

Umweltforschungsplan  
des Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 205 61 220

## Synthetische Nanopartikel

Blick auf Umwelt- und Gesundheitsaspekte



von

**iku** GmbH, Dortmund

IM AUFTRAG  
DES UMWELTBUNDESAMTES

August 2005

## **Impressum**

Stefan Löchtefeld

Unter Mitarbeit von Ann-Kathrin Kühr und Dr. Frank Claus

iku GmbH

Olpe 39, 44135 Dortmund

Tel. 02 31-3 18 91, Fax 02 31-3 18 94

[www.iku-gmbh.de](http://www.iku-gmbh.de)    [loechtefeld@iku-gmbh.de](mailto:loechtefeld@iku-gmbh.de)

[www.dialog-nanopartikel.de](http://www.dialog-nanopartikel.de)

Das Vorhaben „Ermittlung und Bewertung der Umwelt- und Gesundheitsgefahren durch Nanopartikel“ wird im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplan – Förderkennzeichen 205 61 220 erstellt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit finanziert.

## Inhaltsverzeichnis

Einführung.....	1
Welche Ziele hat dieser Bericht?.....	1
Was heißt Nanotechnologie? .....	1
Was heißt Synthetische Nanopartikel? .....	2
Stand und künftige Entwicklung der Nanotechnologie .....	4
In welchen Bereichen wird zur Nanotechnologie geforscht und entwickelt?4	
Welche Markt- und Beschäftigungspotenziale hat die Nanotechnologie? .....	5
Welche Umsätze macht die Nanotechnologie? .....	5
Wie wird die Nanotechnologie gefördert? .....	6
Welche Produkte gibt es? .....	7
Welche Produkte sind bereits am Markt? .....	7
Welche Produkte kann es in der Zukunft geben? .....	8
Welche Produkte haben positive Effekte auf die Umwelt?.....	9
Umweltentlastungspotenziale .....	9
Umwelt- und gesundheitsbezogene Bewertung von Nanopartikeln.....	11
Klassifizierung von Nanopartikeln .....	11
Über welche Nanopartikel reden wir?.....	11
Welche Nanopartikel befinden sich bereits im Einsatz? .....	11
Kohlenstoff-Nanoröhren.....	12
Fullerene .....	12
Quantenpunkte .....	13
Wann sprechen wir von Risiken? .....	13
Welche Gefahren für Umwelt und Gesundheit durch Nanopartikel sind bekannt?.....	14
Welche Untersuchungsergebnisse liegen vor?.....	16
Ist eine Bewertung der Risiken möglich?.....	18
Welche Projekte laufen zu gesundheitlichen Auswirkungen?.....	19
Wo wird Regulierungsbedarf gesehen?.....	19
Welche Handlungsbedarfe bei den Umwelt- und Gesundheitsgefahren synthetischer Nanopartikel werden gesehen?.....	21
Literaturverzeichnis .....	22



## Einführung

### Welche Ziele hat dieser Bericht?

Der Bericht gibt eine allgemeinverständliche Übersicht über die beiden Themenkomplexe Nanotechnologie und Synthetische Nanopartikel. Er soll den Teilnehmenden der Veranstaltung „Dialog zur Bewertung von synthetischen Nanopartikeln in Arbeits- und Umweltbereichen“ am 11. und 12. Oktober 2005 zur Vorbereitung dienen. Der Bericht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### Was heißt Nanotechnologie?

Größe ...

Bisher gibt es keine allgemeingültige Definition der Nanotechnologie. Wir verwenden im Folgenden die Definition des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF): „Gegenstand der Nanotechnologie ist die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von funktionalen Strukturen, deren Abmessungen im Bereich unter einhundert Nanometer liegen.“ (BMBF 2002)

Ein Nanometer (nm) bezeichnet dabei den millionsten Teil eines Millimeters bzw.  $10^{-9}$  m. Zum Vergleich: ein Haar hat einen Durchmesser von ca. 50.000 nm; ein Wasserstoffatom ca. 0,1 nm.

...und neue Funktionalitäten /Eigenschaften ...

Wesentlich für die Nanotechnologie ist, dass aus der Nanoskaligkeit der Komponenten neue Funktionalitäten oder Eigenschaften<sup>1</sup> resultieren. Diese neuen Funktionalitäten resultieren überwiegend aus dem veränderten Verhältnis von Oberflächenatomen zu Volumenatomen und dem quantenmechanischen Verhalten.<sup>2</sup>

... und neuartige Herstellungsmöglichkeiten.

Außerdem zeichnet sich die Nanotechnologie durch neuartige Herstellungsmöglichkeiten aus. Hierzu zählen insbesondere auch eine verbesserte Kon-

---

<sup>1</sup> Neue Eigenschaften bzw. Funktionalitäten können sich beziehen auf: Kratzfestigkeit, Farbigkeit, Transparenz, Leitfähigkeit, Festigkeit etc.

<sup>2</sup> Vgl. auch VDI TZ ZTC 2004; BMBF 2004

trollmöglichkeit im Herstellungsprozess und die Selbstorganisation nanoskaliger Materialien. Bei der Selbstorganisation fügen sich nanoskalige Materialien unter bestimmten Umgebungsvoraussetzungen zu neuen Strukturen zusammen.

*Top-Down und Bottom-Up*

„Das besondere Potenzial der Nanotechnologie liegt in der Kombination eines Top-Down-Ansatzes [Anm.: durch fortschreitende Miniaturisierung] mit einem Bottom-Up-Ansatz [Anm.: Zusammensetzen aus einzelnen Bausteinen]. Die kontrollierbare Manipulation von Atomen und Molekülen auf der Nanoskala ist dabei das entscheidend Neue, das die Nanotechnologie kennzeichnet. Sie wird es in zunehmendem Maße erlauben, funktionale Nanostrukturen Atom für Atom aufzubauen und daraus Materialien und Bauteile mit bislang unbekanntem Eigenschaften zu erzeugen.“ (BMBF 2002)

## Was heißt Synthetische Nanopartikel?

*künstlich  
hergestellte Partikel  
kleiner 100 nm*

Unter Nanoparticles werden im angloamerikanischen Sprachraum sowohl natürliche als auch künstlich hergestellte Partikel kleiner 100 nm verstanden. Unter synthetischen Nanopartikeln bezeichnen wir künstlich hergestellte Partikel mit einer Größe kleiner 100 nm, die über veränderte Eigenschaften und/oder Funktionalitäten verfügen. Im Englischen spricht man von Engineered Nanoparticles oder Nanosized Particles. Gleichbedeutend werden die Begriffe „Ultrafeine Partikel“ (insb. von Toxikologen), „nucleation mode particles“ oder „engineered nanostructured material“ verwendet. (vgl. Oberdörster et. al. 2005)

Die bisher bei Atomen oder Molekülen bekannten Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Magnetismus, Farbe, mechanische Härte oder ein bestimmter Schmelzpunkt können sich je nach Größe oder Struktur der Partikel verändern. Cadmium-Tellurid-Partikel (CdTe) z.B. fluoreszieren in unterschiedlichen Farben, je nach Partikelgröße (2 bis 5 nm).

*Eigenschaftsveränderungen*

Es wurden drei grundsätzliche Eigenschaftsveränderungen festgestellt:

1. ein verändertes quantenmechanisches Verhalten z.B. in Bezug auf Farbe, Transparenz, Härte, Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit
2. eine vergrößerte Oberfläche, die zu Änderungen des Schmelz- und Siedepunktes, der chemischen Reaktivität und der Katalysewirkung führt und

3. eine veränderte molekulare Erkennungsmöglichkeit, die in Kombination mit einer erhöhten Erkennungsfähigkeit, Adaptionfähigkeit, Reparaturfähigkeit und Selbstorganisation neue biologische Anwendungen zulässt.

## Stand und künftige Entwicklung der Nanotechnologie

### In welchen Bereichen wird zur Nanotechnologie geforscht und entwickelt?

Forschungs- und Entwicklungsbereiche der Nanotechnologie sind z.B.

- **Analytik**

Themen: Verbesserung der Sensoreigenschaften und Analyseinstrumente, chemisch-sensitive Nanoanalytik

- **Elektronik**

Themen: Chip-Produktion, Herstellung verbesserter Speichermedien

- **Optoelektronik**

Themen: neue Prinzipien des Schaltkreisentwurfs, Quanteneffekte für die Herstellung neuartiger Transistoren nutzbar machen, neuartige Halbleiter-Lichtquellen (Dioden und Laser)

- **Optik**

Themen: Ultrapräzisionsbearbeitung optischer Komponenten, Lithografie zur Herstellung immer kleinerer elektronischer Bauelemente, Optische Bauelemente mit Funktionsflächen (Asphären) für Datenprojektoren, Kameras, Brillengläser, Scanner

- **Biotechnologie und Medizin**

Themen: Einsatz von Nanopartikeln in der Tumorbekämpfung, nanostrukturierte und funktionalisierte Oberflächen und Membranen, verbesserte Diagnose und zielgerichteter Einsatz von Wirkstoffen; neuro-aktive Implantate

- **Materialwissenschaften**

Themen: ultradünne Nanoschichten, Nanokristalle, Nanostrukturen für mikroelektronische Bauteile, Brennstoffzellen, kratzfeste Oberflächen,

wasser- und schmutzabweisende Oberflächen; Antireflexeigenschaften, photoaktive Strahlung

Kompetenzzentren  
BMBF

Das BMBF hat insgesamt 9 Kompetenzzentren geschaffen, um eine Vernetzung der Akteure herzustellen:

- Ultradünne funktionale Schichten (Dresden)
- NanoChem (Saarbrücken)
- Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung (Braunschweig)
- Nanoanalytik (Münster)
- HanseNanoTec (Hamburg)
- ENNaB – Excellence Network NanoBioTechnology (München)
- NanOp – Nanostrukturen für die Optoelektronik (Berlin)
- NanoBioTech (Kaiserslautern)
- NanoMat (Karlsruhe)

Daneben gibt es eine Reihe weiterer Netzwerke und Forschungseinrichtungen. Näheres findet sich unter [www.nano-map.de](http://www.nano-map.de).

## Welche Markt- und Beschäftigungspotenziale hat die Nanotechnologie?

### Welche Umsätze macht die Nanotechnologie?

Welche Umsätze wirklich gemacht werden, hängt stark von der Definition ab, wann ein Produkt mit Nanotechnologie (Bestandteilen oder Produktionsweisen) hergestellt wurde.

Große Spanne bei  
den Umsatzerwartungen

VDI-TZ ZTC (2004) stellt Schätzungen unterschiedlicher Analysten zusammen und erhält eine Spanne zwischen 900 Mio. USD für das Weltmarktvolumen nanotechnologischer Produkte in 2005 bis zu einer Billion USD für das Weltmarktvolumen nanotechnisch beeinflusster Produkte im Jahr 2015. Die gleichen Autoren erwarten ein exponentielles Wachstum des Weltmarktes nanotechnologischer Produkte.

Nach einer Studie des US-Marktforschungsinstituts LuxResearch machen Produkte, in denen Nanotechnologie eingesetzt wird, nur 0,1 Prozent der globalen Warenproduktion aus. Bis 2014 wird sich dieser Anteil auf rund 15 Prozent erhöhen.<sup>3</sup>

Eine Aussage zur Zahl der Arbeitsplätze, die direkt oder indirekt von der Nanotechnologie abhängen, ist zurzeit nicht möglich. Das BMBF erwartet einen großen Anstieg verbunden mit einem Bedarf nach Fachkräften (BMBF 2004).

### Wie wird die Nanotechnologie gefördert?

Förderung BMBF und BMWA

Das Bundesbildungsministerium fördert Projekte im Rahmen seines Förderprogramms Nanotechnologie. Darüber hinaus besteht eine indirekte Förderung über die institutionelle Förderung von Wissenschaftsorganisationen. Auch das Bundeswirtschaftsministerium fördert einige Projekte.

Die Summe der Nanotechnologieförderung in den Jahren 2002 bis 2005 in Deutschland ergibt folgendes Gesamtbild:

Nanotechnologieförderung in Deutschland	2002	2003	2004	2005
BMBF Projektförderung	73,9	88,2	123,8	129,2
BMWA Projektförderung	21,1	24,5	24,5	23,7
Institutionelle Förderung <sup>4</sup>	143,1	144,2	144,8	145,4
<b>Summe (in Mio. €)</b>	<b>238,1</b>	<b>256,9</b>	<b>293,1</b>	<b>298,3</b>

(VDI TZ ZTC 2004)

Daneben gibt es Ausgaben der Industrie für Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanotechnologie. Hierzu liegen uns keine Daten vor.

Im Vergleich zu anderen europäischen Staaten belegt Deutschland mit Abstand einen Spitzenplatz beim Umfang der Fördermittel.

<sup>3</sup> Pressemitteilung der Allianz AG. Vom 07.06.2005  
<http://www.presstext.at/pte.mc?pte=050608055> vom 31.07.2005

<sup>4</sup> Institutionelle Förderung bezieht sich auf die Förderung der DFG, MPG, HGF, FhG und WGL

„Ein Vergleich der Aufwendungen in Europa, den USA und in Japan ergibt grob abgeschätzt und - ohne auf die Förderdetails näher einzugehen - durchaus ähnlich hohe Fördervolumina.“ (VDI-TZ ZTC 2004)

VDI-TZ ZTC kommt daher zu dem Schluss, dass Deutschland aktuell eine gute Ausgangssituation im internationalen Wettbewerb einnimmt.

## Welche Produkte gibt es?

Der Einsatz nanoskaliger Materialien kann schon in chinesischen Keramiken von vor 2000 Jahren nachgewiesen werden. Der Einsatz von Carbon Black-Partikel in Gummireifen ist auch längst internationaler Standard.

*Erste Produkte verfügbar*

In letzter Zeit kommen immer mehr neuartige Produkte mit nanotechnischen Materialien oder nanotechnologischen Produktionsweisen auf den Markt.

## Welche Produkte sind bereits am Markt?

Folgende Übersicht stellt einige bereits vorhandene Produkte dar:

- Sonnenschutzcremes mit höherem UV-Schutz und für empfindlichere Haut beinhalten Oxidpartikel
- Kosmetika mit Nanopartikeln
- Nanoskalige Tonerpartikel für Kopierer und Drucker
- Farben und Lacke, die UV-Strahlen absorbieren
- Kratzfeste Autolacke
- Textilien, die wasser- und schmutzabweisend sind
- Textilien, die durch Oxidpartikel über einen verbesserten Sonnenschutz verfügen
- Sicherheitsbekleidung, die elektrostatische Aufladung verhindert
- Verbesserte Entspiegelung und höhere Kratzfestigkeit von Brillengläsern
- Optimierte Elektronik-Chips, Festplatten, RAM-Speicher, Diodenlaser, Displays, Akkus

- Effizientere Energieausnutzung bei Leuchtdioden in Anzeigetafeln, Rückleuchten und Taschenlampen
- Golf- und Tennisschläger mit Carbonbeimischungen mit erhöhter Stabilität und verbesserten Spieleigenschaften
- Beimischungen nanopartikulärer Materialien bei Babywindeln zur besseren Absorption der Feuchtigkeit, bei Frischhaltefolien zur höheren Reißfestigkeit und Gaspermeabilität

(u.a. BMBF 2004).

### Welche Produkte kann es in der Zukunft geben?

Hier gibt es eine Vielzahl von Ideen und Einsatzmöglichkeiten. Die folgende Zusammenstellung enthält sowohl Überlegungen als auch Produkte und Verfahren, die sich bereits im Versuchsstadium befinden.

- **Automobilindustrie:** intelligente Systeme, die auf Fahrverhalten und Umweltreize reagieren; Spiegel und Scheiben, die sich auf äußere Bedingungen einstellen; verbesserte Haftung von Reifen auf unterschiedlichen Straßenbelägen; schaltbare Farbwechsel des Lacks; kratzfeste Kunststoffe in der Innenverkleidung
- **Maschinen und Anlagenbau:** neue Fertigungs- und Anlagentechniken; verbesserte Maschinen und Anlagen durch funktionale Schichten; eine verbesserte Messtechnik und Sensorik
- **Energietechnik:** neue Energiespeicher wie Brennstoffzellen; hocheffiziente Solarzellen und neuartige Materialien, die Wärme in elektrischen Strom umwandeln
- **Medizin:** Diagnose- und Therapieansätze bei Krebs und Diabetes; Nanopartikel als Kontrastmittel, zur lokalen Zerstörung des Gewebes (z.B. Tumoren) und als Wirkstofftransporter; Bio-Chips für die medizinische Diagnostik
- **Information und Kommunikation:** Multifunktionale Geräte in kleinen Formaten; dreidimensionale holographische Darstellung; Geräte, die eine online-Diagnostik mit automatischer Alarmierung zulassen

- **Optik:** Beleuchtungstechniken auf Basis optoelektronischer Komponenten (z.B. großflächige Leuchtdioden); nanometer genau gefertigte optische Linsen in beliebiger Geometrie (z.B. für Datenprojektionsgeräte, in der Lithographie und Medizintechnik).

(diverse Quellen; u.a. BMBF 2004).

### Welche Produkte haben positive Effekte auf die Umwelt?

Bei der Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten werden immer wieder auch die Chancen für die Umwelt betont:

- Verbesserung der Trinkwassergewinnung und der Boden- und Luftreinigung mittels nanotechnologischer Verfahren
- Verbesserte Energieausnutzung z.B. durch höheren Nutzungsgrad der Solarzellen, verbesserter Nutzungsgrad von Lampen (OLED Organic Light Emitting Diode)
- Verbesserte Energiespeicherung und -transport z.B. durch Wasserstoffspeicher, optimierte Lithium-Ionen-Batterien, verbesserte Brennzellentechnologie, Hybridfahrzeuge
- Ressourcenschonung durch neue Materialien z.B. durch Einsatz von leichteren Materialien in der Automobilindustrie, dünnere Schichten
- Ressourcenschonung durch Einsatz weniger Materialien z.B. bei Lackpigmenten
- Verringerung des Einsatzes umweltschädlicher Substanzen z.B. durch Einsatz selbstreinigender Oberflächen oder Ersatz schädlicher Substanzen

Die Entwicklungsstadien reichen von Marktreife (Lacke und wirkungsoptimierten Lampen) bis hin zu frühen Entwicklungsstadien (Luft- und Bodenreinigung).

### Umweltentlastungspotenziale

Forschung IÖW

Im Auftrage des BMBF hat das Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung IÖW die „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotech-

nologischer Produkte“ untersucht. Mittels Ökobilanzierung von bereits verwendeten Produkten wurden erwartbare positive ökologische Effekte und Potenziale den möglicherweise problematischen Wirkungen gegenübergestellt. Dazu wurden in fünf Fallstudien ökoeffiziente Nanolacke, nanotechnologische Prozessinnovationen der Styrolsynthese, Nanoinnovationen im Displaybereich, Nanoanwendungen im Lichtbereich und Risikopotenziale nanotechnologischer Anwendungen untersucht.

*Nicht per se mit Entlastungspotenzialen verbunden*

„Im Ergebnis der ökobilanziellen Vergleiche ist festzuhalten, dass nanotechnologische Anwendungen nicht per se mit hohen ökologischen Entlastungspotenzialen verbunden sind. Gleichwohl konnten für die Mehrzahl der gezielt ausgewählten Anwendungskontexte hohe Ökoeffizienzpotenziale mit der gewählten Methode der vergleichenden Betrachtung von Funktionalitäten ermittelt werden.“ (Steinfeld et. al. 2004)

Die Risiko- und Gefährdungspotenziale, die durch die Ökobilanz nicht erfasst werden, werden am Beispiel der Nanopartikel diskutiert. Außerdem stellen die Autoren des IÖW fest, dass die Bewertung abhängig von den bekannten Stoff- und Energiedaten ist und sich für in der Entwicklung befindliche Produkte keine Abschätzung vornehmen lässt.

# Umwelt- und gesundheitsbezogene Bewertung von Nanopartikeln

## Klassifizierung von Nanopartikeln

Das VDI-TZ ZTC (2004) stellt eine Klassifizierung von Nanomaterialien nach den Kategorien Dimension, Phasenzusammensetzung und Herstellungsprozess vor.

### *Dimensionen von Nanosystemen*

Nanosysteme können in einer oder mehreren Dimensionen nanoskalig strukturiert sein:

- Eindimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. ultradünne Schichten
- Zweidimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. Nanoleitungen, Quantendrähte
- Dreidimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. Quantenpunkte, Nanopulver, funktionale supramolekulare Systeme.

### *Phasenzusammensetzung*

Sie können aus einer (single-phase solids) oder mehreren (multi-phase solids) festen Phasen bestehen oder aus verschiedenen Phasen bestehen (multi-phase systems, fest-flüssig, flüssig-gasförmig, fest-gasförmig). Außerdem kann nach dem Herstellungsprozess (mechanisch oder in Gas- oder Flüssigphasen) klassifiziert werden.

## Über welche Nanopartikel reden wir?

Mit Nanopartikeln wird ein Verbund von einigen bis zu mehreren hundert Atomen oder Molekülen bezeichnet.

## Welche Nanopartikel befinden sich bereits im Einsatz?

Die wichtigsten im Einsatz befindlichen Nanopartikel sind:

- Carbon Black,

- Metalloxide wie Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ , Titandioxid  $\text{TiO}_2$ , Aluminiumdioxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zinkoxid  $\text{ZnO}$  und Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ),
- Halbleiter wie Cadmium-Tellurit  $\text{CdTe}$  und Gallium-Arsenid  $\text{GaAs}$  und
- Metalle wie Gold und Silber.

Carbon Black, auch Industrieruß genannt, wird z.B. in Reifen als verstärkender Füllstoff eingesetzt. Nanoskaliges  $\text{TiO}_2$  wird in Sonnenschutzcremes eingesetzt, um die UV-Durchlässigkeit zu verringern.  $\text{TiO}_2$  und  $\text{ZnO}$  wird u.a. in Kosmetika verwandt.

## Kohlenstoff-Nanoröhren

*Ein- oder mehrwandige Röhren*

Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes CNT) sind Röhren mit einem Durchmesser von einem bis zu 50 Nanometern. Sie sind in der Regel nur einige Mikrometer lang, vereinzelt auch länger. Kohlenstoff-Nanoröhren können ein- (Single-Walled Carbon Nano Tube SWCNT) oder mehrwandig (Multi-Walled Carbon Nano Tube MWCNT) sein. Die Enden können offen oder geschlossen, die Wand ein geschlossener Ring oder eine spiralförmige Struktur haben.

Sie zeichnen sich durch eine besonders hohe Zugfestigkeit aus und sind je nach Struktur leitend oder halbleitend. Einige Strukturen haben bei tiefen Temperaturen auch die Eigenschaften eines Supraleiters. Wegen ihrer Eigenschaft als Halbleiter werden sie unter anderen für die Transistorherstellung bei Computerchips verwandt. Außerdem werden sie in der Display-Herstellung eingesetzt.

*Nanoröhren aus verschiedenen Materialien*

Neben den Kohlenstoff-Nanoröhren gibt es noch Nanoröhren aus anderen Materialien wie Metallnitriden, -sulfiden oder -halogeniden.

## Fullerene

Fullerene sind ausschließlich aus Kohlenstoffatomen bestehende Makromoleküle. Besonders gut erforscht sind Fullerene in der Form  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{70}$ ,  $\text{C}_{76}$ ,  $\text{C}_{80}$  etc.  $\text{C}_{60}$  wird auch Buckminster Fullerene oder Buckyball genannt. Für Fullerene werden besonders medizinische Anwendungen erwartet.

## Quantenpunkte

Quantenpunkte sind 5 nm hohe und 100 nm große, pyramidenförmige Gebilde. Sie bestehen aus einigen tausend Atomen und auf einen Quadratzentimeter lassen sich etwa 100 Milliarden Quantenpunkte unterbringen. Unter geeigneten Rahmenbedingungen ordnen sich diese Quantenpunkte selbstständig und regelmäßig an. Sie stellen u.a. die Grundlage für neue Lasersysteme. (BMBF 2002)

## Wann sprechen wir von Risiken?

Versicherungsmathematisch wird die Höhe des Risikos durch den möglichen Schaden im Verhältnis zu seiner Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet. Risikowissenschaftler unterscheiden zwischen

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| <i>Unterschied Risiko,</i>  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Risiko (risk) als der Wahrscheinlichkeit eines Auftretens einer adversen Wirkung unter bestimmten Bedingungen,</li></ul>   |
| <i>Gefahr,</i>              | <ul style="list-style-type: none"><li>• Gefahr (danger) als Zustand, Umstand oder Vorgang bei dem mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein erheblicher Schaden für den Menschen oder Umwelt besteht,</li></ul> |
| <i>Gefährdung,</i>          | <ul style="list-style-type: none"><li>• Gefährdung (hazard) als dem Vorhandensein einer Gefahr und</li></ul>   |
| <i>Gefährdungspotenzial</i> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Gefährdungspotenzial (hazard potenzial) als das Potenzial eines Stoffes einen Schaden hervorzurufen (vgl. Risikokommission 2003)</li></ul>                             |

Dieses Gefährdungspotenzial wird erst zu einer Gefährdung, wenn ein Ereignisses, wie z.B. der Exposition eines Stoffes in einer Mindestmenge, eintritt.

- |  |   |
|--|---|
| <i>Kriterien für die Bewertung von Risiken</i> | <p>Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WGBU (1998) benennt folgende Kriterien für die Bewertung von Risiken:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Eintrittswahrscheinlichkeit:</b> wie wahrscheinlich tritt ein Risiko ein?</li><li>• <b>Abschätzungssicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit:</b> wie gut kann eine Einschätzung des Ereigniseintrittes vorgenommen werden?</li><li>• <b>Ausmaß der Schadensfolgen:</b> wie groß sind die prognostizierten Schäden?</li></ul> |
|--|---|

- **Abschätzungssicherheit des Schadensausmaßes:** wie gut kann eine Einschätzung des Schadenumfangs vorgenommen werden?
- **Ubiquität:** wie groß ist die Verbreitung/Ausbreitung?
- **Persistenz:** wie hoch ist die Abbaugeschwindigkeit?
- **Irreversibilität:** in wie weit können entstandene Schäden rückgängig gemacht werden?
- **Verzögerungswirkung:** wie lange dauert es, bis die Schäden auftreten – akut bis Langzeitwirkungen
- **Mobilisierungspotenzial:** in welchem Maße führen die Schäden zu Einstellungs- oder Verhaltensveränderungen in der Bevölkerung

*Konzept auf synthetische Nanopartikel übertragbar?*

Zu klären ist, in wie weit diese Kriterien für synthetische Nanopartikel übertragbar sind. In diesem Zusammenhang steht auch noch die offene Frage, ob die Risiken in bestimmten Gefährdungsklassen zusammengefasst werden können.

## Welche Gefahren für Umwelt und Gesundheit durch Nanopartikel sind bekannt?

*Offene Fragen*

Um Risiken für die Gesundheit des Menschen abschätzen zu können, müssen folgende Fragestellung geklärt werden:

- Welche synthetischen Nanopartikel in welcher Größe beeinträchtigen wie die Gesundheit?
- Welche Eigenschaften der Nanopartikel und welche Reaktionen im menschlichen Körper spielen dabei eine Rolle?
- Wie lassen sich Dosis-Wirkungsbeziehungen quantifizieren?
- Welche Mengen/ Konzentrationen/ Oberflächengrößen an synthetischen Nanopartikeln werden bei welchen Vorgängen (Herstellung, Verarbeitung, Nutzung, Entsorgung) normalerweise freigesetzt? Welche Mengen/ Konzentrationen/ Oberflächengröße im schlimmsten Fall?

(vgl. auch Oberdörster 2005). Die Fragen lassen sich vergleichbar auch auf Risiken für die Umwelt übertragen.

Diese Fragen können bisher nur teilweise und nur für bestimmte Partikel beantwortet werden. Unklar ist zurzeit auch, ob diese Untersuchungen für alle Partikel separat erfolgen müssen oder ob eine Einteilung der Nanopartikel in Risikoklassen möglich ist.

*Offene Fragen für  
mögliche Gefähr-  
dungen der Umwelt*

Für die Umwelt sind noch weitere Fragestellungen zu klären:

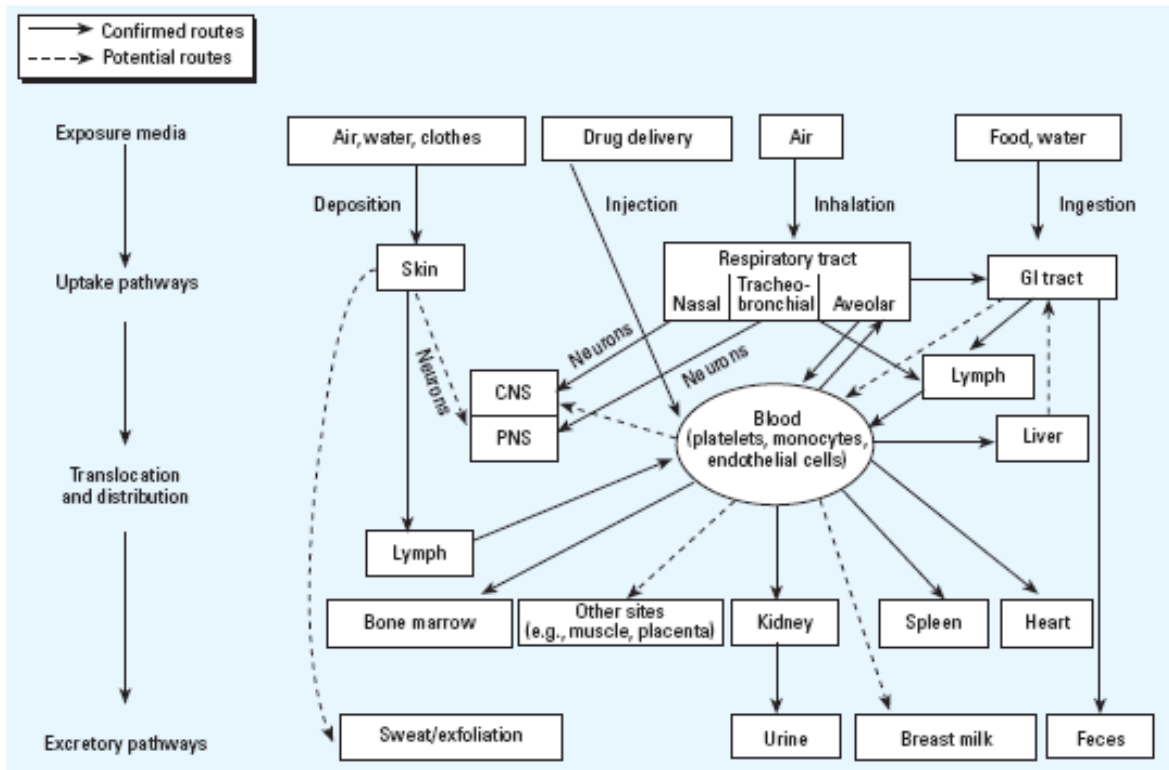
- Wie gelangen synthetische Nanopartikel in die Umwelt (beabsichtigte – unbeabsichtigte Freisetzungen; Lebenszyklus: Produktion-Verarbeitung-Produkt-Verwertung; Freisetzungsszenarien)
- Wie verhalten sich die Nanopartikel in der Umwelt? (Absinken, Agglomeration, Deagglomeration, Ablagerung, Abbau, Löslichkeit)
- Welchen Einfluss üben sie auf Nahrungsketten aus?
- Welche synthetischen Nanopartikel können als Transportmittel für andere schädliche Stoffe dienen? Oder durch welche anderen Stoffe werden synthetische Nanopartikel verbreitet?
- In wie weit kann eine Extrapolation der Ergebnisse der Forschung zu ultrafeinen Partikeln (UFP) erfolgen? (vgl. unter anderem Swiss Re 2004)

*Ergebnisse bei UFP*

Oberdörster et. al. (2005) stellen in ihrem Übersichtsartikel die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zu ultrafeinen Partikeln zusammen. Dabei gehen sie ein auf

- die Toxikologie von ultrafeinen Partikeln für Mensch und Umwelt
- mögliche Expositions- und Aufnahmepfade für Mensch, Tier und Umwelt
- die verschiedenen Aufnahmewege (Inhalation, Injektion, dermal und durch Nahrungsaufnahme)
- das Verhalten von Nanopartikeln in Bezug auf Aufnahme, Translokation, Verteilung und Wirkungen im Körper und
- die Fragestellungen, die im Rahmen einer Risikobewertung gemeinsam durch Industrie, Wissenschaft und Administration beantwortet werden müssen.

Die nachgewiesenen und vermuteten Pfade von Nanopartikeln fassen Oberdörster et. al. (2005) in untenstehender Grafik mit dem Titel „Biokinetik von synthetischen Nanopartikeln“ zusammen.



### Welche Untersuchungsergebnisse liegen vor?

*Erste Ergebnisse sind mit Skepsis zu betrachten*

Wir stellen in Kürze einige Untersuchungsergebnisse vor. Kritisiert wird an bisherigen Untersuchungen, dass sie in der Regel nicht reproduzierbar sind (z.B. aufgrund fehlender Referenzmaterialien). Bei den ultrafeinen Partikeln werden häufig Gemische sehr unterschiedliche Größen untersucht und nicht nach natürlichen, durch Verbrennung oder synthetisch hergestellten Nanopartikeln unterschieden. Eine Extrapolation von Daten aus dem Bereich der ultrafeinen Partikel auf synthetische Nanopartikel muss daher kritisch betrachtet werden.

- Wasserlösliche C<sub>60</sub>-Fullerene erzeugen in einem Versuch Gehirnstörungen und Stresssymptome bei jungen Forellenbarschen<sup>5</sup>

<sup>5</sup> <http://pubs.acs.org/cen/news/8213/8213bass.html> vom 31.07.2005. Die Ergebnisse von Eva Oberdörster wurden bisher nicht von anderen Wissenschaftlern bestätigt.

- Bei einer Injektion von polyalkylsulfonierten C<sub>60</sub>-Fullerenen (FC4S) liegt die letale Dosis 50 (LD50) für Ratten bei 600 mg/kg Körpergewicht. Eine orale Verabreichung erwies sich als nicht toxisch. (Chen et al. 1998)
- Oberdörster stellt die Hypothese auf, dass ultrafeine Partikel ursächlich mitverantwortlich für negative Wirkungen bei sensiblen Personen sind. Untersuchungen an Nagetieren zeigen, dass kleinere Partikel bei gleicher Masse stärkere Entzündungswirkungen verursachen als größere Partikel. Oberflächeneigenschaften scheinen hier eine Rolle zu spielen. (Oberdörster 2000)
- In einer weiteren Studie stellten Oberdörster et al. fest, dass sich Kohlenstoffpartikel bei Ratten in einem signifikanten Ausmaß von der Nase zum zentralen Nervensystem über den Geruchsnerve bewegen – und zwar unter Umgehung der Blut-Hirn-Schranke. (Oberdörster et al. 2004)
- Jens Schulz und Kollegen von der Firma Beiersdorf untersuchten die dermale Absorption von Nanopartikeln wie TiO<sub>2</sub> und ZnO. Unabhängig von der Oberflächencharakteristik, der Partikelgröße und der Form der Partikel wird keine Aufnahme über die Haut festgestellt. Lediglich in den oberen Hautschichten konnten Ablagerungen von TiO<sub>2</sub> festgestellt werden. (Schulz et al. 2002)  
Die ersten Ergebnisse aus dem Projekt NANODERM und einer Untersuchung der BASF AG<sup>6</sup> bestätigen diese Aussage, haben aber festgestellt, dass bei Verletzungen der Haut Nanopartikel auch in die tieferen Hautschichten eindringen können.
- Kreuter untersuchte, ob die inzwischen als Wirkstofftransporter eingesetzten Poly(butylcyanoacrylate) Nanopartikel PBCA toxische Effekte auf die Blut-Hirn-Schranke haben. In-vitro- und Tierversuche legen nahe, dass es keine Störung der Blut-Hirn-Schranke gibt. (Kreuter et al. 2003)
- Colvin spricht in ihrer Übersichtsarbeit die toxischen Wirkungen von Kohlenstoffnanostrukturen (Fullerene und Kohlenstoffnanoröhren) an,

---

<sup>6</sup> Lt. mündlichen Aussagen von Herrn Dr. Reinert, Universität Leipzig, und Herrn Dr. Leibold, BASF AG.

die in einigen In-vitro- und Tierversuchen festgestellt wurden. (Colvin 2003)

- Warheit unternahm die erste toxikologische peer-review-Studie zu Single-walled-Nanocarbon-Tubes. Zwar sterben bei hohen Dosen Raten, doch handelt es sich dabei um mechanische Blockaden der oberen Atemwege (Warheit 2004) Für ihn sei es noch zu früh, über Gefahren von Nanopartikeln Aussagen zu treffen. Dazu lägen zu wenig belastbare Studien vor; wenn, dann beziehen sich diese auf  $\text{TiO}_2$ , Carbon Black und Dieselruß. Außerdem seien Versuche an Ratten nur bedingt übertragbar und die Toxizität eines Stoffes hänge neben der Größe und Zusammensetzung auch von Oberflächenbeschichtung ab. (Warheit 2004b)
- Lam untersuchte Mäuse sieben und neunzig Tage nach Verabreichung von Single Wall Carbon Nanotubes bzw. Quarz und Carbon Black. Nach diesen Untersuchungen sollen SWNCT toxischer sein als Carbon Black. Kritiker dagegen gehen davon aus, dass die metallischen Katalyspartikel in den Nanopartikeln für die gesundheitlichen Auswirkungen verantwortlich sind. (Lam 2004)
- Derfus et. al. wiesen nach, dass Quantenpunkte unter bestimmten Voraussetzungen zytotoxische Wirkungen haben. Die Wirkung kann verändert werden z.B. durch entsprechende Beschichtungen. (Derfus 2004)

### **Ist eine Bewertung der Risiken möglich?**

Eine abschließende Risikobewertung der Gefährdungen durch synthetische Nanopartikel kann an dieser Stelle noch nicht gemacht werden. Hierzu sind weitere Studien notwendig, die

*Klärung von Fragen notwendig*

- die Toxikologie der Nanopartikel,
- die Expositionspfade,
- die Aufnahme- und Ausscheidungspfade,
- die Langzeitwirkungen von Nanopartikeln

- und die Dosis-Wirkungs-Beziehungen untersuchen (vgl. u.a. Oberdörster 2005).

## Welche Projekte laufen zu gesundheitlichen Auswirkungen?

Die Europäische Kommission fördert folgende Projekte:

- Nano-Pathology (seit 12/2001): Entwicklung von diagnostischen Methoden und Tools und Bestimmung der pathologischen Bedeutung von Nanopartikeln.
- NANODERM (seit 01/2003): Untersuchungen über das Eindringen von Nanopartikeln in die Haut. Insbesondere von in Pflege- und Haushaltsprodukten eingesetzte Partikel wie z.B. TiO<sub>2</sub> <20nm.
- NANOSAFE (04/2003 bis 08/2004): Risikobewertung in der Produktion, Verwendung und Nutzung von Nanopartikeln in Industrieprozessen und Produkten.
- NANOSAFE 2 (seit 04/2005): Entwicklung von Verfahren zur Erkennung, Verfolgung und Charakterisierung von Nanopartikeln
- NANOTOX: Erforschung weiterer toxikologischer Wirkungen von Nanopartikeln. Ist inzwischen mit IMPART zusammengelegt. IMPART beschäftigt sich mit dem Verständnis von toxikologischen Wirkungen auf Gesundheit und Umwelt.

Darüber hinaus wird weiter in öffentlichen und firmeneigenen Forschungslabors zu dem Thema geforscht.

## Wo wird Regulierungsbedarf gesehen?

*Regulierungsbedarf  
muss geklärt werden*

Das Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages TAB hält es für erforderlich, den Regulierungsbedarf zu klären. „Im Vordergrund sollten dabei zunächst die aktuellen und realistischerweise zu erwartenden nanotechnologischen Anwendungen stehen.“ (TAB 2003)

Dabei stehen insbesondere folgende Regulierungen im Mittelpunkt:

- Bundesimmissionsschutzgesetz, TA Luft
- Chemikaliengesetz und REACH<sup>7</sup>,
- Arbeitsschutzgesetze,
- Arzneimittelgesetz und Medizinproduktegesetz,
- Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz,
- Novel-Food-Verordnung (EG).

*Kein „Lex Nanotechnologie“*

Der Bericht der Royal Society (2004) befasst sich intensiv mit den vorhandenen und notwendigen Regulationsbedarfen. Zum Zeitpunkt der Erstellung wird kein Bedarf für spezielle nanotechnologische Regelungen gesehen. Insbesondere wird die Forderung der ETC Group (2003) nach einem Moratorium zurückgewiesen. Allerdings sehen sie Bedarf, bestehende Regelungen zu ergänzen, um der Tatsache der neuen und veränderten Eigenschaften von synthetischen Nanopartikeln Rechnung zu tragen<sup>8</sup>. Die Aufgabe der Industrie sei es, ihre Gefährdungsbeurteilungen der Nanopartikel zur Verfügung zu stellen. Die Behörden sollen dann die Vorschriften auf ihre Wirksamkeit zum Schutz von Mensch und Umwelt überprüfen. Eine Empfehlung ist, synthetische Nanopartikel als Neustoffe im Sinne von REACH zu behandeln. Darüber hinaus enthält der Bericht noch eine Reihe von Empfehlungen zu Arbeitssicherheit, Produktsicherheit und Messtechnik.

*... aber gemeinsam  
Regulierungsbedarf  
abklären*

*Regulierungsbedarfe  
international ab-  
stimmen*

Auf allen Ebenen – Deutschland, EU und OECD aber auch in anderen Ländern (z.B. USA, Großbritannien, Australien) – werden Überlegungen zum Regulierungsbedarf angestellt. Die unterschiedlichen Aktivitäten sollten koordiniert und Vorgehensweisen abgestimmt werden.

---

<sup>7</sup> In der Gesetzgebung befindliche EU-Richtlinie zur „Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals“ REACH

<sup>8</sup> In diesem Zusammenhang wird von verschiedenen Akteuren z.B. eine Parametererweiterung der Umweltmessungen von Gewicht und Konzentration um die Parameter Oberfläche und Partikelgröße für sinnvoll erachtet.

## Welche Handlungsbedarfe bei den Umwelt- und Gesundheitsgefahren synthetischer Nanopartikel werden gesehen?

Neben den Regulierungsbedarfen werden folgende Handlungsbedarfe formuliert:

- Systematische Analyse der Umwelt- und Gesundheitsgefahren nanotechnologischer Verfahren und Produkte (TAB 2003, Swiss Re 2004)
- Untersuchungen zu Ausbreitungsverhalten in allen Medien (insb. Luft) und potentielle Langzeitfolgen für Umwelt und Gesundheit gerade von synthetischen Materialien wie Fullerenen und Nanoröhren (TAB 2003)
- Analyse und Spezifizierung von Emissionsquellen von Nanocompositen und Nanopartikeln sowie Ausbreitungsmodelle (TAB 2003)
- Untersuchungen und Modelle zur Aufnahme, Translokation in und Interaktion mit dem menschlichen Körper (TAB 2003, Swiss Re 2004)
- Toxikologische und epidemiologische Untersuchungen einschließlich der Persistenz und Bioakkumulation von synthetischen Nanopartikeln (Royal Society 2004)
- Untersuchungen zum Verhalten von Nanopartikeln in Produkten im gesamten Lebenszyklus von der Produktion und Verarbeitung über die Nutzung bis zur Verwertung (TAB 2003; Royal Society 2004)
- Empfehlungen, wie mit synthetischen Nanopartikeln bis zur Abklärung von Risiken umgegangen werden soll (Royal Society 2004)
- Einrichtung eines nationalen, interdisziplinären Forschungszentrums zur Untersuchung der Gefährdungspotenziale synthetischer Nanopartikel (Royal Society 2004)
- Einrichtung einer zentralen Informationsstelle für die breite Öffentlichkeit (TAB 2003)
- Durchführung eines öffentlichen Dialogs zu Chancen und Risiken synthetischer Nanopartikel (Royal Society 2004, TAB 2003)

## Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF [Hrsg.] (2002) Nanotechnologie in D. Standortbestimmung. Berlin: Eigenverlag
- Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF [Hrsg.] (2004) Nanotechnologie erobert Märkte. Deutsche Zukunftsoffensive für Nanotechnologie. Berlin: Eigenverlag.
- Chen HH et al. (1998) Acute and subacute toxicity Study of water-soluble polyalkylsulfonated C60 in Rats. In: Toxicol Pathol. 26(1) Seite 143-151
- Colvin, Vicki (2003) The potential environmental impact of engineered nanomaterials. In: Nature Biotechnology 21(10) Seite 1166-1170
- Derfus, A.M. et. al. (2004) Probing the cytotoxicity of Semiconductor Quantum Dots. In: Nano Lett. 4(1) Seite 11
- ETC Group [Hrsg.] (2003) The big down.
- Kreuter, Jörg et. al. (2003) Direct evidence that polysorbate-80-coated poly(butylcyanoacrylate) nanoparticles deliver drug to the CNS via specific mechanisms requiring prior binding of drugs to the nanoparticles. Pharm Res 20(3) Seite 409-416
- Lam, Chiu-Wing et. al. (2004) Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days after Intratracheal Instillation. Toxicol. Sci. 77(1) Seite 126
- Oberdörster, Günther (2000) Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. In: Int Arch Occup Environm Health. 74(1) Seite 1-8
- Oberdörster, Günther et. al. (2004) Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. In: Inhalation Toxicology 16(6-7) Seite 437-445
- Oberdörster, Günther; Oberdörster, Eva; Oberdörster, Jan (2005) Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. In: Environmental Health Perspectives. Vol. 113 Nr. 7 S. 823-839
- Risikokommission [Hrsg.] (2003) Abschlussbericht der Risikokommission. Ad-hoc-Kommission „Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risiko-

bewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland“. Salzgitter

The Royal Society, The Royal Academy of Engineering [Hrsg.] (2004) Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.

Schulz, Jens et. al. (2002) Distribution of sunscreens on skin. Adv Drug Deliv Rev 54(1) Seite 157-163

Steinfeld, Michael; von Gleich, Armin; Petschow, Ulrich; Haum, Rüdiger; Chudoba, Thomas; Haubold, Stephan (2004) Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. Schriftenreihe des IÖW 177/04

Swiss Re (2004) Nanotechnologie: Kleine Teilchen – große Zukunft? Reihe Risk Perception Zürich: Eigenverlag

TAB Büro für Technikfolgenabschätzung [Hrsg.]; Paschen, Herbert; Coenen, Christopher; Fleischer, Torsten; Grünwald, Reinhard; Oertel, Dagmar; Revermann, Christoph (2003) Nanotechnologie. TAB-Arbeitsberichte Nr. 92. Berlin: Eigenverlag. (Auch als Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages unter Drucksache 15/2713 veröffentlicht.)

VDI-TZ ZTC Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH [Hrsg.] (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. Innovations- und Technikanalyse.

Warheit, David B. (2004) Comparative Pulmonary Toxicity Assessment on Single Walled Carbon Nano Tubes in Rats. In: Toxicol. Sci. 77(1) Seite 117

Warheit, David B. (2004b) Nanoparticles: Health impacts? Materials today 02/2004 Seite 32-35

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WGBU [Hrsg.] (1998). Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998. Berlin: Springer

Weiterführende Literatur finden Sie auf der Homepage unter [www.dialog-nanopartikel.de/downloads.html](http://www.dialog-nanopartikel.de/downloads.html).

[www.dialog-nanopartikel.de](http://www.dialog-nanopartikel.de)

Das Vorhaben „Ermittlung und Bewertung der Umwelt- und Gesundheitsgefahren durch Nanopartikel“ wird im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplan – Förderkennzeichen 205 61 220 erstellt und mit Mitteln des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit finanziert.