



# Arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung bei Tätigkeiten mit Kohlenstoffnanoröhren (CNT)

Fragen und Antworten

BAUA-PRAXIS

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kohlenstoffnanoröhren – arbeitsmedizinische Beratung für eine sichere Anwendung</b>	<b>3</b>
<hr/>		
<b>2</b>	<b>Hinweise zum Text</b>	<b>5</b>
<hr/>		
<b>3</b>	<b>Exkurs: Was sind Kohlenstoffnanoröhren (CNT)?</b>	<b>6</b>
<hr/>		
<b>4</b>	<b>Fragen und Antworten zu CNT</b>	<b>7</b>
4.1	Sind CNT gesundheitsgefährdend?	7
4.2	Wie können CNT am Arbeitsplatz in den menschlichen Organismus gelangen?	9
4.3	Gibt es Grenzwerte für Nanomaterialien am Arbeitsplatz?	10
4.4	Welche Schutzmaßnahmen können beim Umgang mit CNT ergriffen werden?	11
4.5	Was leistet die arbeitsmedizinische Vorsorge und Beratung zum Schutz vor CNT?	12
4.6	Wo gibt es weitere Informationen?	13
<hr/>		
<b>5</b>	<b>Gefährdungen und Grenzwerte: der aktuelle Stand der Wissenschaft zu CNT</b>	<b>14</b>
5.1	Untersuchungen zu kanzerogenen und entzündlichen Wirkungen von CNT	14
5.2	Studien zum Einfluss der Materialeigenschaften von CNT auf ihre Wirkung	16
5.3	Wirkung auf den Menschen	18
5.4	Grenzwerte	19
<hr/>		
<b>6</b>	<b>Besondere Schutzmaßnahmen – Ergänzung zur Frage 4.4</b>	<b>21</b>
<hr/>		
	<b>Glossar</b>	<b>23</b>
	<b>Literatur</b>	<b>27</b>
	<b>Impressum</b>	<b>34</b>
<hr/>		

# 1 Kohlenstoffnanoröhren – arbeitsmedizinische Beratung für eine sichere Anwendung



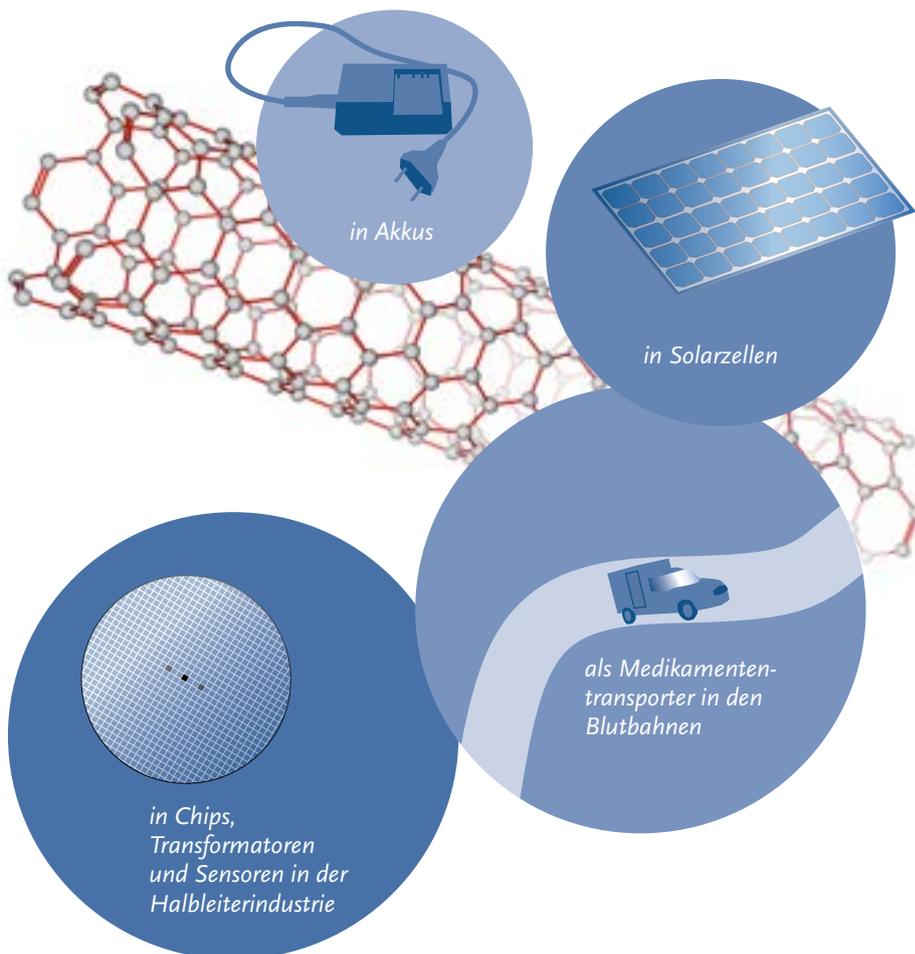
Kohlenstoffnanoröhren (*kurz CNT für carbon nanotubes*) haben Eigenschaften, die sie aus technischer Sicht zur ersten Wahl für eine Vielzahl von Anwendungen machen. Bei einem Bruchteil des Gewichts von Stahl ist ihre Zugfestigkeit 100-fach höher. Einige CNT können um ein Vielfaches mehr elektrische Ladungen aufnehmen als Kupfer. Mit ihren Halbleitereigenschaften eignen sich CNT zur Entwicklung von Transistoren, die kleiner und schneller sind als Siliziumtransistoren. Zudem lassen sich Kohlenstoffnanoröhren in ihrem Design frei gestalten, sodass ihre technischen Eigenschaften sehr unterschiedliche industrielle Anwendungen – von der Halbleiterproduktion bis zum Flugzeugbau – ermöglichen. Die Herstellung von CNT findet, so das Ergebnis einer Befragung durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), bei mehr als der Hälfte der Firmen und Institutionen bisher im Labormaßstab statt (Plietzko u. a. 2013a).

Wie CNT auf den menschlichen Organismus wirken, ist derzeit noch unzureichend erforscht. Bisher gibt es ausschließlich toxikologische Untersuchungen an Tieren, die auf mögliche gesundheitliche Gefährdungen durch CNT hinweisen. So zeigen vergleichende Untersuchungen ähnliche Wirkungen wie durch Asbest, dessen fibrogene und kanzerogene Wirkung auf den menschlichen Organismus nachgewiesen ist.

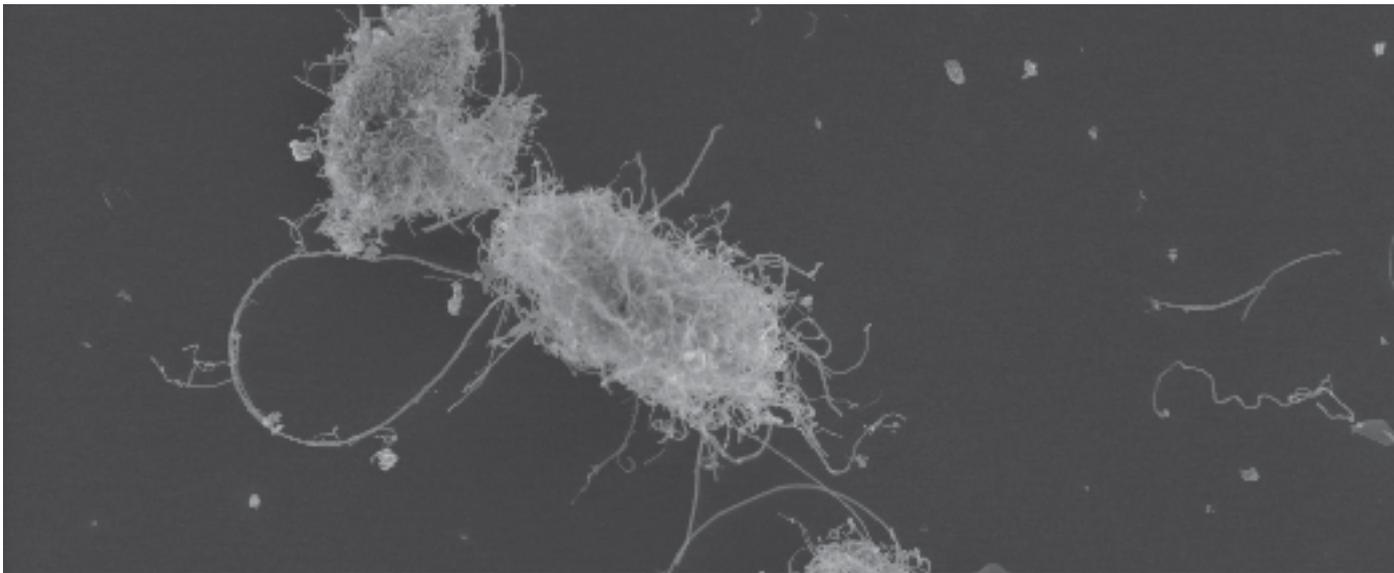
Außerdem ist aus Tierversuchen bekannt, dass es bei Einatmung von partikelförmig zusammengeballten CNT im Organismus zu entzündlichen Reaktionen kommen kann. Angesichts dieser unklaren Ausgangslage hat der Gesetzgeber Vorschriften erlassen, um Beschäftigte vor Belastungen beim Umgang mit Nanomaterialien einschließlich CNT zu schützen. Die [Bekanntmachung zu Gefahrstoffen 527 \(BekGS 527, 2013\)](#) listet die erforderlichen Schritte für einen sicheren Umgang mit CNT auf.

Ein wichtiges Element ist dabei die allgemeine arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung. Sie soll Beschäftigte über bekannte und vermutete Gefahren von Nanomaterialien informieren. Bisher fehlte es allerdings an geeignetem Informationsmaterial für diese Beratung zu CNT am Arbeitsplatz. Mit der vorliegenden Handlungsempfehlung schließt die BAuA diese Lücke und stellt einen Leitfaden für die arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung zur Verfügung.

## MÖGLICHE ANWENDUNGSGEBIETE VON KOHLENSTOFFNANORÖHREN (CNT):



## 2 Hinweise zum Text



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines lockeren Agglomerats von teilweise biegsamen CNT (Länge: 8 Mikrometer [µm])

Betriebsärzte und beauftragte Arbeitsmediziner stehen vor der Aufgabe, Beschäftigte arbeitsmedizinisch-toxikologisch zum Umgang mit CNT zu beraten. Die Beratung ist nach der Gefahrstoffverordnung ein obligatorischer Teil der betrieblichen Unterweisung. Die BAuA-Praxis versteht sich als praktische Hilfestellung für die Beratung und arbeitsmedizinische Vorsorge im Unternehmen. Sie fasst den aktuellen Stand der Forschung zu CNT und möglichen Gesundheitsgefährdungen zusammen, beschreibt Aufnahmewege und gibt einen Überblick zu Grenzwerten und Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten.

Ziel ist es, den Dialog zwischen Beschäftigten und Betriebsarzt zu erleichtern. Die grundlegenden Fragen zum Thema werden deshalb – wie in der Gesprächssituation – kurz und punktgenau beantwortet. Jede Antwort ist durch zusätzliches Wissen unterfüttert, sodass auch weitergehende Fragen beantwortet werden können. Am Ende dieser BAuA-Praxis befindet sich eine prägnante Darstellung des aktuellen Wissensstandes zu möglichen Risiken durch CNT sowie zur Grenzwertsituation.

Die BAuA-Praxis richtet sich ausdrücklich nicht nur an Arbeitsmediziner. Linksammlung, Glossar und Literaturliste erleichtern auch Nicht-Experten die Einarbeitung in die Materie.

### 3

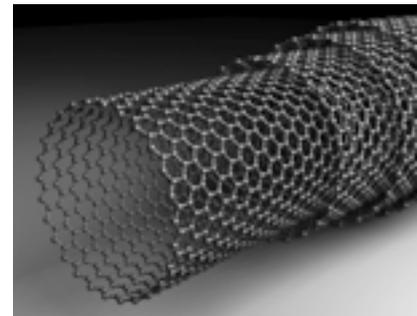
## Exkurs: Was sind Kohlenstoffnanoröhren (CNT)?

CNT gehören zur Gruppe der Nanomaterialien. Nach Definition der EU-Kommission handelt es sich dabei um natürliche, hergestellte oder bei Prozessen anfallende Nanoobjekte. Von diesen haben „mindestens 50 Prozent ihrer Partikel (nach Anzahlgrößenverteilung) ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 bis 100 Nanometer (nm)“ (EU-Kommission 2011). Innerhalb der Nanomaterialien nehmen CNT eine Sonderstellung ein. Im Verhältnis zum Durchmesser können sie sehr lang und dabei so dünn wie eine Lage von Kohlenstoffatomen sein. Deshalb hat die EU-Kommission veranlasst, auch einwandige Kohlenstoffnanoröhren sowie Fullerene und Graphen-flocken mit einem oder mehreren Außenmaßen unter einem Nanometer als Nanomaterialien zu definieren (EU-Kommission 2011).

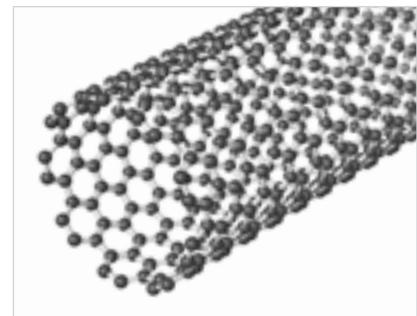
CNT werden in einwandige (*single-walled carbon nanotubes*, kurz: SWCNT) und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren (*multi-walled carbon nanotubes*, kurz: MWCNT) unterteilt. SWCNT sind einlagige wabenförmige Anordnungen von Kohlenstoffatomen, die zu einer nahtlosen Röhre gerollt sind. MWCNT hingegen bestehen aus mehreren solcher SWCNT, die mit zunehmendem Durchmesser umeinander konzentrisch angeordnet sind. Die meisten derzeit produzierten CNT haben einen Durchmesser zwischen 1 nm und 50 nm, ihre Länge liegt im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich. Je nach Herstellungsmethode und Biegsamkeit können CNT mehr oder weniger stark agglomeriert vorliegen. CNT-Agglomerate und -Aggregate haben in der Praxis häufig eine Größe von mehreren Mikrometern. Aggregate können bis zu einem Millimeter groß werden.

Optische Industrie und Werkstoffindustrie verwenden CNT derzeit vor allem im Flugzeugbau und für Rotoren von Windrädern. In elektronischen Bauteilen dienen sie als Halbleiter. In der medizinischen Forschung laufen Versuche, bei denen CNT als „Transportmittel“ für Medikamente und Impfstoffe getestet werden.

CNT sind nicht immer das Ergebnis gezielter Herstellung, sondern können auch zufällig bei Verbrennungsprozessen entstehen. So fanden Forscher dichte CNT-Cluster bei Luftmessungen in der Umgebung eines Gaskraftwerkes, aber auch im Abgasstrom eines Gasherdes (Murr et al. 2006).



Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhre



Einwandige Kohlenstoffnanoröhre

# 4 Fragen und Antworten zu CNT



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer sternförmigen Defektstruktur aus Kohlenstoffnanoröhren. Der Stern hat sich aufgrund interner mechanischer Spannungen spontan in einem sogenannten CNT-Rasen gebildet (Durchmesser: 300 µm).

## 4.1 Sind CNT gesundheitsgefährdend?

**Gesundheitsgefährdungen durch Kohlenstoffnanoröhren (CNT) und Kohlenstoffnanofasern (CNF) können nach dem derzeitigen Wissensstand vor allem durch das Einatmen dieser Nanomaterialien entstehen. CNT und CNF werden aufgrund ihrer Biobeständigkeit im Körper nicht abgebaut. Aus CNT können Fasern entstehen, die bei entsprechender Geometrie und Größe eine asbestartige Wirkung entfalten. Sehr dünne und flexible CNT bilden darüber hinaus partikelartige Knäuel, die Entzündungen in der Lunge hervorrufen können, wie sie von granulären biobeständigen Nanomaterialien bekannt sind (AGS 2011).**

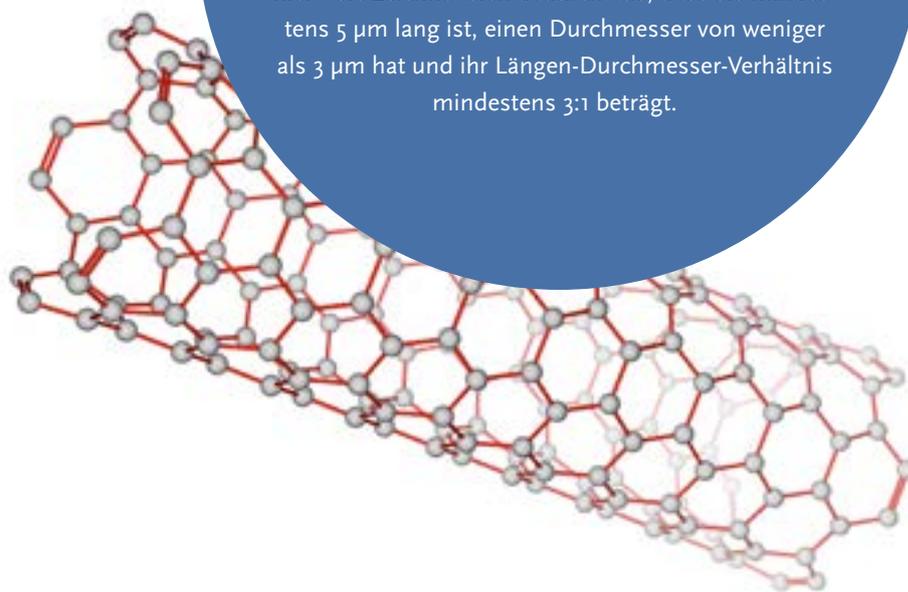
Die wissenschaftliche Datenlage zu Gesundheitsbeeinträchtigungen Beschäftigter mit Kontakt zu CNT ist derzeit noch unsicher. Aus experimentellen Studien an Nagetieren ist bekannt, dass CNT gesundheitsschädliche Wirkungen an der Lunge auslösen können. So führte die Injektion von MWCNT in das Bauchfell von Ratten zu ähnlichen Ergebnissen wie bei Asbestfasern aus Krokydolith. Unter bestimmten Voraussetzungen (Durchmesser 50 nm, rigide lange Faserstruktur) kam es zu pleuralen Entzündungen und Mesotheliomen.

Zudem riefen Agglomerate von CNT entzündliche Prozesse an den Lungenbläschen von Versuchstieren hervor. Dies führte zu chronisch-entzündlichen Gewebsveränderungen und Krebs.

Diese in Tierversuchen festgestellte asbestartige Wirkung von CNT gibt Anlass zur Vorsicht – insbesondere mit Blick auf die Erfahrungen und Folgen mit der Asbestbelastung. Asbestbedingte Lungenkrankheiten gehören heute noch zu den häufigsten Berufskrankheiten – mehr als 20 Jahre nach dem Asbest-Verbot. Asbestose, Lungenkarzinom und Mesotheliom als Folge früherer Asbestbelastungen führen in Deutschland pro Jahr noch immer zu circa 3.000 Anerkennungen im Berufskrankheitenverfahren.

### WAS BEDEUTET „WHO-FASER“?

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat die Eigenschaften von biobeständigen Fasern charakterisiert, die verantwortlich für die asbestartige Wirkung sein können und die sogenannte „WHO-Faser“ definiert. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie mindestens 5  $\mu\text{m}$  lang ist, einen Durchmesser von weniger als 3  $\mu\text{m}$  hat und ihr Längen-Durchmesser-Verhältnis mindestens 3:1 beträgt.



Quelle: Weltgesundheitsorganisation (WHO)

## 4.2 Wie können CNT am Arbeitsplatz in den menschlichen Organismus gelangen?

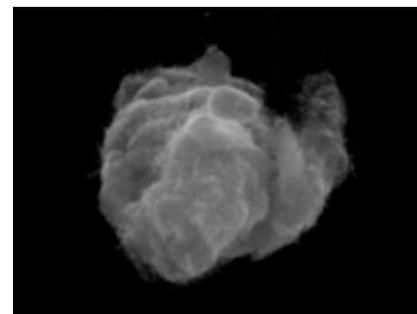
Chemische Arbeitsstoffe können durch Einatmen (inhalativ), über die Haut (dermal) und durch Verschlucken (oral) aufgenommen werden. CNT gelangen nach aktuellem Stand der Forschung vor allem inhalativ in den menschlichen Organismus. Deshalb ist für die Bewertung von Gefährdungen vor allem die inhalative Aufnahme als maßgeblich anzusehen (BekGS 527, 2013). Für die Bewertung einer möglichen Exposition sind verschiedene Faktoren ausschlaggebend: die Art des Herstellungs- und Verarbeitungsprozesses, die Freisetzungswahrscheinlichkeit und -menge, das Staubungsverhalten und die eingesetzten technischen Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz.



Die Exposition gegenüber CNT hängt entscheidend von der Art der Herstellung und Verarbeitung ab. So kann die inhalative Exposition minimiert werden, wenn CNT in geschlossenen Systemen hergestellt oder verwendet werden. Erfolgt die Weiterverarbeitung in einer nichtstaubenden Form oder als flüssige Suspension, die nicht versprüht wird, sind Belastungen nicht zu erwarten. Dies gilt auch, wenn CNT in eine feste Matrix, z. B. Kunststoff, eingeschlossen werden.

Zu Belastungen der Haut kann es bei manuellen Tätigkeiten mit staubförmigen oder dispergierten Nanomaterialien kommen. Wenn CNT in einer Feststoffmatrix gebunden sind und diese nicht durch Reiben oder Schleifen bearbeitet wird, ist dies allerdings nicht zu erwarten.

Für die Charakterisierung der Exposition muss der Arbeitgeber präzise über das eingesetzte Produkt bzw. Material informiert sein. Neben dem Aggregat- bzw. Agglomeratzustand des Materials muss er auch über die Tätigkeit und die Luftkonzentration am Arbeitsplatz Bescheid wissen, um Gefährdungen richtig einschätzen zu können. Dabei sind die Vorgaben der Gefahrstoffverordnung zu beachten. Die BekGS 527 „Herstellte Nanomaterialien“ und die „**Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz**“ (BAuA 2012) erläutern das Vorgehen detailliert. Die Informationen zur Exposition sollen in die Unterweisung und arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung der Beschäftigten einfließen.



Dichtes Agglomerat von flexiblen CNT (Durchmesser: 10 µm)

### 4.3. Gibt es Grenzwerte für Nanomaterialien am Arbeitsplatz?

**Für Nanomaterialien gibt es in Deutschland keine rechtsverbindlichen Arbeitsplatzgrenzwerte. Dies gilt auch für CNT und andere Nanofasern. Allerdings enthält die Anlage zur BekGS 527 eine Reihe von Empfehlungen verschiedener Organisationen und Hersteller. Sie dienen der Orientierung und können – nach entsprechender fachkundiger Bewertung – als Beurteilungsmaßstab herangezogen werden.**

Nach der BekGS 527 sind Nanomaterialien mit bestimmten Eigenschaften vorsorglich wie Stoffe mit möglicherweise karzinogenen Eigenschaften zu behandeln. Dies gilt für biobeständige faserförmige und starre Nanomaterialien, die zugleich den WHO-Faserkriterien entsprechen oder deren Morphologie nicht genau bekannt ist. Nanofasern oder Nanoröhrchen, die den Kriterien der „WHO-Faser“ entsprechen, können asbestartige Wirkungen aufweisen. Deshalb gibt es eine Reihe von Empfehlungen zur Faserkonzentration. Die Faserkonzentration kann je nach Messverfahren als Faseranzahl je Kubikmeter oder als gravimetrische Konzentration (Gewicht je Kubikmeter) angegeben werden. Diese unterschiedlichen Maßangaben können zu unterschiedlichen Grenzwertempfehlungen führen.

So rät die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), eine Konzentration von 10.000 Fasern/m<sup>3</sup> nicht zu überschreiten. Das National Institute for Occupational Safety and Health der USA (NIOSH) hatte 2010 auf der Basis experimenteller Daten eingeschätzt, dass Gefährdungen schon bei einer Exposition unter 0,001 mg/m<sup>3</sup> auftreten können. Es empfahl aber eine Obergrenze von 0,007 mg/m<sup>3</sup> in der Höhe der damaligen Nachweisgrenze der Messtechnik und verschärfte diese Empfehlung 2013 aufgrund verbesserter Messmethoden auf 0,001 mg/m<sup>3</sup>.



Ein Hersteller mehrwandiger Kohlenstoffnanoröhren nennt einen Grenzwert von  $0,05 \text{ mg/m}^3$ , der sich auf bestimmte flexible und nicht starre MWCNT bezieht, die größere Agglomerate bilden (Pauluhn 2010).

Bei biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien werden grundsätzlich asbestähnliche Eigenschaften angenommen – außer der Hersteller kann für sein jeweiliges Produkt durch Untersuchungen nachweisen, dass es sich nicht um WHO-Fasern handelt.

Bei Nicht-WHO-Fasern sollte eine Einzelfallbetrachtung mit fachkundiger Unterstützung erfolgen, da eine abschließende Bewertung von biegsamen biobeständigen Fasern noch nicht vorliegt.

#### 4.4 Welche Schutzmaßnahmen können im Umgang mit CNT ergriffen werden?

**Die beste Schutzmaßnahme stellt der Verzicht auf den Einsatz von Nanomaterialien dar, die biobeständig oder starr sind und den WHO-Faserkriterien entsprechen. Es gilt also in erster Linie, Ersatzstoffe zu finden. Wo dies nicht möglich ist und zudem eine erhöhte Gefährdung durch inhalative Exposition besteht, sind Nanomaterialien grundsätzlich in geschlossenen Systemen herzustellen oder zu verarbeiten. In der BekGS 527 werden die genauen Schritte bei der Informationsermittlung, Gefährdungsbeurteilung und der Ableitung von Schutzmaßnahmen beschrieben.**

Die Gefahrstoffverordnung sieht zum Schutz der Beschäftigten ein stufenweises Vorgehen vor. Zu Beginn gilt es, Informationen über Stoffe und Verfahren zu sammeln, eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen und Schutzmaßnahmen festzulegen. In der Folge muss überprüft werden, ob die Maßnahmen greifen. Beschäftigte müssen über den Prozess informiert werden, die Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung und der getroffenen Maßnahmen ist obligatorisch.

Alle Arbeitsvorgänge und Betriebszustände, also auch die Wartung, Instandsetzung, Störungen und Überwachungstätigkeiten, sind ebenfalls zu dokumentieren.

Konkrete Schutzmaßnahmen beziehen sich auf den Zugang zu Arbeitsbereichen, in denen Tätigkeiten mit biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien ausgeführt werden. Hier haben nur befugte und unterwiesene Personen Zutritt. Ebenfalls sind diese Bereiche entsprechend zu kennzeichnen.

Für biobeständige, faserförmige Nanomaterialien gelten besondere Anforderungen bei der Luftrückführung, wie sie in der **TRGS 560 „Luftrückführung bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden, erbgutverändernden und fruchtbarkeitsgefährdenden Stäuben“** aufgeführt sind.

Nanomaterialien, deren Gefährdungspotenzial noch nicht ausreichend toxikologisch geprüft ist, sind zudem nach **TRGS 201 „Einstufung und Kennzeichnung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“** zu kennzeichnen.

## 4.5 Was leistet die arbeitsmedizinische Vorsorge zum Schutz vor CNT?

Die arbeitsmedizinische Vorsorge bietet Beschäftigten die Möglichkeit, sich vom Betriebsarzt untersuchen zu lassen, damit gesundheitliche Veränderungen frühzeitig erkannt werden können. Ebenfalls stellt die Beratung den Beschäftigten einen vertraulichen Rahmen zur Verfügung, um über bekannte und vermutete Gefahren zu sprechen und über mögliche Aufnahmewege in den Körper zu informieren (BekGS 527, 2013).



Nach § 11 des **Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG)** muss der Arbeitgeber bei Tätigkeiten, bei denen ein Gesundheitsschaden nicht ausgeschlossen werden kann, Beschäftigten auf ihren Wunsch hin regelmäßig arbeitsmedizinische Vorsorge ermöglichen (ArbSchG 2013). Darüber hinaus hat der Arbeitgeber beim Verdacht auf Beschwerden oder eine Erkrankung, die im Zusammenhang mit der Tätigkeit oder dem Umgang mit CNT am Arbeitsplatz stehen könnten, eine sogenannte ereignisbezogene Vorsorge anzubieten. Dies gilt unabhängig davon, ob eine reguläre arbeitsmedizinische Vorsorge angeboten wird.

Die arbeitsmedizinische Vorsorge zielt in zwei Richtungen: das frühzeitige Erkennen von Beschwerden und funktionellen Veränderungen und die Beratung zu allen arbeitsmedizinisch-toxikologischen Fragen, die im Zusammenhang mit der Tätigkeit stehen. Der Umfang einer arbeitsmedizinischen Untersuchung hängt von der konkreten Tätigkeit ab. Er orientiert sich an den Stoffeigenschaften des verwendeten CNT-Materials und der Gefährdungsbeurteilung, trägt aber auch aktuellen arbeitsmedizinischen Erkenntnissen und Empfehlungen sowie Einschätzungen des Betriebsarztes Rechnung. Diagnostische Methoden wie Biomonitoring, Atemkondensatmessung und Lungenfunktionstests können bei entsprechender Indikation eingesetzt werden. Eine aufwendige Diagnostik ist nicht immer notwendig. Ein Beratungsgespräch kann ausreichend sein, um persönliche Anliegen der Beschäftigten zu klären und im Sinne der arbeitsmedizinischen Vorsorge zu informieren.

## 4.6 Wo gibt es weitere Informationen?

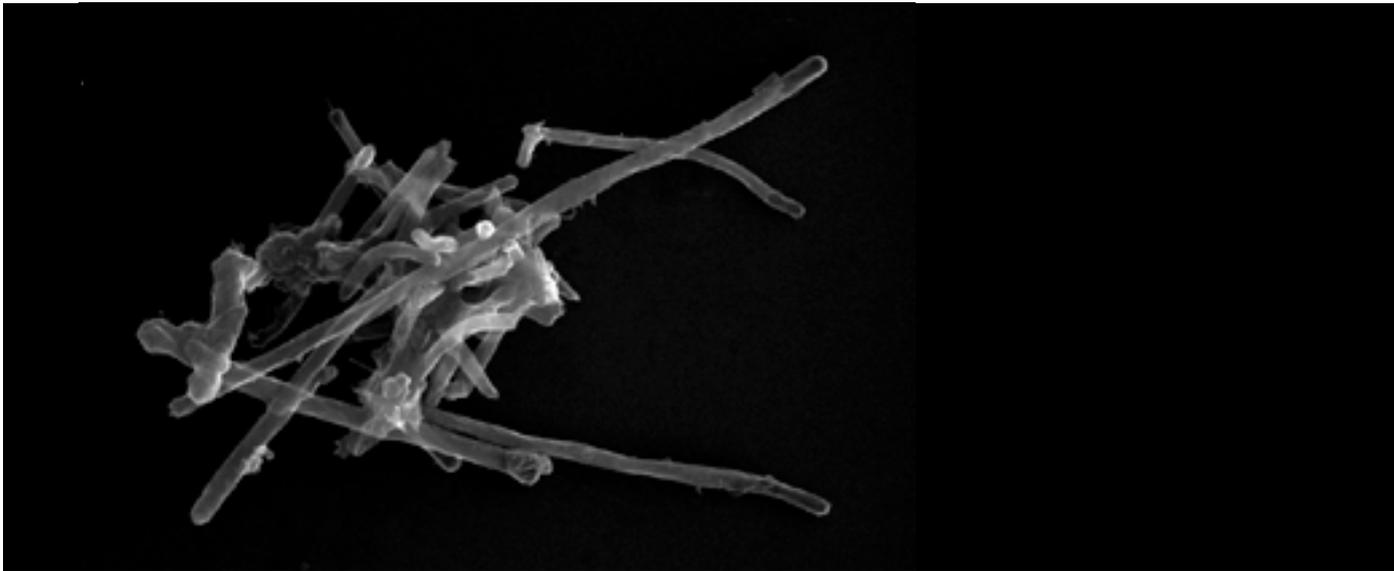
Bei allen Fragen zum Arbeitsschutz ist der Arbeitgeber, die unmittelbare Führungskraft oder die Sicherheitsfachkraft die erste Ansprechperson. Sie beantworten Fragen zur arbeitsmedizinisch-toxikologischen Beratung und zu den Möglichkeiten einer arbeitsmedizinischen Vorsorge. Weitere Auskünfte, vor allem bei gesundheitlichen Fragen, erhalten Beschäftigte beim arbeitsmedizinischen Dienst oder dem Betriebsarzt. Darüber hinaus informieren die zuständige Berufsgenossenschaft und das Amt für Arbeitsschutz (Gewerbeaufsichtsamt).

Unter dem Suchwort „Nanotechnologie“ werden im Internet zahlreiche Informationen zu Nanomaterialien und Nanotechnologie in der Arbeitswelt angeboten. Die folgenden Seiten bieten umfassendes Wissen zu unterschiedlichen Aspekten der Nanotechnologie:

- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [www.baua.de](http://www.baua.de)  
Für die berufliche Praxis: [Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz 2012](#)
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung [www.dguv.de](http://www.dguv.de)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de)
- Bundesinstitut für Risikobewertung [www.bfr.bund.de](http://www.bfr.bund.de)



# 5 Gefährdungen und Grenzwerte: der aktuelle Stand der Wissenschaft zu CNT



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines lockeren Agglomerats von starren CNT (Länge: 6 µm)

## 5.1 Untersuchungen zu kanzerogenen und entzündlichen Wirkungen von CNT

Bei der toxikologischen Bewertung von CNT ist neben der Biobeständigkeit die Geometrie der Faser von entscheidender Bedeutung. Diese Bewertung gilt grundsätzlich auch für Kohlenstoffnanofasern (CNF).

Eine asbestartige Wirkung kann immer dann angenommen werden, wenn einzelne Fasern mindestens 5 µm lang sind, einen Durchmesser von weniger als 3 µm haben und das Verhältnis von Länge zu Durchmesser mindestens 3:1 beträgt. CNT mit dieser kritischen Relation von Länge und Durchmesser werden häufig produziert.

Im Tierexperiment wurden durch die Injektion von CNT verschiedene Erkrankungen hervorgerufen. So führte bei Mäusen die Injektion von langen MWCNT (größer als 5 µm) in das Bauchfell zu entzündlichen Veränderungen. Kurze Fasern unter 1 µm oder verknäulte MWCNT riefen dagegen keine Veränderungen hervor. (Poland et al. 2008; Takagi et al. 2008; Muller et al. 2009; Murphy et al. 2011).

Bei Ratten kam es durch in das Bauchfell injizierte MWCNT zur pleuralen Entzündung und Mesotheliomentstehung in gleicher Weise wie bei injizierten Asbestfasern aus Krokydolith (Nagai et al. 2011). Eine andere Studie untersuchte die Wirkung von MWCNT und Krokydolith, die über die Luftröhre in die Lunge gesprüht wurden. Beide Materialien riefen Entzündungen, pleurale Höhlenbildungen und die Schädigung der Mesothelproliferation hervor (Xu et al. 2012).

Andere Versuche an Ratten zeigten, dass bei intraperitonealer Injektion von CNT mit WHO-Faser-Abmessung neben dem Durchmesser und der Länge der Fasern auch ihre Krümmung einen Einfluss auf die Entstehung von Mesotheliomen hat. Starre, nadelartige CNT führten zu größeren Mesotheliomraten als die leicht gebogenen Varianten. Bei den meisten Versuchstieren entstanden außerdem Granulome auf der peritonealen Oberfläche der Bauchorgane und des Zwerchfells (Rittinghausen et al. 2014).

Generell wurde bei längeren biobeständigen Fasern ein stärkerer entzündlicher Effekt als bei kürzeren Fasern beobachtet. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Makrophagen längere Fasern in geringerem Maße phagozytieren können und damit die Kontaktzeit mit den Zellen steigt. Auch ist die biologische Aktivität längerer Fasern beim Kontakt mit Zellen stärker ausgeprägt (Donaldson et al. 2006, 2010, 2013).

Dass MWCNT von den Lungenbläschen aus in den Pleuraspalt und auch in andere Organe gelangen können, wurde in weiteren Untersuchungen an Nagern deutlich (Hubbs et al. 2009; Porter et al. 2010, 2013; Mercer et al. 2010, 2013a, 2013b).

Das National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) der USA hat 54 tierexperimentelle Studien auf nicht-kanzerogene Lungeneffekte hin ausgewertet. In vielen von ihnen wurde gezeigt, dass CNT und CNF gesundheitsschädlich auf die Lunge wirken und Entzündungen, Granulome und Fibrosen hervorrufen können. Im Vergleich zu anderen partikelförmigen Stoffen wie Quarz, Asbest oder ultrafeinem Kohlenstoff konnte für CNT die gleiche oder eine größere fibrogene Wirkung nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse wurden in Versuchen an Ratten und Mäusen nach Verabreichen von verschiedenen Typen von CNT (SWCNT, MWCNT, gereinigt und ungereinigt) über Inhalation, intratracheale Instillation oder pharyngeale Aspiration gewonnen. Schon bei relativ geringen Massenkonzentrationen von CNT konnte eine reduzierte Lungen-Clearance nachgewiesen werden. Derartige gesundheitsschädliche Effekte wurden auch in Experimenten mit Kohlenstoffnanofasern an Mäusen beobachtet (NIOSH 2013).

In einem Projekt des finnischen Arbeitsmedizin-Instituts FIOSH verursachten lange und starre, nadelartige MWCNT mit einem Durchmesser von mehr als 50 nm starke Entzündungsreaktionen und erbgutverändernde Effekte in der Lunge von Mäusen, während dünnere (etwa 8 bis 15 nm) verwickelte lange MWCNT keine derartigen Effekte auslösten. Darüber hinaus wurden dem Asthma ähnliche Veränderungen in der Lunge gefunden. Die Autoren schlossen daraus, dass nadelartige MWCNT mit besonderer Vorsicht gehandhabt werden sollten (Rydman et al. 2013).



## 5.2 Studien zum Einfluss der Materialeigenschaften von CNT auf ihre Wirkung

Entscheidend für die Wirkung der CNT ist ihre Biobeständigkeit – und damit verbunden ihre Fähigkeit, Entzündungen im Organismus auszulösen. Ferner hängt die Toxizität von den Materialeigenschaften ab: der Struktur, dem Agglomeratvolumen, der Agglomeratdichte und der spezifischen Oberfläche (Teilchenoberfläche im Verhältnis zur Masse bzw. zum Volumen). Die Oberflächenfunktionalität, Verunreinigungen und die Expositions-dosis sind weitere Faktoren, welche die Wirkung beeinflussen.

CNT zeichnen sich durch eine große spezifische Oberfläche aus. CNT-Agglomerate können dabei eine deutlich größere Oberfläche aufweisen als die Agglomerate anderer Nanomaterialien (Wohlleben et al. 2013). Neben der spezifischen Oberfläche können CNT auch durch die Dichte der Agglomerate bzw. Aggregate charakterisiert werden (auch als scheinbare, apparente oder spezifische Dichte bezeichnet). Je nach Art der Zusammenlagerung kann sich die Dichte der Agglomerate, die aus gleich großen primären Nanoröhren bestehen, deutlich unterscheiden: Bei locker agglomerierten CNT-Strukturen ist die Agglomeratdichte geringer als bei dichten Agglomeraten und das Volumen pro Masse ist größer. Nach der Overload-Theorie steht das Volumen von Partikeln mit der Aufnahmekapazität der Makrophagen in den Lungenbläschen in engem Zusammenhang (Begründung zum Allgemeinen Staubgrenzwert 2014). Für CNT ohne WHO-Faser-Charakter und ihre Agglomerate wurde in Tierversuchen gezeigt, dass bei Überladung der Alveolarmakrophagen entzündliche Vorgänge in der Lunge in Gang gesetzt werden, die bis zu Gewebsveränderungen und Krebs führen können. Dabei wurde für unterschiedliche Nanomaterialien ein direkter Zusammenhang zwischen der verabreichten Volumendosis und der auf die spezifische Agglomeratdichte bezogenen Massendosis festgestellt. Beispielsweise reichte in den Versuchen die spezifische Agglomeratdichte von  $0,1 \text{ g/cm}^3$  bei CNT (Baytubes) bis  $5 \text{ g/cm}^3$  bei Eisenoxid-Mikropartikeln. Im Vergleich zu den Eisenpartikeln würde bei CNT-Agglomeraten bereits ein Fünfzigstel der Massenkonzentration ( $0,05 \text{ mg/m}^3$ ) ausreichen, die für Eisenoxid notwendig wäre ( $2,5 \text{ mg/m}^3$ ), um ein Overload auszulösen. (Pauluhn 2011, 2013).

Insbesondere für CNT ohne WHO-Faser-Charakter ist es von großem Interesse, die Dichte der Agglomerate zu bestimmen, um die Volumendosis oder eine auf die Agglomeratdichte bezogene Massendosis in Experimenten oder bei beruflichen Belastungen abschätzen zu können. Derzeit werden Verfahren entwickelt, mit denen die Dichte von Nanopartikelagglomeraten innerhalb von Aerosolen messtechnisch erfasst werden kann (Broßell et al. 2015). Der Vorteil besteht darin, dass die Agglomeratdichte der Aerosole im Test gemessen werden kann, da sich bei der Generierung des Aerosols im Versuch die Eigenschaften im Vergleich zum jeweiligen Ausgangsmaterial ändern können. Die Charakterisierung allein des Ausgangsmaterials ist oft nicht hilfreich, um die Wirkungsunterschiede bei verschiedenen Nanomaterialien erklären zu können, wie sich auch in einer Inhalationsstudie an Ratten mit verschiedenen Kohlenstoff-Modifikationen (CNT-Agglomerate, Graphen, Graphit-Nanoplättchen und Carbon Black) gezeigt hat (Ma-Hock et al. 2013). Für zukünftige Studien sollte eine genaue Charakterisierung des für den Versuch generierten Aerosols in Bezug auf die Struktur des Nanomaterials durchgeführt werden, weil dann die Beziehung zur Wirkung deutlicher wird.

Entscheidende  
Materialeigenschaften:

Biobeständigkeit, Struktur,  
Agglomeratvolumen,  
Agglomeratdichte, Oberfläche,  
Oberflächenfunktionalität,  
Expositions-dosis

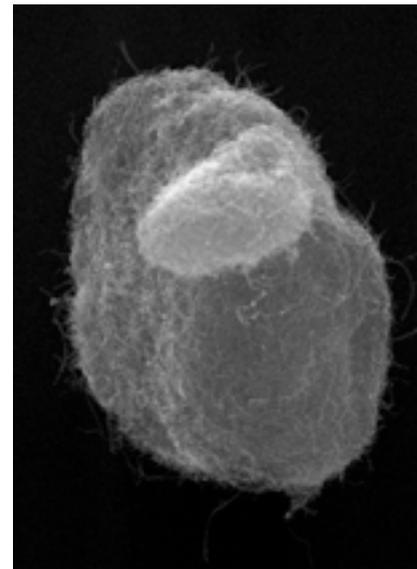
Neben Volumendosis und Massenkonzentration hängt die toxische Wirkung von CNT auch von der Oberflächenfunktionalität und möglichen Verunreinigungen ab. Dies sind vor allem katalytische metallische Bestandteile wie Eisen, Kobalt, Yttrium, Nickel und Molybdän. Diese sind derzeit noch unabdingbar für eine effiziente Produktion von CNT und können nur unter großem Aufwand vollständig entfernt werden (Meyer-Plath 2012). Bei Versuchen an Nagetieren war die Konzentration charakteristischer Biomarker für Entzündung, oxidativen Stress und Zellschädigung umso höher, je mehr Eisen in den CNT enthalten war. Es wurden Zeichen für interstitielle und peribronchiale Entzündung und Nekrose sowie eine höhere Mortalitätsrate bei den Tieren gefunden (Liu et al. 2012).

Pulmonal verabreichte CNT konnten im Tierversuch auch systemische Wirkungen auslösen. Nachgewiesen wurden beispielsweise ein Anstieg von Entzündungsmarkern im Blut, oxidativer Stress im Aortengewebe, gesteigerte Plaquebildung im arteriosklerotischen Mausmodell sowie eine gestörte Fähigkeit der Koronarien, auf erweiternde Medikamente zu reagieren. Als Ursachen wurden Signale von Entzündungsmediatoren und ein neurogener Übertragungsweg diskutiert (NIOSH 2013). Ob diese Ergebnisse auf den Menschen übertragbar sind, kann derzeit noch nicht eingeschätzt werden.

Nach einer inhalativen Exposition von Mäusen mit MWCNT wurden ein Jahr später in den tracheobronchialen Lymphknoten 7 Prozent der Lungenbelastung gefunden, bezogen auf den ersten Tag direkt nach Ende der Exposition. Obwohl 54 Prozent der Lungenbelastung aus Agglomeraten bestand, wurden nur einzelne MWCNT im Zwerchfell in der Brustwand, Leber, Niere, Herz und Gehirn nachgewiesen (im Mittel über 100.000 Fasern pro Gramm Gewebe). Die akkumulierte Faserzahl nahm im Untersuchungszeitraum vom ersten Tag bis zu fast einem Jahr nach Exposition deutlich zu (Mercer et al. 2013a, 2013b).

In ihrer Übersichtsarbeit stellten Liu et al. (2013) die Ergebnisse von Zellversuchen mit CNT zusammen. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass Aggregation und Agglomeration, also die Art der Zusammenlagerung von CNT, das toxische Potenzial wesentlich bestimmen. So führten seilförmig zusammengelagerte CNT mit ihrer größeren Steifigkeit zu ausgeprägterer Zytotoxizität als gut verteilte flexiblere CNT und Asbestfasern gleicher Konzentration (Wick et al. 2007). In Bezug auf die Anzahl der Schichten schienen SWCNT toxischer als MWCNT auf Zellen zu wirken, z. B. beim Entstehen von Nekrose und Degeneration (Jia et al. 2005).

Genotoxische oder kanzerogene Effekte von CNT wurden für SWCNT auch in Versuchen an humanen Zellen nachgewiesen. SWCNT beeinträchtigten die Zellteilung (Mitose) und verursachten dadurch abweichende Chromosomenzahlen (Muller et al. 2009; Sargent et al. 2009, 2011; Kisin et al. 2011, in: NIOSH 2013; Siegrist et al. 2014). Andere In-vitro-Studien mit mehrwandigen CNT (MWCNT) zeigten dagegen keine Hinweise auf Genotoxizität (Wirnitzer et al. 2009; Kim et al. 2011, in: NIOSH 2013).



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines dichten Agglomerats von flexiblen CNT (Durchmesser: 6 µm)

### 5.3 Wirkung auf den Menschen

Die Frage, ob die Wirkung beim Menschen für bestimmte CNT vorausgesagt werden kann, wird gegenwärtig wissenschaftlich diskutiert. Die MAK-Kommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, Pauluhn 2013) schätzte ein, dass die Toxizität von CNT mit der kumulativen Dosis, der Struktur (faserförmig oder geknäulte Zusammenlagerung) und der Oberflächenfunktionalität in Beziehung steht. Hinzu komme der Einfluss durch Verunreinigungen. Bisher könnten demnach aber weder kritische Struktureinheiten der Toxizität definiert werden noch lägen geeignete Tests vor, um zuverlässige allgemeine Indikatoren der Toxizität von unterschiedlichen Materialien zu definieren. Das liegt sowohl an der strukturellen Komplexität von CNT als auch am derzeitigen Fehlen von geeigneten Methoden, die den Mechanismus der Toxizität charakterisieren. Dieses Problem wird dadurch noch verschärft, dass die CNT-Struktur verändert werden muss, damit CNT in Luft oder Flüssigkeiten dispergierbar werden. Das bedeutet, dass neue Struktureinheiten schon durch die spezifischen Prozeduren der Zubereitung im Toxizitätstest erzeugt werden können. Diese Überlegungen machen deutlich, dass allgemeine Risikoindikatoren für CNT derzeit nicht definiert werden können. Von den Autoren des NIOSH (2013) wurde deshalb empfohlen, alle Typen von CNT und CNF als potenziell gesundheitsschädlich beim Einatmen einzustufen, bis die Ergebnisse der Forschung die physiko-chemischen Eigenschaften der CNT und CNF vollständig erklären können.



Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hat ein spezielles industriell gefertigtes CNT mit rigider Faserstruktur und WHO-Faser-Abmessung (MWCNT-7) als „möglicherweise kanzerogen“ für den Menschen, Gruppe 2B, klassifiziert. Alle anderen SWCNT und MWCNT wurden als nicht klassifizierbar in Bezug auf ihre Kanzerogenität für den Menschen kategorisiert (Gruppe 3). Insgesamt wurde die Datenlage als zu uneinheitlich für die verschiedenen CNT eingeschätzt, um generalisierte Aussagen treffen zu können (Grosse et al. 2014).

Die Kommission der Deutschen Gesellschaft für Toxikologie hat für Nanomaterialien eine Einteilung in 3 Kategorien vorgeschlagen. CNT und Nanofasern mit WHO-Faser-Eigenschaften wurden in die 2. Kategorie, die der faserförmigen Nanomaterialien, eingeordnet. Die 1. Kategorie umfasste alle Nanomaterialien mit chemisch vermittelter Toxizität und die 3. Kategorie granuläre biobeständige Nanomaterialien. In die 3. Kategorie wurden auch die biopersistenten Fasern ohne WHO-Faser-Eigenschaften eingruppiert, d. h. Fasern, die zu kurz oder nicht rigide sind, z. B. wenn sie in verklumpter Form auftreten. Für diese ist bei der Wirkung zu beachten, dass entsprechende Faseragglomerate in wesentlich geringerer Dichte vorliegen können als granuläre biobeständige Nanomaterialien. Bei der 2. Kategorie wurde davon ausgegangen, dass biobeständige faserförmige Nanomaterialien nur dann eine asbestartige Wirkung entfalten, wenn bei ihnen Nanofasern mit WHO-Eigenschaften frei vorliegen (Gebel et al. 2014).

In der BekGS 527 wurden CNT ähnlich gruppiert, wobei zusätzlich lösliche Nanomaterialien als erste Gruppe aufgenommen wurden. Den Gruppen zwei bis vier wurden biobeständige Nanomaterialien mit spezifischen toxikologischen Eigenschaften, biobeständige Nanomaterialien ohne spezifische toxikologische Eigenschaften und

biobeständige faserförmige Nanomaterialien zugeordnet. Für faserförmige Nanomaterialien ohne WHO-Faser-Eigenschaften wurde eine Einzelfallprüfung empfohlen. Bei rigiden CNT, die in ihren Abmessungen der WHO-Faser-Definition entsprechen, muss vom Faserprinzip und den Risikowerten von Asbest ausgegangen werden.

## 5.4 Grenzwerte

Rechtsverbindliche Grenzwerte für Nanomaterialien wurden in Deutschland bisher nicht festgelegt. Prinzipiell müssen die Arbeitsplatzgrenzwerte eingehalten werden, die für gefährliche Stoffe in der TRGS 900 veröffentlicht sind, sofern diese Stoffe in Nanomaterialien vorkommen oder aus ihnen bestehen. Dies bedeutet allerdings im Umkehrschluss nicht, dass bei Einhaltung die gesundheitliche Unbedenklichkeit unter Hinweis auf die TRGS 900 gesichert ist, weil die dort niedergelegten Grenzwerte nicht für Nanomaterialien gelten. Das erklärt sich aus der höheren Bioverfügbarkeit von Nanomaterialien angesichts ihrer größeren spezifischen Oberfläche im Vergleich zu größeren Partikeln (BekGS 527, 2013). Granuläre biobeständige Nanomaterialien haben wegen ihres größeren Agglomeratvolumens bei gleicher Massenkonzentration eine stärkere Wirkung als größere Partikel. Bei CNT kommen noch zusätzliche Wirkungsfaktoren durch ihre faserförmige Struktur hinzu.

Von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) wurde eine vorläufige Faserkonzentration von 10.000 Fasern/m<sup>3</sup> für CNT vorgeschlagen, bei denen WHO-Faser-Eigenschaften nicht ausgeschlossen werden können. Dieser Vorschlag basiert auf der Exposition-Risiko-Beziehung für Asbest (TRGS 910, 2014; ehem. BekGS 910, 2012). Gleichzeitig wurde darauf hingewiesen, dass es derzeit an geeigneten Sammelmethode für die betriebliche Überwachung des genannten Wertes und an entsprechenden Analysemethoden bzw. Kriterien zur Auszählung der Fasern sowie der Bestimmung der Faserkonzentration mangelt (DGUV 2014). Die Anzahl von Asbestfasern wird traditionell im Lichtmikroskop bestimmt, allerdings sind CNT auf diese Weise nicht detektierbar. Auch das Rasterelektronenmikroskopische Verfahren zum Messen von Fasern eignet sich nicht, weil es sich nur auf Fasern außerhalb des Nanobereiches bezieht (VDI 3492, 2013; BGI/GUV-I 505-46, 2014). Daher müssen neue Methoden zum Messen von faserförmigen Nanomaterialien entwickelt und validiert werden.

Die Anzahlmessung ist insbesondere für einzeln vorkommende CNT mit WHO-Faser-Abmessung erforderlich. Um die Expositionsdosis ermitteln zu können, gelangt diese Methode für CNT-Strukturen ohne WHO-Faser-Charakteristik nach Erfahrungen aus Tierversuchen an ihre Grenzen. Wegen der Overload-Wirkung von partikelförmigen Faseragglomeraten sind Maße, die die Volumendosis (Pauluhn 2011) oder ggf. die Oberflächendosis (Donaldson et al. 2006) beschreiben, besser geeignet.

Das NIOSH (2013) hat auf der Basis von experimentellen Untersuchungen an Tieren einen Expositionsgrenzwert für CNT abgeleitet. Grundlage waren Studien, in denen deutliche Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei nicht-kanzerogenen Lungeneffekten nachweisbar waren. Dabei lagen für die als Massenkonzentration gemessene Dosis die aussagefähigsten und am besten vergleichbaren Daten vor. Bezogen auf ein Arbeits-



leben von 45 Jahren mit CNT-Exposition ließ sich aus diesen Studien ein Expositionsgrenzwert von 1 Mikrogramm pro Kubikmeter ableiten. Dieser Grenzwert bezieht sich auf den alveolengängigen elementaren Kohlenstoff und entspricht darüber hinaus der analytischen Grenze einer von NIOSH empfohlenen Nachweismethode. Bei dieser Konzentration wurde das Risiko für das Entstehen von leichten Frühformen einer Entzündung in der Lunge auf 0,5 bis 16 Prozent bezogen auf ein Arbeitsleben abgeschätzt.

Derartig niedrige Konzentrationen können am Arbeitsplatz allerdings nur gemessen werden, wenn keine weiteren produktionsbedingten Quellen für elementaren Kohlenstoff vorhanden sind, da Umgebungskonzentrationen in der Regel unter 1 Mikrogramm pro Kubikmeter liegen. Dieser Grenzwert unterscheidet nicht nach CNT mit oder ohne WHO-Fasereigenschaften.

Der Ausschuss für Gefahrstoffe stellte klar, dass es sich bei faserförmigen Nanomaterialien in der Regel nicht um granuläre biobeständige (GBS) Nanomaterialien handelt und daher empfohlene Orientierungswerte für Nano-GBS am Arbeitsplatz keine Anwendung finden (AGS 2015).



## 6 Besondere Schutzmaßnahmen – Ergänzung zur Frage 4.4



Nach BekGS 527 müssen – neben den für alle Nanomaterialien geltenden Forderungen – zusätzlich besondere Schutzmaßnahmen für faserförmige Nanomaterialien eingehalten werden. Wenn bei der abtragenden Bearbeitung von Erzeugnissen, die biobeständige faserförmige Nanomaterialien enthalten, die Freisetzung von Fasern nicht auszuschließen ist, sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich. In diesem Fall müssen – auch bei Verwendung einer wirksamen Absaugung – zusätzlich persönliche Schutzausrüstungen getragen werden.

Bei der Verwendung von Filtergeräten für den Atemschutz können Halbmasken mit P3-Filter oder partikelfiltrierende Halbmasken FFP3 eingesetzt werden. Die BekGS 527 empfiehlt für länger andauernde Tätigkeiten mit biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien aus ergonomischer Sicht gebläseunterstützte Halb- oder Vollmasken mit Partikelfilter TM2P bzw. TM3P.

Besondere Anforderungen gelten für biobeständige faserförmige Nanomaterialien bei der Luftrückführung nach TRGS 560. Bei Anlagen und Geräten, z. B. Entstauber zur Luftrückführung, muss der Durchlassgrad der Filteranlage bzw. des Gerätes (nicht nur des Filtermaterials) 0,005 Prozent unterschreiten.

Arbeitsbereiche, in denen Tätigkeiten mit biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien ausgeführt werden, sind mit dem Verbotssymbol D-P 006 „Zutritt für Unbefugte verboten“ zu kennzeichnen und es ist darauf zu achten, dass nur unterwiesene Personen Zugang haben.

Nanomaterialien, deren Gefährdungspotenzial noch nicht ausreichend toxikologisch geprüft ist, sind nach TRGS 201 zu kennzeichnen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass es sich um die nanopartikuläre Form des Materials bzw. um eine Substanz mit teilweise noch unbekanntem Eigenschaften handelt. Bei einem Nanomaterial, das nur aus einem Stoff besteht, würde nach TRGS 201 die Kennzeichnung „Achtung – noch nicht vollständig geprüfter Stoff“ und bei einem Stoffgemisch „Achtung – dieses Gemisch enthält einen noch nicht vollständig geprüften Stoff“ lauten.

Bei Tätigkeiten mit biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien, die den WHO-Faserkriterien entsprechen oder für die bisher keine morphologischen Prüfungen vorliegen, sollten die Faserkonzentrationen in der Luft am Arbeitsplatz bestimmt werden.

Sind Nanomaterialien als gefährlich eingestuft, sollten sie zur Entsorgung in einem nach gesetzlichen Vorschriften gekennzeichneten dicht verschließbaren Behälter gesammelt werden (z. B. in einem PE-Spannringdeckelfass).

Für Tätigkeiten unter Laborbedingungen gibt die DGUV-Information 213-853 „Nanomaterialien im Labor“ (2015) praxisnahe Hinweise. Demnach können insbesondere bei Tätigkeiten mit biobeständigen faserförmigen Nanomaterialien Gloveboxen, Glovebags oder geschlossene Apparaturen eingesetzt werden, um eine Exposition zu vermeiden.



# Glossar

## **Agglomerat**

Zusammenballung von Nanoobjekten oder -aggregaten oder ihrer Mischung, die durch schwache Wechselwirkungen zusammengehalten wird. Die Agglomeratoberfläche entspricht näherungsweise der Summe der Oberflächen seiner einzelnen Bestandteile (BekGS 527, 2013).

## **Aggregat**

Besteht aus Nanoobjekten, die durch starke Bindungskräfte zusammengehalten werden oder verschmolzen sind. Seine äußere Oberfläche kann deutlich kleiner sein als die Summe der Oberflächen seiner einzelnen Bestandteile (BekGS 527, 2013).

## **Alveolarmakrophagen**

Bewegliche Zellen, die auf der Oberfläche der Lungenbläschen (Alveolen) Bakterien, totes Material und Fremdpartikel (z. B. Staubpartikel) aufnehmen und im Zellinnern abbauen (phagozytieren). Sie dienen der immunologischen Abwehr der Lunge.

## **Biopersistenz, Biobeständigkeit**

Eigenschaft von Nanomaterialien, sich in der Lungen- oder Gewebeflüssigkeit nicht oder wenig aufzulösen. Mit zunehmender Auflösungs geschwindigkeit nimmt die Biobeständigkeit ab.

## **CNT, Kohlenstoffnanoröhre**

Röhren- bzw. faserförmiges Nanomaterial (englisch: carbon nanotubes). Es leitet sich von der Grundstruktur eines Kohlenstoffplättchens ab. Im Vergleich zum Durchmesser kann die Länge sehr groß sein. CNT können einwandig (SWCNT) und mehrwandig (MWCNT) gestaltet sein.

## **CNF, Kohlenstoffnanofaser**

Faserförmiges Nanomaterial aus Kohlenstoff (englisch: carbon nanofibre).

## **CNT-Matrix**

Stoff (z. B. Kunststoff), in den Kohlenstoffnanoröhren eingebettet werden, um die mechanischen Eigenschaften des so gebildeten Faserverbundstoffes zu verbessern.

## **Degeneration**

Funktionelle und/oder morphologische Veränderungen einer Zelle oder eines Gewebes, die zur Verminderung der physiologischen Leistungsfähigkeit und nachfolgend zu Erkrankung und vorzeitiger Alterung führen können.

**Exposition**

Ausgesetztsein von Lebewesen gegenüber schädigenden Umwelteinflüssen, z. B. toxischen chemischen Elementen und Verbindungen oder physikalischen Effekten wie Hitze, Lärm oder Strahlung.

**Fibrotisch, Fibrose**

Gewebeveränderung, die durch eine gesteigerte Vermehrung von Bindegewebszellen gekennzeichnet ist und zu krankhafter Gewebeerhärtung bzw. -verhärtung führen kann.

**Genotoxisch, Genotoxizität**

Wirkungen von chemischen Stoffen, die Änderungen im Erbgut von Zellen auslösen.

**Granuläre biobeständige Nanomaterialien, GBS-Nanomaterialien**

Partikelförmige unlösliche oder schwer lösliche Nanomaterialien ohne stoffspezifische toxische Wirkung (d. h. nicht krebserzeugend, fibrogen, allergisierend, genotoxisch oder sonstig systemisch-toxisch).

**Granulome**

Knötchenförmige Gewebeneubildungen, die charakteristische Entzündungszellen (Makrophagen u. a.) enthalten. Ein Granulom entsteht oft als Reaktion auf einen chronischen Entzündungsreiz.

**Injiziert, Injektion**

Einbringen eines flüssigen Wirkstoffes mit Hilfe einer Spritze in den Körper.

**Intratracheale Instillation**

Einträufeln (lat. instillare) eines flüssigen Wirkstoffes in die Luftröhre.

**Kanzerogen, Kanzerogenität**

Krebserzeugende Wirkung eines Stoffes.

**Krokydolith**

Blauasbest, natürlich vorkommendes faserförmiges Silikat-Mineral. Besteht aus gesundheitsgefährdenden Fasern mit WHO-Fasereigenschaften. Kann nach Inhalation beim Menschen Asbestose, Lungenkrebs und Mesotheliom erzeugen.

**Lungen-Clearance**

Reinigungsfunktion der Lunge. Beinhaltet die Reinigung über die Atemwege mithilfe der Flimmerhärchen des Schleimhautepithels (mukoziliäre Clearance) und über die Lungenbläschen mithilfe der Makrophagen (alveoläre Clearance).

**MAK-Wert**

Die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) gibt die maximal zulässige Konzentration eines Stoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz an, bei der kein Gesundheitsschaden zu erwarten ist. Sie wird auf eine Lebensarbeitszeit von 40 Jahren mit einem 8-Stunden-Tag bzw. einer 40-Stunden-Woche bezogen.

**MAK-Kommission der DFG**

Abkürzung für Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Sie gibt jährlich die MAK- und BAT-Werte-Liste heraus, in der die Maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen und Biologischen Arbeitsstoff-Toleranzwerte (BAT) für Stoffe am Arbeitsplatz auf der Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen angegeben werden.

**Mesothel**

Seröse Haut, die aus 2 Schichten besteht. Eine zur Körperhöhle gerichtete äußere Schicht der Auskleidung der Brusthöhle, Bauchhöhle und des Herzbeutels (Lamina parietalis) und eine Schicht, die die Organe überzieht (Lamina visceralis). Sie ist glänzend, durchsichtig und von einem Flüssigkeitsfilm für eine gute Verschiebbarkeit der inneren Organe bedeckt.

**Mesothelproliferation**

Wachstum und Vermehrung von Mesothelzellen.

**Mesotheliom (malignes Pleuramesotheliom)**

Bösartiger Tumor des Brustfells (Pleura), der von mesothelialen bzw. submesothelialen Zellen der Pleura ausgeht und in enger Beziehung zu einer stattgehabten Asbestexposition steht.

**MWCNT**

Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhre (englisch: multi-walled carbon nanotube).

**Nanomaterial**

Ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält und bei dem mindestens 50 Prozent der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben (EU-Kommission 2011).

**Nanoobjekte**

Materialien mit mindestens einem Außenmaß (Länge, Breite, Höhe) von etwa 1 bis 100 nm. Sie umfassen Nanopartikel, Nanofasern oder Nanoplättchen.

**Nekrose**

Tod einer Zelle durch Schädigung der Zellstruktur, z. B. bei Kontakt mit Schadstoffen.

**Overload-Theorie**

Sie besagt, dass nach Inhalation hoher Konzentrationen von schwer löslichen nicht-toxischen Partikeln (GBS) die Reinigungsfunktion der Lunge (Clearance) unterdrückt wird und es zur zunehmenden Ablagerung der Partikel im Atemtrakt und zur Überladung und Schädigung der Alveolarmakrophagen kommt. Dadurch werden Entzündungsreaktionen in der Lunge in Gang gesetzt, die bis zur Entstehung von Krebs führen können. In Tierversuchen wurde ein Overload durch partikelförmige Agglomerate aus Nanomaterial schon bei einer relativ geringen Massenkonzentration ausgelöst. Pathophysiologisch werden dabei die geringe Agglomeratdichte und somit die auf die Masse bezogene relativ große Volumendosis der Agglomerate als ursächlich angesehen.

### **Pharyngeale Aspiration**

Im Tierversuch Verabreichung einer Wirkstoffdosis in den Rachen mit dem Ziel, über Transportvorgänge in die tieferen Atemwege eine Lungenwirkung hervorzurufen.

### **Pleura**

Das Brustfell ist eine dünne seröse Haut in der Brusthöhle. Es überzieht die Lungen (Pleura pulmonalis) und kleidet die Brusthöhle von innen aus (Pleura parietalis). Die Pleura ist eine gleitende Verschiebeschicht für die Lungenbewegungen.

### **SWCNT**

Einwandige Kohlenstoffnanoröhre (englisch: single-walled carbon nanotube).

### **WHO-Fasern**

Fasern mit einer Länge von größer als 5  $\mu\text{m}$ , einem Durchmesser kleiner als 3  $\mu\text{m}$  und einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von größer als 3:1.

### **Zytotoxizität**

Toxische Wirkung auf Zellen.

# Literatur

**Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (2013).** Zugriff am 18.06.2015 unter:  
[www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf)

**Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (2015):** Beurteilungsmaßstab für technisch gezielt hergestellte ultrafeine Stäube aus alveolengängigen granulären biobeständigen Stäuben ohne signifikante spezifische Toxizität (nanoskalige GBS) (A-Staub). Stand: Mai 2015. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/AGS/AGS-zu-Nanomaterialien.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/AGS/AGS-zu-Nanomaterialien.html)

**Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (2011):** Bericht des AK Nanomaterialien des UA I Gefahrstoffmanagement an den AGS. Wissensstand bezüglich möglicher Wirkprinzipien und Gesundheitsgefahren durch Exposition mit arbeitsplatzrelevanten Nanomaterialien. Stand 24.03.2011. Zugriff am 18.06.2015 unter:  
[www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/AGS/AGS-zu-Nanomaterialien.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/AGS/AGS-zu-Nanomaterialien.html)

**Brock TH, Berges M, Pelzer T, Bachmann V, Plitzko S, Wolf T, Engel S, Götz U, Ragot J, Voetz M, Kund K, Klages-Büchner S, Swain K, Cannon P, Knobl S, Reisinger M, Billerbeck U, Stintz M, Heinemann M, Asbach C, Kuhlbusch T, Reuter M, Schröter N, Eichstädt D, Rommert A, Fischer R (2012):** Ein mehrstufiger Ansatz zur Expositionsermittlung und -bewertung nanoskaliger Aerosole, die aus synthetischen Nanomaterialien in die Luft am Arbeitsplatz freigesetzt werden. Vorgelegt von: Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Technische Universität Dresden (TUD) Bereich Luftreinhaltung & Nachhaltige Nanotechnologie, Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA), Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI). Zugriff am 18.06.2015 unter:  
[www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Messung.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Messung.html)

**Begründung zum Allgemeinen Staubgrenzwert (2014/2001) in der TRGS 900.** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/900/900-allgemeiner-staubgrenzwert.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/900/900-allgemeiner-staubgrenzwert.pdf?__blob=publicationFile)

**Bekanntmachung zu Gefahrstoffen 527 „Hergestellte Nanomaterialien“ (BekGS 527) (2013).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/Bekanntmachung-527.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/Bekanntmachung-527.html)

**BGI/GUV-I 505-46 Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentrationen von lungengängigen anorganischen Fasern in Arbeitsbereichen – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren (2014).** Zugriff am 18.06.2015 unter:

<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-505-46.pdf>

**Broßell D, Valenti M, Bezantakos S, Biskos G, Schmidt-Ott A (2015):** The nanoparticle mass analyser (nano-PMA): Development, characterisation and application for determining the mass, apparent density and shape of particles with masses within the zg-range. *Aerosol Science and Technology*, 4 (7): 495–507. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2015.1045964](http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2015.1045964)

**Bundesanstalt für Arbeitsschutz- und Arbeitsmedizin (BAuA):** Nanotechnologie. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/nanotechnologie](http://www.baua.de/nanotechnologie)

**Bundesdatenschutzgesetz.** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bdsg\\_1990/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bdsg_1990/gesamt.pdf)

**CarboLifeCycle.** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.inno-cnt.de/de/projekte\\_carbolifecycle.php](http://www.inno-cnt.de/de/projekte_carbolifecycle.php)

**Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (2012):** Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Fraktion) (Granuläre biobeständige Stäube (GBS)) [MAK Value Documentation in German language] [The MAK Collection for Occupational Health and Safety]. DOI: 10.1002/3527600418.mbo23ostwdo053

**DGUV:** Nanopartikel am Arbeitsplatz / Beurteilung von Schutzmaßnahmen. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Nanopartikel-am-Arbeitsplatz/Beurteilung-von-Schutzmaßnahmen/index.jsp](http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Nanopartikel-am-Arbeitsplatz/Beurteilung-von-Schutzmaßnahmen/index.jsp)

**DGUV-Information 213-853 Nanomaterialien im Labor (2015)** Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV). Zugriff am 18.06.2015 unter: [http://publikationen.dguv.de/dguv/udt\\_dguv\\_main.aspx?FDOCUID=26368](http://publikationen.dguv.de/dguv/udt_dguv_main.aspx?FDOCUID=26368)

**Donaldson K, Poland CA, Murphy FA, MacFarlane M, Chernova T, Schinwald A (2013):** Pulmonary toxicity of carbon nanotubes and asbestos – similarities and differences. *Adv Drug Deliv Rev* 65: 2078–2086.

**Donaldson K, Murphy FA, Duffin R, Poland CA (2010):** Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma. *Part Fibre Toxicol* 7: 5.

**Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrest G and Alexander A (2006):** Carbon Nanotubes: A review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol Sci* 92(1): 5–22. Zugriff am 18.06.2015 unter: <http://toxsci.oxfordjournals.org/content/92/1/5.full.pdf+html>

**Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz.** Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Verband der Chemischen Industrie, 2012: 25–29. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd4.html](http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd4.html)

**EU-Kommission (2011):** Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU), L 275/38 Amtsblatt der Europäischen Union 20.10.2011. Zugriff am 18.06.2015 unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32011Ho696:DE:NOT>

**Gebel T, Foth H, Damm G, Freyberger A, Kramer PJ, Lilienblum W, Röhl C, Schupp T, Weiss C, Wollin KM, Hengstler JG (2014):** Manufactured nanomaterials: categorization and approaches to hazard assessment. Arch Toxicol 88: 2191–2211. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25326817](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25326817)

**Gefahrstoffverordnung Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (GefStoffV) (2013).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/ Gefahrstoffverordnung](http://www.baua.de/ Gefahrstoffverordnung)

**Grosse Y, Loomis D, Guyton KZ, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, Scocciati C, Mattock H, Straif K [on behalf of the International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group] (2014):** Carcinogenicity of fluoro-edenite, silicon carbide fibres and whiskers, and carbon nanotubes. Lancet Oncol 15(13): 1427–1428. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045%2814%2971109-X/fulltext#article\\_upsell](http://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045%2814%2971109-X/fulltext#article_upsell)

**Hubbs AF, Mercer RR, Coad JE, Battelli LA, Willard P, Sriram K, Wolfarth M, Castranova V, Porter D (2009):** Persistent pulmonary inflammation, airway mucous metaplasia and migration of multi-walled carbon nanotubes from the lung after subchronic exposure. The Toxicologist 108: A2193.

**Jia G, Wang H, Yan L, Wang X, Pei R, Yan T, Zhao Y, Guo X (2005):** Cytotoxicity of carbon nanomaterials: single-wall nanotube, multi-wall nanotube and fullerene. Environ Sci Technol 39(5): 1378–83.

**Kuhlbusch TAJ, Asbach C, Fissan H, Göhler D, Stintz M (2011):** Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. Part Fibre Toxicol 8:22. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.particleandfibretoxicology.com/content/8/1/22](http://www.particleandfibretoxicology.com/content/8/1/22)

**Liu Y, Zhao Y, Sun B, Chen C (2013):** Understanding the toxicity of carbon nanotubes. Acc Chem Res 46(3): 702–13.

**Ma-Hock L, Strauss V, Treumann S, Küttler K, Wohlleben W, Hofmann T, Gröters S, Wiench K, van Ravenzwaay B, Landsiedel R (2013):** Comparative inhalation toxicity of multi-wall carbon nanotubes, graphene, graphite nanoplatelets and low surface carbon black. Part Fibre Toxicol 10: 23.

**Ma-Hock L, Treumann S, Strauss V, Brill S, Luizi F, Mertler M, Wiench K, Gamer AO, van Ravenzwaay B, Landsiedel R (2009):** Inhalation toxicity of multiwall carbon nanotubes in rats exposed for 3 months. *Toxicol Sci* 112(2): 468–481.

**Mercer RR, Scabilloni JF, Hubbs AF, Battelli LA, McKinney W, Friend S, Wolfarth MG, Andrew M, Castranova V, Porter DW (2013a):** Distribution and fibrotic response following inhalation exposure to multi-walled carbon nanotubes. *Part Fibre Toxicol* 10: 33. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.particleandfibretoxicology.com/content/10/1/33](http://www.particleandfibretoxicology.com/content/10/1/33)

**Mercer RR, Scabilloni JF, Hubbs AF, Wang L, Battelli LA, McKinney W, Castranova V, Porter DW (2013b):** Extrapulmonary transport of MWCNT following inhalation exposure. *Part Fibre Toxicol* 10: 38. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.particleandfibretoxicology.com/content/10/1/38](http://www.particleandfibretoxicology.com/content/10/1/38)

**Mercer RR, Hubbs AF, Scabilloni JF, Wang L, Battelli LA, Schwegler-Berry D, Castranova V, Porter DW (2010):** Distribution and persistence of pleural penetrations by multi-walled carbon nanotubes. *Particle Fibre Toxicol* 7(28): 1–11.

**Meyer-Plath A (2012):** Plasma-thermal purification and annealing of carbon nanotubes. *Carbon* 50(10): 3934–3942. Zugriff am 18.06.2015 unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2012.04.049>

**Muller J, Delos M, Panin N, Rabolli V, Huaux F, Lison D (2009):** Absence of carcinogenic response to multiwall carbon nanotubes in 2-year bioassay in the peritoneal cavity of the rat. *Toxicol Sci* 110(2): 442–448.

**Murphy FA, Poland CA, Duffin R, Al-Jamal KT, Ali-Boucetta H, Nunes A, Byrne F, Prina-Mello A, Volkov Y, Li S, Mather SJ, Bianco A, Prato M, Macnee W, Wallace WA, Kostarelos K, Donaldson K (2011):** Length-dependent retention of carbon nanotubes in the pleural space of mice initiates sustained inflammation and progressive fibrosis on the parietal pleura. *Am J Pathol* 17(6): 2587–2600.

**Murr LE, Soto KF, Garza KM, Guerrero PA, Martinez F, Esquivel EV, Ramirez DA, Shi Y, Bang JJ, Venzor J (2006):** Combustion-generated nanoparticulates in the El Paso, TX, USA / Juarez, Mexico Metroplex: their comparative characterization and potential for adverse health effects. *Int J Environ Res Public Health* 3(1): 48–66.

**Nagai H, Okazaki Y, Chew SH, Misawa N, Yamashita Y, Akatsuk S, Ishihara T, Yamashita K, Yoshikawa Y, Yasui H, Jiang L, Ohara H, Takahashi T, Ichihara G, Kostarelos K, Miyata Y, Shinohara H, Toyokuni S (2011):** Diameter and rigidity of multiwalled carbon nanotubes are critical factors in mesothelial injury and carcinogenesis. *PNAS* 108(49): 1–9. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3241783/pdf/pnas.201110013.pdf](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3241783/pdf/pnas.201110013.pdf)

**nanoIndEx – Expositionsbestimmung gegenüber luftgetragenen Nanomaterialien mithilfe von personengetragenen Messgeräten.** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.nanoindex.eu](http://www.nanoindex.eu)

**NanoKommission (2011): Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung 2011.** Abschlussbericht der NanoKommission. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/nanodialog](http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/nanotechnologie/nanodialog)

**Nanomaterialien und REACH – Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden (2013).** UBA, BfR, BAuA. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.reach-clp-biozid-helpdesk.de](http://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de)

**NANoREG – A common European approach to the regulatory testing of Manufactured Nanomaterials.** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.nanoreg.eu](http://www.nanoreg.eu)

**Nasterlack M, Groneberg D (2011): Nanopartikel, Ultrafeine Stäube.**  
**In: Triebig G, Kentner M, Schiele R: (Hrsg.): Arbeitsmedizin – Handbuch für Theorie und Praxis, 2. Auflage: 602–613.** Gentner, Stuttgart.

**National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (2013):** Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers. Current Intelligence Bulletin 65. DHHS (NIOSH) Publication No. 2013-145. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/pdfs/2013-145.pdf](http://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/pdfs/2013-145.pdf)

**Pauluhn J (2013):** Common denominators of carbon nanotubes. In: Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area. Nanomaterial (DFG). WILEY-VCH, Weinheim: 68–83.

**Pauluhn J (2011):** Poorly soluble particulates: Searching for a unifying denominator of nanoparticles and fine particles for DNEL estimation. Toxicology 279: 176–188.

**Pauluhn J (2010):** Multi-walled carbon nanotubes (Baytubes): approach for derivation of occupational exposure limit. Regul Toxicol Pharmacol 57: 78–89.

**Plitzko S, Thim C, Bachmann V (2013a):** Zweite Fragebogenaktion zu Aspekten des Arbeitsschutzes bei der Herstellung und bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien in Deutschland. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 73(1/2): 7–13. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/artikel33.html](http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/artikel33.html)

**Plitzko S, Dziurawitz N, Thim C, Asbach C, Kaminski H, Voetz M, Goetz U, Dahmann D (2013b):** Messung der inhalativen Exposition gegenüber Nanomaterialien – Möglichkeiten und Grenzen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 73(7–8): 295–301. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.gefahrstoffe.de/gest/currentarticle.php?data\[article\\_id\]=74184](http://www.gefahrstoffe.de/gest/currentarticle.php?data[article_id]=74184)

**Plitzko S (2009):** Workplace exposure to engineered nanoparticles. Inhal Toxicol 21, Suppl. 1: 25–9. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19558230](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19558230)

**Poland CA, Duffin R, Kinloch I, Maynard A, Wallace WA, Seaton A, Stone V, Brown S, Macnee W, Donaldson K (2008):** Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature nanotechnology* 3: 423–428.

**Porter DW, Hubbs AF, Chen BT, McKinney W, Mercer RR, Wolfarth MG, Battelli L, Wu N, Sriram K, Leonard S, Andrew M, Willard P, Tsuruoka S, Endo M, Tsukada T, Munekane F, Frazer DG, Castranova V (2013):** Acute pulmonary dose-responses to inhaled multi-walled carbon nanotubes. *Nanotoxicology* 7(7): 1179–1194.

**Porter DW, Hubbs AF, Mercer RR, Wu N, Wolfarth MG, Sriram K, Leonard SS, Battelli L, Schwegler-Berry D, Friend S, Andrew M, Chen BT, Tsuruoka S, Endo M, Castranova V (2010):** Mouse pulmonary dose- and time course-responses induced by exposure to multi-walled carbon nanotubes. *Toxicology* 269(2–3): 136–147.

**Rittinghausen S, Hackbarth A, Creutzenberg O, Ernst H, Heinrich U, Leonhardt A, Schaudien D (2014):** The carcinogenic effect of various multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) after intraperitoneal injection in rats. *Part Fibre Toxicol* 11(1): 59. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25410479](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25410479)

**Rydman E, Catalán J, Nymark P, Palomäki J, Norppa H, Alenius H, Koivisto J, Wolff H, Hämeri K, Pylkkänen L, Järventaus H, Suhonen S, Siivola K, Tuomi T, Järvelä M, Vanhala E, Rantala J, Vippola M, Savolainen K (2013):** Evaluation of the health effects of carbon nanotubes. Final Report on Project Number 109137 of the Finnish Work Environment Fund.

**Siegrist KJ, Reynolds SH, Kashon ML, Lowry DT, Dong C, Hubbs AF, Young SH, Salisbury JL, Porter DW, Benkovic SA, McCawley M, Keane MJ, Mastovich JT, Bunker KL, Cena LG, Sparrow MC, Sturgeon JL, Dinu CZ, Sargent LM (2014):** Genotoxicity of multi-walled carbon nanotubes at occupationally relevant doses. *Part Fibre Toxicol* 11(1): 6. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.particleandfibretoxicology.com/content/11/1/6](http://www.particleandfibretoxicology.com/content/11/1/6)

**Takagi A, Hirose A, Nishimura T, Fukumori N, Ogata A, Ohashi N, Kitajima S, Kanno J (2008):** Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J Toxicol Sci* 33(1): 105–116.

**TRGS 201 „Einstufung und Kennzeichnung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“ (2011).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-201.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-201.html)

**TRGS 560 „Luftrückführung bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden, erbgutverändernden und fruchtbarkeitsgefährdenden Stäuben“ (2012).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-560.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-560.html)

**TRGS 910 „Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen“ (2014).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-910.html](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-910.html)

**Verein Deutscher Ingenieure (2013):** VDI 3492: 2013–06. Technische Regel. Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Immissionen – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren.

Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.vdi.de/technik/richtlinien/richtliniendetails/?tx\\_wmdbvdirilisearch\\_pi1\[suid\]=93952&cHash=d32412a7d28d85d9233da18ef36a6b73](http://www.vdi.de/technik/richtlinien/richtliniendetails/?tx_wmdbvdirilisearch_pi1[suid]=93952&cHash=d32412a7d28d85d9233da18ef36a6b73)

**Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) (2014).** Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbmedvv/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbmedvv/gesamt.pdf)

**Wick P, Manser P, Limbach LK, Dettlaff-Weglikowska U, Krumeich F, Roth S, Stark WJ, Bruinink A (2007):** The degree and kind of agglomeration affect carbon nanotube cytotoxicity. *Toxicol Lett* 168(2): 121–31. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17169512](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17169512)

**Wohlleben W, Ma-Hock L, Boyko V, Cox G, Egenolf H, Freiburger H, Hinrichsen B, Hirth S, Landsiedel R (2013):** Nanospecific Guidance in REACH: A comparative physical-chemical characterization of 15 materials with methodical correlations. *J Ceram Sci Tech* 04(02): 93–104.

**Xu J, Futakuchi M, Shimizu H, Alexander DB, Yanagihara K, Fukamachi K, Suzui M, Kanno J, Hirose A, Ogata A, Sakamoto Y, Nakae D, Omori T, Tsuda H (2012):** Multi-walled carbon nanotubes translocate into the pleural cavity and induce visceral mesothelial proliferation in rats. *Cancer Sci* 103 (12): 2045–2050. Zugriff am 18.06.2015 unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Xu+J%2C+Futakuchi+M%2C+Shimizu+H%2C+Alexander+DB+2012](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Xu+J%2C+Futakuchi+M%2C+Shimizu+H%2C+Alexander+DB+2012)

## Impressum

### Arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung bei Tätigkeiten mit Kohlenstoffnanoröhren (CNT)

Fragen und Antworten

#### Herausgeber:

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Friedrich-Henkel-Weg 1–25

D-44149 Dortmund

Postanschrift: Postfach 17 02 02, D-44061 Dortmund

Telefon: +49 (0) 231 9071-2071

Telefax: +49 (0) 231 9071-2070

E-Mail: [info-zentrum@baua.bund.de](mailto:info-zentrum@baua.bund.de)

Internet: [www.baua.de](http://www.baua.de)

#### Autorin:

Dr. Gabriele Lotz

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

#### Textredaktion:

KONTEXT, Dortmund

Dr. Andrea Thalmann

Stephan Imhof

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

**Grafik:** eckedesign, Berlin

**Fotos:** Titel: Savas Keskiner/iStock; S. 3: skynesher/iStock; S. 5: BAuA, Fachgruppe 4.5, Nico Dziurowitz und Carmen Thim; S. 6: Simfo/iStock, Molekuul/iStock;  
S. 7: Dr. Asmus Meyer-Plath; S. 9: twilightproductions/iStock, Nico Dziurowitz und Carmen Thim; S. 12: aycatcher/iStock, Fotoagentur FOX, Uwe Völkner, Köln/Lindlar;  
S. 14: BAuA, Fachgruppe 4.5, Nico Dziurowitz und Carmen Thim; S. 15: lozanona/iStock; S. 17: BAuA, Fachgruppe 4.5, Nico Dziurowitz und Carmen Thim;  
S. 18: mediaphotos/iStock; S. 19: Avid Creative, Inc./iStock; S. 20: Ugurhan Betin/iStock;  
S. 21: tmcnem/iStock; S. 22: Savas Keskiner/iStock; Grafik S. 4/8/10 Leonid Andronov/123RF

Abdruck und sonstige Wiedergabe, auch auszugsweise, ist unter Angabe der Quelle ausdrücklich gestattet.

Haftungsansprüche materieller oder ideeller Art gegen die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der angebotenen Informationen beziehungsweise durch die Nutzung fehlerhafter und unvollständiger Informationen verursacht werden, sind grundsätzlich ausgeschlossen, es sei denn, sie sind nachweislich auf vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verschulden unseres Hauses zurückzuführen.

ISBN: 978-3-88261-161-8

1. Auflage, Oktober 2015



[www.baua.de/dok/6940854](http://www.baua.de/dok/6940854)

**baaa:**  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz  
und Arbeitsmedizin