

Übersichtsbeiträge

Auswirkungen nanotechnologischer Entwicklungen auf die Umwelt

Harald F. Krug

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Toxikologie und Genetik, Hermann-von-Helmholtz-Platz-1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Korrespondenzautor (krug@itg.fzk.de)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2005.08.103>**Zusammenfassung**

Hintergrund. Die Nanowissenschaften entwickeln und nutzen Materialien, die im primären Stadium die Größe von häufig nur wenigen Nanometern besitzen. Diese sehr feinen Partikel zeigen völlig neue Eigenschaften und damit auch neue Chancen in der Anwendung. Die Synthese von Nanopartikeln im technischen Maßstab wird schon seit Jahrzehnten durchgeführt; die Exposition der Lebewesen gegenüber ultrafeinen Partikeln findet jedoch schon viel länger statt, da diese Partikel häufig bei Verbrennungsprozessen freigesetzt werden.

Ziel. In diesem Beitrag sollen ausschließlich produzierte Nanomaterialien betrachtet werden, da auf diesen technischen Produkten große Hoffnungen zu vielfältiger Nutzung ruhen, während zu den möglichen negativen Wirkungen für Lebewesen oder für die Umwelt nahezu keine Informationen vorliegen. Am Arbeitsplatz, während der Produktion, in technischen oder gar in medizinischen Anwendungen werden Nanopartikel selbstverständlich auch 'Nebenwirkungen' haben, die es sehr genau gegenüber den Vorteilen dieser Materialien abzuwägen gilt, bevor diese in die Umwelt entlassen werden. Daher ist mehr Information zu ihrer Sicherheit und zu den möglichen Gefährdungen absolut notwendig.

Ergebnisse und Diskussion. Mittlerweile hat auch eine öffentliche Diskussion zu den Gefahren der Nanotechnologie begonnen, die dazu geführt hat, dass die Risikoforschung intensiviert wird. Diese Forschungsaktivitäten sind in verschiedenen Fachrichtungen initiiert worden, um die umwelttoxikologischen, -hygienischen und gesundheitlichen Folgen zu untersuchen und die Risiken, die bei Produktion und Umgang mit diesen Materialien entstehen könnten, zu charakterisieren und abzuschätzen.

Demgegenüber stehen aber auch nanotechnologische Entwicklungen, die heutige Umweltprobleme lösen helfen können, indem mit neuen Materialien Abfälle und Abwässer gereinigt, energie- und materialsparende Techniken eingesetzt und mögliche Gefährdungen, z.B. durch Chemikalien, frühzeitig detektiert werden können. Dennoch ist es außerordentlich wichtig, die neuen Eigenschaften der Nanomaterialien auch dahingehend zu berücksichtigen, dass biologische Systeme davon in Mitleidenschaft gezogen und die Gesundheit des Menschen negativ beeinflusst werden könnte.

Schlussfolgerungen. Um die Risiken von Nanopartikeln abschätzen zu können, ist eine umfassende Untersuchung des gesamten **Lebenszyklus** der neuen Materialien notwendig, die sich sowohl mit den Transportwegen in der Umwelt, den Expositionspfaden der lebenden Organismen, den toxischen Effekten sowie der Bioverfügbarkeit und der Bioakkumulation beschäftigen.

Schlagwörter: Nanopartikel, Anwendungen; Nanopartikel, biologische Mechanismen; Nanopartikel, Einwirkungen; Nanopartikel, Gefährdung; Nanopartikel, Toxizität; Nanopartikel, Umwelt; Nanotechnologie

Abstract**Impact of Nanotechnological Developments on the Environment**

Background. Nanotechnology is about discovering, developing and using materials consisting in their primary stage at a size within the low nanometer range. These ultrafine particles offer new properties and opportunities. Even if the synthesis of nanoparticles has been discovered not until during the last decades, the exposure of humans to ultrafine particles occurred long before, due to the generation of ultrafine particles in ambient air during combustion processing.

Aim. Within this review, only engineered nanoparticles are considered, because these technical products are associated with many hopes for new applications, while only little information is available about their potential adverse effects. At workplaces, during manufacturing, in technical applications or in drugs, nanoparticles will always have 'side effects' which have carefully to be weighed against their advantages, before they can be released in the environment. Therefore, information about their safety and potential hazards is urgently needed.

Results and Discussion. Along with the technical development of nanoparticles, a public discussion has started, leading to extensive investigations on possible negative 'side effects' on human health. Research activities have been strengthened in departments for environmental toxicology, hygiene institutes and other academic facilities to identify hazard and risks during handling and use of these new materials. On the other hand, nanotechnology offers the promise to prematurely identify environmental problems through improved detection and monitoring capabilities, and significantly reduced environmental effects from cleaner manufacturing and synthesis approaches, which results in a reduction or elimination of wastes as well as reduced energy use, and unique remediation solutions as well as pollution strategies.

Conclusions. However, the potential impact of manufactured nanomaterials used in various applications also needs to be evaluated in the context of human health with regard to potential toxicology and routes of exposure, environmental effects, including fate, transport, transformation, bio-availability, and bio-accumulation, and an analysis of product-life cycle.

Keywords: Nanoparticles, applications; nanoparticles, biological mechanisms; nanoparticles, environment; nanoparticles, hazards; nanoparticles, implications; nanoparticles, toxicity; nanotechnology

1 Problemstellung

Seit Feynman's legendärem Ausspruch "There's Plenty of Room at the Bottom" (Feynman 1960) sind die Naturwissenschaftler der Physik, Chemie, Elektronik und anderer Fachrichtungen damit beschäftigt, die kleinsten Einheiten der Materie neu zu kombinieren. Mit den Möglichkeiten

der modernen Analytik, insbesondere der Atomkraftmikroskopie-Technik, können nicht nur die Eigenschaften von Materie und Atomen untersucht, sondern sogar einzelne Atome manipuliert werden. Dies führte dazu, dass, begleitend zu den bekannten Ergebnissen, auch Spekulationen aufkamen, die eine Manipulation der Materie auf der Ebene einzelner Atome dahingehend interpretierten, dass die Möglichkeit besteht, damit Motoren und Maschinen zu generieren, die sich selbst replizieren und eventuell außer Kontrolle geraten könnten. Ohne diese lange geführte Diskussion zwischen Eric Drexler, dem Vertreter der Gefährdungshypothese, und Richard Smalley, dem Vertreter der Sicherheitshypothese, wieder wachrufen zu wollen (Baum 2003), zeigen die Reaktionen darauf doch, dass hier 1. eine vernünftige Kommunikation notwendig ist, um auf die realen Gefährdungen hinzuweisen, und 2. eine begleitende sicherheitsrelevante Forschung benötigt wird, um die wirklichen Gefährdungen zu identifizieren und ihnen begegnen zu können. Womit in naher Zukunft sehr wahrscheinlich gerechnet werden muss, ist eine Steigerung der Produktion von Nanomaterialien und Nanopartikeln und damit verbunden auch ihre mögliche Freisetzung in Luft, Wasser und Boden.

2 Risiko-Management

Der erste Schritt zum Risiko-Management ist die Identifizierung potenzieller Risiken und deren Ursache. Eine vernünftige Risikoidentifizierung muss alle Bereiche einer Technologie einschließen, sowohl interne als auch externe Faktoren (Abb. 1). Dazu ist eine intensive Forschung notwendig, die sich mit den Belangen sowohl gesundheitlicher als auch umweltrelevanter Fragen beschäftigt (Aitken et al. 2004, Helland 2004, Royal Society 2004):

- Partikelaufnahme durch lebende Organismen
- Akkumulation von Nanopartikeln in bestimmten Organen (z.B. Lunge, Leber, Milz, Gehirn, Fötus)
- Spezifische Effekte von Nanopartikeln im Atemtrakt (z.B. Entzündung)
- Verbleib und Verhalten der Nanomaterialien in der Umwelt (z.B. Mobilisierung von Schwermetallen, Bindung an und von toxischen Substanzen)
- Mögliche Akkumulation über die Nahrungskette
- Desorption/Adsorption
- überraschende Effekte

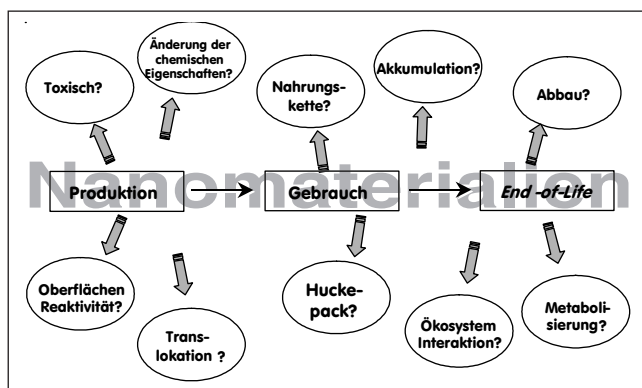


Abb. 1: Fragen zur Identifizierung einer Gefährdung durch Nanopartikel, die während des gesamten Lebenszyklus in der Umwelt auftreten können (verändert nach: Helland 2004)

Ein sehr wichtiger Gesichtspunkt für die Abschätzung möglicher Risiken aus der Nanotechnologie liegt in der Unterscheidung zwischen freien Nanomaterialien, speziell nanoskaligen Partikeln, und fixierten Nanopartikeln, da hier ein großer Unterschied in der Mobilität besteht. Weiterhin muss zwischen Partikeln und Materialien unterschieden werden, die als technische Produkte hergestellt werden und solchen, die unbeabsichtigt bei technischen Prozessen entstehen und in die Umwelt entlassen werden (z.B. Dieselruß, Flugasche, Katalysatorstaub, Kerzenruß, usw.). Letzteren, hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen stammenden, ultrafeinen Partikeln (UFP), war und ist der Mensch seit Anbeginn seiner biologischen Entwicklung ausgesetzt gewesen. Waren es in früheren Zeiten Waldbrände, Vulkane oder Sand- und andere Sturmereignisse, so ist seit der industriellen Revolution und mit der Entwicklung des Straßenverkehrs ein dramatischer Anstieg der UFP in der Luft innerhalb des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen.

Mit der anzunehmenden sehr schnellen Entwicklung auf dem Gebiet nanotechnologischer Produkte muss jetzt damit gerechnet werden, dass eine weitere Quelle für solche kleinsten Partikel entsteht, die über die Umwelt zum Menschen oder umgekehrt, d.h. von den Herstellerbetrieben in die Umwelt, gelangen. Die damit einhergehende Belastung von Mensch und Tier über Atmung, Nahrung und Haut, sowie die direkte Injektion von Nanopartikeln im medizinischen Bereich, könnte zu adversen Effekten führen (Krug 2003, Krug et al. 2004, Krug und Diabaté 2003, Oberdörster 2004). Mit dem Wissen, dass neu synthetisierte Nanomaterialien völlig neue Eigenschaften im Hinblick auf chemische, physikalische und elektronische Anwendungen besitzen, können auch gänzlich neue Auswirkungen für lebende Systeme postuliert werden. Daher kann das Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt und in lebenden Organismen nicht einfach extrapoliert werden; eine aussagefähige Vorhersage für die Toxizität von Nanopartikeln kann auf der Basis des Wissens über konventionelle Materialien nicht erreicht werden. Die Situation ist, zusätzlich zu den oben genannten neuen Auswirkungen, auch aus den folgenden Gründen nicht einschätzbar:

- durch die große Zahl verschiedener Substanzen und
- durch die große Zahl unterschiedlicher Strukturen, Oberflächen und Größen.

Daher sind Informationen zur Sicherheit und zu den möglichen Gefährdungen durch Nanomaterialien dringend notwendig. Dabei kann durchaus von den bisherigen Studien zur Auswirkung ultrafeiner Stäube in der Umwelt profitiert werden, denn hier liegt bereits eine Vielzahl von Erkenntnissen vor. Seit dem Mittelalter und früher gibt es gut dokumentierte Fälle zur arbeitsplatzbezogenen Exposition mit gesundheitlichen Auswirkungen. Speziell die Kumpel in den Bergwerken sind längere Zeit ihres Lebens einer inhalativen Exposition gegenüber Staub in jeder Größe ausgesetzt, die zu Pneumokoniose und Fibrose der Lunge führen kann. Dabei hat sich gezeigt, dass gerade die Fraktion der ultrafeinen Partikel in der Luft zu den stärksten gesundheitlichen Einschränkungen führten (de Hartog et al. 2003, Eikmann und Seitz 2002, Heinrich et al. 2002, Kappos et al. 2004, Oberdörster 2000, Pekkanen et al. 2002, Peters et al. 2002).

3 Quellen ultrafeiner Partikel: Neue Produkte

Die Erkenntnisse aus diesen und vielen weiteren Studien lässt durchaus eine vorsichtig befangene Einstellung gegenüber neuen Quellen sehr feiner Partikel erwarten. Verschiedene Produkte sind bereits seit langer Zeit auf dem Markt (Tab. 1).

Einige dieser Produkte werden über kurz oder lang zu einer Erhöhung der Partikelanzahl in der Umwelt führen, auch wenn nicht alle freigesetzten Partikel im ultrafeinen Bereich unter 100 nm sein werden. Die Nutzung nanotechnologischer Produkte in allen Lebensbereichen wirft einige wichtige Fragen auf:

- Folgt aus der Nutzung unmittelbar eine erhöhte Exposition gegenüber Nanopartikeln und welche Expositionspfade sind beteiligt?
- Wohin gehen die Nanopartikel nach einer Freisetzung und wo verbleiben sie?
- Gibt es ein nicht akzeptierbares Risiko durch die neuen Materialien?

Derzeit wird durch die Produktion von Nanomaterialien und -partikeln kein nennenswerter Beitrag zur Partikelanzahl in der Luft geleistet. Die öffentliche Diskussion und die vertretenen Meinungen in der Tagespresse basieren augenblicklich rein auf Spekulation. Allerdings sollte auch deutlich gemacht werden, dass es an den entsprechenden Daten zur Beurteilung einer Exposition und der Gefährdung noch fehlt und hier die Wissenslücken unbedingt in naher Zukunft geschlossen werden müssen. Hierzu hat sich mittlerweile ein neues Forschungsfeld etabliert, die Nanotoxikologie. Diese hat sich auf die Untersuchung zur biologischen Sicherheit von technischen Nanostrukturen und -materialien spezialisiert. Auch für diesen Teil der toxikologischen Forschung gelten die gleichen Regeln wie für die Abschätzung einer Gefährdung durch andere chemische Umweltbelastungen (Abb. 2).

Tabelle 1: Gebrauch von nanoskaligen Metalloxiden und Kohlenstoffmodifikationen in verschiedenen Produkten von kommerziellem Interesse (Beispiele)

Typ	Produkte (Beispiele)
Metalloxide <ul style="list-style-type: none"> • Siliziumdioxid (SiO₂) • Titandioxid (TiO₂) • Aluminiumoxid (Al₂O₃) • Eisenoxid (Fe₃O₄, Fe₂O₃) • Zirkonoxid (ZrO₂) • Zinkdioxid (ZnO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • Additive in Polymerkompositen • UV-A Schutz • Solarzellen • Pharmazie / Medizin • Additive zu kratzresistenten Oberflächen
Kohlenstoffmodifikationen <ul style="list-style-type: none"> • Carbon Black 	<ul style="list-style-type: none"> • Autoreifen, Drucker, Kopierer
Fullerene <ul style="list-style-type: none"> • Buckminsterfullerene (C₆₀) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische und tribologische Anwendungen / Additive zu Schmierfetten
Kohlenstoffnanoröhrchen <ul style="list-style-type: none"> • <i>Single-wall</i> Kohlenstoffnanoröhrchen • <i>Multi-wall</i> Kohlenstoffnanoröhrchen 	<ul style="list-style-type: none"> • Additive in Polymerkompositen • Elektronische Feldemission • Batterien • Brennstoffzelle
Kohlenstoffnanodrähte <ul style="list-style-type: none"> • verschiedene Konformationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische und tribologische Anwendungen <ul style="list-style-type: none"> – Trägermaterial für Katalysatoren – Additive in Polymerkompositen – Elastische Schäume

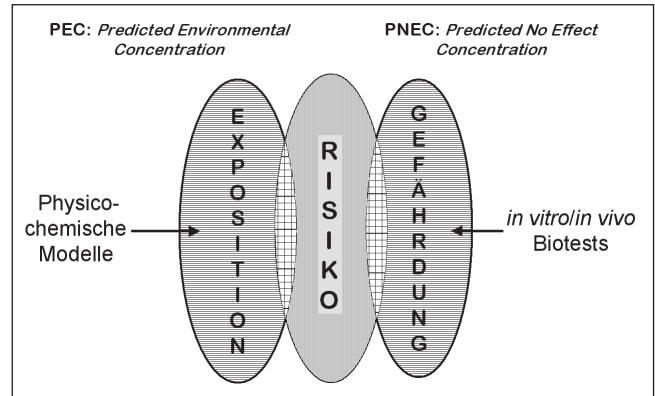


Abb. 2: Konventioneller Ansatz für eine ökotoxikologische Risikoabschätzung

Dabei gilt, dass bei kleinem PEC-Wert und großem PNEC-Wert ($PEC/PNEC < 1$) mit nur geringem Risiko zu rechnen ist und daher keine Maßnahmen zur Minderung notwendig sind, während umgekehrt, bei hohem PEC-Wert und niedrigerem PNEC-Wert ($PEC/PNEC > 1$), weitere Maßnahmen erforderlich sind. Das kann einerseits bedeuten, dass eine beschränkte Nutzung die Folge ist, kann aber auch durch erweiterte Testverfahren behoben werden, wenn daraus folgt, dass das Verhältnis der beiden Werte wieder kleiner 1 wird.

4 Produktion und Gebrauch von Nanomaterialien

Wie oben bereits erwähnt, wird die Produktion und der Gebrauch von Nanomaterialien dramatisch ansteigen, und alle Bereiche des täglichen Lebens werden davon betroffen sein. Eine Exposition gegenüber Nanomaterialien wird somit immer wahrscheinlicher, wobei eine wichtige Unterscheidung sein wird, ob diese Materialien beschichtet oder unbeschichtet sind. Beschichtungen verändern die Eigenschaften des Materials, was sich direkt auf den Partikel und sein Verhalten in biologischen Systemen auswirkt. Ebenfalls wichtig für mögliche weitreichende Effekte ist die Stabilität und damit die Überlebenszeit (Persistenz) der Partikel in der Umwelt. Sowohl die umweltrelevanten als auch die gesundheitlichen Effekte werden größtenteils dadurch geprägt, ob es sich um kurzlebige oder langlebige/stabile Nanopartikel handelt. Für stabile Partikel gilt prinzipiell Ähnliches wie für langlebige Chemikalien; sie könnten, wenn sie von lebenden Organismen aufgenommen werden, dort akkumulieren, sich in bestimmten Zielorganen anreichern und letztlich eine kritische Wirkung entfalten, wenn eine genügend große Dosis erreicht ist. Daher müssen rechtzeitig Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden, um frühzeitig solche stabilen (persistente) Materialien mit kritischer Konsequenz zu erkennen und deren Freisetzung zu verhindern. In einem Bericht des Institutes für Arbeitsmedizin in Großbritannien wurde jüngst gefordert, dass folgende Punkte unbedingt beachtet werden müssen (Aitken et al. 2004):

- potenzielle Pfade für die Exposition des Menschen,
- mögliche industrielle Quellen für eine arbeitsplatzbezogene Exposition,
- die Höhe der Exposition,
- die Mittel und Effektivität von Kontrollmaßnahmen,
- die Zahl der möglicherweise exponierten Menschen,

- Trends im Gebrauch von nanotechnologischen Produkten, das rechtzeitige Erkennen von Auswirkungen, die durch den Wechsel vom Labormaßstab zum industriellen Maßstab hervorgerufen werden.

Diese Punkte sind so oder in ähnlicher Weise auch übertragbar auf die Verhältnisse in der Umwelt; z.B. gelangen in geringem aber kontinuierlichem Maße Nanopartikel aus kosmetischen Produkten durch Körperreinigung in das Abwasser und somit in die Umwelt (Daughton und Ternes 1999).

5 Möglichkeiten und Gefährdungspotenzial von Nanomaterialien

Die technischen Möglichkeiten der Nanotechnologie, neue Typen miniaturisierter Sensoren, Schadstofffilter und Brennstoffzell-Katalysatoren zu entwickeln, können einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Umwelt leisten. Aber diese Entwicklungen stehen erst am Beginn, und die Unsicherheit, die mit der Produktion der neuen Materialien verbunden ist, überwiegt derzeit die möglichen Vorteile. Diese Vorteile zu vermitteln und gegenüber den möglichen Nachteilen abzuwägen, ist eine große Herausforderung der Technologieentwickler. Es gibt jedoch bereits eine Vielzahl von Ideen für bessere 'End-of-Pipe' Technologien, die zur Luftreinhaltung, Abwasser-, Boden- und Abfallreinigung sowie zur Energieproduktion und -speicherung beitragen könnten. Einige Beispiele für die Nutzung in der Umwelt sind:

- Synthese oder Fabrikationsprozesse könnten bei Raumtemperatur und normalem Druck erfolgen, um Energie zu sparen.
- Der Gebrauch von nicht-toxischen Katalysatoren führt zu minimaler Bildung von Schadstoffen und reduziert Materialaufwand und Emission.
- Wasser-basierte Reaktionen können Lösungsmittel sparen helfen, Kontaminanten reduzieren, und eine angepasste Produktion 'just in time' kann Umweltbelastung reduzieren und Überproduktion verhindern.
- Nanoskalige Informationstechnologie wird die Kontrolle von Produkten und Produktwegen verbessern, um Recycling, Wiedereinsatz und 'end of life' Entsorgung umweltgerechter zu gestalten.
- Nanoskaliges Eisen könnte sehr effizient bei der Grundwasserbehandlung eingesetzt werden, mit weiteren Verbesserungsmöglichkeiten durch den Einsatz zusätzlicher Metalle, z.B. Palladium.
- Verschiedene Nanomaterialien können als Halbleiterfilme Anwendung finden, um Sensoren oder Photokatalysatoren zu produzieren, und diese Sensoren könnten organische Schadstoffe detektieren und über die photokatalytischen Reaktionen auch gleich 'entsorgen'.
- Einzelmoleküldetektion könnte Schadstoffe frühzeitig erkennen helfen, so dass Vorsorgemaßnahmen möglich sind.
- Nanobausteine könnten über spezifische Reaktionen Chemikalien analysieren, wobei auch biogene Toxine detektiert werden könnten, um z.B. Nahrungsmittel effizienter zu überwachen.

So sind bereits erste Studien veröffentlicht, in denen Kohlenstoff-Nanoröhrchen als Sensoren für Gase eingesetzt werden (Modi et al. 2003), Metalloxid-Partikel empfindlich auf

Feuchtigkeit oder Wasserstoff reagieren (Varghese und Grimes 2003), Silber-Polymernanopartikel für den Nachweis von aromatischen Kohlenwasserstoffen (De Jesus et al. 2004), und Nanopartikel zum Abfangen organischer Schadstoffe verwendet werden (Yuan 2004).

Neben diesen positiven Aspekten zu nanotechnologischen Anwendungen in der Umwelt dürfen aber die oben bereits erwähnten möglichen negativen Einwirkungen auf Umwelt und lebende Organismen nicht aus den Augen verloren werden. Erste Studien zur direkten Untersuchung einer Exposition gegenüber Nanopartikeln und deren Effekte auf die Mortalität wurden mittlerweile schon ausgeführt. Allerdings wurden bisher keine signifikanten Steigerungen der standardisierten Mortalitätsrate für spezifische Todesursachen weder in Ratten gefunden, die hohen Konzentrationen an nanoskaligem TiO_2 ausgesetzt waren, noch bei Arbeitern einer Kohortenstudie nachgewiesen (Fryzek et al. 2003). Die Datenlage ist aber alles andere als ausreichend, um als Basis für eine wissenschaftliche Diskussion zu dienen. Selbst wenn die reinen Nanomaterialien keinen negativen Effekt auf lebende Systeme hätten, könnten sie nach Ansicht von Toxikologen und Arbeitsmedizinern durchaus in der Lage sein, andere chemische Kontaminanten auf ihrer Oberfläche zu binden und diesen einen erleichterten Transport in der Luft oder im Wasser zu ermöglichen und damit zu einer erhöhten Belastung der Organismen in der Umwelt führen. Die meisten Nanomaterialien oder -produkte sind derzeit nur im Laborgebrauch, so dass eine Umweltbelastung aktuell niedrig oder vernachlässigbar ist. Aber mit der ansteigenden Zahl der möglichen Anwendungen erhöht sich auch eine mögliche Belastung der Umwelt und die Exposition lebender Organismen (Aitken et al. 2004, Luther 2004).

6 Verteilung von Nanopartikeln über die Luft

Abhängig von Produktion und Gebrauch können Nanomaterialien das Wasser oder die Luft erreichen, um letztlich in den Boden oder das Grundwasser zu gelangen. Darüber hinaus wird ihre Verwendung in Ein-Weg-Artikeln zur erhöhten Vorsicht gegenüber Recycling und Abfalldeponierung führen müssen. Da sich Nanopartikel in der Luft eher wie Gasmoleküle verhalten und so gut wie nicht sedimentieren, könnten sie sehr große Distanzen zurücklegen. Die Langzeit-Effekte sind aufgrund der dürftigen Datenlage derzeit überhaupt nicht kalkulierbar. Allerdings ist die Luft eines der bestuntersuchten Umweltkompartimente, und ihre Belastung wird seit vielen Jahrzehnten aufgezeichnet. Die über die Luft exponierten Organismen werden intensiv untersucht, und viele Studien beschäftigten sich mit adversen Effekten der partikulären Masse in der Luft. Dennoch sind die unverhältnismäßig höheren Wirkungen gerade der ultrafeinen Partikel in der Luft erst in den vergangenen 10 Jahren wirklich erkannt worden (de Hartog et al. 2003, Ibaldo-Mulli et al. 2002, Kappos et al. 2004, Schulz et al. 2005, Wichmann et al. 2000). Es könnte nun vermutet werden, dass in den folgenden Jahren die Zahl der ultrafeinen Partikel in der Luft ansteigt, zuerst am Arbeitsplatz und nachfolgend auch in der Umwelt. Vor allem wegen der Oberflächenbehandlung technisch hergestellter Nanopartikel könnte es durchaus zur Freisetzung von nanoskaligen Partikeln kommen, während

Tabelle 2: Koagulations-Halblebenszeiten von Nanopartikeln (Originalwerte aus: Preining 1998)

Partikel Durchmesser [nm]	Halblebenszeit bei einer Konzentration von			
	$1 \text{ g} \times \text{m}^{-3}$	$1 \text{ mg} \times \text{m}^{-3}$	$1 \text{ } \mu\text{g} \times \text{m}^{-3}$	$1 \text{ ng} \times \text{m}^{-3}$
1	2,20 μs	2,20 ms	2,20 s	36,67 min
2	12,00 μs	12,00 ms	12,00 s	3,34 h
5	0,12 ms	0,12 s	2,00 min	33,34 h
10	0,70 ms	0,70 s	11,67 min	8,10 d
20	3,80 ms	3,80 s	63,34 min	43,98 d

normalerweise oxidische Metallpartikel und auch Kohlenstoffnanomaterialien kurze Zeit nach ihrer Entstehung bereits zu aggregieren beginnen und größere Agglomerate bilden, die häufig schneller sedimentieren als die Primärpartikel. Direkt nach der Präparation verhalten sich die Primärpartikel eher wie ein Gas oder eine Dampfphase, in der Diffusionsprozesse überwiegen. Die Primärpartikel haben hohe Diffusionskoeffizienten und mischen sich schnell in Aerosolsystemen. Das ist ein wichtiger Aspekt bei der Kontrolle solch kleinster Partikel in der Luft. In geschlossenen Synthesystemen, die ein Leck aufweisen, könnten Nanopartikel wegen ihrer viel höheren Mobilität eher unbemerkt entweichen als ihre größeren Vertreter. Durch die schnellere Verteilung ist die messbare Konzentration an der Austrittsstelle eher niedrig; dafür könnte eine größere Zahl an Individuen exponiert werden, da die Partikel sich großflächiger verteilen. Aus diesem Grund müssen zur Kontrolle Gasdetektionssysteme verwendet werden und keine Partikeldetektoren, in jedem Falle aber sehr sensitive Systeme. Auf der anderen Seite führt die höhere Geschwindigkeit der kleineren Partikel auch zu einer größeren Zahl an Kollisionen, die ihre Neigung zur Aggregation und Agglomeration unterstützt und das Wachstum der Partikel fördert. Dieser Wachstumsprozess ist direkt abhängig von der Anzahl der Partikel im Volumen und ihrer Mobilität. Obwohl dieser Prozess sehr schnell abläuft (Tab. 2), muss berücksichtigt werden, dass aus diesen Kollisionen meistens wieder ein Nanopartikel resultiert, der zwar größer ist als die Primärpartikel, aber dennoch häufig mindestens eine Ausdehnung im Raum besitzt, die kleiner ist als 100 nm.

Eine Schwierigkeit ist es und wird es auch bei den zukünftigen Studien sein, dass luftgetragene Partikel keine einheitliche Population darstellen, sondern sich immer aus den unterschiedlichsten Quellen ergeben. So mischen sich möglicherweise emittierte technische Partikel schon am Arbeitsplatz z.B. mit Dieselabgasen beim Packen und Verladen der Nanomaterialien (Kuhlbusch et al. 2004), so dass Bestimmung und eindeutige Quellenzuweisung häufig sehr schwierig ist. Dennoch gibt es Hinweise darauf, dass während des Prozessierens von Nanomaterialien solche auch in die Luft freigesetzt werden (Maynard et al. 2004). Dies sind jedoch bisher die einzigen aktuellen Studien, die sich mit der Freisetzung produzierter Nanopartikel beschäftigen haben. Zwei weitere Berichte haben kürzlich Zusammenfassungen von Studien präsentiert, die sich mit generellen Aspekten der Verteilung ultrafeiner Partikel in der Atmosphäre als auch am Arbeitsplatz beschäftigen, allerdings im wesentlichen unabsichtlich entstehende Partikel und nicht technisch produzierte berücksichtigen (Brown et al. 2003, Möhlmann 2003).

7 Verteilung von Nanopartikeln über das Wasser

Über einen längeren Zeitraum betrachtet, wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Verteilung und eine Exposition der Umwelt und des Menschen über das Wasser und den Boden geben. Wenn das Wachstum in der Produktion tatsächlich so schnell gehen wird wie prognostiziert, könnten steigende Konzentrationen von Nanomaterialien im Grundwasser oder im Boden ein wesentlicher Expositionspfad sein, der bei Abschätzungen eines Umweltrisikos beachtet werden sollte (Colvin 2003). Solche Produkte sind bereits im Einsatz als Titandioxid-Nanopartikel in Sonnenschutzmitteln und Farben, als Kohlenstoffnanoröhrchen in Kompositmaterialien (Autoreifen) oder als Aluminiumnanopartikel in Haarwaschmitteln (Daughton und Ternes 1999).

Wie oben bereits erwähnt, können verschiedene metallische als auch Polymernanopartikel bei der Grundwassersanierung eingesetzt werden und sind somit ebenfalls eine mögliche Belastungsquelle (Lecoanet und Wiesner 2004, Tungittiplakorn et al. 2004, Wang und Zhang 1997).

Zwei Punkte sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung: zum einen müssen die direkten Effekte der Nanomaterialien in der Umwelt untersucht werden, und zum anderen müssen die Wege der Nanomaterialien in die Umwelt hinein (und durch z.B. die poröse Bodenmatrix hindurch) aufgeklärt werden. Erste Studien haben einen großen Unterschied der Beweglichkeit von Nanopartikeln in porösen Medien festgestellt, abhängig davon, ob es sich um oxidische Partikel oder Kohlenstoffpartikel, wie Fullerene, handelt (Lecoanet et al. 2004, Lecoanet und Wiesner 2004). Während ihres Transports im Wasser oder durch die Bodenmatrix könnten auch harmlose Partikel mit anderen Chemikalien reagieren oder diese adsorbieren und dadurch selbst zu einer möglichen Gefährdung beitragen (Gerde et al. 2001, Moore und Willows 1998, Xia et al. 2004). Viele Substanzen haben die Möglichkeit, an der Oberfläche von Nanoteilchen fest zu haften (De Jesus et al. 2004, Mudroch et al. 1994); diese Adsorbentien könnten dann eine biologische Wirkung mit verursachen, speziell die Aufnahme durch Organismen erhöhen oder auch direkt adverse Effekte auslösen (Abb. 3). Es wäre denkbar, dass die Partikel selbst oder aber die gebundenen Schadstoffe nach einer Aufnahme durch Lebewesen in deren Zellen, z.B. über eine lysosomale Schädigung, eine verstärkte Autophagie und damit Zellschädigung hervorrufen, wie es von Moore (2002) angedeutet wird.

Am Beispiel der Fullerene konnte allerdings auch gezeigt werden, dass die Verfügbarkeit und die Mobilität von Nanomaterialien in Wasser und Boden sehr stark von den physiko-

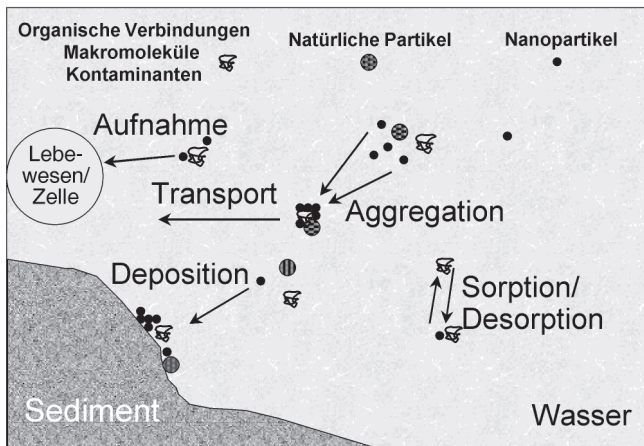


Abb. 3: Verteilung und mögliche Reaktionen von Nanopartikeln im aquatischen System

chemischen Eigenschaften der Oberfläche dieser Teilchen abhängt. Bei unterschiedlichen Ionenstärken und pH-Werten haben sich drei Fullerenpräparationen und vier verschiedene oxidische Materialien sehr verschiedenartig verhalten, was ihre Transporteigenschaften im Aquifer anbelangt (Lecoanet et al. 2004, Lecoanet und Wiesner 2004). Während der Transport von mineralischen Nanopartikeln durch gängige Modelle für den Partikeltransport in porösen Medien beschrieben werden konnte, galt dies für die Fullerene nicht, da diese sich völlig unerwartet verhielten und ungewöhnliche Eigenschaften aufwiesen. Gerade die Form der Fullerene, die vor kurzem in biologischen Tests für Aufsehen gesorgt hatte (Oberdörster 2004), ist die am wenigsten mobile in den Boden- und Wasseruntersuchungen gewesen, so dass hier eher ein reduziertes Risiko zu erwarten ist. Dieses Beispiel soll demonstrieren, dass unser Wissen zum Verhalten von Nanomaterialien in der Umwelt völlig ungenügend und die daraus resultierende Debatte um mögliche Risiken fachlich noch nicht fundiert ist. Daher sollte für jedes Material eine Bewertung herbeigeführt werden, die auch das Wissen zur Verfügbarkeit und den Transport im Wasser und/oder im Boden berücksichtigt (Abb. 4).

Die oben zitierte Arbeit von Eva Oberdörster (2004) hat erstmals einen direkten Effekt von im Wasser suspendierten Fullerenen auf Fische zeigen können. Nach einer Exposition

mit 0,5 ppm wasser-löslicher Buckyballs (C_{60}) über 48 h wiesen die Tiere signifikante Erhöhungen der Lipidperoxidation im Gehirn auf. Weiterhin wurde die Genexpression z.B. in der Leber kontrolliert, wobei auffiel, dass es hier Gene gab, die angeschaltet und andere, die ausgeschaltet waren. Es gab somit Hinweise auf eine systemische Wirkung der Fullerene, obwohl die Autorin selbst die Konzentration als sehr hoch einstufte und den Fullerenen nur eine 'moderate Toxizität' zuordnete. Unbeantwortet sind bisher die Fragen, wieviel von dem Material wirklich von den Fischen aufgenommen wurde und ob dieses Material tatsächlich in der Nahrungskette oder auch in spezifischen Organen, wie dem Gehirn, akkumulieren kann. Eine solche Akkumulation würde dann auch eine Gefährdung anderer Organismen nahe legen. Es ist daher notwendig, die Anstrengungen zu vergrößern, um mehr Informationen über die Bioakkumulation der Nanomaterialien zu erhalten, da viele von ihnen sicher nur schlecht biodegradierbar sind und sich daher unter Umständen wie persistente Schadstoffe verhalten könnten.

8 Schlussfolgerungen

Auf der Basis des bisher aufgezeigten Wissensstandes können grundsätzlich 4 wichtige Überlegungen zum ökotoxikologischen Risikomanagement von Nanomaterialien angestellt werden:

1. Die bisherigen Untersuchungen zur Toxikologie von Nanomaterialien sind eher eine Beschreibung der Symptome gewesen; es ist daher dringend notwendig, mehr über die Wirkmechanismen auf zellulärer und molekularer Ebene zu erfahren.
2. Die Weiterentwicklung von Modellen und Modellsystemen ist notwendig, um zelluläre und physiologische Prozesse besser erfassen und die Kommunikation zwischen den Zellen in die Untersuchungen mit einschließen zu können.
3. Es sollte eine Beziehung zwischen molekularen, zellulären und pathophysiologischen Endpunkten mit ökologischen Konsequenzen hergestellt werden können.
4. Eine präzisere vorbeugende Abschätzung möglicher schädigender Einflüsse von neuen Entwicklungen auf dem

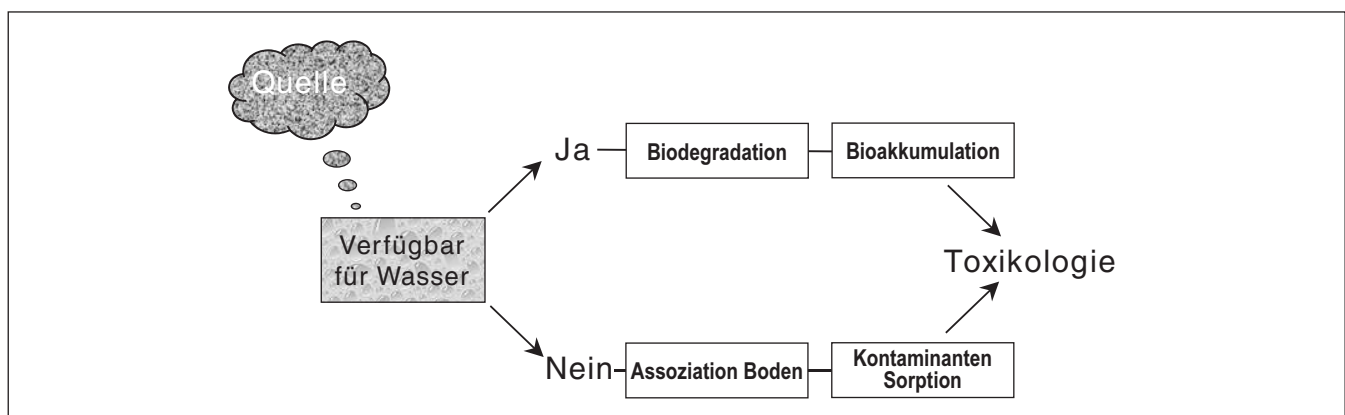


Abb. 4: Entscheidungsschema für eine Bewertung von Nanomaterialien in Umweltkompartimenten

Gebiet der Nanotechnologie sollte durch eine verbesserte Datenlage möglich sein.

Erst auf der Grundlage eines verbesserten Wissens um die möglichen Gefahren im gesamten Lebenszyklus der Produkte ist eine Risikoabschätzung möglich und können entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden, um eine Gefährdung für Mensch und Umwelt zu reduzieren.

Dies wurde auch auf einem Workshop des NSF (National Science Foundation) und der EPA (Environmental Protection Agency) deutlich, dessen Ergebnis Dreher (2004) wie folgt zusammenfasst:

Gerade für produzierte Nanopartikel sind eine Reihe von kritischen Punkten zur Risikoabschätzung offen, die Gegenstand weiterer Untersuchungen sein müssen:

1. die valide Expositionsabschätzung,
2. die Toxizität,
3. die Extrapolation ihrer Toxizität aus existierenden Daten zu Partikeln und Fasern der Luft,
4. das Verhalten und der Verbleib in der Umwelt und in Organismen, ihr Transport, die Persistenz und die mögliche Transformation der Nanopartikel,
5. das Recycling und die Nachhaltigkeit der nanotechnologischen Produkte.

Also bleibt die Frage offen, ob alle Nanomaterialien auch gleichzeitig Nanonoxen sind (Kern et al. 2004). Die gesamte Thematik zu Umwelt und Gesundheit wird sehr anschaulich in einem ganz aktuellen Übersichtsartikel dargestellt, der sich mit den möglichen Wegen von Nanopartikeln in der Umwelt sowie den Aufnahmepfaden durch Organismen beschäftigt (Oberdörster et al. 2005). An dieser Stelle bleibt festzuhalten, dass für eine realistische Abschätzung von Exposition, Gefährdung und dem einhergehenden Risiko die gegenwärtige Datenlage nicht ausreicht. Daher erübrigen sich derzeit auch spezifische regulatorische Maßnahmen, da völlig unklar ist, worauf diese eigentlich abzielen sollten. Dennoch sollte dem Umgang mit Nanomaterialien sowohl bei der Entwicklung im Forschungslabor als auch bei der großtechnischen Herstellung erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden, da die einzigartigen Eigenschaften der neuen Materialien nicht nur technisch, sondern auch biologisch Wirkung zeigen können und das Verhalten der Nanopartikel gegenüber den Bulk-Materialien sicher verändert sein wird. Dies ist inzwischen auch von den Förderinstitutionen erkannt worden, und sowohl die europäischen als auch die deutschen Fördergremien haben entsprechende Ausschreibungen und Projekte initiiert. In diesen Projekten wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass das Feld der Nanotoxikologie nur multidisziplinär anzugehen ist, d.h. neben der Industrie und den Behörden sind hier vor allem Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler, Ingenieure, Mediziner, Biologen, Toxikologen, Ökologen, Statistiker und weitere Fachrichtungen gefragt, die sich mit allen Auswirkungen der Nanotechnologie bis hin zu ethischen Fragestellungen und der Betrachtung der Nachhaltigkeit dieser Technologie befassen müssen.

Literatur

- Aitken RJ, Creely KS, Tran CL (2004): Nanoparticles: an occupational hygiene review. Norwich, Crown Copyright
- Baum R (2003): Nanotechnology – Drexler and Smalley make the case for and against 'molecular assemblers'. *Chemical & Engineering News* 81, 37–42
- Brown LM, Collings N, Harrison RM, Maynard AD, Maynard RL (2003): *Ultrafine Particles in the Atmosphere*. London, Imperial College Press
- Colvin VL (2003): The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nature Biotechnol* 21, 1166–1170
- Daughton CG, Ternes TA (1999): Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environ Health Perspect* 107 Suppl 6, 907–938
- de Hartog JJ, Hoek G, Peters A, Timonen KL, Ibaldo-Mulli A, Brunekreef B, Heinrich J, Tiittanen P, van Wijnen JH, Kreyling WG, Kulmala M, Pekkanen J (2003): Effects of fine and ultrafine particles on cardiorespiratory symptoms in elderly subjects with coronary heart disease: the ULTRA study. *Am J Epidemiol* 157, 613–623
- De Jesus MA, Giesfeldt KS, Sepaniak MJ (2004): Factors affecting the sorption of model environmental pollutants onto silver polydimethylsiloxane nanocomposite Raman substrates. *Appl Spectrosc* 58, 1157–1164
- Dreher KL (2004): Health and environmental impact of nanotechnology: toxicological assessment of manufactured nanoparticles. *Toxicol Sci* 77, 3–5 (siehe auch National Science Foundation and U.S. Environmental Protection Agency, May 2003. Nanotechnology Grand Challenge in the Environment Research Planning Workshop, Session E: 'Nanotechnology Implications in Health and the Environment'. <<http://es.epa.gov/ncer/publications/nano/nanotechnology4-20-04.pdf>>)
- Eikmann T, Seitz H (2002): Klein, aber oho! Von der zunehmenden Bedeutung der Feinstäube. *Umweltmed Forsch Prax* 7, 63–64
- Feynman RP (1960): There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science* 23, 22–36
- Fryzek JP, Chadda B, Marano D, White K, Schweitzer S, McLaughlin JK, Blot WJ (2003): A cohort mortality study among titanium dioxide manufacturing workers in the United States. *J Occup Environ Med* 45, 400–409
- Gerde P, Muggenburg BA, Lundborg M, Tesfaigzi Y, Dahl AR (2001): Respiratory epithelial penetration and clearance of particle-borne benzo[a]pyrene. *Res Rep Health Eff Inst* 5–25
- Heinrich J, Grote V, Peters A, Wichmann HE (2002): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte. *Umweltmed Forsch Prax* 7, 91–99
- Helland A (2004): Nanoparticles: a closer look at the risks to human health and the environment. Lund, IIIIEE, Lund University
- Ibaldo-Mulli A, Wichmann HE, Kreyling WG, Peters A (2002): Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles. *J Aerosol Med* 15, 189–201
- Kappos AD, Bruckmann P, Eikmann T, Englert N, Heinrich U, Hoppe P, Koch E, Krause GH, Kreyling WG, Rauchfuss K, Rombout P, Schulz-Klemp V, Thiel WR, Wichmann HE (2004): Health effects of particles in ambient air. *Int J Hyg Environ Health* 207, 399–407
- Kern K, Wörle-Knirsch JM, Krug HF (2004): Nanonoxen: Nanoparticle uptake, transport and toxicity. *Signal Transduction* 3–4, 149
- Krug HF (2003): Nanopartikel: Gesundheitsrisiko, Therapiechance? *Nachrichten aus der Chemie* 51, 1241–1246
- Krug HF, Diabaté S (2003): Ultrafeine Partikel: Gesundheitsrisiko versus Therapiechance!? *umwelt medizin gesellschaft* 16, 250–255
- Krug HF, Kern K, Diabaté S (2004): Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuch einer Abwägung. *Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 13, 58–64

- Kuhlbusch TA, Neumann S, Fissan H (2004): Number size distribution, mass concentration, and particle composition of PM1, PM2.5, and PM10 in bag filling areas of carbon black production. *J Occup Environ Hyg* 1, 660–671
- Lecoanet HF, Bottero JY, Wiesner MR (2004): Laboratory assessment of the mobility of nanomaterials in porous media. *Environ Sci Technol* 38, 5164–5169
- Lecoanet HF, Wiesner MR (2004): Velocity effects on fullerene and oxide nanoparticle deposition in porous media. *Environ Sci Technol* 38, 4377–4382
- Luther W (2004): Industrial application of nanomaterials – chances and risks. Technology analysis. Düsseldorf, Future Technologies Division of VDI Technologiezentrum GmbH
- Maynard AD, Baron PA, Foley M, Shvedova AA, Kisin ER, Castranova V (2004): Exposure to carbon nanotube material: aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material. *J Toxicol Environ Health A* 67, 87–107
- Modi A, Koratkar N, Lass E, Wei B, Ajayan PM (2003): Miniaturized gas ionization sensors using carbon nanotubes. *Nature* 424, 171–174
- Möhlmann C (2003): Ultrafine aerosols at workplaces. Sankt Augustin, HVBG Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA
- Moore MN (2002): Biocomplexity: the post-genome challenge in ecotoxicology. *Aquat Toxicol* 59, 1–15
- Moore MN, Willows RI (1998): A model for cellular uptake and intracellular behaviour of particulate-bound micropollutants. *Mar Environ Res* 46, 509–514
- Mudroch A, Kaiser KLE, Comba ME, Neilson M (1994): Particle-associated PCBs in lake Ontario. *Sci Total Environ* 158, 113–125
- Oberdörster E (2004): Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environ Health Perspect* 112, 1058–1062
- Oberdörster G (2000): Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies. *Philos Trans R Soc Lond Ser A-Math Phys Eng Sci* 358, 2719–2739
- Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J (2005): Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environ Health Perspect* 113, 823–839
- Pekkanen J, Peters A, Hoek G, Tiittanen P, Brunekreef B, de Hartog J, Heinrich J, Ibaldo-Mulli A, Kreyling WG, Lanki T, Timonen KL, Vanninen E (2002): Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease: the Exposure and Risk Assessment for Fine and Ultrafine Particles in Ambient Air (ULTRA) study. *Circulation* 106, 933–938
- Peters A, Heinrich J, Wichmann HE (2002): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Kurzzeiteffekte. *Umweltmed Forsch Prax* 7, 101–115
- Preining O (1998): The physical nature of very, very small particles and its impact on their behaviour. *J Aerosol Sci* 29, 481–495
- Royal Society (2004): Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. London, Royal Society
- Schulz H, Harder V, Ibaldo-Mulli A, Khandoga A, Koenig W, Krombach F, Radekewicz R, Stampfl A, Thorand B, Peters A (2005): Cardiovascular effects of fine and ultrafine particles. *J Aerosol Med* 18, 1–22
- Tungitiplakorn W, Lion LW, Cohen C, Kim JY (2004): Engineered polymeric nanoparticles for soil remediation. *Environ Sci Technol* 38, 1605–1610
- Varghese OK, Grimes CA (2003): Metal oxide nanoarchitectures for environmental sensing. *J Nanosci Nanotechnol* 3, 277–293
- Wang CB, Zhang WX (1997): Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs. *Environ Sci Technol* 31, 2154–2156
- Wichmann HE, Spix C, Tuch T, Wolke G, Peters A, Heinrich J, Kreyling WG, Heyder J (2000): Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: role of particle number and particle mass. *Res Rep Health Eff Inst* 98, 5–86
- Xia T, Korge P, Weiss JN, Li N, Venkatesen MI, Sioutas C, Nel A (2004): Quinones and aromatic chemical compounds in particulate matter induce mitochondrial dysfunction: implications for ultrafine particle toxicity. *Environ Health Perspect* 112, 1347–1358
- Yuan G (2004): Natural and modified nanomaterials as sorbents of environmental contaminants. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng* 39, 2661–2670

Eingegangen: 22. August 2005

Akzeptiert: 4. September 2005

OnlineFirst: 5. September 2005

Zu Ref. Heinrich et al. 2002

UFP – *Umweltmed Forsch Prax* 7 (2) 91–99 (2002)

Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte

Joachim Heinrich, Veit Grote, Annette Peters, H. Erich Wichmann

Korrespondenzautor: Dr. Joachim Heinrich, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Epidemiologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85758 Neuherberg; e-mail: Joachim.Heinrich@gsf.de

Langzeitwirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesundheit können mittels Querschnittsstudien und Kohortenuntersuchungen mit individueller Kontrolle für Störfaktoren analysiert werden. Die Übersicht fasst den aktuellen Wissensstand zu epidemiologischen Langzeitwirkungen von Luftschadstoffen zusammen. Die überwiegende Zahl von regionalen Querschnittsstudien zeigt, dass Kinder, die in Regionen mit hoher partikelförmiger Luftbelastung aufwachsen, häufiger an nicht-allergischen infektiösen Atemwegserkrankungen wie z.B. Bronchitis erkranken. Begleitende Lungenfunktionseinschränkungen waren nur in vergleichsweise wenigen Studien nachweisbar. Für einen Anstieg der Exposition um 10 µg/m³ TSP oder PM10 im Jahresmittel erhöht sich die Prävalenz der Bronchitis bei Kindern um etwa 20 bis 40%. Querschnittsstudien von Er-

wachsenen zeigen eine statistisch signifikante, aber geringgradig eingeschränkte Lungenfunktion. US-amerikanische Kohortenstudien zeigen einen Anstieg der Gesamtsterblichkeit um 24 bis 50% für PM10 (pro 50 µg/m³), 17 bis 25% für PM2.5 (pro 25 µg/m³) und 10 bis 50% für Sulfat (pro 15 µg/m³). Die Verbesserung der Luftqualität in Ostdeutschland geht einher mit einem Rückgang der Häufigkeit der Bronchitis und infektiöser Atemwegssymptome bei Kindern. Weitere Studien zu Langzeitwirkungen mit verbesserter und spezifischer Expositionsschätzung sowie mit einer größeren Anzahl von Studienregionen sind erforderlich, um gesundheitliche Wirkungen besser quantifizieren, die aktuelle Grenzwertdiskussion stärker mit Daten untermauern und schließlich auch Effekte von Luftreinhaltemaßnahmen begleitend evaluieren zu können.