

# NANOTECHNIK FÜR MENSCH UND UMWELT

CHANCEN FÖRDERN UND  
RISIKEN MINDERN

## Impressum

**Herausgeber** Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau

**E-Mail:** [pressestelle@uba.de](mailto:pressestelle@uba.de)  
**Internet:** [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

**Autor:** Dr. Heidi Becker  
Dr. Wolfgang Dubbert  
Dr. Kathrin Schwirn  
Dr. Doris Völker

**Stand:** Oktober 2009

**Gestaltung:** UBA

**Umschlagfoto:** © Rainer Sturm / Pixelio.de

## **Inhalt:**

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2. Entwicklungs- und Anwendungsbereiche von Nanotechnik-Produkten</b>	<b>3</b>
<b>3. Umweltentlastungspotentiale und Potentiale im Gesundheitsschutz</b>	<b>5</b>
3.1. Beispiele für Umwelt- und Gesundheitsentlastungspotentiale	5
3.2. Bewertung des Umwelt- und Gesundheitsentlastungspotentials	7
<b>4. Belastungspotentiale für Mensch und Umwelt – mögliche Gefahren, Exposition, Persistenz</b>	<b>8</b>
4.1. Gesundheitliche Aspekte	9
4.2. Ökotoxikologische Aspekte	10
4.3. Weiterentwicklung gesetzlicher Regelungen	11
4.4. Bewertung der Risiken – Informations- und Forschungsbedarf	12
<b>5. Aktivitäten des Umweltbundesamtes</b>	<b>13</b>
5.1. Forschungsprojekte und Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes	14
5.2. Nationale und internationale Gremienbeteiligung und Zusammenarbeit	18
<b>6. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen</b>	<b>19</b>
<b>7. Weiterführende Literatur</b>	<b>20</b>
<b>Anhang</b>	<b>22</b>

# 1. Einleitung

Sie gilt als eine der Schlüsseltechniken der Zukunft und Politik, Wissenschaft sowie Wirtschaft hegen große Erwartungen in sie: die Nanotechnik. Unter Nanotechnik versteht das Umweltbundesamt (UBA) Verfahren zur Untersuchung, gezielten Herstellung und Anwendung von Prozessen, und Materialien – im folgenden Text als „Nanomaterialien“ bezeichnet –, die aus abgrenzbaren strukturellen Bestandteilen in der Größenordnung von 100 Nanometer\* oder weniger in mindestens einer Dimension bestehen. Diese Nanomaterialien umfassen die Nanoobjekte wie Nanopartikel, Nanofasern (Stäbchen, Röhrchen) und Nanoplättchen, die aus verschiedenen Materialien bestehen können, und daraus abgeleitete Agglomerate, Aggregate und sonstige komplexere Strukturen. Technisch erzeugte Nanomaterialien besitzen neuartige Eigenschaften, die für die Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen von Bedeutung sind. Diese neuen Material- und Stoffeigenschaften leiten sich aus den besonderen Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften sowie zum Teil aus der geometrischen Form des Materials ab.

Das Umweltbundesamt geht auf Grundlage der verfügbaren Fachliteratur\*\* sowie der jährlich zunehmenden Zahl der Produkte davon aus, dass die Nanotechnik in den kommenden Jahrzehnten die Industrie und die Gesellschaft stark beeinflussen wird und das Potential zur grundlegenden Veränderung ganzer Technikfelder besitzt. Anwendung findet die Nanotechnik in vielen, sehr unterschiedlichen Bereichen, wie in der Automobilindustrie, der Chemie, der Pharmazie, der Medizin, der Bio- und Umwelttechnik, der Kommunikationstechnik, im Maschinenbau sowie in der Kosmetik- und Lebensmittelindustrie. In Deutschland ist die Zahl der Unternehmen, die im Bereich Nanotechnik tätig sind, im Jahr 2008 auf über 800 gestiegen. Die Unternehmen erwarten weiterhin positive Entwicklungen. Die Industrie sieht große Marktpotentiale, sie reichen weltweit bis zu einer Billion US-Dollar im Jahr 2015 (Schätzung der US National Science Foundation (NSF) in den Jahren 2000 und 2006).

Nanotechnik birgt nach Meinung vieler Fachleute nicht nur Potential für die wirtschaftliche Entwicklung, auch für den Umwelt- und Gesundheitsschutz werden Verbesserungen erwartet,

wie beispielsweise eine Erhöhung der Ressourceneffizienz und ein verbesserter Umweltschutz.

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 des Menschen und der Umwelt durch Nanomaterialien bekannt. Bisher sind Messtechniken in der Nanodimension sehr aufwändig und für Messungen in Innenräumen und im Außenbereich nur unzureichend entwickelt. Die Frage, welche Wirkung technisch hergestellte Nanomaterialien auf den Menschen und die Umwelt haben, ist noch nicht genügend beantwortet. Wegen der neuartigen Eigenschaften technisch hergestellter Nanomaterialien ist die industrielle 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 üblich ist.

Die Bundesregierung und die EU-Kommission reagierten in den vergangenen Jahren mit der Förderung einer Reihe von Forschungsprojekten. Beispielhaft sind hier die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekte wie die „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ (2002 bis 2004) oder die im Rahmen der „NanoCare“ (2006-2009)-Initiative initiierten Projekte genannt. Die Europäische Union ist mit dem sechsten und siebten Forschungsrahmenprogramm in Projekten wie „NanoSafe 1“ (2003 bis 2004) und „NanoSafe 2“ (seit 2005) aktiv geworden.

Die bisherigen Projekte zur Risikoforschung von Nanomaterialien, die an dieser Stelle nicht umfassend vorgestellt werden können, geben erste Hinweise auf mögliche toxische Effekte von Nanomaterialien und geben Anlass zu weiterführender Forschung: Zu einer umfassenden Risikobewertung fehlt es derzeit vor allem an toxikologischen Langzeituntersuchungen und, vielfach fehlen noch Daten zur ökotoxikologischen Wirkung. Das BMBF setzt daher seine „NanoCare“ Initiative fort und schließt zur Untersuchung der möglichen Umweltgefährdung die Initiative „NanoNature“ an. Um den Forschungsbedarf für die Ermittlung der Schadwirkung auf Mensch und Umwelt zu identifizieren und beschreiben zu können, verfasste das Umweltbundesamt gemeinsam mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, federführend) und dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) eine Forschungsstrategie. Die Nanokommission griff diese Strategie in ihrem Bericht auf.

\* 1 nm = 10<sup>-9</sup> m

\*\* Wesentliche Literaturquellen sind in Kapitel 7 "Weiterführende Literatur" zusammengestellt.

Als wichtigen Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung entwickelten 2006 sieben beteiligte Bundesministerien die „Nano-Initiative Aktionsplan 2010“ ressortübergreifend. In diesem Rahmen setzte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Herbst 2006 die Nanokommission der Bundesregierung ein, um im so genannten „NanoDialog 2006-2008“ zusammen mit Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Behörden und Verbänden die Chancen und Risiken von Nanomaterialien zu diskutieren und konsensuale Empfehlungen für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien zu erarbeiten. Die fachlichen Aktivitäten waren auf drei Arbeitsgruppen (AG) aufgeteilt: Arbeitsgruppe 1 „Chancen für Umwelt und Gesundheit“, AG 2 „Risiken und Sicherheitsforschung“ und AG 3 „Leitfaden für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien“. Das Umweltbundesamt wirkte in den Arbeitsgruppen 1 und 2 des NanoDialogs 2006 bis 2008 mit. Dieser Stakeholder-Dialog wird in einer zweiten Staffel bis 2010 fortgesetzt. Des Weiteren beteiligt sich das Umweltbundesamt an der Diskussion zur Anpassung von REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) an Nanomaterialien (federführend für Deutschland ist hier die BAuA) und in der OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (siehe Abschnitte 4.3 und 5).

Wie eine Analyse des BfR ergab, wird das Thema Nanotechnik derzeit in den deutschen Medien wenig kontrovers diskutiert. Eine weitere Studie des BfR bestätigte, dass die Nanotechnik in der Bevölkerung ein überwiegend positives Image genießt. So erhoffen sich Verbraucher und Verbraucherinnen beispielsweise bei Reinigungsmitteln und Lacken Vorteile, während bei Nanomaterialien in Lebensmitteln Skepsis überwiegt.

Das Umweltbundesamt will die sachlich geführte Diskussion über die Chancen und Risiken der Nanotechnik unterstützen. Es will einen Beitrag dazu leisten, die Chancen der Nanotechnik für den Umwelt- und Gesundheitsschutz zu fördern und gleichzeitig die Risiken zu bewerten und zu vermeiden.

Auf den kommenden Seiten sind verschiedene Aspekte der Chancen und Risiken der Nanotechnik zusammengefasst. Dargestellt sind sowohl die Umweltentlastungspotentiale dieser innovativen Technik – vor allem in den Bereichen der Ressourcenschonung, der Energieeffizienz und

des Gesundheitsschutzes – als auch die Umweltbelastungspotentiale und die gesundheitlichen Risiken sowie die Ansätze zur Verringerung derselben.

## 2. Entwicklungs- und Anwendungsbereiche von Nanotechnik-Produkten

Das Umweltbundesamt erwartet mit Hilfe der Nanotechnik zahlreiche Innovationen 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 ist aber bereits auf dem Markt oder auf dem Weg dorthin. Ein im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitetes Rechtsgutachten enthält eine erste Übersicht der auf dem deutschen Markt oder in der Entwicklung befindlichen Nanoprodukte (Stand 2007). Einen vollständigen Überblick solcher Produkte gibt es nicht, zumal eine hierfür geeignete Melde- und Kennzeichnungsregelungen nicht existiert.

Für die Nanotechnik lassen sich folgende Anwendungsfelder beispielhaft identifizieren:

- ▶ Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung: zum Beispiel thermische und chemische Schutzschichten, nanometerdünne Beschichtung von Computerfestplatten, biozide Schutzschichten,
- ▶ Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese: zum Beispiel katalytisch wirksame Nanomaterialien, Autoabgaskatalysatoren, nanoporöse Filter, Nanoreaktoren,
- ▶ Energiewandlung und -nutzung: zum Beispiel Farbstoffsolarzellen, Brennstoffzellen, leistungsfähigere Batterien/Akkumulatoren, Leuchtdioden,
- ▶ 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\*),

\* Ein "Lab-on-a-Chip"-System vereint ein oder mehrere chemische oder biologische Laborreaktionsschritte auf einem einzigen Chip

- ▶ Informationsverarbeitung und -übermittlung: zum Beispiel organische Leuchtdioden (OLED = Kürzel für „Organic Light Emitting Diode“, elektronische Bauelemente in Nanometerdimensionen) sowie
- ▶ Lebenswissenschaften: zum Beispiel Anwendungen der Nanobiotechnik in Analytik und Diagnostik, ortsgenauer Wirkstofftransport („Drug-Delivery“-Systeme), biokompatible Implantate.

Die Bandbreite nanoskaliger Arbeitsmittel zur Verarbeitung in Produktionsprozessen (Werkstoffe) reicht von Aggregaten und Pulvern anorganischer und organischer Nanomaterialien, die in einer Matrix dispergiert oder emulgiert vorliegen können, über Nanokolloide, Nanoröhren und Nanoschichten bis zu komplexen organischen Molekülen. Unter Umwelt- und Gesundheitsschutzaspekten ist entscheidend, ob Nanomaterialien fest in eine Matrix eingebunden sind oder frei vorliegend verwendet werden. Zur Freisetzung ursprünglich fest eingebundener Nanomaterialien aus Produkten durch Alterungs- oder Abbauprozesse (z. B. im Abfall) liegen bisher nur wenige Informationen vor. Generell erwartet das Umweltbundesamt bei der festen Einbindung von Nanomaterialien in Schichten oder in Dispersionen nach derzeitigem Wissen keine Freisetzung größeren Ausmaßes aus diesen Produkten.

*Anorganische Nanomaterialien* aus Metalloxiden (besonders Siliziumdioxid, Cerdioxid, Titandioxid, Aluminiumoxid) haben zurzeit eine große wirtschaftliche Bedeutung. Ihre Hauptanwendungsgebiete liegen in der Elektronik, Pharmazie, Medizin, Kosmetik sowie in der Chemie und Katalyse, zum Beispiel:

- ▶ Titandioxid- und Zinkdioxidpartikel als UV-

Absorber in Sonnenschutzmitteln und als Zusatzstoffe in Farben oder Photokatalysatoren,

- ▶ Goldpartikel als Markerstoffe in der Medizin und für biologische Schnelltests,
- ▶ Aluminiumoxidpartikel als poröse Träger-schicht für Autoabgaskatalysatoren,
- ▶ Cerdioxid als Kraftstoffzusatz zur Optimierung der Verbrennung.

Bei *komplexen Kohlenstoffmolekülen* sind derzeit wirtschaftlich relevant: Carbon Black und Spezialruße, zum Beispiel als Füllstoffe für Gummi und Pigmente (Toner). Die Industrie erwartet für Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT) zukünftig ein hohes wirtschaftliches Potential – vor allem für die Anwendung in der Sensorik und Elektronik, zum Beispiel für TV- und PC-Flachbildschirme sowie auch zur Härtung spezieller Werkstoffe.

*Organische Nanomaterialien*, wie Polymernanopartikel und nanotechnikbasierte Wirk- und Effektstoffe (wie etwa Pharmazeutika), können die physiologische Wirksamkeit von Pharmaka, von Wirkstoffen in der Kosmetik, von Pflanzenschutzmitteln oder Ernährungsbestandteilen und die technischen Eigenschaften – beispielsweise in Lacken sowie Druckfarben – optimieren. Die Industrie erwartet vor allem bei Bindemitteln für Farben und Lacke, Klebebändern und Beschichtungssystemen für Textilien, Holz und Leder eine Erhöhung der Produktwerte.

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

- ▶ Hartschichten (für Kratzfestigkeit),
- ▶ Tribologische Schichten (Verschleißschutz),
- ▶ Antifog-Schichten (beispielsweise selbstreinigende Oberflächen für Glas oder Textilien),

Tabelle1: Die vier Generationen nanotechnischer Produkte und Prozesse, nach O. Renn und M. Roco (2006).

<b>Erste Generation</b> (gegenwärtig aktuell)	Passive Nanostrukturen; Anwendungsbereiche: zum Beispiel Beschichtungen, Nanopartikel, Massengüter (nanostrukturierte Metalle, Polymere und Keramiken).
<b>Zweite Generation</b> (ab circa 2005 erste Anwendungen)	Aktive Nanostrukturen; Anwendungsbereiche: zum Beispiel Transistoren, Verstärker, adaptive Strukturen etc..
<b>Dritte Generation</b> (ab circa 2010 erwartet)	3D-Nanosysteme mit heterogenen Nanokomponenten und unterschiedlichen Techniken des Zusammenbaus; Anwendungsbereiche: zum Beispiel künstliche Organe, Nanoroboter.
<b>Vierte Generation</b> (ab circa 2020 erwartet)	Molekulare Nanosysteme mit heterogenen Molekülen, basierend auf biomimetischen Verfahren und neuem Design; Anwendungsbereiche: zum Beispiel selbst-replizierende nanostrukturierte Systeme

- ▶ Antireflexschichten (etwa zur Effizienzsteigerung von Solarzellen),
- ▶ Korrosionsschutzschichten.

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

Mittlerweile teilen manche Autoren nanotechnische Produkte und Prozesse in vier Generationen ein (Tabelle 1), die zum Teil schon heute Stand der Technik sind oder deren Realisierung Fachleute bis zum Jahr 2020 erwarten. Die bisher genannten Effekte und Anwendungsbeispiele gründen sich fast ausschließlich auf den Möglichkeiten der ersten Generation der Nanotechniken. Wegen des mittelfristig zu erwartenden Auftretens von Anwendungen späterer Generationen, empfiehlt das Umweltbundesamt, diese bei der Betrachtung der Be- und Entlastungspotentiale von Nanotechniken und bei der Entwicklung von Bewertungsschemata zu Chancen und Risiken zukünftig zu berücksichtigen.

### 3. Umweltentlastungspotentiale und Potentiale im Gesundheitsschutz

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. Hierzu führte die Nanokommission der deutschen Bundesregierung in ihrem Bericht eine Reihe von Anwendungen auf, die bereits kommerziell verfügbar sind.

Die folgenden Beispiele zeigen Entlastungspotentiale für die Umwelt und Gesundheit, wie sie sich in der Anwendung in Bezug auf bestimmte Einspar- und Verbesserungsleistungen ergeben. Es ist zu beachten, dass die hier genannten Vorteile für die Umwelt und Gesundheit nicht das Ergebnis einer umfassenden Bewertung des Umweltentlastungs- und des Gesundheitspotentials sind. Hierzu bedarf es weitergehender Analysen und Bewertungen (siehe Abschnitt 3.2) sowie der Berücksichtigung möglicher Belastungspotentiale (siehe Abschnitt 4).

### 3.1. Beispiele für Umwelt- und Gesundheitsentlastungspotentiale

#### *Einsparung von Rohstoffen durch Miniaturisierung*

- ▶ Der Einsatz magnetischer Nanopartikel in Klebeverbindungen vereinfacht die Wiederverwendung von Produktkomponenten: Die Erwärmung der Partikel über ein magnetisches Wechselfeld lässt sich sowohl zur Aushärtung thermisch aktivierbarer Polymerverbindungen als auch zur Zerstörung von Klebeverbindungen nutzen.
- ▶ Durch Verringerung der Schichtdicke lassen sich Rohstoffe sparen: bei nanoskaligen Beschichtungs- und Katalysatormaterialien, bei mit Nanopartikeln optimierten Materialien im Leichtbau, verschleiß- und reibungsarmen Oberflächen im Maschinenbau und hochspezifischen Membranen in der Biotechnik.
- ▶ Nanotechnische Sensoren lassen sich wegen ihres geringen Gewichtes sehr effizient betreiben. Diese Sensoren werden vorrangig für die Spurenanalytik und den biomedizinischen Bereich entwickelt. Eine (in vivo-) Sensorik für das Biomonitoring vitaler Körperfunktionen ermöglicht das frühzeitige Erkennen von physiologischen Störungen. Zukunftschancen liegen auch in der Umweltsanierung für den optimierten und spezifischen Nachweis biologischer und chemischer Verunreinigungen (zum Beispiel Lab-on-a-chip-Systeme).

#### *Einsparung von Energie durch Gewichtsreduktion oder durch Funktionsoptimierung*

Bauteile aus nanotechnisch optimierten Kunststoffen für Fahrzeuge oder Flugzeuge können über die Gewichtsreduktion den Treibstoffverbrauch senken. Beimischungen von Nanopartikeln (2 bis 5 Prozent) können die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Kunststoffen wesentlich verbessern, so dass diese zunehmend in Konkurrenz zu metallischen Werkstoffen treten.

- ▶ Während herkömmliche Glühbirnen 5 Prozent der eingesetzten elektrischen Energie in Licht umwandeln, liegt die Umwandlungsrate bei Energiesparlampen bei 25 Prozent, bei Nanotechnik-basierten OLEDs (Organischen Leuchtdioden) bis zu 50 Prozent. Ein vom US Department of Energy veröffentlichter Bericht für OLEDs prognostiziert eine fast zweifach höhere Effizienz im Energieverbrauch gegenüber konventionellen Leuchtstoffen bei gleicher Lebensdauer. Außerdem zeigen diese Lampensysteme einen weiteren Vorteil für

das Recycling, da sie im Gegensatz zu Leuchtstoffröhren kein Quecksilber enthalten.

- ▶ Die Nanotechnik findet Verwendung in der Entwicklung einer effektiveren Nutzung regenerativer Energien, wie bei der Photovoltaik. Hier kommen verschiedene Nanomaterialien zum Einsatz: Nanokristalle können die sonst relativ niedrigen Wirkungsgrade von Dünnschichtsolarzellen erhöhen, Siliziumsolarzellen lassen sich durch nanoporöse Schichten entspiegeln und erhöhen so den Nutzungsgrad des Sonnenlichts. Ebenfalls auf dem Markt sind Farbstoffsolarzellen mit nanokristallinem Titandioxid für eine effiziente Energienutzung.
- ▶ In modernen Autoreifen werden bereits Siliziumdioxid- und Nanorußpartikel zur Materialverstärkung eingearbeitet. Sie bewirken einen geringeren Rollwiderstand und helfen so, bis zu zehn Prozent Kraftstoff zu sparen.

### **Verbesserung der Reinigungsleistung von Filtersystemen**

- ▶ Membranverfahren gelten als Techniken mit großem Marktpotential in den Sektoren Abwasserbehandlung, Trinkwasseraufbereitung und Wasserentsalzung. In der Abwasserbehandlung wird die „inverse Nanotechnik“ (Techniken zur Minderung von Nanopartikeln) genutzt. Nanoporöse Membranen (Nanofilter) können vorbehandeltes Abwasser von Krankheitserregern (Bakterien, Viren) befreien und so die Verbreitung von Krankheitserregern in die Umwelt verhindern. Ein derartiges Membranfilterverfahren – von Fachleuten des Umweltbundesamtes mitentwickelt, erprobt und gefördert – befindet sich in einigen kommunalen Kläranlagen in Deutschland in Betrieb. Einige Hersteller vertreiben dieses Verfahren auch auf ausländischen Märkten erfolgreich. Über Nanofilter ist auch eine Wasserentsalzung möglich sowie das Herausfiltern von Schwermetallen und Dioxinen. Dabei lassen sich die Trenngenaugigkeit und der Durchsatz genauer steuern als bei herkömmlichen Verfahren.
- ▶ In der Luftreinhaltung spielen nanotechnische Produkte bisher noch keine wesentliche Rolle. Nanokatalysatoren zum Abbau luftgetragener Schadstoffe oder nanoporöse Membranen für ihre Abtrennung finden sich vereinzelt in der Anwendung. Nanokatalysatoren wie der Photokatalysator Titandioxid können unter dem Einfluss von Licht und Wasser hochreaktive Hydroxylradikale erzeugen, die organische Schadstoffe und Mikroorganismen oxidativ angreifen. Nanofilter können sich auch zur Schadstoffentfernung und Nebenproduktabtrennung aus gasförmigen Medien

eignen, wie Forschungsarbeiten zeigten. Die Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen ist mit der Nanotechnik optimierbar. Der Dreiwegekatalysator enthält katalytisch aktive Edelmetalle (Platin, Rhodium und Palladium), deren Partikelgrößen im nanoskaligen Bereich liegen. Mit zunehmend kleineren Dimensionen der Edelmetallpartikel erhöht sich deren Wirkung, woraus eine Verminderung der notwendigen Einsatzmengen der Platingruppenmetalle resultiert. Derzeit lässt das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) in dem Verbundprojekt „NanoKat“ nanoporöse Partikelfilter entwickeln, um nanoskalige Rußpartikel aus Abgasen zurückzuhalten.

### **Anwendungen im Gesundheitsschutz**

- ▶ Im Gesundheitsschutz können die speziellen Eigenschaften der Nanomaterialien genutzt werden, um gezielt die Blut-Hirn-Schranke für Therapeutika passierbar zu machen (zum Beispiel Therapeutika bei Gehirnhautentzündung). Eine zielgerichtete Therapie kann den Einsatz von Medikamenten reduzieren und die Gesamtbelastung des Körpers senken.
- ▶ Weiterhin bietet der Einbau permanenter antimikrobiell wirkender Nanomaterialien, zum Beispiel nanopartikuläres Titandioxid oder Silber, in Oberflächen die Möglichkeit einer Verringerung gesundheitlicher Gefährdung durch Keime in Krankenhäusern.
- ▶ Bereits weit verbreitet ist der UV-Schutz unter Einsatz von Nanopartikeln aus Zink- oder Titandioxid, die in geeigneter Emulsion als Cremes oder Sprays aufgetragen werden. Dadurch lässt sich der Einsatz gesundheitlich bedenklicher organischer Chemikalien zum Sonnenschutz reduzieren.

### **Verminderung des Einsatzes oder Ersatz der Verwendung gefährlicher Stoffe**

- ▶ Auch im medizinischen Bereich kann die Anwendung verschiedener Nanomaterialien vorteilhaft sein, beispielsweise biozide ultradünne Polymerbeschichtungen auf Langzeitkathetern.
- ▶ Nanoporöse Oxidschichten (beispielsweise Siliziumdioxid) lassen sich mit einer bioziden Substanz (wie Silber) versehen, die durch Nanoporen kontrolliert über einen längeren Zeitraum abgegeben wird. Dies kann giftige organische Biozide ersetzen (zum Beispiel in Holzschutzmitteln und Farben).
- ▶ Beim Korrosionsschutz für Metalle werden – wegen nanotechnikbasierter Oberflächen – umwelt- und gesundheitsbedenkliche Chrom-VI-Lacke verzichtbar.

- ▶ Durch die gezielte Reaktionsführung mit Nanokatalysatoren lässt sich die Ausbeute chemischer Reaktionen erhöhen und damit eine Verringerung des Anfalls umweltbelastender Nebenprodukte erreichen (Stichwort: Ressourceneffizienz).

### **Umweltschutz durch Verwendung nanoskaliger Katalysatoren**

- ▶ In der Abwasserreinigung befinden sich Systeme mit Nanokatalysatoren in der Entwicklung. Für die Behandlung spezieller Industrieabwässer, wie mit halogenorganischen Kohlenwasserstoffen (HKW) belastete Abwässer, kann sich alternativ zu kosten- und energieintensiven Behandlungsverfahren der Einsatz extrem reaktiver Palladium-Katalysatoren auf nanoskaligen Magnetitpartikeln eignen. Dadurch können die HKW selektiv in leicht abbaubare, weniger giftige Verbindungen überführt werden.
- ▶ Die Anwendung von Nanopartikeln zur in situ-Grundwasseranierung erfolgt seit einigen Jahren. Das kann zur Beseitigung organischer oder anorganischer Stoffe, wie Schwer- und Halbmetalle, beitragen. Verschiedene Materialien (zum Beispiel nanopartikuläre Eisenverbindungen wie „Nano Zero Valent Iron“ oder „Carbo Iron“) sind bereits am Markt erhältlich. Es gibt hierzu zahlreiche Forschungsaktivitäten im In- und Ausland.

## **3.2. Bewertung des Umwelt- und Gesundheitsentlastungspotentials**

Bisherige Arbeiten, die das Umweltentlastungspotential nanotechnischer Produkte und Prozesse behandeln, erfassen diese vor allem qualitativ. Genauere Daten, die die bessere Umweltverträglichkeit der Anwendungen untermauern, liegen derzeit nur vereinzelt vor (zum Beispiel Steinfeldt et al. (2004), Oakdene Hollins (2007)). Zwei im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitete Studien dokumentieren weitere Fallbeispiele, die über einen an Ökobilanzen angelehnten Ansatz Effizienzpotentiale Nanotechnik-basierender Anwendungen aufzeigen (siehe Abschnitt 5.1 „Forschungsprojekte und Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes“).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für die Mehrzahl der untersuchten Anwendungen mehr oder weniger hohe Ökoeffizienzpotentiale vorliegen. Nanotechnische Anwendungen sind aber nicht per se mit Entlastungspotentialen verbunden und erfordern eine fallweise Analyse. Für eine

Beschreibung der Entlastungseffekte für die Umwelt definierten das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und das Umweltbundesamt im Rahmen des NanoDialogs der Bundesregierung (siehe Abschnitt 5.2.) Kriterien. So ist im Rahmen einer Lebensweganalyse (Life Cycle Assessment = LCA) unter anderem der Beitrag zum Klimaschutz, zur Energie- und Ressourceneinsparung, zur Substitution und Reduktion umweltgefährdender Stoffe und zur Erhöhung der Sicherheit in der Prozessführung zu bestimmen. Auf diese Weise lassen sich Vor- und Nachteile nanotechnischer Produkte und Verfahren in nachvollziehbarer Weise verdeutlichen.

Es besteht vielfältiger Informations- und Forschungsbedarf zu den Umweltentlastungspotentialen:

- ▶ Klärung der Fragen, welches Nachhaltigkeitspotential nanotechnische Produkte und Verfahren haben, welche Wirkungen die Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf hat sowie die Bewertung eventuell vorhandener „ökologischer Rucksäcke“. So fehlt in der Regel bei der Beschreibung der Umweltvorteile von Produkten in der Anwendung eine Analyse und Bewertung des Ressourcen- und Energieverbrauchs in der Herstellung dieser Produkte. Für eine sachgerechte Bewertung ist im Vorfeld die Erarbeitung eines Bewertungsschemas sinnvoll. Hierfür ist die Bereitstellung aussagekräftiger Daten von Seiten der Hersteller unabdingbar.
- ▶ Am Lebenszyklus von Produkten ausgerichtete Betrachtung und Bewertung der positiven und negativen Wirkungen von Nanomaterialien unter dem Gesichtspunkten Umwelt-, Gesundheits- und Arbeitsschutz.
- ▶ Welche Wirkung hat die Nanotechnik auf den Rohstoff- und Energiebedarf? Bei dieser Frage ist auch der vermehrte Einsatz von Edelmetallen und seltenen Elementen in Verbraucherprodukten zu betrachten. So wird Nanosilber verbreitet in Textilien wie Putztüchern, Strümpfen und Hemden eingesetzt. Angesichts der Tatsache, dass es sich dabei um Wegwerfartikel oder um Artikel mit relativ kurzer Nutzungszeit handelt und dass nach jeder Wäsche der Gehalt an Silberpartikeln bis zur Hälfte ins Abwasser verloren gehen kann, hält das Umweltbundesamt den Einsatz in diesen Produkten für problematisch. Die statistische Reichweite von Silber, also die Zahl der Jahre, in denen Silber noch zur Verfügung steht, ohne Recyclingaktivitäten zu berücksichtigen, beträgt schätzungs-

weise 29 Jahre. Im Sinne eines vorsorgenden Umweltschutzes empfiehlt das Umweltbundesamt, einen Eintrag von Nano-Silber in die Umwelt zu vermeiden, auch wenn derzeit der Silberverbrauch durch diese Anwendungen noch gering ist: Für Deutschland ergibt sich eine Schätzung der gesamten Silbereinsatzmenge auf 8 Tonnen pro Jahr (2007), wobei circa 1,1 Tonnen Silber in Bereichen zum Einsatz kommen, in denen es als Nano-Silber benutzt wird (siehe auch Abschnitt 4.2. „Ökotoxikologische Aspekte“).

- ▶ Welche Nanomaterialien eignen sich für eine effiziente Behandlung kontaminierten Grundwassers und der Abluft und wie lassen sich diese Nanomaterialien wieder aus der Umwelt entfernen?
- ▶ Was geschieht mit diesen Materialien im Laufe ihres „Lebens“ (Produktionsphase, Nutzungsphase, Abfallphase) in der Umwelt und wie wirken sie sich auf diese aus? Mit zunehmender Verwendung wird die Klärung der Risiken dringender.

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

Durch den zunehmenden Einsatz synthetischer Nanomaterialien ist auch mit deren vermehrtem Eintrag in die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft zu rechnen. Nanomaterialien entstehen – ebenso wie größere Schwebstaubteilchen – sowohl bei technischen als auch bei natürlichen Prozessen, wie etwa Vulkanausbrüchen oder Waldbränden. Sie entstehen auch ungewollt bei vielen technischen Prozessen, zum Beispiel beim Schleifen. Diese Nanomaterialien sind in Form, Zusammensetzung und Größe sehr unterschiedlich, während synthetisch erzeugte Nanomaterialien nach gewünschten Eigenschaften hergestellt und gestaltet sind. Untersuchungen zum natürlichen oder durch Verbrennung entstandenen Ultrafeinstaub lassen zwar Schätzungen zum Verhalten und zur Wirkung synthetischer Nanomaterialien in der Umwelt zu. Diese reichen jedoch nicht aus, um die Risiken industriell erzeugter Nanomaterialien sicher schätzen zu können. Die breiten Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnik und die sehr unterschiedlichen Nanomaterialien erfordern eine differenzierte Beurteilung des möglichen Risikos für die menschliche Gesundheit und die Umwelt.

Risiken für Mensch und Umwelt sind am ehesten bei Nanomaterialien zu erwarten, die als freie Partikel in Produkten enthalten sind. Solange Nanopartikel fest in Materialien eingebunden sind, ist eine Gefährdung während der bestimmungsgemäßen Verwendung kaum zu erwarten. Aber auch in diesem Fall ist zu klären, ob und in welcher Form Nanomaterialien während des Herstellungsprozesses, beim Gebrauch eines Produktes, durch Alterung und Abbau sowie bei der Entsorgung und Wiederverwertung in die Umwelt gelangen können, denn auch bei Nanomaterialien ist die Betrachtung des gesamten Lebensweges die Voraussetzung für die Bewertung einer Umweltgefährdung.

Entscheidend für die Schätzung des Risikos durch Nanomaterialien ist, in welcher Form diese mit Mensch und Umwelt in Kontakt kommen. Es gibt noch wichtige Fragen, die zu beantworten sind:

- ▶ Wie stabil und langlebig sind diese Formen?
- ▶ Zerfallen oder agglomerieren sie?
- ▶ Sind sie in Wasser löslich?
- ▶ Treten sie in Wechselwirkung mit Oberflächen, anderen Nanomaterialien oder Chemikalien?
- ▶ Werden Sie abgebaut und wie ändern sich dabei ihre Eigenschaften?

Zur Bestimmung der Toxizität von Nanomaterialien in biologischen Systemen ist weiterhin die Charakterisierung der untersuchten Materialien bezüglich Größe, Form, Dispergierbarkeit und Oberflächenbeschaffenheit unerlässlich. In biologischen Systemen können sich aber gerade die Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Umgebung rasch ändern.

Über den Luftweg können sich Nanopartikel wegen ihrer geringen Größe grenzüberschreitend verbreiten und auch an Aerosole haften. Nanopartikel können in lebende Zellen gelangen. Sie haben daher grundsätzlich das Potential, in Organismen zu akkumulieren und sich über die Nahrungskette anzureichern.

Es gibt bisher noch keine Erkenntnisse, wie organische Nanomaterialien in der Umwelt abgebaut werden. Es gibt keine Hinweise, dass in der Umwelt ein Abbau der gegenwärtig bereits in größerem Maßstab produzierten Kohlenstoff-Nanomaterialien (Fullerene und Nanoröhrchen) stattfindet.

Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes ist die Kennzeichnung von Erzeugnissen, denen Nanomaterialien zur Verbesserung der

Gebrauchseigenschaften zugesetzt sind, im Rahmen einer freiwilligen Produktkennzeichnung wie dem Blauen Engel erst dann sinnvoll, wenn eine gesundheitliche und ökologische Bewertung der Nanomaterialien vorliegt. Erst dann können entsprechende Erzeugnisse auf der Grundlage vorliegender Stoffbewertungen beurteilt und Anforderungen für die Produktkennzeichnung mit dem Blauen Engel festgelegt werden. Bisher hat sich sowohl das Umweltbundesamt als auch die Jury Umweltzeichen bei Erzeugnissen, die Nanomaterialien enthalten, unter Hinweis auf die ungelösten Bewertungsfragen von Nanomaterialien gegen Neuvorschläge zur Kennzeichnung mit dem Blauen Engel ausgesprochen.

Derzeit ist eine Kennzeichnung oder eine Meldepflicht von Produkten im Hinblick auf ihren Gehalt an Nanomaterialien noch nicht vorgeschrieben. Ob ein Produkt Nanomaterialien enthält oder nicht, ist für die Nutzerin und den Nutzer nicht erkennbar. Diese Information ist aber Voraussetzung, um gezielt die Herkunft und Verbreitung bestimmter Nanomaterialien in der Umwelt untersuchen und beurteilen zu können. Im Rahmen der Novellierung der Kosmetikverordnung und der „Novel-Food“-Verordnung auf EU-Ebene wird erstmals eine Kennzeichnung gefordert. Die Kosmetikverordnung wird allerdings erst ab 2012 in Kraft treten; die „Novel-Food“-Verordnung befindet sich aktuell in der Revision.

## 4.1. Gesundheitliche Aspekte

Zu den gesundheitlichen Risiken die von den bereits auf dem Markt erhältlichen Nanomaterialien ausgehen könnten, bestehen noch große Wissenslücken. Die mögliche Aufnahme der Nanomaterialien 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. Die Zahl der auf die Wirkung von Nanomaterialien bezogenen Forschungsarbeiten ist noch klein; zur inhalativen Aufnahme über die Atemwege liegen vergleichsweise die meisten wissenschaftlichen Studien vor.

Nanopartikel gelangen in der Lunge bis in den alveolaren Bereich. Hier entfernen die alveolaren Makrophagen diese Nanopartikel wegen

ihrer geringen Größe nur unzureichend. Deshalb kann es zu Entzündungsprozessen in der Lunge kommen.

Von den Alveolen (Lungenbläschen) ist der Übertritt von Partikeln in das Lungenepithel und den Zwischenraum nachgewiesen und von dort in geringem Maße der Transport in sekundäre Organe, was auf einen Übertritt in den Blutkreislauf schließen lässt.

Nicht toxische, biobeständige Nanomaterialien können Lungentumore in Nagern induzieren, mittels ähnlicher Mechanismen wie feine Partikel. Diese Mechanismen beinhalten die Schädigung der Desoxyribonukleinsäure (DNS; Erbinformation), die Verstärkung der Zellproliferation (Vermehrung), verbunden mit anhaltenden Entzündungsreaktionen in der Lunge.

Für bestimmte Kohlenstoffnanoröhrchen gibt es Hinweise auf akute asbestfaser-ähnliche pathogene Effekte in Abhängigkeit von ihrer spezifischen Struktur und Länge. Hierzu zählen verminderte Abbau-Leistung der alveolaren Makrophagen, Entzündungen und Fibrosen in den Lungen (krankhafte Vermehrung des Bindegewebes). Werden Kohlenstoffnanoröhrchen in den Bauchraum von Versuchstieren injiziert, bilden sich auch die für Asbest typischen Mesotheliome (Tumore in der die Lungen überziehenden Haut).

Bei Tierversuchen mit Ratten zeigte sich, dass eine direkte Aufnahme der Nanopartikel von der Nase über den Riechnerv zum Gehirn möglich ist, wo die Nanopartikel im Riechkolben akkumulieren. Mögliche negative Wirkungen sind jedoch noch nicht ausreichend untersucht.

Neben einer gezielten Aufnahme von Nanomaterialien durch den Mund (zum Beispiel in Arzneimitteln) ist auch eine unbeabsichtigte orale Aufnahme in Betracht zu ziehen, etwa in Form von Zusätzen in Nahrungsmitteln. Ebenso können in der Lunge herausgefilterte Nanomaterialien in den Magen-Darm-Trakt gelangen. Nur wenige Studien beschäftigten sich bisher mit der Aufnahme und dem Verbleib von Nanomaterialien im Magen-Darm-Trakt. Generell scheinen die Studien auf eine sehr geringe Aufnahme hinzudeuten.

Über die Haut sind prinzipiell zwei Aufnahmewege von Nanomaterialien denkbar: Diese können erstens über Zwischenräume der oberen Hautschicht und zweitens über die Haarwurzeln in die Haut gelangen. Intakte, gesunde Haut stellt offensichtlich eine effektive Barriere gegen-

über Titandioxid-Nanopartikeln dar. Partikel ließen sich zwar zwischen den abgestorbenen Zellen der Hornhaut und auch in Haarfollikeln nachweisen, allerdings nie in tieferen Hautschichten oder im Kontakt mit vitalen Zellen. Kommerziell erwerbbar „Quantum Dots“ (Quantenpunkte sind nanoskalige Materialstrukturen, meist aus Halbleitermaterialien) und Fullerene dringen dagegen leicht in die Haut ein.

Quantitative Angaben zur relativen Bedeutung der einzelnen Aufnahmepfade sind zurzeit nicht möglich. Klar ist allerdings, dass über den Blutkreislauf in den Körper gelangte Partikel in die verschiedenen Organe (Herz, Leber, Milz, Niere, Knochenmark) transportierbar sind.

Untersuchungen geben Hinweise darauf, dass manche 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.

Auf der zellulären Ebene scheinen Barrieren für größere Moleküle – wie die Zellmembran – kein unüberwindbares Hindernis für Nanopartikel darzustellen. Partikel mit einem Durchmesser <40nm werden offensichtlich mittels eines noch unbekanntes Mechanismus in die Zellen aufgenommen.

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. Es ist vorstellbar, dass Partikel in den Mitochondrien mit der Atmungskette interagieren und damit die Energieproduktion stören und zur Produktion reaktiver Sauerstoffspezies führen können. Nanopartikel mit einem Durchmesser <30nm können sogar in den Zellkern gelangen, wobei kleinste Nanopartikel (<2nm) sich als Cluster in die DNS-Doppelhelix einlagern können. Die gesundheitlichen Wirkungen solcher möglichen Interaktionen sind noch völlig unbekannt.

Die Verteilung der Nanomaterialien im Körper scheint abhängig von Größe, Form und Stoffeigenschaften zu sein. Biologisch abbaubare Nanomaterialien, zum Beispiel Dextranpartikel oder Liposomen, werden metabolisiert und ausgeschieden. Über das Verhalten der nicht-abbaubaren Nanomaterialien ist jedoch noch wenig bekannt. Erste Studien zeigen, dass eine Akkumulation besonders in den Entgiftungsorganen (das heißt Leber und Niere) erfolgt. Ob durch

diese Anreicherung der Materialien im Körper ein gesundheitliches Risiko besteht, ist noch nicht ausreichend untersucht.

## 4.2. Ökotoxikologische Aspekte

Da wegen ihrer geringen Größe neue Funktionalitäten der Nanomaterialien im Vergleich zu ihrer makroskopischen Form festzustellen sind, besteht bei einer Umweltextposition auch das Risiko eines veränderten Verhaltens und einer unerwünschten Wirkung auf die verschiedenen Ökosysteme. Eine potentielle Gefährdung ist dabei am ehesten bei gezielt in die Umwelt eingebrachten nanoskaligen Produkten anzunehmen. Es können jedoch auch in einer Matrix gebundene Nanomaterialien aus Produkten durch Abnutzung oder Auswaschung in die Umwelt gelangen. Anhaltspunkte hierzu geben zum Beispiel Schweizer Untersuchungen, die zeigen, dass Titandioxid-Partikel in Fassadenanstrichen, die dort zu einer Selbstreinigung der Oberflächen führen, von Hausfassaden ausgewaschen werden und so in den Boden oder in das Wasser gelangen können. Auch in Verbraucherprodukten enthaltene Nanomaterialien können die Umwelt belasten. Studien aus den USA und Schweden ermitteln, dass wegen ihrer bakteriziden Wirkung in Socken und Sportbekleidung eingesetzte Silber-Nanopartikel sich beim Waschen aus den Textilien lösen und ins Abwasser gelangen. Im Zusammenhang mit der steigenden Zahl von Produkten, die Silber-Nanopartikel enthalten, ist eine Erhöhung des Silbergehalts im Klärschlamm zu erwarten. Untersuchungsbedarf besteht, ob dies die bakterielle Gemeinschaft in Kläranlagen stören kann. Auch die Wirkung von Nano-Silber auf Organismen in Oberflächengewässern, Sedimenten und Böden ist zurzeit unzureichend untersucht. Das Umweltbundesamt empfiehlt, im Sinne eines vorsorgenden Umweltschutzes einen Eintrag von Nano-Silber in die Umwelt zu vermeiden.

Die Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zur Erfassung der Wirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt stieg in den letzten Jahren stark. Die meisten Studien befassen sich mit den ökotoxikologischen Effekten auf Organismen in Wasser-Ökosystemen. Vor allem Mikroorganismen, aquatische Wirbellose und verschiedene Fischarten wurden untersucht. So können bereits relativ niedrige Konzentrationen von C60-Molekülen („Buckminsterfulleren“) und nanoskaligem Titandioxid im Wasser je nach Art der Ver-

abreichung bei Wasserflöhen tödlich wirken. Eine andere Studie zeigt, dass die Belastung mit nanoskaligem Silber bei Wasserflöhen zu einer höheren Sterblichkeitsrate führt als die Belastung mit mikroskaligem Silber bei gleicher Konzentration.

Die Aufnahme vieler Nanomaterialien über Kiemen und andere Epithelien durch aquatische Organismen ist bekannt. Eine Studie mit dem japanischen Reiskörpfling zeigt, dass fluoreszierende Nanomaterialien in verschiedenen Organen akkumulieren und auch in diesen Organismen die Blut-Hirn-Schranke überwinden können. Während der Embryonalentwicklung des Zebrafisches erhöhten Nano-Silberpartikel bereits bei geringen Konzentrationen die Rate an Fehlbildungen. Bei höheren Konzentrationen stieg auch die Sterblichkeitsrate unter den Embryonen. Kohlenstoffnanoröhrchen verzögerten den Schlupf der Zebrafische.

Studien zur Ökotoxikologie von Nanomaterialien in Boden-Ökosystemen sind noch sehr selten. Bei Säugetieren lassen sich die Ergebnisse aus Laborstudien für die Modellierung der Wirkung auf die menschliche Gesundheit in begrenztem Umfang auch auf Wildtiere übertragen. Besonderer Bedarf besteht jedoch in der Erforschung der Wirkungen von Nanopartikeln auf andere Wirbeltiere, Wirbellose und auch Pflanzen. Die bisherigen, wenigen Studien zeigen unter anderem reduzierte Enzymaktivitäten, wie die des antioxidativen Enzyms Katalase und des detoxifizierenden Enzyms Glutathion-S-Transferase in Asseln nach Aufnahme von Titandioxid-Nanopartikeln, sowie eingeschränkte Fortpflanzungsraten bei Kompostwürmern nach Exposition mit Kohlenstoffnanoröhrchen. Erst wenige Studien beschäftigten sich bisher mit der toxischen Wirkung auf Primärproduzenten. Versuche mit Aluminiumoxid-Nanopartikeln zeigten ein reduziertes Wurzelwachstum bei verschiedenen Nutzpflanzen (zum Beispiel Mais, Gurke, Soja, Karotte). Bei größeren Aluminium-Partikeln trat dieser Effekt nicht auf. Ein weiteres Beispiel ist eine Veröffentlichung über Kupfer-Nanopartikel, die sich in Zellen von Pflanzenkeimlingen der Mungobohne und des Weizen anreichern und zu einem reduzierten Wurzelwachstum führen.

Zur Anreicherung von Nanomaterialien in Organismen oder ihrer Anreicherung über die Nahrungskette ist bisher noch wenig bekannt. Ebenfalls wurden bisher kaum Interaktionen von Nanomaterialien mit anderen Umweltchemikalien untersucht. So stehen einige Nanomaterialien im Verdacht, als Vektoren für den Transport

toxischer Chemikalien zu fungieren. Eine Studie mit Algen wies nach, dass sich die Toxizität des polyzyklischen Kohlenwasserstoffes Phenanthren nach Sorption an aggregierte C60-Molekülen („Buckminsterfullerene“) erhöhte, was auf eine erhöhte Bioverfügbarkeit von Phenanthren nach Transport an die Zellmembranen der Algen zurückgeführt wurde.

### 4.3. Weiterentwicklung gesetzlicher Regelungen

Regulierungen, die sich speziell auf die Nanotechnik und ihre Anwendungen beziehen, gibt es in Deutschland bisher noch nicht. Erste Vorschriften mit spezifischen Regeln für die Zulassung, Sicherheitsprüfung und Kennzeichnung von Nanomaterialien in Verbraucherprodukten hat das EU-Parlament inzwischen verabschiedet. So soll mit einer neuen Kosmetik-Verordnung und einer neuen Novel-Food-Verordnung der Einsatz von Nanomaterialien in kosmetischen Produkten und in Lebensmitteln reguliert werden.

Grundlegend für die Regulierungen sind die Definitionen für Nanomaterialien. Diese müssen weiter entwickelt werden und sollten auch Nanomaterialien wie Agglomerate und Aggregate berücksichtigen. Denn neben der Größe der Nanomaterialien sind auch deren spezifische Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften bei der Risikobeurteilung der Materialien wichtig.

Initiativen zur Anpassung von REACH und der Biozid-Richtlinie finden sich im Folgenden.

#### Nanomaterialien und REACH

Die REACH-VO (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) ist als zentrale stoffrechtliche Regelung in Europa grundsätzlich geeignet, die Risiken von Nanomaterialien für Gesundheit und Umwelt zu erfassen und zu managen.

Bisher gibt es allerdings keinerlei spezifische Hinweise auf Nanomaterialien in dieser Verordnung. Es fehlt an eindeutigen rechtlichen Vorgaben und Umsetzungsleitfäden, die gewährleisten, die spezifischen Risiken der Nanomaterialien sicher zu erkennen, zu bewerten und geeignete Risikomanagementmaßnahmen zu entwickeln.

Deshalb arbeitet eine EU-Arbeitsgruppe (Subgroup on Nanomaterials from the Meetings of

the REACH and CLP Competent Authorities) an Regeln zu Nanomaterialien unter der REACH-VO.

Für Nanomaterialien ist eine angepasste, spezifische Bewertungsstrategie erforderlich. Dabei sind valide und angemessene Prüfungen mit den Nanomaterialien sicherzustellen. Die bisherigen Prüf- und Bewertungsverfahren nach REACH-VO sind auf Nanomaterialien nicht ohne Modifikation und Weiterentwicklung anwendbar.

Es sind durch die Europäische Kommission Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass die Hersteller und Importeure eine eigene, vom Bulkmaterial (Chemikalie, die in größerer Menge hergestellt wird) unabhängige Risikobewertung für die Nanomaterialien durchführen müssen. Die REACH-VO sollte daher Hersteller und Importeure von Nanomaterialien verpflichten, eigene (Teil-) Dossiers mit Daten zu allen erforderlichen Endpunkten (Ergebnisse toxikologischer, ökotoxikologischer oder physikalisch-chemischer Tests) sowie spezifischen Expositionsinformationen und Risikomanagementmaßnahmen einzureichen. Neben der Entwicklung von Eckpunkten für Leitfäden zu diesen nanospezifischen Aspekten berät die o.g. EU-Arbeitsgruppe auch darüber, ob Anpassungen der REACH-Verordnung und ihrer Anhänge notwendig sind.

Das Umweltbundesamt arbeitet im Bereich der Umsetzung und Anpassung von REACH an Nanomaterialien eng mit dem BMU, den anderen Bewertungsstellen (BAuA, BfR), der Bundesstelle Chemikalien und der Europäischen Chemikalienagentur ECHA zusammen, um die notwendigen Voraussetzungen für die Prüfung, Bewertung und das Management von Nanomaterialien nach REACH-VO zu schaffen.

#### **Nanomaterialien im Rahmen der Biozid-Richtlinie**

Als Biozidprodukte definiert die Biozid-Richtlinie 98/8/EG Wirkstoffe und Zubereitungen, die dazu bestimmt sind, auf chemischem oder biologischem Weg Schadorganismen zu zerstören, abzuschrecken, unschädlich zu machen, Schädigungen durch sie zu verhindern oder sie in anderer Weise zu bekämpfen. In Deutschland sind etwa 20.000 Biozidprodukte auf dem Markt, die – nachdem eine gemeinsame Bewertung der Wirkstoffe in der EU stattgefunden hat – schrittweise eine Zulassung bekommen. Es gibt bereits einige Produkte, die biozid wirkende Nanomaterialien enthalten.

In der derzeitigen Fassung der Biozid-Richtlinie

sind Nanomaterialien nicht explizit berücksichtigt. Wie bei der REACH-VO fehlt es an eindeutigen rechtlichen Vorgaben, die eine sichere Erkennung und Bewertung spezifischer Risiken der Nanomaterialien sowie die Entwicklung geeigneter Risikomanagementmaßnahmen gewährleisten. Weiterhin mangelt es an Methoden zur Beobachtung des Expositionspotentials.

Wie unter REACH sind durch die Europäische Kommission in der Biozid-Richtlinie daher die Voraussetzungen zu schaffen, eine eigene Risikobewertung für biozide Nanomaterialien durchzuführen. Hierzu ist es erforderlich, bei der Wirkstoffprüfung zur Aufnahme in den Anhang I der Biozid-Richtlinie bei Wirkstoffen in Nanoform innerhalb des (Teil-)Dossiers alle spezifischen, erforderlichen Endpunkte zu berücksichtigen. Dafür sind geeignete Teststrategien und Testmethoden weiterzuentwickeln und verbindlich festzuschreiben.

Zurzeit erfolgt eine Revision der Biozidrichtlinie. Das Umweltbundesamt beteiligt sich an der Diskussion der Novellierung und wird sich dafür einsetzen, dass biozide Wirkstoffe, die aus nanoskaligen Materialien bestehen, wegen ihrer besonderen Eigenschaften als selbstständige Wirkstoffe mit eigener Identität zu behandeln sind. Die notwendigen Datenanforderungen, die die speziellen Risiken von Nanomaterialien erfassen, sind durch die Europäische Kommission anzupassen oder zu entwickeln.

Die Anforderungen an die Bewertung sind vergleichbar mit den Anforderungen unter REACH, somit ist generell eine einheitliche Bewertung von Nanomaterialien im Stoffrecht anzustreben.

#### **4.4. Bewertung der Risiken - Informations- und Forschungsbedarf**

Für eine verlässliche, umfassende Risikoanalyse der Nanomaterialien fehlen bisher ausreichende Informationen.

Dringend benötigt werden Informationen der Hersteller zu den verwendeten und auf dem Markt befindlichen Nanomaterialien. Geeignete Informationssysteme und Informationsverpflichtungen sollten vordringlich und kurzfristig die Produktion und den Verbrauch der verschiedenen Nanomaterialien erfassen. Angaben zur Charakterisierung und zu Funktionalitäten der eingesetzten Nanomaterialien sollten einfließen. Dieses ließe sich im Rahmen einer Meldeverordnung erreichen. Informationen zum Expositions-

verhalten der Nanomaterialien und zu deren Verbleib in der Umwelt sowie zu (öko-)toxischen Effekten sollten die Hersteller dann über die Registrierungs- oder Zulassungsunterlagen im Rahmen der Stoffgesetze vorlegen. Die Wissenslücken zu Exposition und Wirkung von Nanomaterialien sind sehr groß. Daher sollte ein Schwerpunkt der Forschung auf dem Bedarf für die Bewertung und Regulierung von Risiken liegen. Da alle Bewertungsbehörden vor dem gleichen Problem stehen, erarbeiteten die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, federführend), das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und das Umweltbundesamt (UBA) eine gemeinsame Forschungsstrategie „Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln“. In dieser sind die Forschungsthemen identifiziert, die dringend und prioritär für eine Risikobewertung zum Schutz des Menschen und der Umwelt sind.

Da es angesichts der Vielzahl unterschiedlich modifizierter Nanomaterialien nicht möglich sein wird, alle Varianten zu testen, gilt es zu ermitteln, welche Parameter für die Charakterisierung der Nanomaterialien die Gesundheits- und Umweltrisiken besonders beeinflussen. Ziel sollte es sein, Nanomaterialien zu Klassen mit ähnlichen Wirkungen zusammenzufassen. Bei der Durchführung der Prüfverfahren sind geeignete Bezugsgrößen zu bestimmen (zum Beispiel Masse, Partikelzahl, Oberfläche), um damit eine möglichst vergleichbare Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Studien zu erreichen.

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

- ▶ Einsatz und Anwendung von Nanomaterialien:  
Exemplarische Bewertung von Produkten, die bereits auf dem Markt sind oder kurz vor der Markteinführung stehen, wie Kosmetika, Haushaltsprodukte, Biozide, und die in relevanten Mengen in die Umwelt gelangen können. Hierzu zählen Beschichtungen von Textilien und weitere Materialien, zum Beispiel Lebensmittelverpackungen, die als Abfall oft in die Umwelt gelangen.
- ▶ Freisetzung von Nanomaterialien:  
Expositionsszenarien über den gesamten Lebenszyklus von Nanomaterialien.
- ▶ Verhalten und Verbleib von Nanomaterialien in der Umwelt  
Untersuchungen zum Verhalten von Nanomaterialien in der Umwelt (Persistenz, Bioakku-

mulation, Wechselwirkungen mit Nährstoffen und Chemikalien, auch in Abhängigkeit von ihrer Form, Größe, Ladung, Beschichtung und/oder Oberflächengestalt).

- ▶ Messverfahren  
Entwicklung und Optimierung geeigneter Messverfahren für die Ermittlung der Exposition von Mensch und Umwelt.
- ▶ Wirkungsbeurteilung:  
Überprüfung und gegebenenfalls Entwicklung oder Optimierung geeigneter Prüfverfahren für die Ermittlung der Wirkungen auf Mensch und Umwelt. Untersuchung relevanter toxikologischer und ökotoxikologischer Endpunkte von Nanomaterialien sowie die Wechselwirkung zwischen Nanopartikeln. Überprüfung der Eignung von in vitro-Verfahren (Experimente werden in einer kontrollierten, künstlichen Umgebung, außerhalb eines lebenden Organismus, durchgeführt) durch in vivo-Verfahren (Experimente werden im lebenden Organismus durchgeführt).
- ▶ Charakterisierung und Klassifizierung sowie Beurteilung der Wirkung von Nanomaterialien  
Identifizierung relevanter Parameter zur Charakterisierung von Eigenschaften der Nanomaterialien.  
Bestimmung von Parametern, die eine Klassifizierung und Gruppierung von Nanomaterialien hinsichtlich ihrer Wirkung und ihres Verhaltens ermöglichen.
- ▶ Teststrategien  
Entwicklung geeigneter, intelligenter Test- und Bewertungsstrategien zur Erfassung gesundheitlicher und ökotoxikologischer Wirkungen.  
Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die unterschiedlichen Aufnahmepfade.

Eine ausführliche Beschreibung und Begründung des Forschungsbedarfs findet sich in der Forschungsstrategie der genannten Bundesoberbehörden.

## 5. Aktivitäten des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt will zu umweltrelevanten Aspekten der Nanotechnik informieren, Wissensdefizite ausfüllen und weiteren Handlungsbedarf ermitteln. Es will die positiven Wirkungen der Nanotechnik unterstützen und fortentwickeln, Umweltentlastungspotentiale ermitteln, Risiken

für die Umwelt und die menschliche Gesundheit identifizieren sowie Vorkehrungen für deren Verminderung treffen.

## 5.1. Forschungsprojekte und Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes

Die in den Überschriften der einzelnen Projekte genannten Jahreszahlen bezeichnen das Jahr der Veröffentlichung.

### Rechtsgutachten Nanotechnologien (2007):

In der bestehenden Umweltgesetzgebung gibt es – wie bereits erläutert – keine spezifischen Vorgaben zu Nanomaterialien. Die vorhandenen Regulierungen sind für die besonderen, von Nanomaterialien ausgehenden Risiken unzureichend. So unterscheidet das Stoffrecht nicht zwischen der nano- und makroskaligen Form eines Stoffes. Darüber hinaus sind die im Stoffrecht festgelegten Mengenschwellen für die Nanotechnik ungeeignet. Im Rechtsgutachten Nanotechnologie beschäftigten sich das Ökoinstitut e.V. und die sofia – Sonderforschungsgruppe Institutionenanalyse – im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Regulierungsbedarf und den Regulierungsmöglichkeiten der Nanotechnik im bestehenden Rechtsrahmen auf nationaler und europäischer Ebene. Das Gutachten identifiziert Regelungslücken in der bestehenden nationalen und europäischen Umweltgesetzgebung im Hinblick auf Nanotechniken, zeigt Gestaltungsmöglichkeiten auf, um nanospezifische/-taugliche Vorgaben in die Umweltgesetzgebung einzuarbeiten, und gibt Empfehlungen zum weiteren regulatorischen Vorgehen. So schlägt das Gutachten ein Stufenkonzept vor. Hiernach ist in einem ersten Schritt zunächst das Informationsdefizit zu bewältigen. Die so gewonnenen Risikoinformationen sind dann hinsichtlich eines sich daraus eventuell ergebenden Regelungsbedarfs zu bewerten und zu systematisieren.

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3198.pdf>

### Technisches Vorgehen bei der Testung von Nanopartikeln (2007):

Standardisierte Tests zur Erfassung von Umweltwirkungen wurden für „klassische Chemikalien“ entwickelt und lassen sich nur eingeschränkt auf die Testung von Nanopartikeln übertragen. Da spezielle Methoden für Nanopartikel nicht vorlie-

gen, stellt die Untersuchung von Nanomaterialien eine besondere Herausforderung dar. Ein Austausch der Fachleute zu ihren Erfahrungen und grundlegenden Entwicklungen sowie ein Vergleich der Resultate ist besonders wichtig. Nur so lassen sich Ergebnisse absichern und neue Erkenntnisse gewinnen. Grundlage hierfür ist die Dokumentation und Veröffentlichung aller relevanten Informationen zu den einzelnen Studien. Ziel einer vom Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie (IME) durchgeführten Untersuchung war es daher, anhand der Auswertung relevanter Literatur zum Umweltverhalten und zur Ökotoxikologie von Nanomaterialien Empfehlungen zu geben, wie bei deren Testung technisch vorzugehen ist und welche Informationen Teil einer Berichtspflicht sein sollten. Diese Studie enthält unter anderem Themen wie die Suspensionsherstellung, die Charakterisierung von Nanomaterial und der Suspensionen in Wasser, die Wahl der Testorganismen und Endpunkte sowie die Frage nach dem Referenzmaterial.

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3484.pdf>

### Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie (2007):

Nanotechniken können dazu beitragen, Wasserverschmutzungen vorzubeugen oder zu beseitigen und die Wasserqualität zu überwachen. Der Weltmarkt in der Wasserversorgung wird voraussichtlich stark wachsen. Für das Jahr 2010 prognostizieren Fachleute ihn auf über 400 Mrd. US-\$, wobei die Membrantechniken eine Schlüsselrolle einnehmen.

Die hohe Entwicklungsdynamik bei den Nanotechniken spiegelt sich in der stetig wachsenden Zahl an Patenten und Publikationen wider. Wichtiges Segment sind neuartige Filtrationsmembranen sowie Nanomaterialien für die katalytische, adsorptive oder magneto-separative Reinigung von Abwässern. Zum Teil sind hier bereits erste marktreife Produkte verfügbar. Langfristig bietet die Konvergenz von Elektronik, Biotechnik, Nanotechnik und Mikrosystemtechnik auch für die nachhaltige Wasserwirtschaft neue Perspektiven und Anwendungen.

Deutschland besitzt vor allem wegen seiner starken Grundlagenforschung eine hohe Kompetenz

\* BMU-Programm zur Förderung von Innovationen mit Demonstrationscharakter zur Verminderung von Umweltbelastungen

in der Membran- und Nanofiltrationstechnik, die als gute Basis zur Erschließung von Auslandsmärkten dienen kann. Ansatzpunkte für Politikmaßnahmen sind die Initiierung und Durchführung innovationsbegleitender Maßnahmen für den weiteren Ausbau dieser Techniken sowie zur Erschließung internationaler Märkte. Eine Unterstützung der Hersteller zur Entwicklung reifer Anwendungen und Verfahren kann durch das Umweltinnovationsprogramm des Bundesumweltministeriums\* erfolgen, damit die innovativen Ansätze aus der Forschung schnell in international vermarktbarere Produkte münden. Hohe Umweltstandards in Deutschland und in der Europäischen Union – die dann möglicherweise auch weitere Länder übernehmen werden – verbessern dabei die Exportchancen.

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3455.pdf>

#### **Beurteilung der Gesamtumweltextposition von Silberionen aus Biozid-Produkten (2008):**

Silber wird wegen seiner bakteriziden Eigenschaften bereits in zahlreichen Produkten des täglichen Lebens sowie der Medizin eingesetzt und gewinnt noch zunehmend an Bedeutung. Es findet sich in Bioziden, beispielsweise in gelöster und kolloidaler Form, auch als freies oder gebundenes Nanopartikel. Durch das hohe Interesse am Einsatz von Silber ist dessen potentieller Eintrag in die Umwelt von Bedeutung. Das im Auftrag des Umweltbundesamtes gefertigte Gutachten der Fraunhofer-Institute für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie sowie für System- und Innovationsforschung befasste sich daher mit der Risikoschätzung eines Silbereintrages in die Umwelt. Dazu wurden Informationen zu silberhaltigen Produkten und deren Einsatzmengen, dem Verbleib und dem Verhalten von Silber in der Umwelt sowie ökotoxikologische Daten zu Silberverbindungen und Silber-Nanopartikel zusammengetragen. Auf Basis dieser Daten führte die Fachleute eine Risikoschätzung durch und zeigten Informationslücken auf. Diese bestehen beispielsweise hinsichtlich der Einsatzmenge des Silbers in gelöster, kolloidaler und nanopartikulärer Form in Produkten sowie hinsichtlich der Höhe ihres Eintrages aus den Produkten in die Umwelt. Das Wissen zur Konzentration der für die toxische Wirkung entscheidenden freien Silberionen in der Umwelt ist gering. Spezifische Wissensdefizite zu Silber-Nanopartikeln betreffen die Ökotoxizität im Vergleich zu den nicht-nanoskaligen Silberverbindungen.

Weiterhin ist zum Einfluss veränderter Umweltbedingungen auf den Verbleib und die Wirkung von Silber-Nanopartikeln (zum Beispiel beim Abbau organischer Substanz im Boden) bisher wenig bekannt.

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3673.pdf>

#### **Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte (2009):**

In der Studie ermittelten die Autoren der Universität Bremen die positiven Wirkungen auf die Umwelt durch Anwendung der Nanotechnik im Vergleich zu herkömmlichen Produktlösungen. Beispielsweise kann die Zugabe von feinverteilten organischen Nanopartikeln in einen Kunststoff (Polybutylenterephthalat) dessen Fließeigenschaft signifikant verbessern. Das hat Vorteile für die Spritzgussverarbeitung und führt wegen geringerer Einspritzdrücken und niedrigerer Verarbeitungstemperatur in einer Energieeinsparung um bis zu 20 Prozent. Elektro-, Automobil- und Haushaltgeräteindustrie sowie der Maschinenbau setzen den Kunststoff für eine Vielzahl von Verwendungen ein.

Außergewöhnliche Umweltentlastungspotentiale entstehen durch ein neuartiges Verfahren zur Herstellung lötfähiger Endoberflächen für Leiterplatten. Die neue, organische Endoberfläche besteht aus einem Komplex nanoskaligen „Organischen Metalls“ (Polyanilin) und Silber, ist nur 55 nm dick, bietet aber einen besseren Schutz vor Oxidation als die „herkömmlichen“ Schichten, die 6- bis 100-mal dicker sind. Die Hersteller haben Materialeffizienzgewinne von mehreren 100 Prozent. Der Energieverbrauch und die Kohlendioxid-Emission verringern sich um etwa 10 Prozent. Die Anwendung von Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes) für antistatische Folien, wie sie die Halbleiterindustrie zur Verpackung elektronischer Bauteile verwendet, kann das Treibhauspotential und das Versauerungspotential um über 10 Prozent im Vergleich zu herkömmlichen leitfähigen Folien auf Basis von Polycarbonaten mit dem Additiv Carbon Black verringern. Das Projekt ist abgeschlossen.

#### **Untersuchungen des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz (2009):**

Die Firma Golder Associates GmbH untersuchte zwei Fallbeispiele in der Studie „Untersuchungen des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz“: Zum einen erfolgte eine ökobilanzielle

Betrachtung zweier Ansätze zur UV-Bestrahlung von mit Tetrachlorethen (Perchlorethen, PCE) belastetem Wasser. Untersuchungsgegenstand war der Einsatz einer Kombination von nanoskaligem Titandioxid und Sauerstoff im Vergleich zur Anwendung von Eisen(II)-Verbindungen mit Wasserstoffperoxid (Photo-Fenton-Verfahren). Die Fallstudie zeigte, dass bei einem langjährigen photokatalytischen Einsatz nanoskaligen Titandioxids im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren mit einer deutlich höheren Umweltbelastung zu rechnen ist. Dieses ist insbesondere auf einen hohen Verbrauch an Ressourcen beim Abbau und Transport des Titandioxids in der Vorkette zurückzuführen.

Im zweiten Fallbeispiel untersuchte die Studie die Verbesserung der Luftqualität im Fahrzeuginnenraum mit Hilfe von Kabinenluftfiltern. Mittlerweile sind über 90 Prozent der Neufahrzeuge mit solchen Filtern ausgestattet, die nicht nur Stäube und Partikel wie Pollen, Dieselruß oder Reifenabrieb zurückhalten, sondern auch Geruchsstoffe und Gase eliminieren können. Das Fallbeispiel vergleicht einen herkömmlichen PKW-Kombinationsfilter auf der Basis von Polypropylenfasern und Aktivkohle mit solchen Kombinationsfiltern, die zusätzlich mit Nanofasern aus einem Polymer (zum Beispiel Polyamid) beschichtet sind. Die Nanofaserbeschichtung führt zu einem geringeren Luftwiderstand der Filter mit gleicher Abscheideleistung von Partikeln. In der Folge bedarf es weniger Energie, die belastete Luft durch den Filter zu drücken. Die Schätzungen des Kraftstoffsparpotentials und der möglichen Kohlendioxid-Reduzierung ergaben nur sehr geringe Vorteile für den nanofaserbeschichteten Filter. Eine Umweltentlastung würde erst durch den Einsatz einer hohen Stückzahl von Filterelementen spürbar. Materialeffizienzvorteile wurden nicht betrachtet.

Das Projekt ist beendet. Der Abschlussbericht wird im Laufe des Jahres 2009 zur Verfügung stehen.

### **Spezifische Identifizierung künstlicher Nanopartikel in der Luft (2009):**

Die Literaturstudie hatte zum Ziel, die technischen Möglichkeiten der Identifikation künstlicher Nanopartikel in Luftproben zu beschreiben. Grenzwerte zur Überwachung der Luftqualität dienen in erster Linie dem Schutz der menschlichen Gesundheit und der Ökosysteme vor nachteiligen Folgen, wobei standardisierte Messverfahren eine unabdingbare Voraussetzung bilden.

Der Auftragnehmer, das Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) – Fachbereich „Material Analysis and Indoor Chemistry“, stellt in einem zusammenfassenden Bericht die Quellgruppen von Nanopartikeln mit Relevanz für die Atmosphäre, deren physikalisch-chemische Eigenschaften und die Freisetzungswege, die im Zusammenhang mit der Nutzung nanoskaliger Produkte stehen, sowie deren Literaturzitate, bereit. Eine Übersicht über die zurzeit zur Verfügung stehenden analytischen Methoden zur Charakterisierung luftgetragener Nanoteilchen und die technischen Möglichkeiten zur spezifischen Identifizierung künstlicher Nanopartikel ergänzen den Bericht. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung des Forschungsbedarfs vor dem Hintergrund, zukünftig künstliche Nanopartikel sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erfassen.

Folgende Ergebnisse sind besonders hervorzuheben:

- ▶ Eine analytische Messtechnik für die spezifische Identifizierung künstlicher Nanopartikel in Luftproben, geeignet zum Einsatz in Messnetzen, ist nicht verfügbar. Zeitlich aufwendige und kostenintensive Einzelpartikelanalysen mit hochauflösenden mikroskopischen und spektroskopischen Verfahren stehen zwar zur Verfügung, deren Einsatz bleibt aber noch auf den Bereich der Forschung beschränkt.
- ▶ Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in vielen Bereichen der Nanopartikelmesstechnik. Dieser reicht von der Bereitstellung eines rückführbaren Standards für die Partikelzahlkonzentration bis hin zur Definition der Methoden, welche Parameter für die Charakterisierung von Größe, Form und Struktur angewendet werden können.
- ▶ Mit dem Bericht steht eine umfassende Literaturübersicht über den aktuellen Stand der Messtechnik im Hinblick auf die Charakterisierung von Nanopartikeln zur Verfügung. Lebenszyklusanalysen, die alle Prozesse von der Herstellung eines Produktes, über dessen Nutzung bis hin zur Entsorgung beschreiben, sind geeignet, den potentiellen Eintrag künstlicher Nanopartikel in die Atmosphäre zu bestimmen.

Das Projekt ist abgeschlossen. Der Forschungsbericht wird im Laufe des Jahres 2009 zur Verfügung stehen.

### **Untersuchung zur Toxikokinetik von Nanopartikeln in vivo (2009):**

Aktuelle Studien lassen auf ein erhöhtes Gefährdungspotential für die menschliche Gesundheit ausgehend von einer Exposition gegenüber technisch hergestellten Partikeln schließen. Nanopartikel können über verschiedene Pfade, insbesondere über Inhalation oder orale Aufnahme, in den Organismus gelangen. Es liegen bisher nur wenige Studien vor, welche die Aufnahme und Verteilung der Nanopartikel im Körper, den Zielorganen und damit die systemische Verfügbarkeit und tatsächliche Konzentration der Partikel im Organismus beschreiben. Erste Hinweise deuten auf einen Übergang von inhalierten Nanopartikeln über das Lungenepithel in den Körperkreislauf hin. Im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchen Fachleute des Helmholtzzentrums München (Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt) die Verteilung radioaktiv markierter Titandioxid-Nanopartikel nach einer Stunde, 24 Stunden, einer Woche und einem Monat nach einmaliger Exposition in Ratten mittels quantitativer, biokinetischer Analysen.

Das Projekt wird zurzeit bearbeitet und noch im Jahr 2009 abgeschlossen.

### **Studie zur Emission von Nanopartikeln aus Produkten in ihrem Lebenszyklus und ihre ökologische Bewertung (2009):**

Ziel dieses vom Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) durchzuführenden Vorhabens ist eine Einschätzung, inwieweit Umwelt und Menschen gegenüber künstlich hergestellten Nanomaterialien exponiert sind. Die Fachleute sollen die Expositionspfade mit relevanten Einträgen in die verschiedenen Umweltmedien beschrieben und – soweit vorhanden – mit konkreten Daten unterlegen. Hierbei sind beispielsweise die Daten zu Freisetzungen bei der Produktion über die Abluft, über das Abwasser und als Abfall, beim Transport und bei der Weiterverarbeitung zu einem Endprodukt zu untersuchen. Außerdem sollen Untersuchungen zur Exposition während des Gebrauchs nanomaterialhaltiger Endprodukte (zum Beispiel durch Abrieb, Verschleiß oder Waschen) und zum Verhalten der Nanomaterialien nach ihrem Gebrauch bei der Entsorgung, Deponierung, Verbrennung oder Wiederverwertung einfließen. Soweit möglich, sollen auch relevante Einflussgrößen, die zu einer Exposition von Nanomaterialien während des gesamten Lebenszyklusses

führen, Berücksichtigung finden. Auf der Basis der ermittelten Informationen sollen die Fachleute die für eine Umweltexposition vordringlich zu untersuchenden Nanomaterialien identifizieren und die Expositionsschwerpunkte von Produkten aus/mit Nanomaterialien in ihrem Lebenszyklus benennen. So lassen sich Minimierungsmöglichkeiten im Produktionsverfahren identifizieren. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, Expositionspfade von Nanomaterialien zu erkennen und in der Folge Verhalten und Verbleib in der Umwelt zu untersuchen sowie gegebenenfalls erforderliche Risikominderungsmaßnahmen zu entwickeln.

Das Projekt wird zurzeit bearbeitet und noch im Jahr 2009 abgeschlossen.

### **Messung von Abriebpartikeln aus Textilien**

Über Kontakte zum Bekleidungsphysiologischen Institut Hohenstein bekam das Umweltbundesamt fünf Textilmuster, die mit unterschiedlichen Konzentrationen von Titandioxid-Nanopartikeln ausgerüstet waren. Das Umweltbundesamt führte mit den Mustern pilotartige Untersuchungen zum Abriebverhalten durch. Diese zeigten, dass Partikel mit Durchmesser kleiner als 350 nm – also auch die klassischen „Nanopartikel“ bis etwa 100 nm – sich nicht ablösen, größere Partikel von 350 nm bis 2 µm (Mikrometer) hingegen schon. Es handelt sich um vorläufige Ergebnisse, die es in weiteren Studien abzusichern gilt. Durch gezielte Abrasionsversuche will das Umweltbundesamt den Einfluss unterschiedlich stark beanspruchter und gealterter Textilien auf die Nanoteilchenfreisetzung prüfen. Dazu stellte das Institut Hohenstein weitere Textilmuster zur Verfügung, die mit unterschiedlichen Konzentrationen von Nanosilberpartikeln imprägniert sind. Für die Untersuchungen nutzte das Umweltbundesamt zwei in der Industrie übliche Gerätemodelle zur Erzeugung eines Abriebs unter kontrollierten Bedingungen in einer Prüfkammer. Die ersten Untersuchungen begannen im Frühjahr 2009.

Weitere Messungen zur Freisetzung von Nanoteilchen aus Lacken und Farben sowie bei Heimwerkarbeiten sind für das Jahr 2010 geplant.

### **Verbandförderung**

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit finanziert über die Verbandförderung, in der Umweltschutz- und Naturschutzverbände, Initiativen und Organisa-

tionen Zuschüsse für Projekte von umweltpolitischen Belangen erhalten, zurzeit folgende Projekte zum Thema Nanotechnik: Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) unterstützt die Öffentlichkeitsdebatte in dem Projekt „Nanotechnologie und Umweltschutz: Chancen nutzen, Risiken minimieren“. Das Öko-Institut beteiligt sich mit dem Projekt „Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten“.

## 5.2. Nationale und internationale Gremienbeteiligung und Zusammenarbeit

### Forschungsstrategie der Bundesoberbehörden

Wie bereits in Abschnitt 4.3 dargestellt, standen die Bewertungsbehörden vor dem Problem, die Wissenslücken zur Bewertung der Risiken der Nanotechnik möglichst schnell und effektiv zu schließen. Über die Europäische Union und das Forschungsministerium angestoßene Forschungsprojekte in großen Forschungsverbänden orientieren sich häufig an den Möglichkeiten und Zielen der beteiligten Institute (zum Beispiel überwiegende Arbeiten mit Zellkulturen). Sie sind daher meist nicht geeignet, die spezifischen Anforderungen einer Bewertungsbehörde zu erfüllen. Daher erarbeiteten die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, federführend), das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und das Umweltbundesamt eine gemeinsame Forschungsstrategie „Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln“, um gezielt den Forschungsbedarf für die regulatorische Bewertung des Risikos zu identifizieren.

Auf einer vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) und Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gemeinsam durchgeführten Dialogveranstaltung am 30. November 2006 stellten die Bundesoberbehörden ihren Entwurf einer Forschungsstrategie vor. Die von den 120 Teilnehmenden aus der Wissenschaft, der Wirtschaft, den Verbänden und Nichtregierungsorganisationen gegebenen Empfehlungen und die Kommentare nationaler und internationaler Expertinnen und Experten sind in der Endfassung der Strategie berücksichtigt.

Das Umweltbundesamt brachte die Forschungsstrategie in die Arbeit der OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials und in die AG 2 des NanoDialogs (siehe Abschnitt „NanoDialog“) ein. Für eine mehr als punktuelle Umsetzung der Strategie ist eine angemessene Finanzierung noch nicht geklärt.

<http://www.umweltbundesamt.de/technik-verfahren-sicherheit/dokumente/forschungsstrategie.pdf>

### NanoDialog

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit setzte im Herbst 2006 die Nanokommission der Bundesregierung ein, um in einem Stakeholderdialog zusammen mit den Beteiligten aus Politik, Umwelt- und Naturschutz die Chancen und Risiken von Nanomaterialien zu diskutieren und Empfehlungen für einen verantwortungsvollen Umgang konsensual zu erarbeiten. Die fachlichen Zuarbeiten erbrachten drei Arbeitsgruppen: Arbeitsgruppe 1 „Chancen für Umwelt und Gesundheit“, AG 2 „Risiken und Sicherheitsforschung“, AG 3 „Leitfaden für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien“. Das Umweltbundesamt wirkte in den Arbeitsgruppen 1 und 2 mit. Auch bei der Fortsetzung des NanoDialogs („NanoDialog 2009-2010“) beteiligt sich das Amt.

### OECD Sponsorship Programm

International beteiligt sich das Umweltbundesamt gemeinsam mit der BAuA und dem BfR unter Federführung des BMU an der „Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN)“ des „Chemicals Committee and Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology“ der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) mit den möglichen Gefährdungen, die von Nanomaterialien ausgehen könnten. Dazu initiierte die OECD unter anderem ein Testprogramm. Bei diesem verpflichteten sich die Mitgliedsstaaten, 14 repräsentative Nanomaterialien, für die von einer Exposition von Mensch und Umwelt auszugehen ist, an über 50 Endpunkten zu adressieren („OECD Sponsorship Programme“). Bis Ende des Jahres 2010 entstehen Stoffdossiers, die neben einer genauen Beschreibung des jeweiligen Nanomaterials, auch Informationen zu physikalisch-chemischen Eigenschaften, zum Umweltverhalten und zu den toxikologischen sowie ökotoxikologischen Risiken enthalten. Die Koordinati-

on der deutschen Beteiligung an diesem Testprogramm liegt beim Umweltbundesamt. Dabei hat Deutschland die Hauptverantwortung für die Prüfung von Titandioxid-Nanopartikeln, die Teilverantwortung für Nanopartikel aus Silber sowie eine Beteiligung an der Testung vier weiterer Arten von Nanopartikeln (Carbon Black, Zinkoxid, Cerdioxid und Carbon Nanotubes). Das Umweltbundesamt beteiligt sich weiterhin an der Erstellung von Leitfäden zur Probenvorbereitung und Messtechnik (Dosimetrie), an der Identifizierung internationaler Forschungsschwerpunkte zu Nanorisiken, an der Erstellung einer internationalen Datenbank sowie künftig an Arbeitsgruppen zur Ermittlung und Minderung der Umweltexposition sowie zum Nutzen von Nanomaterialien für Umwelt und Gesundheit.

### **Scientific Knowledge for Environmental Protection**

Das europäische Netzwerk SKEP (Scientific Knowledge for Environmental Protection) fördert grenzüberschreitende Forschungsprojekte zu Chancen und Risiken so genannter „Konvergierender Techniken“ („converging technologies“), wozu auch die Nanotechnik und ihre Zusammenarbeit mit der Bio- und Informationstechnologie zählt. Das Umweltbundesamt ist Mitglied in diesem Netzwerk und stellte für eine gemeinsame europäische Ausschreibung eines Forschungsprojektes mit dem Titel „Impacts of Emerging Technologies for Environmental Regulation“ Gelder zur Verfügung. Neben Deutschland sind noch zehn weitere EU-Mitgliedstaaten an der Ausschreibung beteiligt. Innerhalb des Netzwerks ist eine „Technical Working Group“ für die Entwicklung der konkreten Ziele und Forschungsfragen zuständig. Die Ausschreibung konzentriert sich auf die Herausforderungen und Möglichkeiten zur Regulierung derartiger technischer Entwicklungen.

### **DECHEMA/VCI-Arbeitskreis**

In Deutschland beteiligt sich das Umweltbundesamt am DECHEMA/VCI-Arbeitskreis „Responsible Production and Use of Nanomaterials“. Auch dieser Arbeitskreis beabsichtigt, Chancen und Risiken der Nanotechnik zu identifizieren. Er will die Industrie dabei unterstützen, Nanotechniken wirtschaftlich und technisch erfolgreich anzuwenden, wobei ethische, ökologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen sind. Das Umweltbundesamt

gelangt so an Informationen zu neuen Verfahrensentwicklungen aus erster Hand.

### **Nationale und internationale Normung**

An einigen Normungsarbeiten zur Nanotechnik ist das Bundesumweltministerium und das Umweltbundesamt im Rahmen der ISO (International Standardization Organization) und des Deutschen Instituts für Normung (DIN) beteiligt. Die ISO hat eine technische Kommission (TC 229) „Nanotechnologien“ mit den drei Arbeitsgruppen „Terminologie und Nomenklatur“, „Messung und Charakterisierung“, „Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte von Nanotechnologien“ und „Werkstoffspezifikationen“ eingerichtet. Auf deutscher Ebene betreibt das DIN den Arbeitsausschuss NA 062-08-17 AA „Nanotechnologien“.

## **6. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen**

Grundlegend für angestrebte Regulierungen für Nanomaterialien sind ihre eindeutigen Definitionen, da klar sein muss, was welchen gesetzlichen Pflichten unterliegt. Dazu ist es unter anderem erforderlich, die Definitionen weiterzuentwickeln. Sie sollten auch Nanomaterialien wie Agglomerate und Aggregate, mit einbeziehen, denn neben der Größe der Nanomaterialien sind auch deren spezifische Oberflächen- und Grenzeigenschaften bei der Risikobeurteilung der Materialien wichtig.

Das Umweltbundesamt erwartet von der Nanotechnik zahlreiche innovative Entwicklungen in verschiedenen technischen Bereichen und unterschiedlichen Anwendungsfeldern sowie Wirtschaftszweigen. Nanotechnik und nanotechnische Produkte ermöglichen in vielen Fällen, Rohstoffe und Energie im Lebensweg eines Produktes effizienter zu nutzen und den Ausstoß von Schadstoffen sowie den Energieverbrauch zu verringern.

Neben ökonomischen Vorteilen weist eine große Palette der Anwendungen in der Nanotechnik Umweltentlastungspotentiale auf. Bei breiter Ausschöpfung dieser Potentiale durch gezielte Förderung dieser Anwendungen ist eine Reduzierung der Umweltinanspruchnahme zu erreichen und in einigen Fällen auch die gesundheitliche Belastung zu vermindern.

Das Umweltbundesamt unterstützt die Förderung der Nanotechnik in umweltentlastenden Anwendungen. Voraussetzung ist allerdings, dass die möglichen von ihr ausgehenden Risiken zunächst identifiziert und minimiert werden können. Um hierbei erfolgreich zu sein, sind weitergehende Informationen erforderlich:

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. Hierzu ist ein sowohl von Industrials als auch von Behördenseite anerkanntes Bewertungsverfahren unter maßgeblicher Beteiligung des Umweltbundesamtes zu erarbeiten. Für die sachgerechte Bewertung ist es unabdingbar, dass die Hersteller aussagekräftige Daten zur Verfügung stellen. Auf diese Weise lässt sich das Vertrauen bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern in die Produkte fördern.

2. Wie die Chancen, so verdienen auch die Risiken dieser Technik Aufmerksamkeit. Angesichts der sehr dynamischen Entwicklung und der Hinweise auf Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch Nanotechnik ist es dringend geboten, solche zu erkennen und zu bewerten. Dafür ist es notwendig, dass die Hersteller ihre Ergebnisse zur Risikobewertung offenlegen. Die Risikoforschung in Deutschland und Europa ist weiter zu verstärken, abgestimmte Prüf- und Bewertungsstrategien, insbesondere innerhalb der OECD, sind zu entwickeln und nanospezifische Anforderungen in die Stoffgesetze und ihre Ausführungsleitfäden aufzunehmen.

3. Im Sinne der Erhöhung der Transparenz zu Nanomaterialien in Produkten empfiehlt das Umweltbundesamt die Einführung einer Meldepflicht. Das Chemikaliengesetz ermöglicht die Einführung solcher Meldeverpflichtungen für Zubereitungen. Für die Wahlfreiheit der Verbraucherinnen und Verbraucher ist ein geeignetes Kennzeichnungssystem anzustreben, das informiert, ohne eine Gefahr zu suggerieren. Trotz der zunehmenden Zahl wissenschaftlicher Untersuchungen bestehen noch erhebliche Informationslücken und damit hoher, gezielter Forschungsbedarf zur Risikobewertung, der gemeinsam von den betroffenen Branchen finanziert werden sollte.

Das Umweltbundesamt empfiehlt weiterhin, die Verwendung von Produkten, die Nanomaterialien enthalten und frei setzen können, im Sinne eines vorsorgenden Umweltschutzes so lange zu vermeiden, als ihre Wirkungen in der Umwelt

und auf die menschliche Gesundheit noch weitgehend unbekannt sind. So lange nicht die erforderlichen Daten für eine abschließende Bewertung von Produkten vorliegen, steht das Umweltbundesamt der Vergabe des „Blauen Engels“ an Nanomaterialien enthaltende Produkte ablehnend gegenüber.

## 7. Weiterführende Literatur

- Angrick, M. (2008): Ressourcenschutz für unseren Planeten. Metropolis-Verlag Marburg.
- Bachmann, G. et al. (2007): Nanotechnologien für den Umweltschutz. Zukünftige Technologien Nr. 71.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Bundesinstitut für Risikobewertung, Umweltbundesamt (2007). Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien – Forschungsstrategie -. (<http://www.umweltbundesamt.de/technikverfahren-sicherheit/dokumente/forschungsstrategie.pdf> )
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2008): Risikowahrnehmung beim Thema Nanotechnologie – Analyse der Medienberichterstattung. BfR-Wissenschaft 07/2008 vom 10.11.2008. ([http://www.bfr.bund.de/cm/238/risikowahrnehmung\\_beim\\_thema\\_nanotechnologie.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/238/risikowahrnehmung_beim_thema_nanotechnologie.pdf))
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2008): Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung. BfR-Wissenschaft 05/2008 vom 18.06.2008. ([http://www.bfr.bund.de/cm/238/wahrnehmung\\_der\\_nanotechnologie\\_in\\_der\\_bevoelkerung.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/238/wahrnehmung_der_nanotechnologie_in_der_bevoelkerung.pdf))
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.)(2006): Nano-Initiative – Aktionsplan 2010.
- Führ, M. et al. (2007): Rechtsgutachten Nanotechnologien – ReNaTe. Umweltbundesamt Texte 10/2007. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3198.pdf>)
- Gaiser, B. K. et al. (2009): Assessing exposure, uptake and toxicity of silver and cerium dioxide nanoparticles from contaminated environments. Environ Health.
- Helland, A. et al. (2007): Reviewing the Environmental and Human Health Knowledge Base of Carbon Nanotubes. EHP 115(8): 1125-1131.
- Hund-Rinke, K. et al. (2007): Technisches Vorgehen bei der Testung von Nanopartikeln. Abschlussbericht des Ufoplan-Projektes FKZ 206 61 203/03.

- Hund-Rinke, K. et al. (2008): Beurteilung der Gesamtumweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten. Umweltbundesamt Texte 43/2008. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3673.pdf>)
- Kaegi, R. et al. (2008): Synthetic TiO<sub>2</sub> nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment. *Environm Poll* 156, 233-239.
- Kreyling, W.G. et al. (2002): Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *J Toxicol Environ Health A*.
- Luther, W. et al. (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, Innovations- und Technikanalyse. Zukünftige Technologien Nr. 53, Düsseldorf.
- Luther, W. et al. (2007): Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie. In: Umwelt, Innovation, Beschäftigung (Hrsg.: BMU und UBA) 12/07. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3454.pdf>)
- 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): Municipal Wastewater Treatment with Membrane Technology.
- Nanoderm Abschlussbericht (2007): [http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/Downloads/Nanoderm\\_Final\\_Report.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/Downloads/Nanoderm_Final_Report.pdf).
- Nanokommission der deutschen Bundesregierung (2008): Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien – Bericht und Empfehlungen der Nanokommission der deutschen Bundesregierung. ([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanokomm\\_abschlussbericht\\_2008.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanokomm_abschlussbericht_2008.pdf))
- Oakdene Hollins (2007): Environmentally Beneficial Nanotechnologies – Barriers and Opportunities. A report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs (UK).
- Oberdörster, G. et al (2005): Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives* 113(7), 823-839.
- OECD – Safety on Nanomaterials (<http://www.oecd.org/env/nanosafety>).
- Paschen, H. et al. (2003): TA-Projekt Nanotechnologie. Arbeitsbericht Nr. 92. Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- Peters, A. et al. (2006): Translocation and potential neurological effects of fine and ultrafine particles a critical update. *Part Fibre Toxicol* 3: 13.
- Poland, C. A. et al. (2008): Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nat Nanotechnol.* 3(7): 423-428.
- Renn, O. und Roco, M (2006): Nanotechnology Risk Governance. International Risk Governance Council White Paper No. 2.
- Roller, M. (2008): Untersuchungen zur krebserzeugenden Wirkung von Nanopartikeln und anderen Stäuben. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Ref Type: Report.
- Royal Commission on Environmental Pollution (2008): Novel Materials in the Environment: The case of nanotechnology.
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks – SCENIHR (2009): Risk assessment of Products of nanotechnologies. ([http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/cokmittees/04\\_scenihhr/docs/scenihhr\\_o\\_023.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/cokmittees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_023.pdf))
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks – SCENIHR (2005): 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.
- Semmler-Behnke, M. et al. (2008): Biodistribution of 1.4- and 18-nm gold particles in rats. *Small* 4(12):2108-11.
- Steinfeldt, M. et al (2004): Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. *Schriftreihe des IÖW* 177/04.
- Steinfeldt, M. et al.(2009): Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Umweltbundesamt Texte 40/2009.
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004): Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties July 2004. (<http://www.nanotec.org/finalReport.htm>)
- U.S. Environmental Protection Agency (2005): External Review Draft: Nanotechnology White Paper.
- VDI-Technologiezentrum: <http://www.nano-map.de/> (Abruf am 06.03.2009).
- Woodrow Wilson International Center for Scholars (2009): The Project on Emerging Nanotechnologies: ([http://www.nanotech-project.org/inventories/consumer/analysis\\_draft/](http://www.nanotech-project.org/inventories/consumer/analysis_draft/)) (Abruf am 03.09.2009).

# Anhang

## Aktivitäten des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt will zu umweltrelevanten Aspekten der Nanotechnik informieren, Wissensdefizite ausfüllen und weiteren Handlungsbedarf ermitteln. Es will einerseits die positiven Wirkungen der Nanotechnik unterstützen und fortentwickeln, Umweltentlastungspotentiale ermitteln und andererseits Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit identifizieren sowie Vorkehrungen für deren Minderung treffen.

## Künftige Arbeitsschwerpunkte des Umweltbundesamtes zum Thema Nanotechnik

Arbeitsschwerpunkt des Umweltbundesamtes ist auch zukünftig die Bewertung von Nanomaterialien ausgehender (öko-)toxikologischer Risiken. Hierzu engagiert sich das Amt bis Ende des Jahres 2010 in der Phase 1 des OECD Sponsorship Programms für die Erstellung vollständiger Datensätze zu mehreren Nanomaterialien (federführend für Titandioxid und wesentlich für Nano-Silber). Ab 2011 wird sich das Umweltbundesamt an der Phase 2 des OECD Sponsorship beteiligen, in der unter anderem anhand der Erfahrungen aus der ersten Phase vertiefte Prüfungen zusätzlicher Endpunkte und Validierungen der Testmethoden vorgenommen werden sollen. Im Zusammenhang mit dem OECD Sponsorship Programm bereitet das Umweltbundesamt die Durchführung von Forschungsprojekten vor, die sich mit dem Umweltverhalten und öko-toxikologischen Kurz- und Langzeitwirkungen der Nanomaterialien Titandioxid und Silber befassen. Des Weiteren beteiligt sich das Amt an einem Forschungsverbund des Bundesforschungsministeriums, der Erkenntnisse zum Verhalten, zum Verbleib und zur Wirkung nanoskaligen Silbers in Produkten erarbeiten soll. Im Rahmen von SKEP begleitet das Umweltbundesamt ein Forschungsprojekt zu künftigen Entwicklungen und Umweltwirkungen der Nanotechnologie in Konvergenz mit anderen Zukunftstechnologien. Ein besonderer Schwerpunkt ist weiterhin die Anpassung gesetzlicher Regelungen an die Erfordernisse der Nanotechnik. Die Aktivitäten zu REACH und der Biozidrichtlinie führt das Amt fort.

Die Bewertung nanotechnischer Verfahren und Produkte ist fortzuentwickeln. Hierzu benötigt

das Umweltbundesamt dringend ein Bewertungsinstrument für nanotechnische Verfahren und Produkte im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile für die Umwelt gegenüber herkömmlichen Alternativen. Zusätzlich benötigt es Bewertungsinstrumente für nanotechnische Entwicklungen, die neue Funktionalitäten erschließen, für die es keine herkömmlich Alternative gibt. Im Rahmen dieses Schwerpunkts bringt sich das Umweltbundesamt in Arbeitskreise der OECD (Working Party on Manufactured Nanomaterials „Potential Environmental Benefits of Nanotechnology“) und des NanoDialogs der Bundesregierung ein.

## Forschungsprojekte, Gutachten, Gremienbeteiligungen, Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge

Übersichten zu den Forschungsprojekten und Gutachten zum Thema (Tabelle 1), die Beteiligung an Gremienarbeit sowie weitere Kooperationen des Umweltbundesamtes (Tabelle 2) finden sich im Folgenden (detaillierte Beschreibungen der einzelnen Aktivitäten siehe Kapitel 5):

Tabelle 1: Forschungsprojekte und Gutachten zum Thema Nanotechnik im Auftrag des Umweltbundesamtes

Forschungsprojekte/ Gutachten	Laufzeit	Kurzbeschreibung
Rechtsgutachten Nanotechnologien	2007	Für das Rechtsgutachten Nanotechnologie beschäftigte sich das Ökoinstitut e.V. und sofia - Sonderforschungsgruppe Institutionenanalyse - mit dem Regulierungsbedarf und den Regulierungsmöglichkeiten der Nanotechnologie im bestehenden Rechtsrahmen auf nationaler und europäischer Ebene. <a href="http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3198.pdf">http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3198.pdf</a>
Technisches Vorgehen bei der Testung von Nanopartikeln	2007	Anhand der Auswertung relevanter Literatur zum Umweltverhalten und zur Ökotoxikologie von Nanopartikeln wurden Empfehlungen gegeben, wie bei der Testung von Nanopartikeln technisch vorzugehen ist und welche Informationen Teil der Berichtspflicht sein sollten. <a href="http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3484.pdf">http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3484.pdf</a>
Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie	2006-2007	Die Studie untersucht die technologische Entwicklungsdynamik, das wirtschaftliche Potenzial und die Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder für nanotechnische Produkte in der Wasserwirtschaft. <a href="http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3455.pdf">http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3455.pdf</a>
Beurteilung der Gesamtumweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten	2008	Das Risiko eines Silbereintrages in die Umwelt war zu schätzen. Dazu wurden Informationen zu silberhaltigen Produkten und deren Einsatzmengen, dem Verbleib und dem Verhalten in der Umwelt sowie ökotoxikologische Daten zu Silberverbindungen und Silber-Nanopartikel zusammengetragen. Auf Basis dieser Daten wurde eine Risikoabschätzung durchgeführt und Wissenslücken aufgezeigt. <a href="http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3673.pdf">http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3673.pdf</a>
Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte	2006-2008	Die Studie ermittelt an Fallbeispielen die positiven Wirkungen auf die Umwelt durch Anwendung der Nanotechnik im Vergleich zu herkömmlichen Produktlösungen.
Untersuchungen des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz	2007-2008	Die Studie untersucht Chancen und Risiken von nanotechnischen Produkten und Verfahren im Umweltschutz.
Spezifische Identifizierung künstlicher Nanopartikel in der Luft	2007-2008	Das Projekt hat zum Ziel, die technischen Möglichkeiten zur spezifischen Identifikation der künstlichen Nanopartikel in Luftproben zu beschreiben. Quellgruppen von Nanopartikeln mit Relevanz für die Atmosphäre, deren physikalisch-chemische Eigenschaften und die Freisetzungswege der Nanopartikel aus Produkten werden identifiziert. Eine Übersicht der zurzeit zur Verfügung stehenden analytischen Methoden zur Charakterisierung luftgetragener Nanoteilchen und die technischen Möglichkeiten zur spezifischen Identifizierung künstlicher Nanopartikel ergänzen den Bericht.
Untersuchung zur Toxikokinetik von Nanopartikeln <i>in vivo</i>	2007-2009	Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Verteilung markierter Titandioxid-Nanopartikel nach einmaliger inhalativer Exposition in Ratten mittels quantitativer, biokinetischer Analysen untersucht.
Studie zur Emission von Nanopartikeln aus Produkten in ihrem Lebenszyklus und ihre ökologische Bewertung	2008-2009	Ziel der Studie ist die Schätzung der Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber synthetisch hergestellten Nanomaterialien im Lebenszyklus ausgewählter Fallbeispiele und die möglichen Wirkung auf die Umwelt.
Eigenforschung: Messung von Abriebpartikeln aus Textilien		Durch gezielte Abrasionsversuche soll der Einfluss unterschiedlich stark beanspruchter und gealterter Textilien, welche mit Titandioxid-Nanopartikeln ausgerüstet sind, auf die Freisetzung solcher Partikel untersucht werden.
Verbändeförderung zum Thema Nanotechnik		Zurzeit Förderung des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) und des Öko-Instituts

Tabelle 2: Nationale und internationale Gremienbeteiligung und Zusammenarbeit

Internat. und nat. Gremienbeteiligung und Zusammenarbeiten	Kurzbeschreibung
Forschungsstrategie der Bundesoberbehörden (mit BAuA (federführend) und BfR)	In der gemeinsamen Forschungsstrategie „Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln“ wurden die vorrangig für eine Risikobewertung zum Schutz des Menschen und der Umwelt zu bearbeitenden Forschungsthemen identifiziert.
NanoDialog der Bundesregierung (2006-2008; weiterführend 2009-2010, mit Vertretern aus Nicht-Regierungsorganisationen, Industrie, nationalen Forschungseinrichtungen und Behörden)	Mitarbeit an der AG1: „Chancen für Umwelt und Gesundheit – Effizienter Umgang mit Ressourcen und Gesundheitsschutz“ und AG 2: „Risiken und Sicherheit für Umwelt und Gesundheit“.
OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) 2006-2012	<p>Mitarbeit an der Entwicklung und Betreuung der “OECD Database on Research into the Safety of Manufactured Nanomaterialien”; Einbringen der Forschungsstrategie der Bundesoberbehörden und nationaler Forschungsprojekte.</p> <p>Mitarbeit am OECD Sponsorship Programm (2006-2012) zur Testung von 14 Nanomaterialien. Hauptverantwortung für Titan-dioxid, Teilverantwortung für Nano-Silber und Beteiligung bei 4 weiteren Nanomaterialien.</p> <p>Das Umweltbundesamt stellt seit März 2009 einen der Vizepräsidenten der WPMN.</p> <p>Mitarbeit im “Steering Committee” für die “OECD Conference on Potential Environmental Benefits of Nanotechnology”.</p>
Europäisches Netzwerk Scientific Knowledge for Environmental Protection (ERA SKEP)	Beteiligung an der gemeinsamen Forschungsausschreibung im ERA-net SKEP. Hier ist die “Technical Working Group” zum Projekt „Opportunities and Impacts of Emerging Technologies for Environmental Regulation“ für die Entwicklung der konkreten Ziele und Forschungsfragen zuständig
DECHEMA/VCI-Arbeitskreis “Responsible Production and Use of Nanomaterials“	Beteiligung am Arbeitskreis mit dem Ziel der Förderung der wirtschaftlich und technisch erfolgreichen Umsetzung der Nanotechnik unter Berücksichtigung ethischer, ökologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte
Nationale und internationale Normung	Informelle Beteiligung am DIN NA 062-08-17 AA „Nanotechnologien“ mit vier Arbeitskreisen (AK 1 „Terminologie und Nomenklatur“, AK 2 „Messung und Charakterisierung“, AK 3 „Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte von Nanotechnologien“, AK 4 „Werkstoffspezifikationen“) sowie ISO/TC 229 Task Group on Nanotechnologies and Sustainability
Nanomaterialien unter REACH	<p>Das Umweltbundesamt arbeitet im Bereich der Umsetzung und Weiterentwicklung von REACH eng mit den anderen Bewertungsstellen (BAuA, BfR), der Bundesstelle Chemikalien und der Europäischen Chemikalienagentur ECHA zusammen.</p> <p>Eine EU-Arbeitsgruppe (Subgroup on Nanomaterials from the Meetings of the REACH and CLP Competent Authorities) arbeitet an Konzepten zum Umgang mit Nanomaterialien unter der REACH-VO. Federführend für Deutschland ist hier die BAuA, über die sich das Umweltbundesamt an der Diskussion dieser Arbeitsgruppe beteiligt.</p>
Biozid-Richtlinie	Das Umweltbundesamt beteiligt sich an der Diskussion zur Revision der Biozidrichtlinie und setzt sich dafür ein, dass biozide Wirkstoffe, die aus nanoskaligen Partikeln bestehen, wegen ihrer besonderen Eigenschaften als selbständige Wirkstoffe mit eigener Identität zu behandeln sind.

## Veröffentlichungen

Umweltbundesamt (2006): „Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt“ Hintergrundpapier August 2006.

Becker, H. (2007): Gesundheitliche Risiken technisch hergestellter Nanopartikel. UMID 2/2007 S. 24-27.

Dubbert, W. und Rappolder, M. (2007): Nationale und internationale Aktivitäten zu den Chancen und Risiken der Nanotechnik im Umweltbereich. UMID 2/2007 S. 20-23.

BAuA-UBA-BfR (2007): „Nanotechnologie: Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien – Forschungsstrategie.“

Bendisch, B. und Leuschner, C (2008): „Untersuchungsbedarf für Zwerge“ – Testverfahren für Nanomaterialien bedürfen weiterer Entwicklung. Umwelt 9/2008 S. 485-486.

## Konferenzbeiträge/Vorträge/Poster

Dubbert, W., Märkel K., Rappolder M.: „Nanotechnologie, kleine Probleme – große Wirkung?, UBA-Kolloquium, 22.05.2006.

Rappolder, M.: „Nanotechnologie – eine Herausforderung für die regulatorische Ökotoxikologie“, SETAC GLB, Landau, 05.09.2006.

Rappolder, M.: „Nanotechnologie: Kleine Teilchen – Große Wirkung“, Tagung der KNU (Koordinierung Normungsarbeit der Umweltverbände) 28.09.2006.

Rappolder, M., Dubbert, W.: „The German Research Strategy“, Treffen des Council for Science and Innovation (CST) UK im BMU, Berlin, 10.11.06.

Rappolder, M.: Nanotechnologien in vielen Lebensbereichen – Lassen sich die positiven und negativen Folgen für die Umwelt abschätzen? Tagung Ev. Akademie, BUND, Iserlohn, 05.05.2007.

Rappolder, M.: „Nanotechnology – The German Research Strategy for Environment and Health“. SETAC Europe Porto, 20.-24.05.2007.

Becker, H.: „Wirkungsbezogene Beurteilung von Nanopartikeln“, SETAC GLB, Helmholtzzentrum für Umweltforschung - UFZ Leipzig, 12.-14.09.2007.

Rappolder M.: „Nanotechnologie – Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt“, Umweltkolloquium Landesumweltamt, Güstrow, 15.11.2007.

Leuschner, C. und Rappolder, M.: „Einsatz von Nanomaterialien – Untersuchungsbedarf zum Schutz der Umwelt“, Workshop Photokatalyse Fraunhofer IME, Schmallenberg, 13.03.2008.

Hund-Rinke, K., Herrchen, M., Leuschner, C., Rappolder, M.: „Testing fate and effect of nanomaterials needs harmonized metho-

dology to achieve – maximum synergism of results in this new area“, SETAC Europe 2008, Warschau, 25.-29.05.2008.

Leuschner, C. und Aust, N.: „Untersuchungsbedarf zum Schutz der Umwelt – Nano-Silber in Alltagsprodukten“, Evangelische Akademie, Villingst, 30.05.2008.

Rappolder M., Leuschner C., Dubbert, W.: „Nano-Silber in der Anwendung –Einschätzung im Umweltbundesamtes“. Veranstaltung des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und VCI-DECHEMA „ NanoSilber – Einsatzmöglichkeiten, Nutzen und Wirkmechanismen antimikrobieller Anwendungen.“ Frankfurt, 16. Juni 2008.

v. Gleich, A. (Uni Bremen) und Dubbert, W.: UBA-Projekt „Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte“, DECHEMA/VCI, Frankfurt am Main, 17.06.2008.

Leuschner, C.: „Untersuchungsbedarf zum Schutz der Umwelt – Aktivitäten des Umweltbundesamtes zur Nanotechnik“, DECHEMA NanoNature Workshop, Frankfurt am Main, 26.08.2008.

Martens, S. (Golder Associates) und Dubbert, W.: UBA-Projekt „Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz“, DECHEMA/VCI, Frankfurt am Main, 13.10.2008.

Leuschner, C.: „Untersuchungsbedarf für Nanomaterialien – zum Schutz der Umwelt“, Workshop „Nanotechnologie in der Landwirtschaft“ Julius Kühn Institut, Kleinmachnow, 21.10.2008.

Dubbert, W. und Leuschner, C.: „Nationale und internationale Aktivitäten des Umweltbundesamtes zur Nanotechnik“, 3. Symposium „Nanotechnology and Toxicology in Environment and Health“, Helmholtzzentrum für Umweltforschung - UFZ, Leipzig, 18./19.03.2009.

Dubbert, W.: „Nanotechnology and its Potential Benefits for the Environment“, AICHEM 2009, Frankfurt am Main, 14.05.2009.

