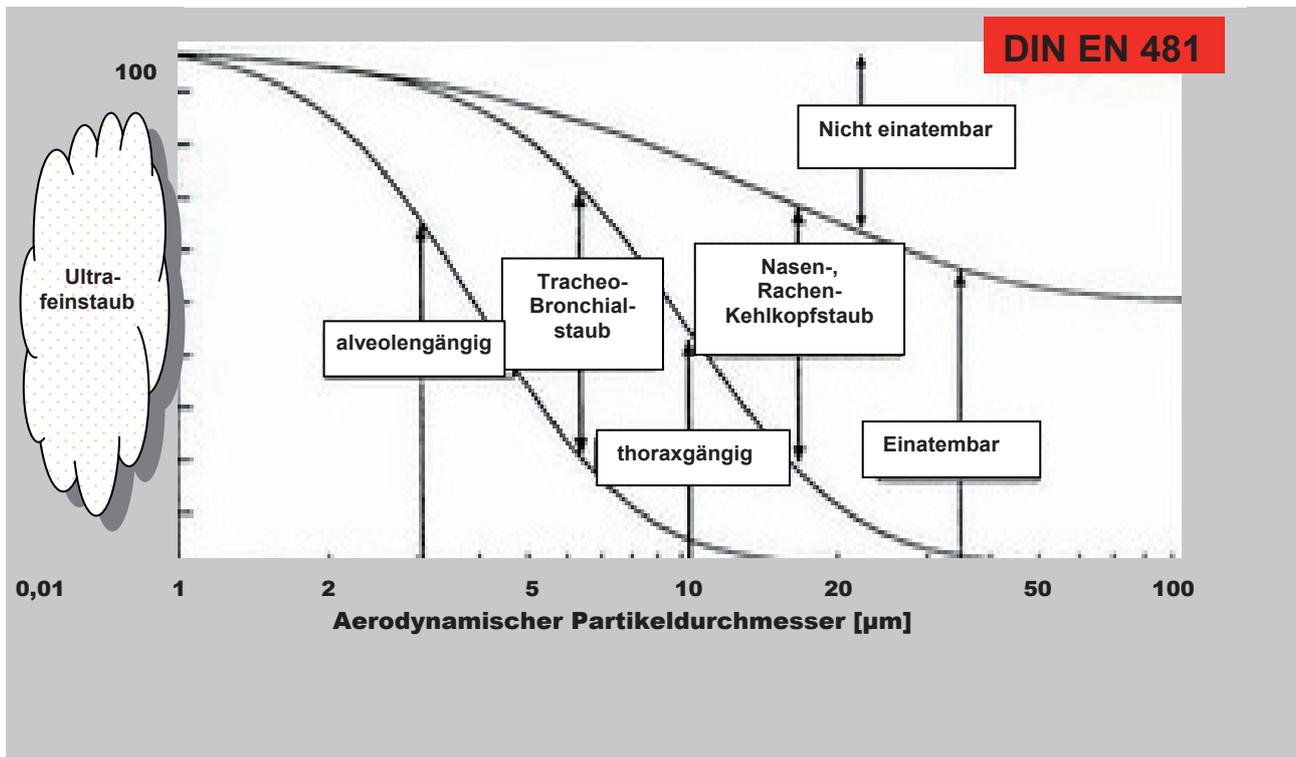


Abb. 2: Aerodynamische Partikeldurchmesser verschiedener Staubfraktionen [DIN/EN 481]

#### STAUBFRAKTIONEN AUS DEM BEREICH DES EMISSIONS-/IMMISSIONSSCHUTZES:

- In der Staubfraktion PM 10 finden sich alle Partikel, die den gröÑenselektiven Lufteinlass eines Staubsammlers passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm einen Abscheidegrad von 50 % aufweist. Dieser thorakale Schwebstaub lagert sich überwiegend in der Luftröhre und den großen Bronchien ab. Dazu gehören u.a. auch Stäube, die durch Bremsen-, Reifen- und Straßenabrieb entstehen.
- Der eigentliche Feinstaub misst weniger als 2,5 µm (PM 2,5) und wird auch als „Alveolengängiger Schwebstaub“ bezeichnet. Dieser Staub entsteht beispielsweise bei Verbrennungsprozessen und gelangt bis in die kleinen Atemwege und Alveolen.
- Neben PM 10 und 2,5 ist im Umweltschutz in Einzelfällen auch die Fraktion PM 1 von Bedeutung – diese Staubfraktion umfasst nur noch Partikel kleiner als 1 µm.

## 4 Vorkommen und Verwendung

Nanopartikel am Arbeitsplatz sind nicht neu. In Farben und Lacken oder Medikamenten kommen Nanopartikel in Form von Titan- und Zinkoxid bereits seit mehr als 30 Jahren zum Einsatz. Bei der Produktion von Autoreifen werden seit vielen Jahren nanoskalige Rußpartikel (carbon black) zur Verbesserung der Abrolleigenschaften zugesetzt.

Seit einigen Jahren kommen allerdings eine Vielzahl von neuen Produkten und Anwendungen auf den Markt (siehe Abb. 3). Mit zunehmender Produktion und Verbreitung steigt auch das Risiko einer unbeabsichtigten Freisetzung von Nanopartikeln und damit der Luftbelastung an Arbeitsplätzen.

An Arbeitsplätzen besteht nach derzeitigem Wissensstand eine Exposition gegenüber Nanopartikeln vor allem bei Prozessen, die ungebundene Partikel erzeugen, als Ausgangsbasis nutzen oder bei denen diese als Nebenprodukte freigesetzt werden. Die Höhe der jeweiligen Exposition

wird im Wesentlichen durch die bei den einzelnen Herstellungsverfahren und Arbeitsschritten freigesetzte Menge an Nanopartikeln und deren Staubungs- bzw. Adsorptions- und Agglomerationsverhalten bestimmt.

Die gezielte Herstellung von Nanopartikeln birgt nicht in allen Fällen ein hohes Risiko, das Gefährdungspotential ist weitgehend vom Herstellungsverfahren abhängig. Bei der Synthese in der Gasphase erfolgt die Produktion der Teilchen fast ausschließlich in geschlossenen Anlagen oder in Räumen mit Unterdruck. Werden die Partikel in einem flüssigen Medium erzeugt, wird eine inhalative Aufnahme durch Vermeidung von Aerosolbildung verhindert. Eine Freisetzung von in Flüssigkeit suspendierten Partikeln ist dabei einfacher zu verhindern als bei Pulvern, die sich schon bei der geringsten Erschütterung in der Luft verteilen.

Eine Exposition von Beschäftigten ergibt sich weiterhin an Arbeitsplätzen, an denen die Nano-Produkte abgefüllt,

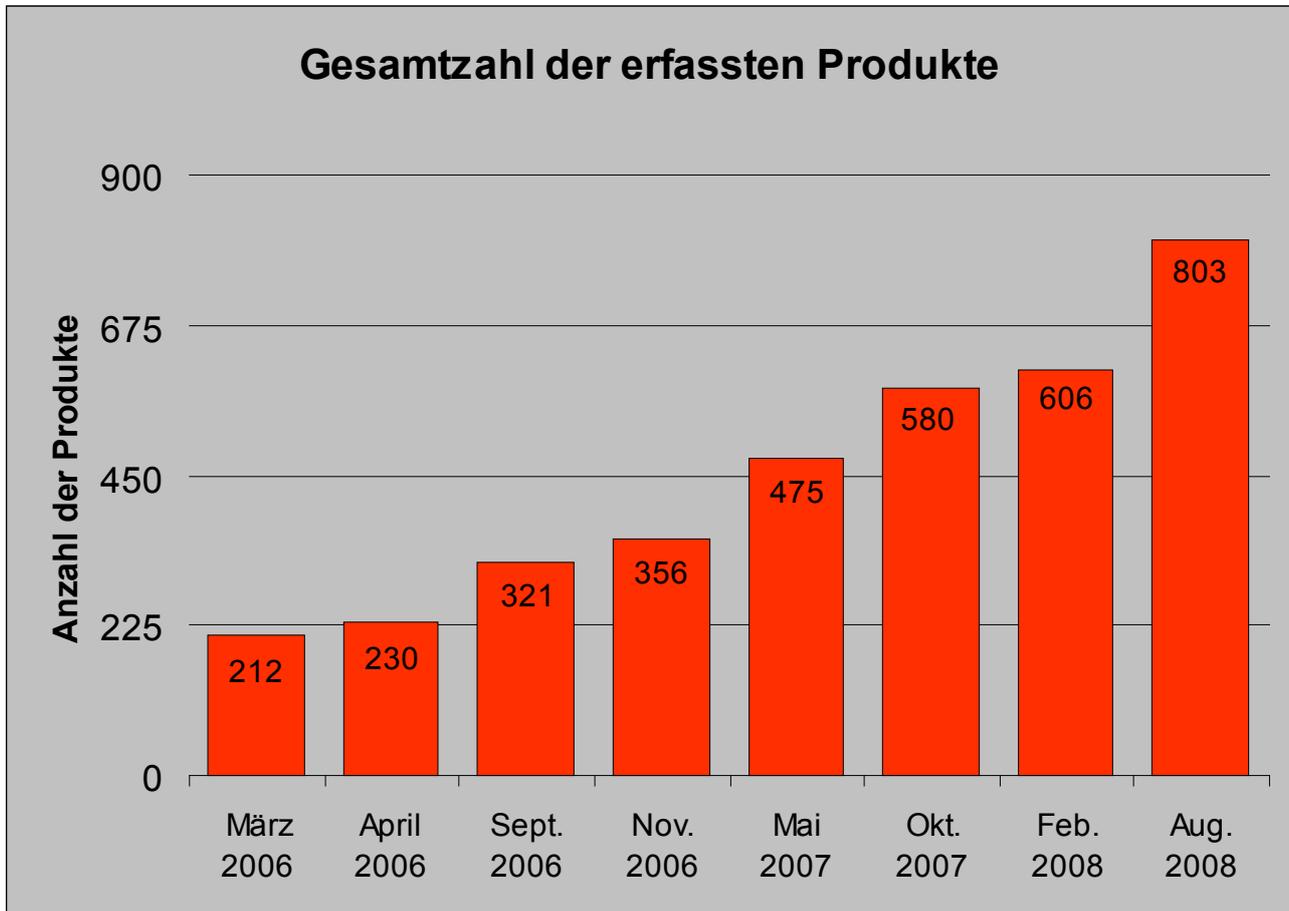


Abb. 3: Gesamtzahl der bekannten Nanoprodukte zum jeweiligen Zeitpunkt [PEN, 2009]

umgefüllt oder verpackt werden. Dazu kommen Transport und Verladearbeiten, bei denen Nanopartikel in die (Raum)-Luft bzw. Umwelt gelangen können [BAUA/VCI, 2007].

In der Mehrzahl der Fälle stellen Nanopartikel lediglich das Ausgangsmaterial für die Herstellung von Folgeprodukten dar. Sie bilden häufig nur einen Bestandteil und kommen in Form von Suspensionen, Lösungen oder Pasten auf den Markt. Sie können freigesetzt werden, wenn diese (Zwischen)-Produkte im Herstellerbetrieb oder von externen gewerblichen Anwendern weiterverarbeitet werden. Ausschlaggebend für eine Minderung der Freisetzung kann hier die Information über das Gefährdungspotential entlang der Lieferkette und die Weitergabe notwendiger Fakten mittels Sicherheitsdatenblatt sein.

Der Einsatz von fertigen Produkten und Materialien (Formulierungen), welche Nanopartikel enthalten, die bei Verwendung wieder freigesetzt werden (Luft, Wasser, Boden), stellt ein weiteres Problem dar.

Eine nicht zu vernachlässigende Quelle für Nanopartikel ist der Bereich Produktionsabfall, Entsorgung und Wiederverwertung von „Nanoprodukten“, da in der Regel eine Informationsweitergabe über ein Gefährdungspotential an den Entsorger/das Recyclingunternehmen nicht erfolgt. In welchem Umfang hierbei Nanopartikel freigesetzt werden ist weitgehend unerforscht. Neben dem Arbeitsschutz werden hier möglicherweise auch die Medien Wasser, Boden und Luft tangiert (siehe Abb. 4).

Bei diesen Betrachtungen sollte man aber auf keinen Fall vergessen, dass an Arbeitsplätzen auch Partikel im Nanobereich aus anderen Prozessen auftreten können. Hier sind beispielsweise anzuführen: Dieselmotoremissionen (DME) von Fahrzeugen, Schweißrauch, Plasmaschneiden, Laserbearbeitung von (Metall)-Oberflächen.

Nachdem die Möglichkeiten zur Freisetzung von Nanopartikeln im Rahmen der Herstellung, über Transport und Weiterverarbeitung bis zur Entsorgung beleuchtet wurden, bleibt noch die Frage der chemischen Zusammensetzung näher zu betrachten: Um welche Stoffe bzw. Produkte handelt es sich? In welchen Bereichen oder Branchen werden sie eingesetzt?

Aufgrund des ständig wachsenden Marktes ist es unmöglich, einen umfassenden Überblick über die Verwendung und das Vorkommen von Nanomaterialien in industriellen Prozessen und konsumnahen Produkten zu gewinnen. Gegenwärtig gibt es keine abschließende Übersicht zu den in Europa erhältlichen Endprodukten, welche Nanopartikel enthalten, oder zu industriell eingesetzten Nanopartikeln. In der industriellen Produktion werden Nanopartikel oft als Rohstoff, häufig in modifizierter Form, als Teil des Produktionsprozesses suspendiert, in Komposite eingebaut oder auf bestehende, nicht nanoskalige Materialien aufgetragen. Häufig verwendete Formen von Nanopartikeln als Rohstoff in der Industrie sind oxidische Nanopartikel (z.B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ), nicht-oxidische Nanopartikel (z.B.  $\text{TiC}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{SiC}$ ) oder metallische Nanopartikel (z.B.  $\text{Ag}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cu}$ ). Zudem werden in jüngster Zeit Kohlenstoff-Nano-

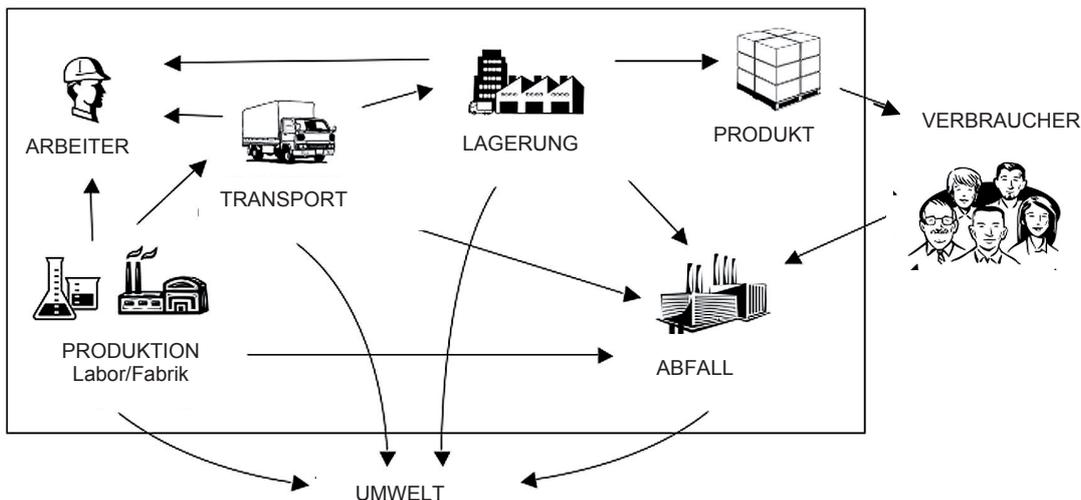


Abb. 4: Mögliche Expositionspfade für Nanopartikel [nach ROYAL SOCIETY, 2004]

röhrchen, Fullere, Quantum Dots (Quantenpunkte aus z.B. CdSe, ZnS), Nanodrähte und Nanofasern eingesetzt.

Einige der derzeit wichtigsten Anwendungsgebiete sind in Abb. 5 dargestellt. Dazu gehören der Kosmetikbereich mit z.B. Sonnenmilch (Titandioxid und Zinkoxid) und die Lebensmittelbranche, die silberdotierte Verpackungen zur Verbesserung der Haltbarkeit verwendet. Die Textilindustrie setzt verstärkt auf erhöhte Funktionalität durch Nano-Zusätze. Medizin und pharmazeutische Industrie sehen Potential im Bereich Arzneimittel und Implantationsmedizin.

Verbundwerkstoffe in der Autoindustrie (Kohlenstoff-Nanoröhrchen, Carbon Black in Reifen), Ton/Lehm als Nanopartikel im Baubereich sowie Farben und Beschichtungen zur Herstellung von Oberflächen mit verbesserten Eigenschaften wie Kratzfestigkeit bzw. biozider Wirkung (Silber) sind weitere Anwendungsbereiche. Gebiete mit hohen

Erwartungen an die Nanotechnologie sind die Bereiche Elektronik (Brennstoffzellen, Batterien, Displays), Kraftstoff-Additive (Ceroxid), Katalysatoren und Werkstoffe oder Schneidwerkzeuge aus nanokristallinem Material wie Wolframcarbid, Tantalcarbid und Titancarbid. Von ersten erfolgreichen Grundwassersanierungen durch Injektion von Nanopartikeln in den Boden wird ebenfalls berichtet [ROYAL SOCIETY, 2004; BAFU/BAG 2007]. Wie Abb. 6 zeigt, sind Silber und Kohlenstoff die derzeit am häufigsten verwendeten Materialien.

In der Literatur finden sich zahlreiche weitere Materialien und Anwendungsfelder [BAFU/BAG, 2007]. Im Internet gibt es bereits öffentlich zugängliche Datenbanken, welche Produkte im Zusammenhang mit Nanotechnologie oder Nanopartikeln auflisten oder anbieten [NANOWERK, 2009; STANFORD MATERIAL CORP, 2009].

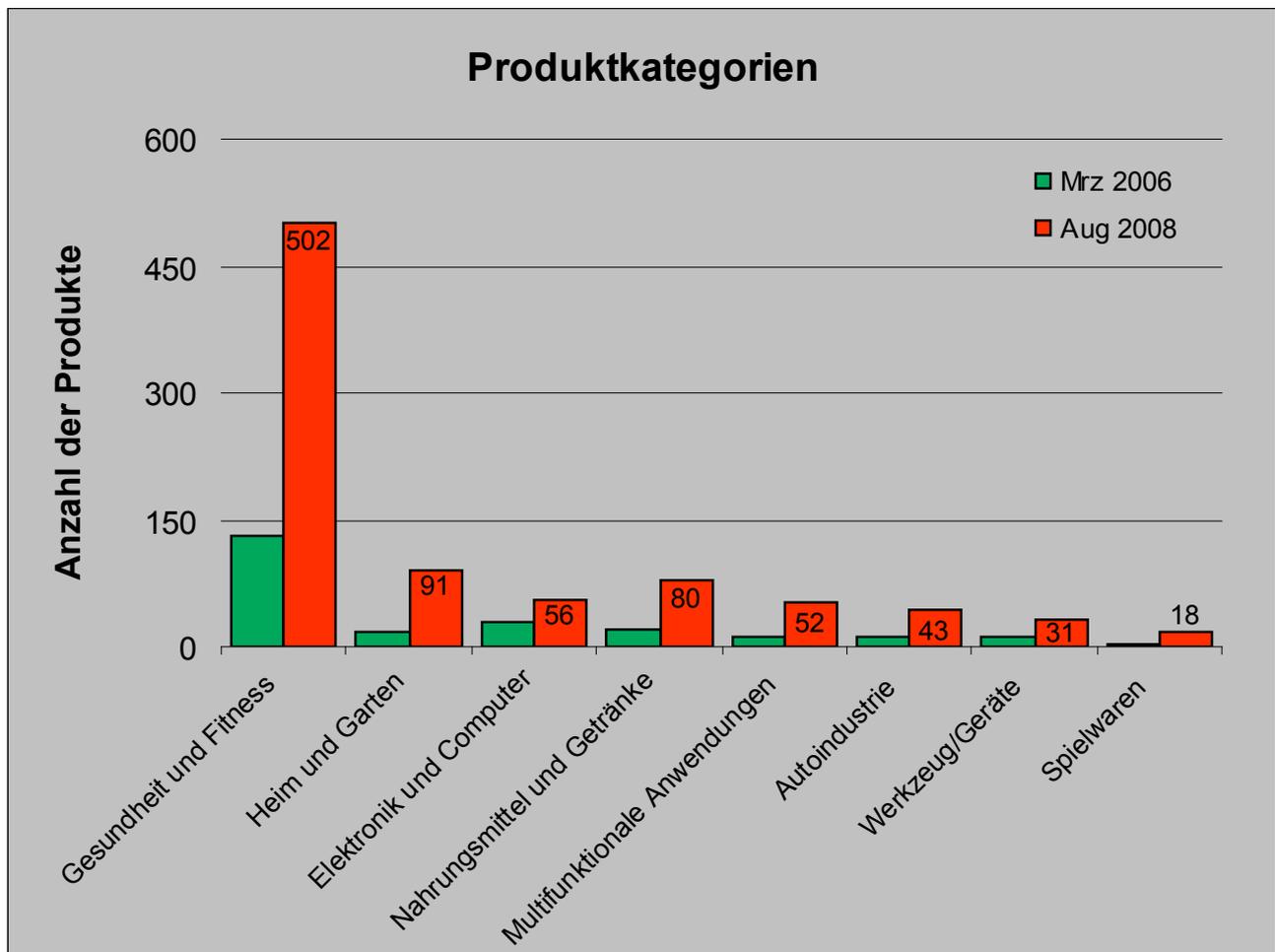


Abb. 5: Anzahl nanopartikelhaltiger Produkte, unterteilt in verschiedene Kategorien [PEN, 2009]

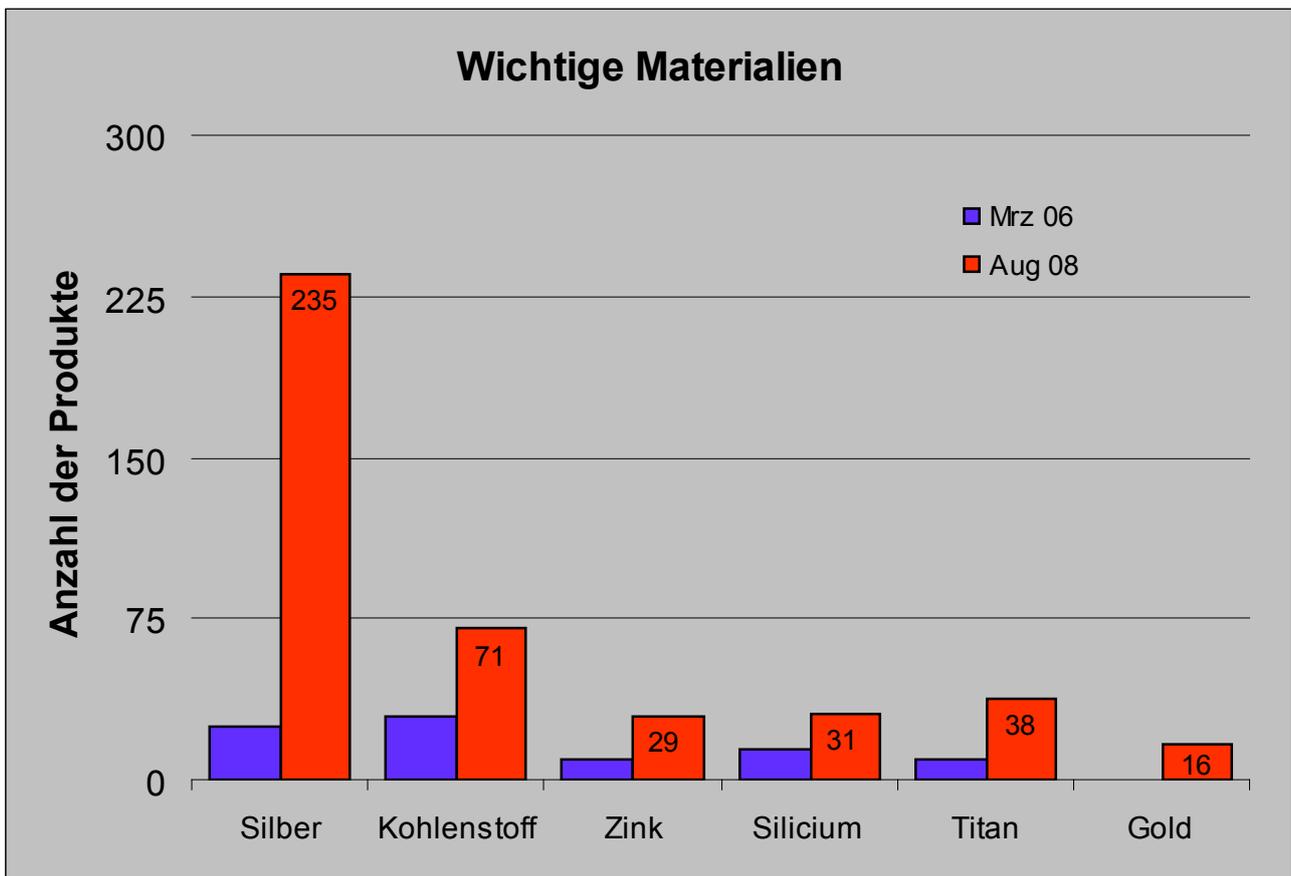


Abb. 6: Anzahl nanohaltiger Produkte, verknüpft mit dem verwendeten Material [PEN, 2009]

Neben herkömmlichen Stoffen in Nanopartikelgröße gelangen neuerdings vermehrt synthetische Produkte mit neuen Eigenschaften zur Anwendung. Eine der jüngsten technischen Anwendungen sind Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) und Fullerene, die bezüglich Zusammensetzung und Struktur keine natürlichen Pendanten haben. Als neue Substanzklassen werden diese derzeit im Technikumsmaßstab (Tonnen-Bereich) hergestellt. Da diese in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen und aufgrund ihrer Struktur

relativ stabil sind, sollten sie zukünftig einer kritischen Bewertung unterzogen werden.

**Fullerene** sind ausschließlich aus Kohlenstoffatomen bestehende kugelförmige Makromoleküle, für die insbesondere verschiedene Möglichkeiten zur Verwendung als Katalysator, Schmiermittel, zur Herstellung künstlicher Diamanten, in der Medizin, als Halbleiter und Supraleiter gesehen werden. Das mit Abstand am besten erforschte

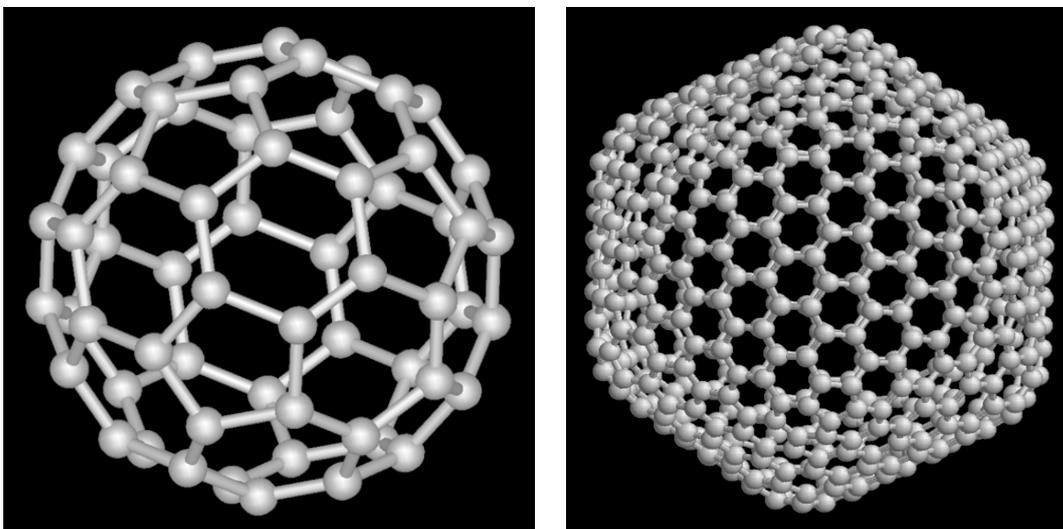


Abb. 7: Fullerenstrukturen (links  $C_{60}$ ; rechts  $C_{540}$ ) [WIKIPEDIA, 2009]

Fulleren hat eine  $C_{60}$ -Struktur, das zu Ehren des Architekten Richard Buckminster Fuller „Buckminster-Fulleren“ (englisch: „Bucky Ball“) genannt wurde, da es den von ihm konstruierten geodätischen Kuppeln ähnelt [WIKIPEDIA, 2009]. Einen Einsatz findet das  $C_{60}$ -Molekül zum Beispiel in sog. Anti-Aging-Cremes – aufgrund seiner elektronischen Eigenschaften kann es extrem viele Radikale aufnehmen und als Radikalfänger die Haut gesund und straff erhalten.

**Kohlenstoff-Nanoröhren** (Carbon Nanotubes, CNT) können als neue Kohlenstoff-Substanzklasse angesehen werden. Es handelt sich um Röhren mit einem Durchmesser von 1 bis 50 Nanometern. Sie zeichnen sich durch eine besonders hohe Zugfestigkeit aus und sind je nach Struktur leitend oder halbleitend. CNT können ein- oder mehrwandig sein (single wall carbon nanotube, SWCNT bzw. multiple wall carbon nanotube, MWCNT), und die Wand kann einen geschlossenen Ring oder eine spiralförmige Struktur ausbilden. Die Enden der Röhren können geschlossen oder geöffnet sein, und das Innere kann leer oder gefüllt sein. Je nach Produktionsbedingungen entstehen auch ganze Bündel oder Fäden von Nanoröhren [PEN, 2009]. Wegen ihrer Eigenschaft als Halbleiter werden „Nanotubes“ unter anderem für die Transistorherstellung bei Computerchips verwendet. Außerdem werden sie in der Display-Herstellung, für Lithium-Ionen-Batterien und hochfeste Verbundwerkstoffe eingesetzt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich CNT aufgrund ihrer Langlebigkeit bei Verarbeitung größerer Mengen in unserer Umwelt anreichern.

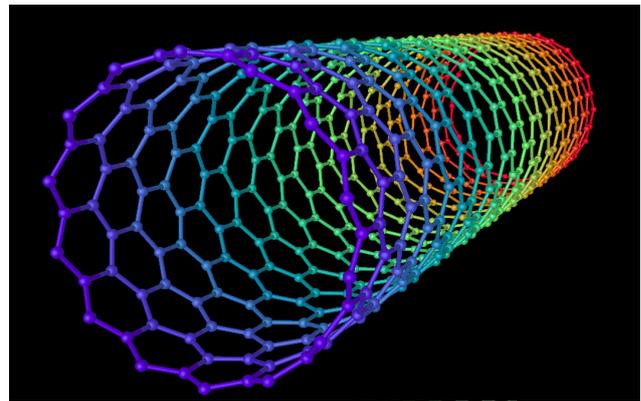


Abb. 8: Schematische Darstellung von einwandigen Kohlenstoffnanoröhren (SWCNT) [Wikipedia, 2009]

**Quantenpunkte** (quantum dot) sind nanoskopische Halbleiter-Materialstrukturen (InGaAs, CdSe). Diese ca. 100 nm großen pyramidenförmigen Gebilde bestehen aus einigen tausend Atomen und sind in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt. Sie verhalten sich ähnlich wie Atome, jedoch kann ihre Form, Größe oder die Anzahl von Elektronen in ihnen beeinflusst werden. Dadurch lassen sich elektronische und optische Eigenschaften von Quantenpunkten maßschneidern [PEN, 2009]. Unter geeigneten Rahmenbedingungen ordnen sich diese Quantenpunkte selbstständig an – sie stellen u.a. die Grundlage für neue Lasersysteme dar.



Abb. 9: Quantenpunkte in Lösung [PEN, 2009]

# 5 Gesetzliche Regelungen

Im Bereich Arbeitsschutz und Chemikalien gibt es in Deutschland bisher keine gesetzlichen Regelungen, die sich speziell auf synthetische Nanopartikel beziehen. Auch aus anderen Ländern sind solche nicht bekannt. Derzeit ist auch eine Kennzeichnung von Stoffen/Produkten im Hinblick auf ihren Gehalt an Nanopartikeln nicht vorgeschrieben.

Ausnahme: Die am 24.03.2009 von der EU-Kommission verabschiedete neue Kosmetik-Verordnung enthält erstmals eine Regelung für den Einsatz von Nanomaterialien. Wer Nanomaterialien in kosmetischen Mitteln verwendet, muss dies gegenüber der EU-Kommission anzeigen und ein Sicherheitsdossier einreichen.

Die EU-Kommission kann in Zweifelsfällen den beratenden wissenschaftlichen Ausschuss einschalten und ggf. eine gesetzliche Regelung des betreffenden Stoffes treffen. Darüber hinaus wird die EU-Kommission verpflichtet, jährlich einen Bericht über den Einsatz von Nanomaterialien zu veröffentlichen.

## REACH:

Das Inverkehrbringen von Stoffen und Zubereitungen – also auch von gezielt hergestellten Nanopartikeln – unterliegt den gesetzlichen Regelungen des Chemikaliengesetzes bzw. der am 01.07.2007 in Kraft getretenen REACH-Verordnung (Registrierung, Evaluierung, Autorisierung von Chemikalien) [REACH-VERORDNUNG, 2007]. Synthetische Nanopartikel müssen somit wie andere Stoffe auf ihre gesundheits- und umweltrelevanten Eigenschaften geprüft und beurteilt werden, sobald ihre Jahresproduktion 1 Tonne (jeweils pro Hersteller) überschreitet. Sie sind bezüglich ihrer Eigenschaften zu beurteilen und die Abnehmer gefährlicher Stoffe müssen über erforderliche Vorsichts- und Schutzmaßnahmen (z.B. durch ein Sicherheitsdatenblatt) informiert werden – ansonsten gilt zukünftig „No Data – No Market“.

Nanospezifische Anpassungen der REACH-Verordnung werden derzeit abgeklärt. Diskussionspunkte sind: die Mengenschwelle für die Registrierung (> 1 t/Jahr), das Fehlen geeigneter nanospezifischer Methoden zur Gefahren-

und Risikobeurteilung sowie auch die Frage, ob synthetische Nanopartikel grundsätzlich als „Non-phase-in-Stoffe“ (Neustoffe) zu betrachten sind.

Da Nanopartikel in der Regel dieselbe CAS-Nummer (Chemical Abstract System-Number) tragen wie gröbere Partikel aus demselben Material, wurde bisher im stoffspezifischen gesetzlichen Regelwerk keine eigene Bewertung der Nanofraktion vorgenommen. Eine gesetzliche Verpflichtung zur Durchführung von speziellen Studien besteht bisher nicht. Eine Ausnahme von dieser Regelung bildet die Substanzklasse der Fullerene, die nicht als „Altstoff“ im europäischen Altstoffverzeichnis EINECS (European Inventory of Existing Chemical Substances) eingetragen sind. Sie haben eine eigene CAS-Nummer und unterliegen bei Überschreitung einer vorgegebenen Mengenschwelle nunmehr umfangreichen Prüfungen nach REACH. Für Carbon Nanotubes (CNT) existiert zwar eine EINECS-Nummer, da es sich jedoch ebenfalls um eine eigene Kohlenstoff-Substanzklasse handelt, wird derzeit innerhalb der EU beraten, ob diese bei Überschreitung bestimmter Mengenschwellen ebenfalls einer umfangreichen Prüfung nach REACH unterzogen werden sollten. Zur Prüfung nanoskaliger Eigenschaften sind jedoch auch unter REACH zukünftig noch geeignete Testverfahren zu entwickeln bzw. zu etablieren.

Die europäische Kommission sieht in ihrer Mitteilung an das europäische Parlament vom Juni 2008 zwar noch Wissenslücken, die es zu schließen gilt, hält jedoch die derzeitigen rechtlichen Regelungen bei Nanomaterialien für ausreichend [EU-KOMMISSION, 2008]. Das europäische Parlament hat im April 2009 eine „Entschließung zu Regelungsaspekten bei Nanomaterialien“ angenommen [EU-PARLAMENT, 2009]. Das EU-Parlament hat hiermit ein starkes Zeichen für die Regulierung der Nanotechnologie gesetzt und sich mit großer Mehrheit für umfangreiche Vorsorgemaßnahmen sowie die vollständige Überprüfung der Gesetzgebung zugunsten des Prinzips „No Data – No Market“ ausgesprochen. Die EU-Kommission wird aufgefordert bis Juni 2011 ein Verzeichnis der Arten von Nanomaterialien und ihrer Anwendungen auf dem europäischen Markt aufzustellen und Bericht über die Unbedenklichkeit der entsprechenden Nanomaterialien zu erstatten.

#### ARBEITSSCHUTZ:

Am Arbeitsplatz ist der Arbeitgeber verpflichtet, zur Verhütung von Berufsunfällen und Berufskrankheiten alle Maßnahmen zu treffen, die nach der einschlägigen Erfahrung notwendig, nach dem Stand der Technik anwendbar und den gegebenen Verhältnissen angemessen sind. Wenn es zum Schutz der Gesundheit von Arbeitnehmer/innen und für ihre Sicherheit erforderlich ist, hat der Arbeitgeber entsprechend qualifiziertes, arbeitsmedizinisch geschultes Personal oder Fachkräfte für Arbeitssicherheit beizuziehen. Alle derzeit vorhandenen Regelungen beziehen sich auf Feinstäube, wovon die Ultrafeinstäube, zu denen die Nanopartikel zählen, eine Teilmenge bilden.

Für einatembare und alveolengängige Stäube gilt der Allgemeine Staubgrenzwert nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe „Arbeitsplatzgrenzwerte“ (AGW) [TRGS 900, 2009]:

A-Staub (alveolengängig, Feinstaub):	3 mg/ m <sup>3</sup>
E-Staub (einatembare, Gesamtstaub):	10 mg/ m <sup>3</sup>

Nach TRGS 900 gilt der Allgemeine Staubgrenzwert ausdrücklich nicht für die ultrafeine Partikelfraktion. Begründung: Ultrafeine Stäube liegen ubiquitär an staubexponierten Arbeitsplätzen vor. Ab welcher Konzentration eine besondere Berücksichtigung der ultrafeinen Stäube erfolgen muss, ist derzeit nicht bekannt. Spezielle Arbeitsplatzgrenzwerte für Nano-Stoffe wurden bisher nicht festgelegt.

#### ARBEITS-/INNENRÄUME:

Auch in diesem Bereich gibt es keine speziellen Regelungen für Ultrafeinstäube/Nanopartikel. Ausgehend von der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 5), die in Auslegung einer entsprechenden Forderung der Arbeitsstättenverordnung „ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft in Arbeitsräumen dann als vorhanden betrachtet, wenn die Luftqualität in Arbeitsräumen ohne besondere Staubbelastung im Wesentlichen der Außenluftqualität entspricht“, kann abgeleitet werden, dass die Staubkonzentration nicht höher als der EG-Staubgrenzwert für die Luft in der Troposphäre (50 µg/m<sup>3</sup> = 0,05 mg/m<sup>3</sup>; Bezug PM 10-Messung) sein sollte.

Eine wichtige Voraussetzung für Regulierungen sind validierte und standardisierte Methoden zur Messung der Belastungssituationen und zur Prüfung der Eigenschaften synthetischer Nanopartikel. Die Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit (OECD) und die internationale Organisation für Normung (ISO) sind federführend bei der Erarbeitung einer einheitlichen Terminologie und Nomenklatur sowie bei der Standardisierung von Mess- und Testmethoden. Ohne solche Methoden sind Gefahren- und Expositionsanalysen und damit eine Risikobeurteilung synthetischer Nanomaterialien nicht möglich. Darüber hinaus müssen Methoden für die Risikobeurteilung von Nanomaterialien für Verbraucher/innen, Arbeitnehmende und die Umwelt erarbeitet werden. Diese Arbeiten können nicht national, sondern müssen international koordiniert durchgeführt werden. Da auf die anstehende Vielfalt an Fragestellungen zur Messung, Testung und Risikobeurteilung von synthetischen Nanopartikeln auch in absehbarer Zukunft keine hinreichenden Antworten zu erwarten sind, sollte zunächst einem vorsorgenden Arbeitsschutz nach dem „Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz“ [BAUA/VCI, 2007] (siehe Abb. 13) der Vorzug gegeben werden.

Da bisher keine ausreichenden Informationen verfügbar sind, welche Betriebe synthetische Nanomaterialien herstellen und wo diese eingesetzt werden, könnte auch in Erwägung gezogen werden, alle Hersteller bzw. gewerblichen Anwender von synthetischen Nanopartikeln in einem Bundesland wie Baden-Württemberg systematisch zu erfassen. Dies könnte die Übersichtlichkeit der derzeitigen Expositionssituation verbessern sowie einen eventuell erforderlichen Handlungsbedarf (bzw. keinen Handlungsbedarf) transparent und begründbar machen. Eine Meldepflicht für Hersteller bzw. gewerbliche Anwender von synthetischen Nanopartikeln ist jedoch bisher aus keinem Land bekannt. In der Schweiz wird versucht, in Zusammenarbeit mit den dortigen Industrieverbänden auf freiwilliger Basis eine Übersicht über Herstellung und gewerbliche Anwendung von Nanopartikeln zu gewinnen.

# 6 Gefährdung am Arbeitsplatz

Grundsätzlich kann der arbeitende Mensch bei jedem Schritt im Lebenszyklus von Nanomaterialien exponiert sein, das heißt, der Schutz des Beschäftigten am Arbeitsplatz spielt sowohl bei Forschung und Entwicklung, Produktion und industrieller Verwendung, als auch bei Transport, Gebrauch und Entsorgung von Nanomaterialien eine Rolle [DEUTSCHER BUNDESTAG, 2007].

Dabei ergeben sich an Arbeitsplätzen nach dem heutigen Kenntnisstand Expositionen gegenüber Nanopartikeln in erster Linie durch Umgang mit gezielt hergestellten Nanopartikeln und Arbeitsverfahren, welche Nanopartikel als Nebenprodukte erzeugen.

Nanopartikel als Nebenprodukte (ultrafeine Partikel) sind weit verbreitet (Schweiß- und thermische Schneidverfahren, Einsatz von dieselbetriebenen Fahrzeugen, Löten, Schleifen von Metallen oder das Metallgießen, sowie das Rauchen). Dabei fallen die Partikel üblicherweise fein verteilt im Abgas beziehungsweise der Umgebungsluft als Aerosol an, so dass sie leicht eingeatmet werden können. Beim Umgang mit gezielt hergestellten Nanopartikeln wird die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein einatembares Aerosol bildet, hingegen entscheidend von der Arbeitstechnik beeinflusst [BAFU, 2007].

Bedingt durch die Besonderheiten von Nanopartikeln müssen arbeitsmedizinische Expositions- und Gefährdungsbeurteilungen unter Berücksichtigung von Partikelgröße und Partikelgeometrie, der Zahl, sowie dem Wirkprofil (toxisch, allergisch, fibrogen, karzinogen) erfolgen [GRONEBERG, 2008]. Nanopartikel besitzen eine extrem große Oberfläche bei nur geringer Masse. Von Oberdörster wurde daher als besonderes Charakteristikum der Nanotoxikologie formuliert: Je kleiner ein Partikel desto toxischer [OBERDÖRSTER, 2005].

Prinzipiell ist eine Aufnahme von Nanopartikeln in den Organismus über die Atemwege, die Haut oder den Magen-Darm-Trakt durch Verschlucken möglich und denkbar, wobei nach heutigem Kenntnisstand die inhalative Aufnahme am Arbeitsplatz die höchste Relevanz besitzt – dies bedeutet, dass gesundheitliche Risiken, insbesondere bei

inhalativer Exposition gegenüber Nanopartikeln, derzeit nicht sicher auszuschließen sind [ENGEL, 2008]. Bei Nanomaterialien, die an eine Matrix gebunden sind, werden die Risiken für die menschliche Gesundheit von der Mehrheit der Experten eher als gering eingeschätzt.

Das Ablagerungsverhalten von Nanopartikeln im Atemtrakt wird nicht durch Sedimentation sondern durch Diffusion bestimmt. In Tierversuchen konnte eine Aufnahme von Nanopartikeln über den Atemtrakt ins Blut festgestellt werden. Die für größere Staubpartikel vorhandene Abscheidfunktion des Atemtraktes wird von Nanopartikeln also überwunden.

Eine spezielle Eigenschaft der Nanopartikel besteht in ihrer Überwindung von eigentlich getrennten Kompartimenten im Körper, so wird zum Beispiel die Blut-Hirn-Schranke durch Nanopartikel überwunden, ein Mechanismus, der in der Medizin bereits zu Überlegungen hinsichtlich therapeutischer Nutzung geführt hat [KREUTER, 2008].

Der aus der Infektiologie schon seit längerem bekannte Weg von Viren über Hirnnerven wie zum Beispiel den Riechnerv in das Gehirn kann auch von Nanopartikeln beschritten werden [OBERDÖRSTER, 2004].

Von besonderer Brisanz für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sind jedoch neue Erkenntnisse, die zur kreberzeugenden Wirkung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen gewonnen wurden. In Tierversuchen konnten Peritonealmesotheliome, d.h. bösartige Tumore des Bauchfells durch die Applikation dieser Nanoröhrchen in den Bauchraum hervorgerufen werden. Möglicherweise besitzen also Nanofasern eine karzinogene Potenz, die bei entsprechender Fasergeometrie und Faserbeständigkeit gewisse Analogien zu Asbest aufweist. Allerdings existieren bisher keine belastbaren Daten zur tatsächlichen Exposition von Arbeitnehmern gegenüber Nanoröhrchen, ebenso wenig wie zu deren Biopersistenz. Auch über die tatsächliche Exposition von Endverbrauchern existieren bislang nur rudimentäre Erkenntnisse. Grundsätzlich sollten jedoch Nanoobjekte, die in Matrices verankert sind, keine akute Gefahr darstellen [GRONEBERG, 2008; MÜLLER, 2008].

Aufgrund dieser Unsicherheiten hat sich die Nanokommission [BMU, 2008] vertiefend mit der Frage der Kategorienbildung und der Verwendung von Entlastungs- und Besorgniskriterien befasst und eine vorläufige Einteilung der Nanomaterialien in 3 Kategorien/Gruppen vorgenommen:

<b>Gruppe 1: Gefährdung wahrscheinlich – Besorgnis hoch</b>	
Kriterien: Exposition gegeben, hohe Mobilität, Reaktivität, Persistenz oder Toxizität der Materialien	
	Maßnahmenkonzept zur Minimierung der Exposition oder Verzicht auf bestimmte Anwendungen erforderlich
<b>Gruppe 2: Gefährdung möglich – Besorgnis mittel</b>	
Kriterien: Exposition nicht auszuschließen, unbekanntes Agglomerations- bzw. Deagglomerationsverhalten, zu wenig Informationen zur Löslichkeit und biologischen Abbaubarkeit, Möglichkeit der Freisetzung von Nanopartikeln aus einer Matrix nicht geklärt.	
	Maßnahmenkonzept zur Vermeidung der Exposition von Mensch und Umwelt erforderlich
<b>Gruppe 3: Gefährdung unwahrscheinlich – Besorgnis gering</b>	
Kriterien: Exposition weitgehend ausgeschlossen, Materialien löslich oder biologisch abbaubar, Materialien gebunden in einer Matrix, Bildung stabiler Aggregate oder Agglomerate	
	Keine über die „gute Arbeitsschutzpraxis“ (oder Hygienepraxis) hinausgehenden Maßnahmen erforderlich
Weitergehende Empfehlungen:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Wenn zu wenige Informationen verfügbar sind, um eine vorläufige Einteilung in eine der oben genannten Kategorien zu ermöglichen, sollte eine Einordnung in Kategorie 1 vorgenommen werden.</li> <li>■ Das Kategoriensystem sollte von der Wirtschaft auch für die Kommunikation in der Lieferkette angewendet werden, d.h. die verwendeten Materialien sind gemäß den Gruppen einzustufen und entsprechende Risikomanagementmaßnahmen zu kommunizieren. Die Vorschriften für das Erstellen von Sicherheitsdatenblättern sind zu beachten.</li> <li>■ Die Kriterienliste zur Bewertung von Nanomaterialien bedarf zeitnah einer Überprüfung und ggf. Weiterentwicklung. Zusätzlich sollte für die Bewertung eine Gewichtung von Kriterien entwickelt werden, bzw. eine Priorisierung.</li> <li>■ Das Kategoriensystem muss noch weitergehend operationalisiert werden. Das heißt, konkrete, einheitliche Test- und Messverfahren müssen ausgewiesen und eine spezifische Zuordnung von Ergebnissen zur Einstufung in Gruppen standardisiert werden.</li> </ul>	

Abb. 10: Gefährdungsgruppen [BMU, 2008]

Aus arbeitsmedizinisch-toxikologischer Sicht lässt sich im Moment kein Grenzwert begründen. Es existieren auch keine Methoden zur Messung der inneren Exposition („Biomonitoring“) des Menschen. Die für die Gesundheitsgefährdung vermuteten Einflussfaktoren wie Partikeloberfläche, Oberflächenstruktur und -zusammensetzung sind messtechnisch und analytisch im Bereich der Nanopartikel bisher nur über sehr aufwändige, nicht standardisierte Verfahren zugänglich [NANOWERK, 2009].

Am Arbeitsplatz ist der Arbeitgeber verpflichtet, alle Maßnahmen zu treffen, die zur Verhütung von Arbeitsunfällen, Berufskrankheiten und von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren notwendig sind. Die Aufgabe im präventiven Gesundheitsschutz wird somit aufgrund der bisher unsicheren Datenlage für viele Nanomaterialien darin bestehen, die Exposition entsprechend dem Stand der Technik zu minimieren, sowie das Krankheitsgeschehen und gesundheitliche Beschwerden im Betrieb zu beobachten. Im Rahmen der betriebsärztlichen Vorsorgeuntersuchungen sind mögliche gesundheitliche Auswirkungen zu erfassen und sorgfältig zu dokumentieren. Die im Zusammenhang mit Nanopartikeln diskutierten Wirkungen sind sowohl hin-

sichtlich ihrer Mechanismen, als auch der potentiellen Zielorgane (Lunge, Herz-Kreislaufsystem) unspezifisch und können durch zahlreiche außerberufliche Faktoren bedingt werden [NASTERLACK, 2008]. Die im Dezember 2008 verabschiedete arbeitsmedizinische Vorsorgeverordnung [ARBMEDVV, 2008] führt in ihrem Anhang, der die arbeitsmedizinischen Pflicht- und Angebotsuntersuchungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen regelt, Nanopartikel nicht separat auf, eine evidenzbasierte Grundlage für die Definition eines nanospezifischen Untersuchungsprogrammes liegt derzeit noch nicht vor. Eine Vorsorgeuntersuchung anlässlich einer Exposition gegenüber Nanomaterialien ist aber aufgrund dieser Verordnung durchaus möglich, da Untersuchungen beim Vorkommen von E- und A-Staub, beim Tragen von Atemschutz, oder aufgrund der zugrundeliegenden chemischen Verbindung gelistet sind.

Weiterhin sind überbetriebliche epidemiologische Untersuchungen im Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz, Umweltschutz und Verbraucherschutz dringend notwendig. Die Nanokommission empfiehlt, die dafür erforderlichen Mittel zu erhöhen, ebenso sollte die Wirtschaft ihre Forschungsanstrengungen im Bereich der Risikoforschung verstärken [BMU, 2008].

# 7 Messung

Im Arbeitsschutz beschränkt sich die Messung luftgetragener, partikelförmiger Stoffe derzeit auf die einatembare und die alveolengängige Fraktion. Für diese beiden Fraktionen gibt es nach DIN EN 481 eine einheitliche Konvention zur Erfassung. Der Allgemeine Staubgrenzwert für diese Fraktionen wurde als gesundheitsbasierter Grenzwert von  $10 \text{ mg/m}^3$  für die einatembare und  $3 \text{ mg/m}^3$  für die alveolengängige Fraktion festgelegt [TRGS 900, 2006].

Der Allgemeine Staubgrenzwert gilt allerdings nicht ohne Einschränkungen. Unter den Stäuben, die nicht in den Geltungsbereich fallen, befinden sich u.a. die ultrafeinen Partikel und damit auch die Nanomaterialien.

Als anerkannte Messverfahren für die beiden Staubfraktionen kommt die Sammlung auf Filtern mit nachfolgender gravimetrischer Bestimmung der Staubmasse zum Einsatz. Aus der durch Differenzwägung der neuen und staubbelasteten Filter ermittelten Masse und dem Probenahmenvolumen wird die jeweilige Staubkonzentration berechnet. Bei dieser Konzentration handelt es sich stets um einen Mittelwert über die gesamte Probenahmedauer. Aussagen über Partikelgrößen oder kurzzeitige Belastungsspitzen sind nicht möglich.

Für die messtechnische Erfassung von Nanopartikeln reicht die Empfindlichkeit des gravimetrischen Verfahrens nicht aus. Die gravimetrische Bestimmung der geringen Partikelmasse ist nicht oder nur ungenau und mit hohem Zeitauf-

wand realisierbar. Zudem ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Belastung oder die Größenverteilung der Partikel zu machen, wie es nach dem derzeitigen Wissensstand als notwendig erachtet wird. Allgemein wird die Teilchenanzahl (Teilchenkonzentration) und -größe von Nanopartikeln in der Luft gegenüber der Massenkonzentration als wesentlich aussagekräftiger angesehen.

Um Aussagen über die Höhe der Exposition gegenüber Nanopartikeln oder Ultrafeinstäuben und gegebenenfalls daraus resultierende gesundheitliche Wirkungen machen zu können, sind neue, spezielle Messverfahren erforderlich. Im Vordergrund steht dabei die Erfassung aller Partikel mit pathogener Wirkung. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die einzelnen Verfahren und ihren Messbereich.

Mögliche Verfahren zur Messung von Partikeln [VDI 3867, Blatt 2, 2006] kleiner als  $0,1 \mu\text{m}$  ( $< 100 \text{ nm}$ ) sind:

- Elektrische Mobilitätsspektrometer mit Kondensationspartikelzähler (CPC)
- Diffusionsbatterie mit Kondensationspartikelzähler (CPC)
- Elektrische Mobilitätsspektrometer mit Elektrometer
- Kondensationspartikelzähler mit differentiellem Mobilitätsanalysator (DMA)
- Elektrische Niederdruckimpaktoren

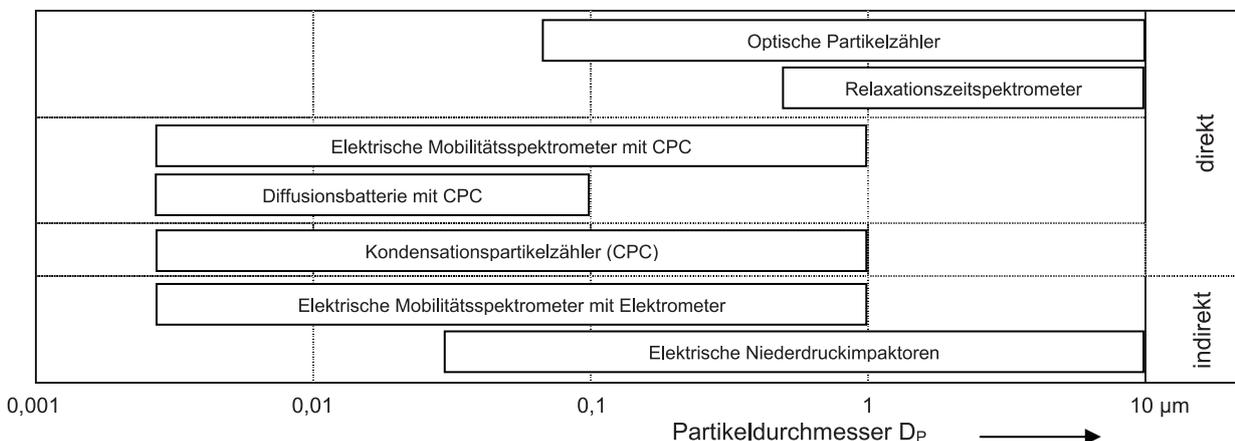


Abb. 11: Messbereiche verschiedener Partikelzählverfahren [nach VDI 3867, Blatt 1, 2006]

Ein rechtsverbindliches, standardisiertes Messverfahren für ultrafeine Partikel wurde bisher nicht festgelegt. Als Ersatz wurde von mehreren deutschen und europäischen Arbeitsschutzorganisationen eine Konvention erarbeitet, in der Rahmenbedingungen für Messungen vorgegeben werden. Diese im Arbeitsschutz weitgehend akzeptierte Konvention enthält weitergehende messtechnische Empfehlungen. Anzahl, Größe, Oberfläche und chemische Zusammensetzung der ultrafeinen Partikel bilden dabei den Bewertungsmaßstab. Daher sind Messverfahren einzusetzen, die es erlauben, diese Größen zu bestimmen oder abzuschätzen [ISO/TR, 2007].

Bei der Messung sollen am Expositionsort alle in größerer Anzahl vorhandenen Partikel in ihrer Anzahlkonzentration und nach Möglichkeit deren Größenverteilung erfasst werden. Der Messbereich sollte den Bereich von ca. 5 nm bis 600 nm abdecken. Wie Abb. 11 zeigt, sind nicht alle Verfahren und damit auch nur ein Teil der auf dem Markt befindlichen Messgeräte in der Lage, diese Anforderungen zu erfüllen. Nachteil aller Verfahren ist, dass derzeit eine personengetragene Messung (wie üblicherweise bei Expositionsmessungen an Arbeitsplätzen angewendet) nicht möglich ist.

Als Standard oder Referenzverfahren hat sich bisher im Arbeitsschutz die Teilchengrößenanalyse mittels Mobilitätsanalysator (DMA) und nachfolgender Anzahlbestimmung mittels Kondensationspartikelzähler (CPC) durchgesetzt (siehe Bild). Zum einen hat dieses Verfahren eine gewisse Verbreitung, zum anderen liegen langjährige Erfahrungen mit entsprechenden Messgeräten vor. Die VDI-Richtlinie 3867 Blatt 2 beschreibt das Messverfahren.

Bei der Analyse von Einzelpartikeln ist eine thermophoretische oder elektrostatische Abscheidung mit nachfolgender Bildanalyse mit Transmissionselektronenmikroskop (TEM) und Elementaranalyse mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) das Mittel der Wahl.



Kondensationspartikelzähler (rechts) mit differentiellem Mobilitätsanalysator (DMA) (links)

Um trotz fehlender Standardisierung eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Nanopartikelmessungen nach unterschiedlichen Verfahren zu erreichen, sind einige Grundvoraussetzungen zu erfüllen:

- Die bei der Dokumentation von Arbeitsplatzmessungen zu erfassenden Randbedingungen sind sorgfältig festzuhalten.
- Die Ergebnisse einer Messung sollten in Form eines Größenverteilungsdiagramms in differentiellem Maßstab  $dN/d\log D_p$  angegeben werden.
- Soweit möglich sind die eingesetzten Verfahren zu kalibrieren oder durch Vergleich mit anderen zu prüfen. Eine regelmäßige Wartung/ Kalibrierung durch den Hersteller im Rahmen der Qualitätssicherung ist in der Regel unumgänglich.

## MÖGLICHKEITEN DER LUBW

Der LUBW steht zur Messung von Nanopartikeln in der Luft am Arbeitsplatz ein Kondensationspartikelzähler (CPC) mit differentiellem Mobilitätsanalysator (DMA) zur Verfügung, der alle Anforderungen der derzeit gültigen Konvention über die Messung von ultrafeinen Partikeln/Nanopartikeln erfüllt.

Die Größenverteilung der Partikel wird in Abhängigkeit vom elektrischen Mobilitätsdurchmesser mit Hilfe des vorgeschalteten elektrostatischen Klassifizierers ermittelt. Mit diesem Verfahren können Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen 10 und 1000 nm bei einer Konzentration von bis zu max.  $10^7$  Partikel/cm<sup>3</sup> erfasst werden. Ein weiterer Vorteil des Gerätes besteht in der Mobilität. Es ist an Arbeitsplätzen, in geschlossenen Räumen und im Freien (Akkubetrieb) einsetzbar.

Ein Messzyklus im Bereich von 10 bis 1000 nm erfordert ca. 7 Minuten Messzeit und wird typischerweise wie in Abb. 12 dargestellt.

Eine Unterscheidung zwischen gezielt hergestellten Nanopartikeln und sonstigen Ultrafeinstäuben ist mit diesem Messverfahren nicht möglich. In der Regel bleibt nur ein Vergleich der am Arbeitsplatz gemessenen Anzahlgrößenverteilung der Par-

tikel mit der im Messzeitraum im Außenbereich vorliegenden Hintergrundbelastung. Problematisch können sich hierbei die veränderlichen Wetterbedingungen (Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) auswirken, da hierdurch teilweise stark variierende Partikelkonzentrationen bzw. Partikelgrößenverteilungen in der Umgebungsluft gemessen werden. Eine zweite Möglichkeit zur Beurteilung bietet die Messung der Luftbelastung im Arbeitsraum vor und nach Aufnahme einer bestimmten Tätigkeit bzw. vor und während des Einsatzes eines Verfahrens. Ein signifikanter Anstieg der Partikelanzahl (idealerweise in einem eng begrenzten Größenbereich) deutet auf eine prozessbedingte Freisetzung von Nanopartikeln (bzw. ultrafeinen Partikeln) hin.

Einen Überblick über die Höhe der Teilchenkonzentration bzw. das Maximum der Größenverteilung in Arbeits- und Innenräumen im Vergleich zur Außenluft geben die in den nachfolgenden Tabellen angeführten Beispiele. Es handelt sich dabei einerseits um Ergebnisse von Messungen der LUBW (Tabelle 1) und andererseits um Messwerte des BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (Tabelle 2).

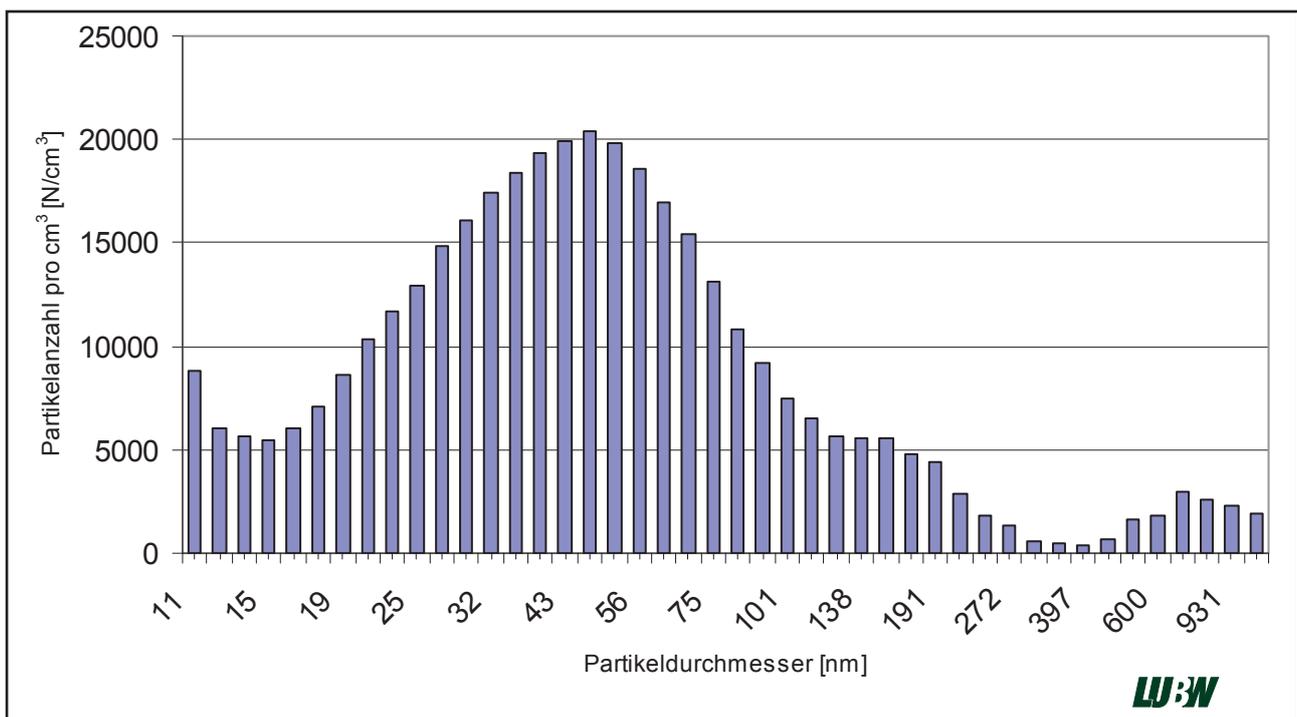


Abb. 12: Darstellung einer Partikel-Anzahlgrößenverteilung [LUBW, 2007]

Arbeitsplatz	Maximum der Anzahlverteilung	Anzahlkonzentration (Messbereich von 10 bis ca. 1000 nm)
Laborbereich	50 - 110 nm	1 500 - 3 500 N/cm <sup>3</sup>
Cafeteria	40 - 150 nm	40 000 - 65 000 N/cm <sup>3</sup> (Raucher) 10 000 - 20 000 N/cm <sup>3</sup> (Nichtraucher)
Chemie (Produktion)	50 nm	80 000 N/cm <sup>3</sup>
Chemie (Herstellung von Nanotubes)	-	bis 41 000 N/cm <sup>3</sup>
Kühlerfertigung	20 - 50 nm	bis 170 000 N/cm <sup>3</sup>
Metallbearbeitung (Automaten): Drehen Fräsen Schleifen		17 300 N/cm <sup>3</sup> 21 600 N/cm <sup>3</sup> 68 300 N/cm <sup>3</sup>
Messestand	30 - 100 nm	4 600 – 14 700 N/cm <sup>3</sup>
Raumschießanlage	140 nm	370 000 N/cm <sup>3</sup> (ohne Lüftung) 4 400 N/cm <sup>3</sup> (Lüftung in Betrieb)

Tabelle 1: Vorkommen von ultrafeinen Aerosolen an verschiedenen Arbeitsplätzen (SMPS) Ergebnisse von Einzelmessungen der LUBW (2007)

Arbeitsverfahren	Maximum der Anzahlverteilung	Anzahlkonzentration (Messbereich von 14 bis ca. 700 nm)
Außenluft, Büroräume	-	bis ca. 10 000 N/cm <sup>3</sup>
Metallschleifen	20 - 170 nm	bis ca. 130 000 N/cm <sup>3</sup>
Weichlöten	30 - 60 nm	bis 400 000 N/cm <sup>3</sup>
Hartlöten	33 - 126	54.000 – 3,5 Mio. N/cm <sup>3</sup>
Schweißen	40 bis 600 nm	100 000 bis 40 Mio. N/cm <sup>3</sup>
Plasmaschneiden	120 – 180 nm	bis 500.000 N/cm <sup>3</sup>
Bäckerei	30 - 110 nm	bis 650 000 N/cm <sup>3</sup>
Flughafenvorfeld	< 45 nm	bis 700 000 N/cm <sup>3</sup>

Tabelle 2: Vorkommen von ultrafeinen Aerosolen an verschiedenen Arbeitsplätzen (SMPS) [MÖHLMANN, 2005]

Die vorliegenden Partikelzahlen machen deutlich, dass bereits die Außenluft eine erhebliche Anzahl an ultrafeinen Partikeln enthält, eine Hintergrundbelastung, die umgebungs- und witterungsbedingt großen Schwankungen unterworfen ist und die Partikelbelastung in Wohn-, Büro- und Arbeitsräumen mitbestimmt. Abhängig vom jeweiligen Arbeitsverfahren und den getroffenen Schutzmaßnahmen liegt die Belastung an Arbeitsplätzen um ein Vielfaches höher. Insgesamt kann auf Basis der vorliegenden Messergebnisse festgestellt werden:

- Im Außenbereich variieren die Partikelzahlkonzentrationen sowie die Partikelgrößenverteilungen am gleichen Messort sehr stark in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit, Windstärke/ Windrichtung und Zeitpunkt der Messung (Umgebungsbedingungen).
- Auch in unauffälligen Büro- bzw. Laborräumen ist an unterschiedlichen Messterminen eine deutliche Variation der Partikelzahlkonzentration sowie der Partikelgrößenverteilung (auch in Abhängigkeit von der Außenluft) feststellbar. Es wurden bis zu 200 000 N/cm<sup>3</sup> gemessen.

- An Arbeitsplätzen in Industrie und Gewerbe können, wie die Beispiele in den Tabellen zeigen, noch wesentlich höhere Partikelkonzentrationen im ultrafeinen Bereich auftreten.
- In Küchen (Mensa), Raucherzimmern sowie in Räumen mit Holzfeuerung sind deutlich erhöhte Partikelzahlkonzentrationen (insbesondere sehr kleine ultrafeine Partikel im Bereich bis ca. 80 nm) detektierbar. Innerhalb von ca. 30 Minuten nach der Erzeugung sehr kleiner ultrafeiner Partikel (Bsp.: Holzfeuerung) finden deutlich erkennbare Aggregationseffekte zu größeren Partikeln (400 bis 600 nm) statt.

# 8 Empfehlungen zum Schutz von Arbeitnehmern

Bei Tätigkeiten mit synthetischen Nanopartikeln hat der Arbeitgeber alle erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer zu treffen. Die etablierte Schutzstrategie der Gefährdungsbeurteilung beruht dabei auf den hierarchisch geordneten Maßnahmen: der Substitution, den technischen Maßnahmen, den organisatorischen Maßnahmen und als letztes den personenbezogenen Schutzmaßnahmen.

Für Tätigkeiten mit synthetischen Nanopartikeln wird im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung (inhalative Route) von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und dem Verband der chemischen Industrie (VCI) folgende Vorgehensweise empfohlen:

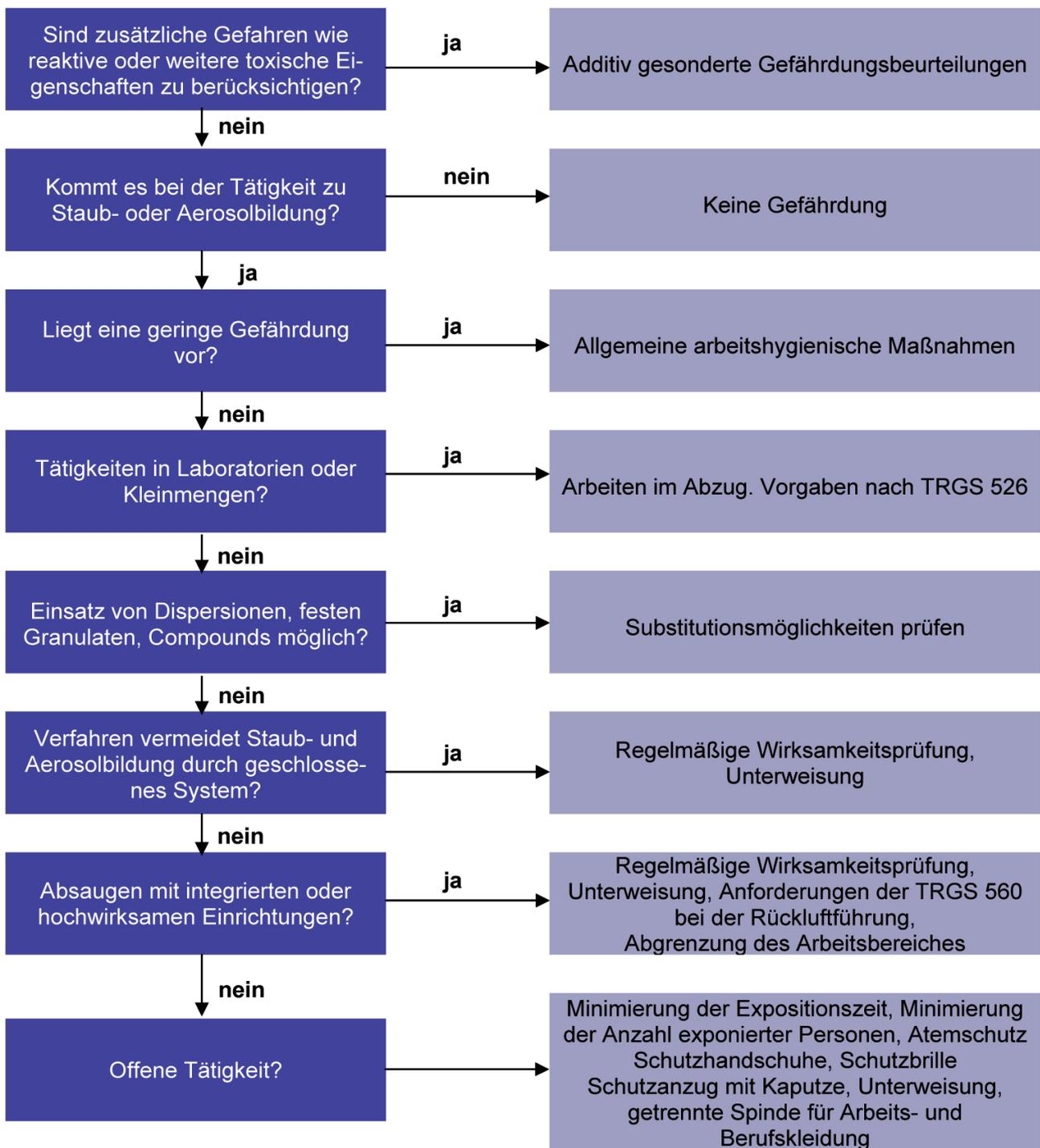


Abb. 13: Ablaufschema Gefährdungsbeurteilung Nanomaterialien am Arbeitsplatz (inhalative Route) [BAUA/VCI, 2007]

Beim Umgang mit synthetisch hergestellten Nanopartikeln – insbesondere wenn neue Substanzklassen zur Anwendung kommen – werden nach dem vorgenannten Konzept (siehe Abb.13) im Rahmen eines vorsorgenden Arbeitsschutzes folgende Maßnahmen empfohlen:

- Als technische Schutzmaßnahme zur Minimierung der Exposition gegenüber Nanopartikeln am Arbeitsplatz sollten grundsätzlich geschlossene Systeme bzw. Einhausungen zur Anwendung kommen (in raumlufttechnischen Anlagen können Nanopartikel durch Schwebstofffilter annähernd quantitativ zurückgehalten werden). Auch aus Gründen des Brand- und Explosionsschutzes sollten Nanopartikel grundsätzlich nicht in nennenswertem Umfang in die Raumluft freigesetzt werden können. Eine Alternative dazu bietet der Einsatz nicht staubender Verfahren (in flüssiger oder pastöser Phase).
- Als organisatorische Schutzmaßnahme sollten Arbeitsbereiche deutlich abgegrenzt und gekennzeichnet werden. Hierzu wird ein neues Warnzeichen („Warnung synthetische Nanoteilchen“) zur Diskussion gestellt (siehe Abb. 14).

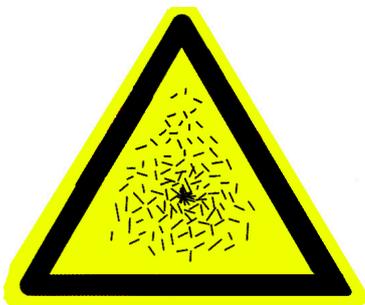


Abb. 14: Vorschlag „Warnung synthetische Nanoteilchen“ [SCHUTZ-DESIGN, 2007]

- Sofern in abgegrenzten Bereichen das Freiwerden synthetischer Nanopartikel nicht ausgeschlossen werden kann, sollte als persönliche Schutzmaßnahme im Bedarfs-, Wartungs- oder Störfall die Verwendung von handelsüblichen Staubschutzmasken (FFP1, FFP2, FFP3) vorgesehen werden. Nach Aussagen des Berufsgenossenschaftlichen Institutes für Arbeitsschutz (BGIA) wird durch handelsübliche Staubschutzmasken auch der überwiegende Anteil an Nanopartikeln (bis zu ca. 99 % für FFP3-Staubschutzmasken) zurückgehalten. Chemikalienschutzhandschuhe können von Nanopartikeln normalerweise nicht durchdrungen werden.

Die Entwicklung einer geeigneten Schutzkonzeption für Tätigkeiten mit synthetischen Nanopartikeln ist ein erster Schritt, um die sich möglicherweise abzeichnenden Gefahren zu begrenzen. Weitere Schritte im Sinne eines präventiven Arbeitsschutzes müssen folgen:

- Gezielte Forschungsförderung beim Umgang mit synthetischen Nanopartikeln (Basis: Teilchenkonzentration und Teilchengrößenverteilung)
- Verstärkte Beobachtung des Krankheits-Geschehens (Häufung von gesundheitlichen Beschwerden und Krankheitssymptomen) bei Tätigkeiten mit synthetischen Nanopartikeln

Für synthetische Nanopartikel existieren derzeit keine spezifischen Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW). Die steigende Produktion und Verwendung wird im Rahmen eines präventiven Arbeitsschutzes allerdings mittel- bis langfristig verlässliche AGW auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse verlangen. Messkampagnen bezüglich Arbeitsplatzkonzentrationen und Feststellung der Art und Wirksamkeit von eingesetzten Schutzmaßnahmen sollten in Erwägung gezogen werden. Regulative Maßnahmen und mögliche Grenzwertsetzungen für synthetische Nanopartikel am Arbeitsplatz können innerhalb der EU bzw. der Bundesrepublik Deutschland in Betracht gezogen werden, wenn weitere Erkenntnisse zu Anwendung und Vorkommen von Nanopartikeln, Teilchenkonzentration und Teilchengrößenverteilung, toxikologisch relevante Teilchenfraktion, Epidemiologie und Wirkmechanismus (abhängig von stofflicher Zusammensetzung, Form, Oberfläche) vorliegen. Die Expositionsauswirkungen durch neuartige Substanzklassen wie Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) und Fullerene („Bucky Balls“) bedürfen einer besonderen Aufmerksamkeit, da es sich um völlig neuartige Substanzen in der belebten Umwelt handelt.

Durch freiwillige branchenspezifische Maßnahmen der Wirtschaft (Code of Conduct bzw. Risikomanagementsysteme) können Leitlinien für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien formuliert werden, die über die Anforderungen der Selbstkontrolle hinausgehen [BUNDESRAT DER SCHWEIZ, 2008]:

- eigene Sicherheitsprüfungen
- weitergehende Maßnahmen der Expositionsminderung (Arbeitsplatz, Anwendung, Entsorgung/Recycling)
- Weitergabe von Informationen
- freiwilliger Verzicht auf den Einsatz bestimmter synthetischer Nanopartikel oder ihrer Anwendungen
- Verringerung bestehender Unsicherheiten hinsichtlich Produktion, Umgang und Inverkehrbringen (insbesondere bei konsumnahen Produkten)

Derartige freiwillige Maßnahmen können zur Vermeidung von restriktiven Regulierungen beitragen. Gegenüber Exponierten fördert ein zertifiziertes Risikomanagementsystem die Vertrauensbildung und demonstriert Verantwortungsbewusstsein beim Herstellen, Anwenden bzw. Inverkehrbringen.

Die messtechnischen Möglichkeiten der LUBW zur Bestimmung der Anzahlkonzentration sowie der Anzahlgrößenverteilung von synthetische Nanopartikeln (bzw. ultrafeinen Partikeln) in der Luft am Arbeitsplatz können von Überwachungsbehörden unentgeltlich in Anspruch genommen werden und dienen zur Überprüfung der Wirksamkeit von anzutreffenden Expositionsminderungsmaßnahmen in Betrieben.

ANSPRECHPARTNER IN DER LUBW:  
Referat 34 – Chemikaliensicherheit,  
Technischer Arbeitsschutz

Gerhard Ott, Tel.: 0721/5600-2355,  
E-Mail: [gerhard.ott@lubw.bwl.de](mailto:gerhard.ott@lubw.bwl.de)

Ulrich Wurster, Tel.: 0721/5600-2319;  
E-Mail: [ulrich.wurster@lubw.bwl.de](mailto:ulrich.wurster@lubw.bwl.de)

## 9 Literatur und Quellen

- ARBMEDVV: „Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge“, BGBl I, S. 2768-2775 (2008)
- BAFU/BAG: „Synthetische Nanomaterialien. Risiko- beurteilung und Risikomanagement: Grundlagenbericht zum Aktionsplan“, Bundesamt für Umwelt und Bundes- amt für Gesundheit Bern (2007); [www.umwelt-schweiz.ch/uw-0721-d](http://www.umwelt-schweiz.ch/uw-0721-d)
- BAUA/VCI: „Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanoma- terialien am Arbeitsplatz“, Bundesanstalt für Arbeits- schutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2007); [www.baua.de/nanotechnologie](http://www.baua.de/nanotechnologie)
- BGIA ARBEITSMAPPE „Messung von Gefähr- stoffen, Expositionsermittlung bei chemischen und bi- ologischen Einwirkungen“, Kennzahl 0412/5: Ultra- feine (Aerosol)-Teilchen und deren Agglomerate und Aggregate (2007), Hrsg: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung – BGIA, Erich Schmidt Verlag, ISBN 978 3 503 02085 0
- BMU: Nano-Dialog: „Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien“, Bericht und Empfehlungen der Nanokommission der deutschen Bundesregierung (2008), [http://www.bmu.de/gesundheits\\_und\\_umwelt/nanotechnologie/nanodialog/doc/42655.php](http://www.bmu.de/gesundheits_und_umwelt/nanotechnologie/nanodialog/doc/42655.php)
- BUNDESRAT DER SCHWEIZ: „Aktionsplan syn- thetische Nanomaterialien“, vom 09. 04. 2008 He- rausgeber: Eidgenössisches Departement des Innern EDI, Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK; [www.umwelt-schweiz.ch/div-4002-d](http://www.umwelt-schweiz.ch/div-4002-d)
- DEUTSCHER BUNDESTAG: Drucksache 16/6337 vom 30.8.2007: „Bericht der Bundesregierung zum Veränderungsbedarf des bestehenden Rechtsrahmens für Anwendungen der Nanotechnologie“
- DIN CEN ISO/TS 27687: „Nanotechnologien - Ter- minologie und Begriffe für Nanoobjekte - Nanoparti- kel, Nanofasern und Nanoplättchen“ (2008)
- DIN EN 481: „Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel“, Beuth Verlag GmbH Berlin (1993)
- ENGEL S., BASF, Tag der Arbeitssicherheit in Fell- bach: „Nanomaterialien – Produktinnovationen und verantwortlicher Umgang am Arbeitsplatz“ (2008)
- EU-KOMMISSION: Empfehlungen der Kommissi- on vom 07.02.2008 (2008); [http://www.nanopartikel.info/haeufige-fragen.html#irfaq\\_4\\_6f0c4](http://www.nanopartikel.info/haeufige-fragen.html#irfaq_4_6f0c4)
- EU-KOMMISSION: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament vom 17.06.2008: „Rege- lungaspekte bei Nanomaterialien“ (2008)
- EU-PARLAMENT: „Entschließung des Europäischen Parlaments vom 24. April 2009 zu Regelungaspekten bei Nanomaterialien“, BR-Drucksache 499/09 vom 19.05.2009 (2009); [http://www.bundesrat.de/cln\\_099/SharedDocs/Drucksachen/2009/0401-500/499-09,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/499-09.pdf](http://www.bundesrat.de/cln_099/SharedDocs/Drucksachen/2009/0401-500/499-09,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/499-09.pdf)
- GRONEBERG D., QUARCOO D.: „Nanotoxizität – wachsende Bedeutung“, Zentralblatt für Arbeitsmedi- zin 58, S. 237 (2008)
- ISO/TR 27628: „Workplace atmospheres – Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols – Inhalati- on, exposure, characterisation and assessment“; In- ternational Organization for Standardization (ISO), Genf/Schweiz (2007)
- KREUTER J., GELPERINA S.: „Use of nanoparticles for cerebral cancer“, Tumori, 94: S. 271-277 (2008)

- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: „Anwendung von Nanopartikeln“ (2007); <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/29564>
- MATTENKLOTT M., HÖEFERT H.: „Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen“, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft Nr. 4, S. 127-129 (2009)
- MÖHLMANN C.: „Vorkommen ultrafeiner Aerosole an Arbeitsplätzen“; Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 65 Nr. 11/12, S. 469-471 (2005)
- MÜLLER M., FRITZ M., BUCHTER A.: „Nanotoxikologie“, Zentralblatt für Arbeitsmedizin 58, S. 238-252 (2008)
- NANOROAD: „Entwicklungen in der Nanotechnologie“ (2008); <http://www.nanoroad.net>
- NANOWERK: [www.nanowerk.com](http://www.nanowerk.com) (Datum des Downloads : 12.02.2009)
- NASTERLACK M., GRONEBERG D.: „Nanopartikel, Ultrafeinstäube“; Arbeitsmedizin: Handbuch für Theorie und Praxis, 2. Auflage; Gentner Verlag (2008)
- OBERDÖRSTER G., SHARP Z., ATUDOREI V. ET. AL.: „Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain“, Inhal Toxicol 16, S. 437-445 (2004)
- OBERDÖRSTER G., OBERDÖRSTER E., OBERDÖRSTER J.: „Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles“; Environmental Health Perspectives 7, S. 823-839 (2005)
- OSTIGUY C., ROBERGE B., MÈNARD L., ENDO C.: „Best Practice Guide to Synthetic Nanoparticle Risk Management“, IRSST (2009); [www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)
- PEN: „The Project on Emerging Nanotechnologies;“ [http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis\\_draft/](http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/) (Datum des Downloads: 12.02.2009)
- REACH-VERORDNUNG: Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 vom 18. 12 2006, berichtigte Fassung im ABl. EU Nr. L 136 vom 29.05.2007
- ROYAL SOCIETY and the Royal Academy of Engineering, London: „Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties“ (2004); [www.nanotec.org.uk/finalReport.htm](http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm)
- SCHUTZDESIGN: <http://www.schutzdesign.de/Schutzkonzept%20%20Nanotechnologie.htm>, (Datum des Downloads: 12.05.2007)
- STANFORD MATERIAL CORP., [www.stanford-materials.com/nano.html](http://www.stanford-materials.com/nano.html), (Datum des Downloads : 12.02.2009)
- SUVA: „Nanopartikel an Arbeitsplätzen“, Schweizerische Unfallversicherung (2007); [http://www.suva.ch/nanopartikel\\_an\\_arbeitsplaetzen.htm](http://www.suva.ch/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.htm)
- SWISS RE: „Nanotechnologie: Kleine Teile große Zukunft?“, Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft (2004); [www.swissre.com](http://www.swissre.com)
- TRGS 900 „Technische Regeln für Gefahrstoffe 900 – Arbeitsplatzgrenzwerte“, Ausgabe Januar 2006 (BArbBl. 1/2006 S. 41), zuletzt geändert und ergänzt am 16.02.2009 GMBL. S. 236
- VDI-RICHTLINIE 3867 Blatt 1: „Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung - Grundlagen“, Februar 2006, Beuth Verlag GmbH Berlin
- VDI-RICHTLINIE 3867 Blatt 2: „Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung - Kondensationspartikelzähler“, Mai 2006, Beuth Verlag GmbH Berlin
- WIKIPEDIA: <http://de.wikipedia.org>, (Datum des Downloads: Juli 2009)



