

Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt

Hintergrundpapier
August 2006



Inhalt:

1. Einleitung
 2. Entwicklungs- und Anwendungsbereiche von Produkten
 3. Umweltentlastungspotentiale
 4. Belastungspotentiale für Mensch und Umwelt – mögliche Gefahren, Exposition, Persistenz
 - 4.1. Gesundheitliche Aspekte bei Nanopartikeln
 - 4.2. Ökotoxikologische Aspekte
 - 4.3. Informationsbedarf
 5. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen
 6. Weiterführende Literatur
- Anhang: Aktivitäten des Umweltbundesamtes

1. Einleitung

Sie gilt als eine der Schlüsseltechniken der Zukunft, und Politik, Wissenschaft und Wirtschaft hegen große Erwartungen in sie: die Nanotechnik. Unter Nanotechnik versteht das Umweltbundesamt (UBA) – in Anlehnung an die Definition des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (TAB) – die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen – zum Beispiel Partikeln, Schichten oder Röhren – in einer Dimension kleiner als 100 Nanometer (nm), also über 1000 mal kleiner als der Durchmesser eines Menschenhaares (ca. 100 Mikrometer).

Künstlich erzeugte Nanopartikel und nanoskalige Systemkomponenten besitzen neue Eigenschaften - zum Beispiel erhöhte Reaktivität, veränderte Lichtabsorption und dadurch veränderte Farbe -, die für die Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen von Bedeutung sind. Diese neuen Material- und Stoffeigenschaften leiten sich aus den besonderen Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften und zum Teil aus der geometrischen Form des Materials ab.

Das UBA geht auf Grundlage der verfügbaren Fachliteratur¹ davon aus, dass die Nanotechnik in den kommenden Jahrzehnten die Industrie in wesentlichen Branchen – etwa in der Automobilindustrie, im Maschinenbau, der Chemie, der Pharmazie, der Medizin oder der Bio- und Umwelttechnik – stark beeinflussen wird und das Potential zur grundlegenden Veränderung ganzer Technikfelder besitzt. In Deutschland gibt es im Jahr 2006 etwa 550 Unternehmen mit rund 50.000 Beschäftigten, die im Bereich Nanotechnik tätig sind. Die Industrie erwartet große Marktpotentiale, sie reichen weltweit bis zu einer Billion US-Dollar im Jahr 2015.

Nanotechnik birgt nach Meinung vieler Fachleute nicht nur positives Potential für die wirtschaftliche Entwicklung. Auch für den Umwelt- und Gesundheitsschutz werden starke Verbesserungen erwartet. So können nanotechnische Entwicklungen vor allem die Ressourceneffizienz erhöhen und die Umweltschutzleistungen insgesamt verbessern.

Aber: Trotz der in den vergangenen Jahren rasanten Entwicklung der Nanotechnik und der wachsenden Zahl der mittels Nanotechnik hergestellten Produkte ist noch sehr wenig über die Exposition der Menschen und der Umwelt durch Nanopartikel bekannt. Die Frage, welche Wirkung Nanopartikel auf den Menschen und die Umwelt

¹ Wesentliche Literaturquellen sind im Kapitel 8 „Weiterführende Literatur“ zusammengestellt

haben, ist noch nicht genügend beantwortet. Wegen der neuartigen Eigenschaften von Nanopartikeln ist daher die technische Entwicklung auch mit Risikobewertungen zu begleiten, denn es gilt potentielle Schäden und Kosten durch die neue Technik zu identifizieren und dann zu vermeiden – so, wie es bei jeder neuen Technik mittlerweile üblich ist. Insbesondere das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die EU-Kommission haben hierzu in den vergangenen Jahren mit der Förderung einer Reihe von Forschungsprojekten reagiert. Das Forschungsministerium ist beispielsweise mit der „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ (2002 bis 2004) sowie mit der Initiative „NanoCare“ (2006 bis 2008), die Europäische Union mit dem sechsten und siebenten Forschungsrahmenprogramm, „NanoSafe 1“ (2003 bis 2004) und „NanoSafe 2“ (seit 2005), aktiv geworden.

Das UBA ist an dieser Diskussion (siehe Abschnitt „Aktivitäten des Umweltbundesamtes“) beteiligt, Die Diskussion über die Chancen und Risiken der Nanotechnik sollte nüchtern-sachlich und jenseits von Technikskeptizismus und Technikbegeisterung geführt werden.

Auf den kommenden Seiten fasst das UBA das Wissen über Chancen und Risiken der Nanotechnik zusammen. Dargestellt sind sowohl die Umweltentlastungspotentiale dieser innovativen Technik – vor allem in den Bereichen der Ressourcenschonung, der Energieeffizienz und des Gesundheitsschutzes – als auch der Umweltbelastungspotentiale und möglichen gesundheitlichen Risiken sowie der Ansätze zur Verringerung derselben.

2. Entwicklungs- und Anwendungsbereiche von Nanotechnik-Produkten

Das UBA erwartet – nach den verfügbaren Informationen² - von der Nanotechnik zahlreiche innovative Entwicklungen in verschiedenen technischen Bereichen und unterschiedlichen Anwendungsfeldern sowie Wirtschaftszweigen. Zwar ist die Entwicklung und die Marktdurchdringung vieler nanotechnischer Verfahren und Produkte noch in den Anfängen, eine Reihe von Produkten und Produktionsverfahren ist aber bereits auf dem Markt oder auf dem Weg dorthin (siehe Tabelle).

Eine wichtige Informationsquelle zu den unterschiedlichen Anwendungsfeldern ist der Bericht „Nanotechnologie“ des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), der sieben Anwendungsfelder aufführt und eine Reihe von Anwendungsbeispielen darstellt:

- Oberflächenfunktionalisierung und –veredelung (zum Beispiel thermische und chemische Schutzschichten, nanometerdünne Beschichtung von Computerfestplatten, biozide Schutzschichten),
- Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese (zum Beispiel katalytisch wirksame Nanopartikel, Autoabgaskatalysatoren, nanoporöse Filter, Nanoreaktoren),
- Energiewandlung und –nutzung (zum Beispiel Farbstoffsolarzellen, Brennstoffzellen, leistungsfähigere Batterien/Akkumulatoren, LED),
- Konstruktion (zum Beispiel Kunststoffe mit Nanofüllstoffen sowie neue Metallverbindungen mit veränderten mechanischen und thermischen Eigenschaften, Eigenschaftsverbesserungen von Baustoffen durch Betonzusatzstoffe),
- Nanosensoren (zum Beispiel Magnetfeldsensoren, optische Sensoren, Biosensoren („Lab-on-a-chip“-Systeme)),
- Informationsverarbeitung und –übermittlung (zum Beispiel organische Leuchtdioden (OLED), elektronische Bauelemente in Nanometerdimensionen) sowie
- Lebenswissenschaften (zum Beispiel Anwendungen der Nanobiotechnologie in Analytik und Diagnostik, ortsgenauer Wirkstofftransport („Drug-Delivery“-Systeme), biokompatible Implantate).

² Quellen s. Abschnitt 1

Die Bandbreite nanoskaliger Werkstoffe reicht von anorganischen und organischen Nanopartikeln, die singular in Aggregaten oder als Pulver sowie in einer Matrix dispergiert oder emulgiert vorliegen können, über Nanokolloide, Nanoröhren und Nanoschichten bis zu den so genannten Fullerenen, das sind komplexe organische Moleküle. Unter Umwelt- und Gesundheitsschutzaspekten ist zu berücksichtigen, dass Nanopartikel entweder fest in eine Matrix eingebunden sind oder frei vorliegend verwendet werden. Zur Freisetzung ursprünglich fest eingebundener Nanopartikel aus Produkten durch Alterungs- oder Abbauprozesse liegen bisher keine Informationen vor. Wegen der in der Regel festen Einbindung von Nanopartikeln in Schichten oder in Dispersionen ist nach derzeitigem Wissen eine Freisetzung größeren Ausmaßes aus diesen Produkten kaum zu erwarten.

Anorganische Nanopartikel aus Metalloxiden (besonders Siliziumdioxid, Ceroxid, Titandioxid, Aluminiumoxid) haben zurzeit die größte wirtschaftliche Bedeutung. Ihre Hauptanwendungsgebiete liegen in der Elektronik, Pharmazie, Medizin, Kosmetik sowie in der Chemie/Katalyse, zum Beispiel:

- Titanoxid- und Zinkdioxidpartikel als UV-Absorber in Sonnenschutzmitteln,
- Goldpartikel als Markerstoffe in der Medizin und für biologische Schnelltests,
- Aluminiumoxidpartikel als poröse Trägerschicht für Autoabgaskatalysatoren.

Bei Kohlenstoffpartikeln sind derzeit wirtschaftlich relevant: Carbon Black und Spezialruße zum Beispiel als Füllstoffe für Gummi und Pigmente (Toner). Das UBA erwartet für Kohlenstoffnanoröhren (CNT) zukünftig ein hohes wirtschaftliches Potential – vor allem für die Anwendung in der Sensorik und Elektronik, zum Beispiel für TV- und PC-Flachbildschirme.

Organische Nanopartikel, wie Polymernanopartikel und nanotechnikbasierte Wirk- und Effektstoffe (wie etwa. Pharmazeutika) können die physiologische Wirksamkeit – etwa von Pharmaka, Kosmetik, Pflanzenschutz oder Ernährung – und die technischen Eigenschaften – beispielsweise in Lacken sowie Druckfarben – optimieren. Das UBA erwartet vor allem bei Bindemitteln für Farben und Lacke, Klebebändern und Beschichtungssystemen für Textilien, Holz und Leder ein hohes Wertschöpfungspotential.

Für *Nanoschichtsysteme* gibt es eine Fülle von unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten mit hohen Markterwartungen:

- Hartschichten (für Kratzfestigkeit),
- Tribologische Schichten (Verschleißschutz),
- Antifog-Schichten (beispielsweise selbstreinigende Oberflächen für Glas oder Textilien),
- Antireflexschichten (etwa zur Effizienzsteigerung von Solarzellen),
- Korrosionsschutzschichten.

Wegen der möglichen Umwelt- und gesundheitlichen Wirkungen (siehe Kapitel 4) der Nanopartikel sind besonders solche Produkte und Produktionsprozesse aufmerksam zu betrachten, die eine Freisetzung der Nanopartikel vermuten lassen. Dazu gehören Kosmetika, Biozide, Umweltsanierung sowie die Herstellung von Nanopartikeln selbst.

Die nachfolgende Tabelle fasst den derzeitigen Entwicklungsstand und die Anwendungsfelder nanotechnischer Produkte zusammen.

	Bereits am Markt verfügbar	Marktreife steht bevor	In Entwicklung	Als Konzept vorhanden
Chemie	Anorganische Nanopartikel Carbon Black Polymerdispersionen Mikronisierte Wirkstoffe Oberflächenveredelung Easy-to-Clean-Schichten	Chemische Sensoren Nano-Schichtsilikate Organische Halbleiter Dendrimere Aerogele Polymere Nanokomposite Lacke	CNT-Verbundmaterialien Hocheffiziente Wasserstoffspeicher	Selbstheilende Werkstoffe
Automobilbau	Reifenfüllstoffe Komponenten mit Hartschichten Antireflexschichten Kratzfeste Lacke	Nanopigmente Magnetoelektronische Sensoren Brennstoffzellen Nanokomposite Kraftstoffzusatz Antifog-Coatings Polymer-Windschutzscheiben	Thermoelektrische Abwärmenutzung	Schaltbare Lacke Ferrofluid-Stoßdämpfer
Elektronik	GMR-HDD	CMOS-Elektronik <100nm Polymerelektronik FRAM MRAM	PC-RAM Molekularelektronik RTD Millipede	DNA-Computing Spintronik
Optische Industrie	Weißer LED	Ultrapräzisionsoptiken OLED	CNT-FED Quantenkryptografie EUVL-Optiken Quantenpunktlaser Photonische Kristalle	
Lebenswissenschaften	Biochips Sonnenschutz	Antimikrobika Magnetische Hyperthermie Drug Delivery Kontrastmittel	Biosensoren Lab-on-a-Chip Tissue Engineering	Neuronale Kopplung an künstliche Systeme Biomolekulare Motoren
Umwelttechnik	Membranen zur Abwasserbehandlung	Abgaskatalysatoren	Filtersysteme zur Abscheidung von Ultrafeinstäuben Produkte zur Reinigung von Grundwasser und Böden	

Erläuterungen zur Tabelle: GMR-HDD: Giant Magnetic Head – Hard Disk Drive; CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor; FRAM: Ferroelectric Random Access Memory; MRAM: Magnetic Random Access Memory; PC-RAM: Personal Computer Random Access Memory; RTD: Resistance Temperature Detector; DNA: Desoxyribonukleinsäure; LED: Light Emitting Diode; OLED: Organic Light Emitting Diode; CNT-FED: Carbon Nanotube Field Emission Display; EUVL: Extreme Ultraviolet Lithography

3. Umweltentlastungspotentiale

Nanotechnik und nanotechnische Produkte machen es möglich, Rohstoffe und Energie im Lebensweg eines Produktes effizienter zu nutzen und so den Ausstoß von Schadstoffen sowie den Energieverbrauch zu verringern. Im Folgenden sind eine Reihe von Beispielen aufgelistet:

Einsparung von Rohstoffen durch Miniaturisierung

- Nanotechnikbasierte Sensoren lassen sich wegen ihres geringeren Gewichtes sehr energieeffizient betreiben. Diese Sensoren werden vorrangig für den biomedizinischen und im militärischen Bereich entwickelt (US-EPA, 2005). Zukunftschancen liegen auch in der Umweltsanierung für den optimierten und spezifischen Nachweis biologischer und chemischer Verunreinigungen.
- Durch Verringerung der Schichtdicke lassen sich Rohstoffe einsparen: bei nanoskaligen Beschichtungs- und Katalysatormaterialien, bei mit Nanopartikeln optimierten Materialien im Leichtbau, verschleiß- und reibungsarmen Oberflächen im Maschinenbau und hochspezifischen Membranen in der Biotechnik.

Einsparung von Energie durch Gewichtsreduktion oder durch Funktionsoptimierung

- Mit Nanotechnik lässt sich die Wasserqualität verbessern. Eine Anwendung ist die Entsalzung von Meerwasser mit Hilfe nanotechnikbasierter Durchflusskondensatoren („Flow-through Capacitor (FTC)“). Diese Technik hilft, den Energieverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Methoden - wie Umkehrosmose oder Destillation - um über 99 Prozent zu verringern.
- Mit dem Einsatz nanotechnikbasierter Leuchtdioden (LED) lässt sich für die Beleuchtung eine drei- bis fünffach erhöhte Energieeffizienz im Vergleich zu der Beleuchtung mit einer herkömmlichen Energiesparlampe erreichen. Bei rund sechs Gigawatt (GW) mittlerem Stromverbrauch für Beleuchtung in Deutschland (gesamt: 53.000 Gigawattstunden (GWh) pro Jahr) ergibt sich ein Energieeinsparpotential, das der Leistung mehrerer Kraftwerke entspricht.
- Die Nanotechnik wird in der Entwicklung einer effektiveren Nutzung regenerativer Energien verwendet, wie bei so genannten organischen Solarzellen und

Farbstoffsolarzellen. Organische Solarzellen (photoaktive Schichten aus organischem Material) absorbieren Licht besser als anorganisches Solarzellenmaterial und benötigen deshalb deutlich geringere Schichtstärken. Bei Farbstoffsolarzellen ist eine höhere Effizienz des Lichteinfangs durch nanometerfeine Verteilung eines Licht absorbierenden Farbstoffs erzielbar. Verbesserte Solarzellen für leistungsarme Anwendungen – wie Mobiltelefone oder Laptop-Computer – werden derzeit zur Marktreife gebracht.

- In modernen Autoreifen werden bereits Siliziumdioxid- und Nanorußpartikel zur Materialverstärkung eingearbeitet. Sie bewirken einen geringeren Rollwiderstand und helfen so, bis zu zehn Prozent Kraftstoff einzusparen.
- Mittels optimierter Bauteile bei Solar- und Brennstoffzellen und durch eine verlustarme Speicherung von Energie wird die Effizienz der Energieumwandlung verbessert.

Verbesserung der Reinigungsleistung von Filtersystemen

- In der Abwasserbehandlung wird die „inverse Nanotechnik“ (Techniken zur Minderung von Nanopartikeln) in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. So lässt sich vorbehandeltes Abwasser durch nanoporöse Membranen von Krankheitserregern - wie etwa Viren – befreien, und so die Verbreitung von Krankheitserregern in die Umwelt verhindern. Dieses Membranfilterverfahren wurde von Wissenschaftlern des Umweltbundesamtes mitentwickelt, erprobt und gefördert. Es befindet sich bereits in einigen kommunalen Kläranlagen in Deutschland in Betrieb und wird von einigen Herstellern, auch auf ausländischen Märkten, erfolgreich vertrieben.
- Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass nanoporöse Membranen und Filter auch zur Schadstoffentfernung und Nebenproduktabtrennung aus gasförmigen und flüssigen Medien geeignet sind.
- Die Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen ist mit der Nanotechnik optimierbar. Derzeit werden nanoporöse Partikelfilter entwickelt, um nanoskalige Rußpartikel aus Abgasen zurückzuhalten.

Gesundheitsschutz durch Verwendung als Therapeutika

- Im Gesundheitsschutz können die speziellen Eigenschaften der Nanomaterialien genutzt werden, um gezielt die Blut-Gehirn-Schranke für Therapeutika passierbar zu machen (zum Beispiel Therapeutika bei Gehirnhautentzündung).

Verminderung des Einsatzes oder Ersatz der Verwendung gefährlicher Stoffe

- Auch im Infektionsschutz und in der Schädlingsbekämpfung ist die Anwendung verschiedener Nanomaterialien sinnvoll, beispielsweise biozide ultradünne Polymerbeschichtungen auf Langzeitkathetern oder Textilien. Nanoporöse Oxidschichten (beispielsweise Siliziumdioxid) lassen sich mit einer bioziden Substanz (wie etwa Silber) versehen, die durch Nanoporen kontrolliert über einen längeren Zeitraum abgegeben wird. Dies ersetzt giftige organische Biozide. Auf den ausländischen Märkten sind bereits Holzschutzmittel mit Zusätzen nanopartikulären Silbers zur effizienteren Verhinderung von Pilz- und Bakterienwachstum präsent.
- Beim Korrosionsschutz für Metalle werden - wegen nanotechnikbasierter Oberflächen - umwelt- und gesundheitsbedenkliche Chrom-VI-Lacke verzichtbar.
- Durch die gezielte Reaktionsführung mit Nanokatalysatoren wird eine Verringerung des Anfalls umweltbelastender Nebenprodukte erreicht und die Ausbeute erhöht (Stichwort: Mehr Ressourceneffizienz).

Soweit die Potentiale, die es gibt. Konkrete Daten, die die bessere Umweltverträglichkeit konkreter Anwendungen untermauern, liegen aber derzeit nur vereinzelt vor. So hat eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Studie³ an einer Reihe von Fallbeispielen über einen an Ökobilanzen angelehnten Ansatz Effizienzpotentiale der Anwendungen von Nanotechnik aufgezeigt. Das Ergebnis: Für die Mehrzahl der untersuchten Anwendungen liegen hohe Ökoeffizienz-

³ Steinfeld et al., 2004

potentiale vor, nanotechnische Anwendungen sind aber nicht per se mit Entlastungspotentialen verbunden.

Forschungsbedarf in Bezug auf die Umweltentlastungspotentiale besteht vor allem zu folgenden Fragestellungen, die an konkreten Produkten und Verfahren zu klären sind:

- Welche Auswirkung hat die Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf?
- Welche Nanomaterialien eignen sich für eine effiziente Behandlung kontaminierten Grundwassers und der Abluft?
- Was geschieht mit diesen Materialien in der Umwelt und wie wirken sie sich auf diese aus?

4. Belastungspotentiale für Mensch und Umwelt – mögliche Gefahren, Exposition, Persistenz

Durch den zunehmenden Einsatz synthetischer Nanopartikel ist zukünftig auch mit einem vermehrten Eintrag dieser Partikel in die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft zu rechnen. Nanopartikel entstehen - wie größere Schwebstaubteilchen - sowohl bei technischen als auch bei natürlichen Prozessen, wie etwa Vulkanausbrüche oder Waldbrände. Bei natürlicher Entstehung sind die Nanopartikel in Form, Zusammensetzung und Größe sehr unterschiedlich, während künstlich - also „absichtlich“ - erzeugte Nanopartikel einheitlich nach gewünschten Eigenschaften hergestellt und gestaltet sind. Untersuchungen zum natürlichen oder durch Verbrennung entstandenen Ultrafeinstaub lassen zwar Schätzungen zum Verhalten und zur Wirkung der Nanopartikel in der Umwelt zu. Diese reichen jedoch nicht aus, um die Risiken künstlich erzeugter Nanopartikel sicher einschätzen zu können. Die breiten Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnik und die sehr unterschiedlichen Nanomaterialien erfordern eine differenzierte Beurteilung eines möglichen Risikos für die menschliche Gesundheit und die Umwelt.

Derzeit ist die Kennzeichnung von Produkten im Hinblick auf ihren Gehalt an Nanopartikeln nicht vorgeschrieben. Für die Anwender bleibt unerkennbar, ob ein Produkt

solche Teilchen enthält oder nicht. Daher ist es schwierig, gezielt die Herkunft und Verbreitung bestimmter Nanomaterialien in der Umwelt zu untersuchen.

Die größten Risiken für Mensch und Umwelt gehen von Nanomaterialien aus, die als freie Partikel in Produkten enthalten sind, zum Beispiel in Kosmetika. Solange Nanopartikel fest in Materialien eingebunden sind, ist eine Gefährdung kaum zu erwarten. Allerdings ist hier zu klären, ob und in welcher Form Nanomaterialien während des Herstellungsprozesses, beim Gebrauch eines Produktes, durch Alterung und Abbau sowie bei der Entsorgung und bei einer Wiederverwertung in die Umwelt gelangen können. Natürlich ist auch bei Nanomaterialien die Betrachtung des gesamten Lebensweges die Voraussetzung für die Bewertung einer Umweltgefährdung.

Entscheidend für die Einschätzung des Risikos durch Nanopartikel ist, in welcher Form diese Materialien mit Mensch und Umwelt in Kontakt kommen. Da gibt es noch wichtige, offene Fragen, die zu beantworten sind: Wie stabil und langlebig sind diese Formen? Zerfallen oder agglomerieren sie, also ballen sie sich zusammen? Sind sie in Wasser löslich? Treten sie in Wechselwirkung mit anderen Nanopartikeln, Chemikalien, Oberflächen? Werden Sie abgebaut und wie verändern sich dabei ihre Eigenschaften?

Über den Luftweg können sich Nanopartikel wegen ihrer geringen Größe grenzüberschreitend verbreiten – auch anhaftend an Aerosolen, einem Gemisch aus festen und flüssigen Schwebeteilchen und Luft.

Nanopartikel können in lebende Zellen gelangen. Sie haben daher das Potential, sich in Organismen anzusammeln und sich über die Nahrungskette anzureichern.

Es gibt bisher noch keine Erkenntnisse, wie organische Nanomaterialien in der Umwelt abgebaut werden. Es lassen sich keine Hinweise finden, die auf einen Abbau von jetzt schon in größerem Maßstab produzierten Kohlenstoff-Nanomaterialien (Fullerene und Nanoröhrchen) hinweisen.

4.1. Gesundheitliche Aspekte bei Nanopartikeln

Mögliche gesundheitliche Risiken, die von den bereits auf dem Markt erhältlichen Nanotechnik basierten Produkten wie Kosmetika ausgehen könnten, sind kaum er-

forscht. Die klassische Aufnahme der Partikel in den Organismus erfolgt über die Atemwege, die Haut und den Mund - oder durch eine Kombination dieser Aufnahmepfade.

Die Atemwege sind wahrscheinlich der bedeutendste Aufnahmeweg. Obwohl die Zahl der auf die Wirkung von Nanopartikeln bezogenen Forschungsarbeiten noch klein ist, liegen zur inhalativen Aufnahme über die Atemwege vergleichsweise die meisten wissenschaftlichen Studien vor.

Nanopartikel gelangen in der Lunge - im Unterschied zu größeren Partikeln - bis in den alveolaren Bereich. Hier entfernen sie die alveolaren Makrophagen, die sogenannten Fresszellen - wegen der geringen Größe der Nanopartikel - nur unzureichend. Deshalb kann es zu Entzündungsprozessen in der Lunge kommen.

Von den Alveolen (Lungenbläschen) ist der Übertritt in den Blutkreislauf nachgewiesen. Dabei treten kleinere Partikel einfacher in das Blut über. Ebenso zeigte sich bei Tierversuchen mit Ratten, dass eine direkte Aufnahme der Partikel über die Nase ins Gehirn möglich ist. Mögliche negative Wirkungen sind jedoch noch nicht ausreichend untersucht⁴.

Über die Haut sind prinzipiell zwei Aufnahmewege von Nanopartikeln denkbar: Partikel können erstens über Zwischenräume der oberen Hautschicht und zweitens über die Haarwurzeln in die Haut gelangen. Jedoch bestehen derzeit weder im Hinblick auf die intakte noch auf die vorgeschädigte Haut ausreichende Kenntnisse darüber. Unklar ist auch, ob toxische Substanzen, welche den Partikeln möglicherweise anhaften können, über den dermalen Aufnahmepfad in den Körper gelangen. Die Bedeutung dieses Aufnahmepfades ist vorrangig zu klären, da zahlreiche Hautpflegeprodukte bereits heute Nanopartikel enthalten.

Mit der Klärung offener Fragen und der Entwicklung geeigneter Untersuchungsmethoden – speziell mit dem Durchgang von Titandioxid-Nanopartikeln durch die Haut (*in vivo* und *in vitro*) - beschäftigt sich das europäische Projekt NANODERM (<http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/>).

Neben einer gezielten Aufnahme von Nanopartikeln durch den Mund (zum Beispiel in Arzneimitteln) ist auch die unbeabsichtigte orale Aufnahme in Betracht zu ziehen, etwa in Form von Zusätzen in Nahrungsmitteln.

⁴ Oberdörster, 2005

Prinzipiell kann der Darm unlösliche Partikel aufnehmen, so dass diese ins Lymphsystem gelangen. Von dort können die Partikel ins Blut übertreten und sich im Körper verteilen. Zurzeit gibt es jedoch keine Untersuchungen, die hinreichende Informationen für die Bewertung potentieller Risiken einer oralen Aufnahme von Nanopartikeln liefern.

Quantitative Angaben zur relativen Bedeutung der einzelnen Aufnahmepfade sind zurzeit nicht möglich. Hier dürften auf jeden Fall die jeweiligen Expositionsbedingungen großen Einfluss haben. Klar ist allerdings, dass über den Blutkreislauf in den Körper gelangte Partikel in verschiedene Organe (Herz, Leber, Milz, Niere, Knochenmark) transportierbar sind.

Untersuchungen geben Hinweise darauf, dass Nanopartikel biologische Barrieren – wie die Blut-Hirn-Schranke – durchdringen können. Es ist auch davon auszugehen, dass ein Übertritt von Nanopartikeln über die Plazenta in den Fetus möglich ist. Derartige Mechanismen können – unabhängig von den Chancen einer gezielten therapeutischen Nutzung – auch Risiken einschließen.

Auf der zellulären Ebene scheint es ebenfalls so zu sein, dass Barrieren - wie die Zellmembran - kein Hindernis für Nanopartikel darstellen. Bei Nervenzellen wurde beobachtet, wie sich Partikel entlang der Nervenfortsätze bewegen. Für Partikel, die in die Zelle gelangen, ist eine Vielzahl von Interaktionen mit Zellbestandteilen denkbar. Die gesundheitlichen Auswirkungen solcher möglichen Interaktionen sind jedoch noch unbekannt.

Die Verteilung der Nanopartikel im Körper scheint abhängig von Größe, Form und Stoffeigenschaften zu sein. Biologisch abbaubare Nanopartikel werden verstoffwechselt und ausgeschieden. Über das Verhalten der nicht-abbaubaren Nanopartikel ist jedoch noch wenig bekannt. Es ist zu vermuten, dass eine Akkumulation besonders in Entgiftungsorganen erfolgt. Ob durch diese Anreicherung der Partikel im Körper ein gesundheitliches Risiko entsteht, ist noch nicht ausreichend untersucht.

4.2. Ökotoxikologische Aspekte

Noch gibt es nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zu den Wirkungen von Nanopartikeln auf die Umwelt. Es ist aber davon auszugehen, dass Nanopartikel wegen ihrer besonderen Eigenschaften durchaus ein Risiko für die Umwelt darstellen.

Bisher wurden nur wenige Organismen in Wasser-Ökosystemen untersucht. So können Wasserflöhe je nach Art der Verabreichung bereits bei relativ niedrigen Konzentrationen von C60-Molekülen („Buckminster-Fulleren“) und nanoskaligem Titandioxid im Wasser sterben. Versuche an jungen Forellenbarschen zeigen, dass diese C60-Nanopartikel über die Kiemen aufnehmen und die Partikel die Blut-Hirn-Schranke überwinden sowie das Gehirn bereits bei geringen Konzentrationen schädigen. Bei Zebrafischembryonen verzögerten Carbon-Nanoröhrchen den Schlupf des Nachwuchses. Die bakterizide, Bakterien abtötende Wirkung einiger Nanomaterialien könnte außerdem negative Effekte in Kläranlagen hervorrufen und zu einer Veränderung der mikrobiellen Zusammensetzung im Wasser führen.

Für Erd-Ökosysteme gibt es ebenfalls kaum Untersuchungen zu Wirkungen der Nanopartikel. Bei Säugetieren lassen sich die Ergebnisse aus Laborstudien für die Modellierung der Wirkung auf die menschliche Gesundheit auch auf Wildtiere übertragen. Zu anderen Wirbeltieren und Wirbellosen gibt es noch keine Studien. Versuche mit Aluminium-Nanopartikeln zeigten ein reduziertes Wurzelwachstum bei verschiedenen Nutzpflanzen (zum Beispiel Mais, Gurke, Soja, Karotte). Bei größeren Aluminium-Partikeln trat dieser Effekt nicht auf. Nanopartikel können die mikrobielle Zusammensetzung im Boden wegen ihrer bioziden – also Bakterien tötenden – Wirkung stören.

4.3. Informationsbedarf

Für eine verlässliche, umfassende Risikoanalyse der Nanopartikel fehlen bisher ausreichende Informationen. Als Voraussetzung für die Bewertung der Risiken für Mensch und Umwelt gilt es – nach Ansicht des UBA – zu ermitteln, welche Parameter für die Charakterisierung der Nanomaterialien geeignet sind, um eine Gesundheits- und Umweltgefährdung einschätzen zu können. Ziel sollte es sein, Nanopartikel zu Klassen mit ähnlichen Wirkungen zusammenzufassen und geeignete Bezugs-

größen zu bestimmen (zum Beispiel Masse, Partikelzahl, Oberfläche), damit eine möglichst vergleichbare Auswertung der Ergebnisse erreichbar ist.

Für die Ermittlung der Exposition sind Messverfahren zu entwickeln oder zu optimieren, um die für eine Bewertung notwendigen Parameter erfassen zu können.

Öko- und humantoxikologische Prüfmethode sowie Teststrategien sind auf ihre Eignung zur Bewertung von Nanopartikeln im Hinblick auf deren besondere Eigenschaften und möglicherweise neue Endpunkte zu überprüfen und zu optimieren.

Vordringlich und kurzfristig durchzusetzen ist die Erfassung der Produktion und des Verbrauchs der verschiedenen Nanopartikel mit Hilfe geeigneter Informationssysteme und Informationsverpflichtungen. Hierzu ist es erforderlich, dass die Unternehmen der Herstellung und des Handels dort vorliegende Informationen zum Expositionsverhalten der Nanopartikel und deren Verbleib in der Umwelt zur Verfügung stellen.

Ein vordringlicher Forschungs- und Informationsbedarf zeichnet sich insbesondere in folgenden Bereichen ab:

- Informationen über den Einsatz und die Anwendung von Nanopartikeln:
Expositionsszenarien über den Lebenszyklus von Nanopartikeln,
- Informationen über Entlastungspotentiale:
Klärung der Fragen, welche Auswirkungen die Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf hat sowie Bewertung eventuell vorhandener „ökologischer Rucksäcke“.
- Informationen über die Freisetzung von Nanopartikeln:
Prüfung von Produkten, die bereits auf dem Markt sind oder kurz vor der Markteinführung stehen, wie Kosmetika, Haushaltsprodukte, Biozide;
Beschichtungen von Textilien und Materialien, die in Berührung mit Lebensmitteln kommen
- Wirkungsbeurteilung:
Untersuchungen zur Persistenz und Bioakkumulation von Nanopartikeln,

Entwicklung und Optimierung geeigneter Messverfahren für die Ermittlung der Exposition von Mensch und Umwelt;

- Identifizierung relevanter Parameter zur Charakterisierung und Klassifizierung sowie zur Beurteilung der Wirkung von Nanopartikeln;

Entwicklung geeigneter Prüfmethode sowie Teststrategien zur Erfassung gesundheitlicher und ökotoxikologischer Wirkungen;

Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die unterschiedlichen Aufnahmepfade.

5. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Die Nanotechnik verspricht nicht nur positive ökonomische Wirkungen. Es gibt eine große Palette der Anwendungen in der Nanotechnik, die Umweltentlastungspotentiale besitzen oder erkennen lassen. Bei breiter Ausschöpfung dieser Potentiale durch gezielte Förderung dieser umweltentlastenden Nanotechnik ist eine deutliche Reduzierung der Umweltinanspruchnahme zu erreichen und in einigen Fällen auch die gesundheitliche Belastung zu vermindern. Das UBA will die Nanotechnik fördern und braucht weitergehende Informationen:

1. Zur Untermauerung des positiven Potentials bedarf es der Bewertung nanotechnischer Verfahren und Produkte im Hinblick auf ihre Vorteile für die Umwelt gegenüber herkömmlichen Alternativen. Das Umweltbundesamt unterstützt beispielsweise die inverse Nanotechnik zur Behandlung des Abwassers und zur Reinigung des Trinkwassers.

2. Wie die Chancen, so verdienen auch die Risiken dieser Technik Aufmerksamkeit. Angesichts der sehr dynamischen Entwicklung der Technik und der Hinweise auf sehr folgenreiche Auswirkungen und möglichen Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch Nanotechnik ist es dringend geboten, diese Risiken zu erkennen und zu bewerten. Trotz der zunehmenden Zahl wissenschaftlicher Untersuchungen bestehen noch erhebliche Informationslücken und damit hoher Forschungsbedarf.

Das UBA macht dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) daher - gemeinsam mit anderen Institutionen - einen Vorschlag für

ein Forschungsprogramm und vergibt ergänzend eine Studie zur Klärung offener Fragen, die das UBA bei der Entwicklung möglicher Regulierungsmaßnahmen unterstützen wird.

6. Weiterführende Literatur

Luther, W. et al. (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, Innovations- und Technikanalyse. Zukünftige Technologien Nr. 53, Düsseldorf

Malanowski, N. (2001): Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse (ITA) Nanotechnologie. Zukünftige Technologien Nr. 35, Düsseldorf

Ministry for Environment and Water Conservation, Agriculture and Consumer Protection of federal state North Rhine-Westphalia, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, and Federal Environmental Agency (2006, in press): Municipal Wastewater Treatment with Membrane Technology.

Paschen, H. et al. (2003): TA-Projekt Nanotechnologie. Arbeitsbericht Nr. 92. Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) Opinion on The Appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies. EU Commission SCENIHR/002/05, September 2005
http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_003.pdf

Steinfeld, M. et al (2004): Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. Schriftreihe des IÖW 177/04

The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004) Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties July 2004, (<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>)

U.S. Environmental Protection Agency (2005): External Review Draft: Nanotechnology White Paper

Oberdörster, G., E. Oberdörster, et al. (2005). "Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles." Environmental Health Perspectives 113(7): 823-839

Anhang: Aktivitäten des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt (UBA) will zu umweltrelevanten Aspekten der Nanotechnik informieren, Wissensdefizite ausfüllen und weiteren Handlungsbedarf aufdecken. Das Amt will einerseits die positiven Wirkungen der Nanotechnik unterstützen und fortentwickeln, andererseits mögliche Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit identifizieren und Vorkehrungen für deren Verminderung treffen.

Am 11. und 12. Oktober 2005 veranstaltete das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gemeinsam mit dem UBA und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) unter dem Motto „Dialog Nanopartikel“ eine Tagung, auf der die Wirkungen synthetischer Nanopartikel auf die Umwelt und die Gesundheit erörtert wurden. Der Tagungsband ist im Internet zugänglich (<http://www.dialog-nanopartikel.de>).

Wichtiges Ergebnis der Veranstaltung „Dialog Nanopartikel“ war die Entscheidung des Bundesumweltministeriums, in Zusammenarbeit mit den beteiligten Behörden den offenen Dialog mit allen Gesellschaftskreisen und Interessengruppen weiterzuführen. Dieser Dialog soll einen Beitrag dazu leisten, die Nanotechnik umwelt- und gesundheitsgerecht weiter zu entwickeln. Am 18. September 2006 wird das BMU im Rahmen der Veranstaltungsreihe „BMU im Dialog“ ein hochrangiges Ministergespräch zum Thema „Chancen und Risiken der Nanotechnologie“ durchführen. Im Rahmen dieser Veranstaltung sollen die Teilnehmer aus Wirtschaft, Wissenschaft, zuständigen Behörden und Ministerien eine gemeinsame Position zum Nutzen der Nanotechnik für den Umweltschutz finden.

Relevante Forschungsaktivitäten sollen im Rahmen des Umweltforschungsplans (UFOPLAN) zum Thema Nanotechnik mit dem „Globalansatz: Wirkung von Nanopartikeln auf Umwelt und Gesundheit“ erfolgen. Die Teilprojekte „Umweltentlastungseffekte durch nanotechnische Verfahren und Produkte“, „Aus- und Bewertung der für die gesundheitlichen Risiken relevanten Literatur auf dem Gebiet der synthetischen Nanopartikel und ultrafeinen Partikel sowie Fasern“ und „Toxikologische Studie zu Auswirkungen von Nanopartikeln und ihrer Verteilung im Körper“ sind vom Umweltbundesamt für 2006 geplant. Im erstgenannten Teilprojekt sind ausgewählte Produkte unter Umweltgesichtspunkten auf ihr entlastendes und belastendes Wirkungspotential zu untersuchen und zu bewerten.

Es ist unstrittig, dass zum Thema Nanotechnik weiterer erheblicher Forschungsbedarf besteht. Daher wird von den am „Dialog Nanopartikel“ beteiligten Behörden - BAuA, UBA und BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) eine gemeinsame Forschungsstrategie zur Ermittlung potentieller Umwelt- und Gesundheitsgefahren durch Nanopartikel konzipiert und im Herbst 2006 veröffentlicht.

International beteiligt sich das UBA an einer „Working Party on Health and Environmental Safety Implications of Manufactured Nanomaterials“, die ein international abgestimmtes Meinungsbild über den Umgang mit einer neuen Technik erarbeiten wird. Die Working Party wurde im Dezember 2005 auf dem „Workshop on Safety of Manufactured Nanomaterials“ des Chemicals Committee and Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) beschlossen.

In Deutschland beteiligt sich das UBA am DECHEMA/VCI-Arbeitskreis „Responsible Production and Use of Nanomaterials“. Sein Ziel ist, Chancen, aber auch mögliche Risiken der chemischen Nanotechnik zu identifizieren. Mit Hilfe geeigneter Maßnahmen ist die wirtschaftlich und technisch erfolgreiche Umsetzung der Nanotechnik unter Berücksichtigung ethischer, ökologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte zu fördern. Das Umweltbundesamt gelangt so an Informationen zu neuen Verfahrensentwicklungen aus erster Hand.

An Normungsarbeiten zur Nanotechnik arbeitet das UBA im Rahmen der ISO (International Standardization Organization) und des Deutschen Instituts für Normung (DIN) mit. Die ISO hat ein neues Technical Committee (TC) „Nanotechnologies“ mit drei Arbeitsgruppen (WG1 „Terminology and nomenclature“, WG2 „Measurement and characterization“, WG3 „Health, safety and environment“) gegründet. Auf deutscher Ebene richtet das DIN den Arbeitsausschuss NMP 817 „Nanotechnologie“ ein. Insbesondere die WG 3 eröffnet die Möglichkeit eines Informationsaustauschs zu aktuellen Daten zur Risikobewertung von Nanopartikeln.

Darüber hinaus untersucht das UBA den bestehenden Rechtsrahmen. Ob die Nanotechnik durch bestehende Gesetze bereits ausreichend geregelt ist, um die mit ihr möglicherweise verbundenen Risiken zu beherrschen, beurteilen die beteiligten Akteure unterschiedlich. So erklärt der Verband der Chemischen Industrie e. V. in ei-

nem Positionspapier vom Oktober 2005, dass neue gesetzliche Regelungen zum Schutz der Umwelt nicht erforderlich seien. Das UBA teilt diese Auffassung nicht: Nanopartikel können wegen ihrer geringen Abmessungen im Vergleich zu größeren Partikeln der gleichen Chemikalie völlig neue Eigenschaften verleihen. Das hieraus möglicherweise resultierende neuartige Risikopotential ist deshalb in bestehenden stoffrechtlichen Regelungen bisher nicht ausreichend berücksichtigt. Auch sind die für eine rechtliche Regelung benötigten standardisierten spezifischen Mess- und Testverfahren sowie Bewertungsmethoden erst zu entwickeln oder den speziellen Bedürfnissen der Nanotechnik anzupassen. Gleichwohl wäre es verfehlt, rechtliche Gesichtspunkte erst dann zu erörtern, wenn die Risiken der Nanotechnik endgültig feststehen. Ein solches Vorgehen widerspräche dem Vorsorgeprinzip. Das Umweltbundesamt hat deshalb ein Gutachten in Auftrag gegeben, dessen Ziel es ist, den derzeitigen Rechtsrahmen zu analysieren und Vorschläge für mögliche Maßnahmen zu entwickeln. Die Ergebnisse sollen im Herbst 2006 vorliegen.