

Nanotechnologie - eine Bestandsaufnahme

Harald F. Krug und Torsten Fleischer

Die „Nanotechnologie“ gilt allgemein als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Neben den zahlreichen möglichen Anwendungen und bereits auf dem Markt befindlichen Produkten nimmt auch der kritische Umgang mit der neuen Technologie mittlerweile Formen an. Viele wissenschaftliche Tagungen und öffentliche Diskussionsveranstaltungen beschäftigen sich daher auch mit dem mit ihr einhergehenden Risikopotenzial. Dabei stehen die biologischen Wirkungen der Nanomaterialien meist im Mittelpunkt des Interesses. In einem schnell wachsenden Feld neuer Produkte und Einsatzmöglichkeiten sehen viele auch einen massiven Anstieg bei den einhergehenden Risiken. Deshalb muss die Frage erlaubt sein, inwieweit diese Risiken akzeptabel sind. Eine Technologie ohne Risiken gibt es nicht, daher sind Anstrengungen notwendig, solche Risiken zu erfassen und nach Möglichkeit für die Bevölkerung so zu minimieren, dass diese letztlich von den Chancen der Technologie weit übertroffen werden. Dies wäre ein wichtiger Beitrag dafür, dass die Technologie als solche akzeptiert würde und nutzbar wäre. In den vergangenen 3 Jahren, seit der letzten Publikation an gleicher Stelle zu diesem Thema, hat sich viel auch in der Hinsicht „Sicherheitsforschung“ getan und es sind mehrere Projekte gestartet worden, die sich diesem Thema widmen. Aber ist das genug Aktivität, um mit den Risiken umzugehen und diese sowohl zu beherrschen als auch entsprechend zu kommunizieren? Der Beitrag soll dazu einige Antworten liefern.

Eine Wachstumsbranche

Der Nanotechnologie werden große Möglichkeiten vor allem auch auf dem Markt zugesprochen (Abb. 1). Die Wachstumzahlen belegen dies und die gezeigten Tendenzen könnten bei einigen Anwendungsgebieten eventuell sogar noch übertroffen

werden. Ein wichtiges Themenfeld innerhalb der Nanomaterialien, die die heutige Nanotechnologie dominieren, sind die sogenannten Nanopartikel. Seit längerem sind bereits Partikel in der Größe von 20-50 nm Durchmesser in Sonnenschutzcremes (TiO₂ und ZnO) enthalten, die einen wesentlich verbesserten Schutz vor UV-Strahlung bieten, als die bisherigen Rezepturen. In Zahncremes helfen sie empfindliche Zähne zu besänftigen und in Pflegemitteln für Oberflächen aller Art schützen sie Holz, Metall und Glas vor allen möglichen Umwelteinflüssen. Mit den verschiedensten Produkten in allen Lebensbereichen kommen wir und auch die Umwelt immer häufiger mit diesen in Kontakt, das heißt, eine Exposition kann nicht nur am Arbeitsplatz relevant sein, sondern wird auch für alle Nutzer solcher Produkte immer wahrscheinlicher. Selbstverständlich wird dann auch die Frage gestellt, ob nicht diese speziellen Eigenschaften der „neuen“ Materialien auch zu kritischen Situationen beitragen könnten, also für einige Nachteile verantwortlich gemacht werden könnten, wenn diese unkontrolliert von lebenden Organismen aufgenommen werden und dort zu negativen Effekten führen (KRUG et al. 2004, KRUG & GRUNWALD 2006, GRUNWALD & FLEISCHER 2007).

Kontakt:

Prof. Dr. habil. Harald F. Krug
Empa - Materials Science & Technology
Postfach 50
Lerchenfeldstrasse 5
9014 St. Gallen
SCHWEIZ
Tel.: +41/71/274 72-0
harald.krug@empa.ch
www.empa.ch

Dipl.-Phys. Torsten Fleischer
Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Hermann-von-Helmholtz-Platz-1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

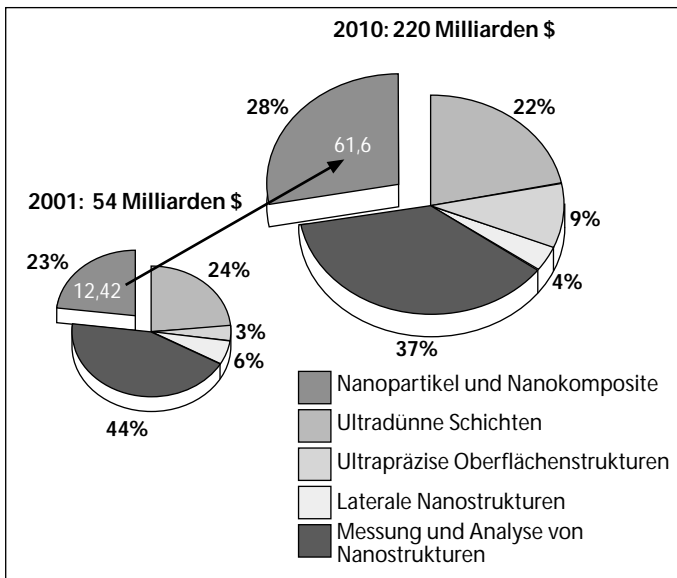


Abb. 1: Erwartete Umsatzsteigerung für nanotechnologisch produzierte Materialien bis 2010. Allein der Anteil der Nanopartikel und Nanokomposite wird von 12 auf 61,6 Milliarden Dollar steigen (Quelle: DZ Bank).

Wie „neu“ sind synthetisierte Nanopartikel?

Vor drei Jahren haben wir festgestellt: ultrafeine Partikel sind nichts Neues. Das stimmt insoweit, dass wir mit den unterschiedlichsten Partikeln in unserer Umgebung auskommen müssen, die im wesentlichen aus Quellen stammen, aus denen sie unbeabsichtigt produziert und freigesetzt werden (z.B. Verbrennungsprozesse aller Art) oder sie stammen direkt aus natürlichen Quellen. Nun sollen hier aber ausschließlich technisch hergestellte Partikel betrachtet werden, solche also, die für einen bestimmten Zweck in eben dieser kleinen Dimension synthetisiert werden. Auch da gibt es eine Reihe von Beispielen, dass "synthetische Nanopartikel" bereits ohne Kenntnis dessen seit vielen Jahrhunderten hergestellt und eingesetzt wurden. So konnten Kohlenstoffnanoröhrchen in Damaszenerschwertern gefunden werden (REIBOLD et al. 2006), mit Nanopartikeln aus Blei wurden Haare gefärbt (WALTER et al. 2006) und Nanogold wurde im Mittelalter für die rote Farbe in Kirchenfenstern verwendet. Wir müssen uns demnach damit abfinden, nicht die Entdecker einer neuen Technologie zu sein, wohl aber werden immer mehr Anwendungen erkannt und durch die Bottom-Up-Synthese sind nun auch die Eigenschaften viel direkter zu beeinflussen. Das macht diese Technologie so erstaunlich, aber sie verursacht eben auch ein unbehagliches Gefühl, wenn es darum geht, dass diese neuen Eigenschaften ohne geeignete Vorsorge auf die Menschen und die Umwelt losgelassen werden sollte. Darum ist eine Abwägung der positiven und negativen Auswirkungen dringend notwendig.

Neue Materialien - Chancen und Risiken

Die Erforschung der negativen Eigenschaften für Leben und Umwelt geht dabei nach grundsätzlichen Regeln vor sich, die wir auch aus anderen Bereichen der Toxikologie bereits kennen (Abb.

2). Ein Risiko (im toxikologischen Sinne, s.u.) liegt eben nur dann wirklich vor, wenn eine Exposition gegeben ist und gleichzeitig auch von dem neuen Material eine biologische Wirkung ausgeht. Sollte dabei wirklich ein Risiko charakterisiert werden können, so ist es unbedingt notwendig, dieses auch nach außen offen zu kommunizieren, da sonst Vorbehalte gegenüber diesen Produkten und letztlich gegenüber der gesamten Technologie entstehen, die zu deren Scheitern führen können. Dieses offene Verhalten gegenüber den Nutzern wurde bei anderen Techniken, etwa bei der Verwendung der Kerntechnik sowie bei der grünen Gentechnik, versäumt. Nicht zuletzt darum ist gerade bei diesen die Gesellschaft in Fragen ihrer Akzeptanz besonders gespalten, ihre Nutzung bis hin zu de-facto-Moratorien reglementiert. Sollte eine solche Situation auch bei Anwendungen der Nanotechnologie eintreten, stünde eine Reihe von neuen Möglichkeiten auf dem Spiel, die ein enormes Potenzial beinhalten, das in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens zu vielleicht revolutionären Änderungen beitragen kann. So können Materialien und technische Entwicklungen der Nanotechnologie gerade für biomedizinische Anwendungen eine Vielzahl von Verbesserungen bewirken:

- Werkzeuge für Mikroskopie und Bildgebung
- Diagnostik und Analyse (Forschung und Therapie)
- Produktion von bio-aktiven Substanzen und Materialien (Lab-on-a-Chip)
- Targeting und Dosierung von Medikamenten
- Intervention in biologische Prozesse (z.B. Zellwachstum)
- Ernährung (Bioverfügbarkeit, Stabilität, Optik)
- Kosmetika (UV-Filter, liposomale Formulierungen)
- Sensoren und Detektoren
- Biomoleküle für Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT; DNA-Computing)

Nanopartikel können aus den unterschiedlichsten Materialien hergestellt werden und nehmen dabei sehr verschiedene Formen an (Abb. 3). Allein diese Tatsache macht eine einheitliche Hypothese zu der biologischen Wirkung dieser Partikeln nahezu unmöglich. Für die Toxikologen bedeutet dies, dass ähnlich wie bei der Chemikalienbewertung jedes Material für sich untersucht und bewertet werden muss. Noch immer hält sich die Hypothese,



Abb. 2: Ansatz zur toxikologischen Risikoabschätzung. Nur wenn eine Exposition vorliegt und gleichzeitig auch von dem Material eine biologische Wirkung ausgeht, liegt ein mögliches Risiko vor. Dies kann auf beiden Seiten mit verschiedenen Modellen oder Untersuchungsmethoden erfasst werden und sollte unbedingt in geeigneter Weise offen kommuniziert werden (verändert nach: KRUG 2005).

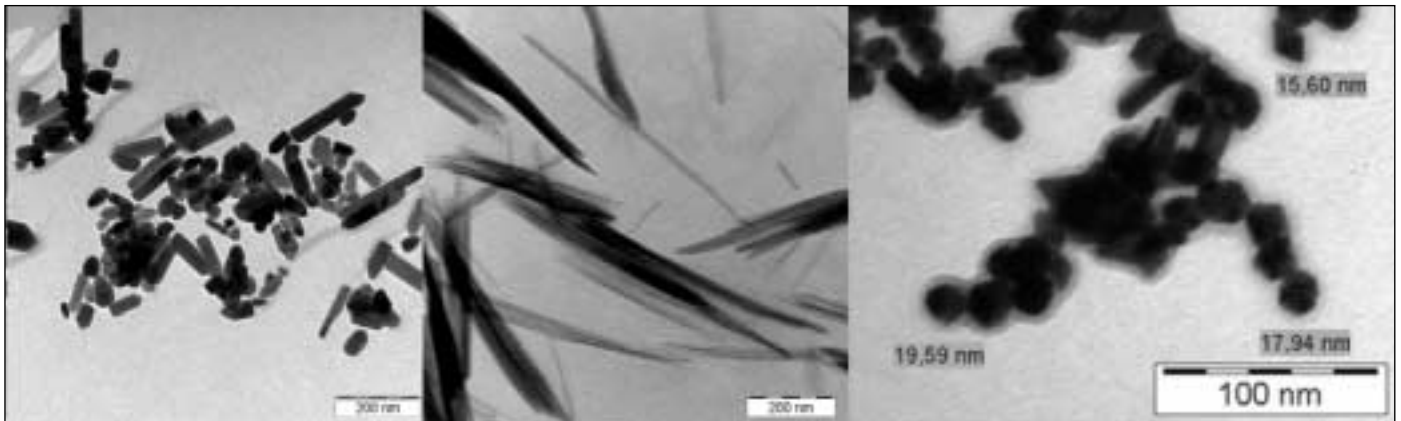


Abb. 3: Elektronenmikroskopische Aufnahmen drei verschiedener Nanomaterialien. Links: Zinkoxid (ZnO) in einer mittleren Größe von 50 nm; Mitte: Vanadiumtrioxid in sehr langen aber dünnen Nadeln; Rechts: Palladium mit einer Primärpartikelgröße von ca. 20 nm als dendritische Agglomerate (Synthese: C. Feldmann Universität Karlsruhe, DFG-CFN).

die der reinen Oberflächengröße eine übergeordnete Rolle bei der Wirkungsstärke der Partikel zuweist (OBERDÖRSTER et al. 2000, OBERDÖRSTER 2001, WOTTRICH et al. 2004, ZHANG et al. 2003): Je kleiner der Partikel, desto größer im Verhältnis die Oberfläche und umso höher die biologische Wirkung. Das wird aber neuerdings mehr und mehr relativiert durch Arbeiten, die dem Material an der Oberfläche den größeren Einfluss auf eine biologische Wirkung zuordnen (WARHEIT et al. 2006).

Was für lebende Organismen und den Menschen gilt, kann unter Umständen auch für die Umwelt selbst relevant sein. So sind eine Vielzahl von Anwendungen in der Entwicklung, die mehr oder weniger direkt in oder für die Umwelt von großer Bedeutung sind:

- Produktionsprozesse bei Umgebungsbedingungen (niedrige Temperatur und Druck) sparen Energie
- Nicht-toxische Katalysatoren und minimale Produktionen reduzieren den Materialverbrauch und die Emissionen
- Reaktionen in wässrigem Milieu helfen Lösungsmittel und Kontaminanten sparen
- Nanoskalige Informationstechnologien helfen bei der Identifizierung und Verfolgung von Produkten, beim Recycling, der Neuproduktion und der End-of-Life-Verwertung (druckbare Elektronik)
- Grundwasserbehandlung kann durch nanoskalige Katalysatoren effizienter gestaltet werden
- Nanomaterialien/Nanodevices sind empfindlichere Sensoren und bessere Photokatalysatoren
- Einzelmolekül-Detektion durch Nanosensoren verbessern die Erkennung von Schadstoffen bevor es zu einem Schaden kommt

Diese Aspekte der Nutzung nanotechnologischer Produkte direkt in der Umwelt kann selbstverständlich auch zu damit verbundenen Problemen führen, indem diese Materialien auch "Nebenwirkungen" haben können, die für einzelne Komponenten der Umwelt Nachteile mit sich bringen (KRUG 2005). Daher müssen neben Risiken für den Menschen auch solche Auswirkungen innerhalb der Umwelt ausreichend im Vorfeld untersucht werden.

Es würde grundsätzlich zu weit führen, an dieser Stelle auf alle möglichen neuen Materialien einzugehen und diese erschöpfend

zu diskutieren. Daher soll beispielhaft an wenigen partikulären Systemen auf die wesentlichen Belange in der Risikodebatte hingewiesen werden. In der Nanotechnologie sind aktuell Kohlenstoffnanoröhrchen für viele Entwicklungen von großem Interesse, und zwar wegen ihrer herausragenden mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Es gibt einwandige Nanoröhrchen mit Durchmessern von 1-2 nm oder mehrwandige

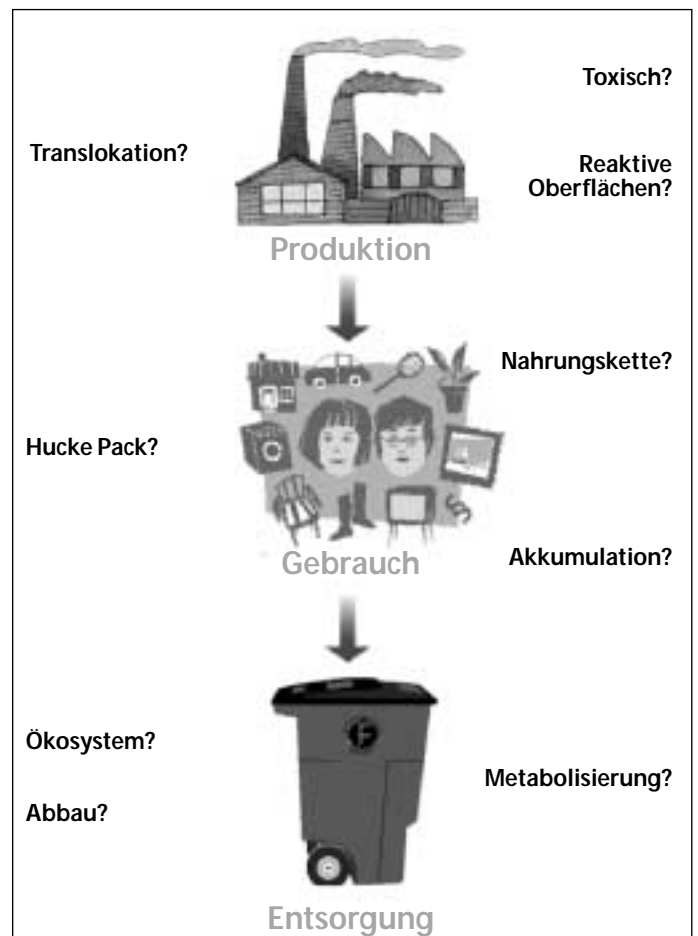


Abb. 4: Ungeklärte Fragen, die für eine Identifizierung einer möglichen Gefährdung durch Nanopartikel bedeutsam sind. Nicht nur am Arbeitsplatz, sondern auch während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes, spielen diese Punkte eine große Rolle (WÖRLE-KNIIRSCH & KRUG 2007)

Nanoröhrchen mit Durchmessern von 10-30 nm. Beide können eine Länge von mehreren Mikrometern haben und werden durchaus von Zellen aufgenommen. Die potenziellen Gefahren in Bezug auf die Inhalation von Nanoröhrchen z. B. bei deren Herstellung, waren bisher völlig unbekannt. Inhalationsversuche mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind sehr schwierig, weil die Röhrchen stark agglomerieren und dann nicht mehr einatembar sind. Bei ersten Experimenten zu ihrer Toxizität wurden die Partikel in Flüssigkeit suspendiert und in die Atemwege von Ratten oder Mäusen instilliert (LAM et al. 2004, WARHEIT et al. 2004). Die höchste Konzentration von 5 mg einwandiger Nanoröhrchen pro kg Körpergewicht führte zu einer Sterblichkeit von ca. 15 % der so behandelten Ratten. Die Ursache war allerdings Ersticken durch eine Verstopfung der Hauptatemwege durch Partikel-Agglomerate und nicht die mögliche Toxizität der Partikel selbst. Bei den Überlebenden wurde eine vorübergehende Lungenentzündung sowie die Bildung von multifokalen Granulomata beobachtet. Das Auftreten von Granulomata bei Abwesenheit anderer schädlicher Effekte scheint nicht dem normalen Paradigma zu folgen, das durch toxische Stäube wie Quarz oder Asbest entsteht. Exposition mit diesen Stäuben führt zu Zellschäden, Entzündung und Fibrose. Wegen der starken Agglomeration in Suspensionen ist es unumgänglich, diese Partikel als Aerosol in einer Inhalationsstudie oder mit einem in vitro-Test zu untersuchen. Unsere eigenen Studien haben ergeben, dass die Kohlenstoffnanoröhrchen nur dann eine akute Toxizität aufweisen, wenn die Kontaminanten, die während der Synthese entstehen (amorpher Kohlenstoff) bzw. dort benutzt werden (Metallionen), nicht in ausreichendem Maße entfernt wurden. Das bedeutet, dass die gezeigte akute Toxizität nur von den Metallen oder dem amorphen Kohlenstoff abhängt, während gereinigte Kohlenstoffröhrchen weder oxidativen Stress noch einen Verlust der Vitalität hervorrufen können (WÖRLE-KNIRSCH et al. 2006). In dieser Studie konnten wir darüber hinaus zeigen, dass auch in vitro Granuloma-ähnliche Strukturen um die Kohlenstoffröhrchen entstehen. Ebenfalls für Aufregung sorgten die von E. Oberdörster in 2004 präsentierten Daten zu Fullerenen, die in aquatischen Systemen auf Fische toxisch wirkten und dabei vor allem in den Gehirnen zu Lipidperoxidation führten (OBERDÖRSTER 2004). Die hier aufgeführten Studien belegen gleichzeitig, wie wichtig es ist, keine voreiligen Schlüsse aus einzelnen Ergebnissen zu ziehen, die noch nicht von unabhängiger Seite wiederholt bzw. durch weitere Experimente bestätigt wurden. Während bei der Instillation der Nanotubes in Ratten- und Mäuselungen die Tiere eher erstickt sind, weil es zum Verschluss der oberen Bronchien kam, ist die Studie von Frau Oberdörster bisher noch nicht durch weitere Studien belegt worden. Dennoch ist es vor diesem Hintergrund als kritisch zu bewerten, wenn bereits in Kosmetika Fullerene als „anti-oxidatives“ Prinzip Verwendung finden, die Daten zu den Untersuchungen dieses Produktes wären für eine umfassende Beurteilung der Fullerene und ihrer Wirkungen von besonderer Bedeutung.

Aus den oben dargestellten Beispielen werden bereits wichtige Fragen deutlich, die für eine Risikoabschätzung unbedingt adressiert werden müssen, um ein Risiko für den Menschen am Arbeitsplatz aber auch der Nutzer der Produkte weitestgehend ausschließen zu können. Daher wäre es notwendig, die nachfolgend aufgeführten Wissenslücken zu schließen und systemati-

sche Untersuchungen möglich zu machen:

1. Verlässliche und vergleichbare Methoden sind derzeit nicht vorhanden/definiert
2. Referenzmaterialien für die biologische Wirkung fehlen völlig
3. Expositionsszenarien werden nur wenig untersucht
4. Einige wichtige biologische Effekte sind zwar beschrieben, aber wichtige Informationen fehlen immer noch zu: Toxikokinetik, Deposition und Akkumulation
5. Ökotoxikologische Aspekte sind bisher fast völlig unberücksichtigt
6. Einige Fragen sind bisher nicht adressierbar, da entsprechende Fälle noch gar nicht eingetreten sind (z.B. Nanopartikel und Epidemiologie)

Forschungspolitische und regulatorische Aktivitäten

Potentielle Gesundheitsgefahren durch synthetische Nanopartikel, Unsicherheiten in Bezug auf Exposition und Wirkungspotenziale, Unwissenheit in Bezug auf die Folgendimensionen haben in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit von Regierungen, Regulierungsbehörden -und auch Nichtregierungsorganisationen - auf dieses Themenfeld gelenkt. Bevor wir hier einige aktuelle Entwicklungen schildern, scheint uns aber eine Vorbemerkung vonnöten: Unterschiedliche Terminologie erschwert die Kommunikation. Dies gilt auch für den Risikobegriff, der nicht nur in den verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich konzeptualisiert und verwendet, sondern auch im öffentlichen, medialen und politischen Sprachgebrauch oft uneinheitlich gebraucht wird. In der Regel liegt hier ein breiterer Risikobegriff als in der toxikologischen Fachdiskussion zugrunde, auch Ungewissheit und Unwissen werden als Risiko begriffen. Da es an dieser Stelle unmöglich ist, den Intentionen der jeweiligen Autoren nachzuspüren, werden wir uns auf deren Terminologie beziehen und dadurch ein gewisses Maß an Unklarheit in Kauf nehmen müssen.

Toxikologen (z.B. KRUG & DIABATÉ 2003, DONALDSON et al. 2004) und Politik beratende Gremien und Institutionen (bspw. TAB 2004, ROYAL SOCIETY 2004) haben - zunächst weitgehend begründet mit Erfahrungen mit ultrafeinen Partikeln - bereits frühzeitig auf potentielle Gesundheitsgefahren synthetischer Nanopartikel hingewiesen. Nicht zuletzt infolge dieser Aktivitäten sind in vielen Industrienationen wie auch auf supranationaler Ebene Programme und Projekte zur toxikologischen Forschung aufgelegt worden. Seitens der Europäischen Kommission sind dies unter anderem die Vorhaben NanoSafe, NanoSafe2, NanoDerm, Particle_Risk und Impart/NanoTox. Der Deutsche Bundestag hat im Dezember 2004 beschlossen, für die ökologische, ethische, soziale, friedenspolitische und verbraucher- und gesundheitsschutzorientierte Begleitforschung 5 % der zur Verfügung stehenden Forschungsmittel für Nanotechnologie im Bundeshaushalt einzusetzen. Dem kommt das BMBF unter anderem durch die Förderung der allesamt im Jahr 2006 begonnenen Vorhaben NanoCare, Tracer und INOS (ca. 8 Mio. € öffentliche Mittel plus Beiträge der Industriepartner über drei Jahre) nach. Im Rahmen der Nationalen Nanotechnologie-Initiative der USA sind für EHS (environmental, health and safety)-Forschung 38,5 Mio.

US-\$ für 2006 und 44 Mio. US-\$ für 2007 vorgesehen, von denen allerdings nur geschätzte 12-15 Mio. US-\$ direkt auf toxikologische Forschung entfallen dürften. Auch aus Japan, Großbritannien und der Schweiz sind umfangreichere Forschungsanstrengungen bekannt.

Ungeachtet dieser wichtigen Aktivitäten wird zunehmend Kritik an der bisherigen politischen Behandlung der Risikoforschung laut. Dabei sind die Argumente durchaus differenziert. Wenig überraschend dürften die Forderungen von Nichtregierungsorganisationen, teilweise unterstützt durch Forschungsorganisationen und Unternehmen sein, die öffentlichen Ausgaben in diesem Bereich deutlich zu erhöhen (z.B. Environmental Defense in den USA: 100 Mio. US-\$ pro Jahr; BUND: „erhebliche Anteile der Forschungsmittel“). Gemessen an den in Deutschland sonst üblichen Verfahrensweisen ungewöhnlicher ist eine Initiative der drei Bundesoberbehörden Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) und Umweltbundesamt (UBA), die eine Forschungsstrategie „Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln“ erarbeitet und im Herbst 2006 einem quasi öffentlichen Konsultationsverfahren unterworfen haben. Nach unserem Kenntnisstand völlig ungeklärt ist jedoch, wie die dort angesprochenen Themen - die gut auch als Defizitanalyse bisheriger Risikopolitik gelesen werden können - in Forschungsprogramme überführt und finanziert werden sollen.

Ein gemeinsames Manko nahezu aller Vorschläge zu einer Intensivierung der nanopartikel-bezogenen Risikoforschung ist allerdings das Fehlen einer klaren Prioritätensetzung und einer darauf abgestimmten Strategie. Offenkundig ist, dass angesichts der zahlreichen offenen Forschungsfragen nicht nur zur Toxikologie und Ökotoxikologie, sondern auch zu Charakterisierung, Messtechnik und Exposition, bei gleichzeitig begrenzten Möglichkeiten und Kapazitäten der damit befassten Forschungseinrichtungen und einer beständig wachsenden Anzahl von Nanopartikel enthaltenden Produkten bzw. Anwendungsideen eine Fokussierung von Forschung vonnöten sein wird. Was sind die wichtigen Schutzziele? Welches Regulierungsparadigma (vorsorgeorientiert, evidenzbasiert, ...) soll zur Anwendungen kommen? Welche Materialgruppen verdienen besondere Aufmerksamkeit, die mit den größten Produktionsvolumina oder solche mit dem höchsten Expositionspotenzial? Was sind die wichtigsten Inkorporationspfade? Dies ist nur eine Auswahl von Fragen, die keineswegs allein innerhalb des Forschungssystems beantwortet werden können, sondern auf politischer Ebene zu klären sind. Darüber hinaus ist zu diskutieren, ob die für nanotechnologiebezogene Risiken relevanten Behörden personell und materiell hinreichend ausgestattet sind und ob sie über ausreichende rechtliche Mittel verfügen, um ihren Aufgaben nachzukommen. Bisher ist schon die Informationslage in Bezug auf die tatsächlich auf dem Markt befindlichen, synthetische Nanopartikel enthaltenden Produkte bzw. solche Partikel einsetzenden Fertigungsverfahren ausgesprochen dürftig. Die im Internet findbaren Datenbanken sind eher erratisch und krank an fehlender Definition, unsystematischer Erhebung sowie einerseits überzogenen und ungeprüften claims und andererseits nicht vorgenommener Deklaration durch Produkthanbieter. Die britische Regierung hat darum - nach ausführlicher öffentlicher Konsulta-

tion - im September 2006 ein freiwilliges Meldeverfahren (Voluntary Reporting Scheme) für synthetische Nanomaterialien eingeführt. Hierbei wird das Umweltministerium (Defra) über einen Zeitraum Informationen (“data from any company or organisation manufacturing, using, importing, researching or managing wastes consisting of engineered nanoscale materials”) sammeln, um auf dieser Basis einen Überblick über die tatsächliche Exposition- und Risikosituation gewinnen und mögliche Regulierungserfordernisse abschätzen zu können. Vergleichbare Vorschläge finden auch in zahlreichen anderen Positionspapieren, unter anderem in der erwähnten BAuA-BfR-UBA-Forschungsstrategie, ihren Niederschlag.

Die regulatorische Situation zu synthetischen Nanopartikeln ist komplex. Eine ganze Zahl von nationalen und europäischen Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen ist der Herstellung, Verwendung und Entsorgung von chemischen Substanzen gewidmet und im Grundsatz auch relevant für Nanomaterialien. Gleiches gilt für deren Verwendung in Produkten, wobei derzeit je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Regulierungsmechanismen relevant sind. Ein vollständiger Überblick kann derzeit noch nicht gegeben werden. Umfangreichere Betrachtungen zum Thema finden sich in einem Ende 2006 vorgelegten, vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Gutachten, das zum Ziel hatte, Regelungslücken auf europäischer und nationaler Ebene im Hinblick auf die Nanotechnologien zu identifizieren, mögliche Regulierungsansätze aufzuzeigen und Empfehlungen zum weiteren regulatorischen Vorgehen zu formulieren (FÜHR et al. 2006). An dieser Stelle soll zunächst nur festgehalten werden, dass für synthetische Nanopartikel aus so genannten EINECS-Stoffen im gegenwärtigen stoffspezifischen Regelwerk keine besonderen Verpflichtungen enthalten sind. Auch im Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch sind Nanopartikel bisher nicht speziell geregelt. In den Beratungen zur neuen europäischen Chemikaliengesetzgebung (REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), die nach jahrelangem Ringen Ende 2006 einen Abschluss gefunden haben, hat das Thema Nanopartikel ebenfalls eine Rolle gespielt. Der Umweltausschuss des Europäischen Parlaments hatte noch im September 2006 zahlreiche Änderungsvorschläge beschlossen, die darauf hinaus liefen, auch Nanopartikel im Rahmen von REACH einer eigenen Bewertung zu unterziehen. Die Vermittlungsverhandlungen zwischen den drei gesetzgebenden Institutionen der Europäischen Union (Parlament, Rat und Kommission) Ende November 2006, die in einen Kompromiss mündeten, auf dem die jetzt in Kraft getretene REACH-Verordnung basiert, konnten diese Vorschläge jedoch nicht passieren.

— Risikowahrnehmung und -kommunikation

Untersuchungen zur öffentlichen Wahrnehmung von Nanotechnologie im allgemeinen und zur Risikowahrnehmung bezogen auf synthetische Nanopartikel im besonderen sind bisher nur vereinzelt durchgeführt worden. Quantitative Studien widmen sich eher der generellen Perspektive auf Nanotechnologie. So wurden in einer Anfang 2005 in allen 25 Mitgliedstaaten der Europäischen Union sowie weiteren europäischen Ländern durchgeführten Eurobarometer-Umfrage Bürger nach ihren

Ansichten zu Wissenschaft und Technik befragt. Etwa 80 % äußerten, dass sie sehr oder durchschnittlich an Innovationen und wissenschaftlichen Entdeckungen interessiert seien. Daraufhin gebeten, ihre wichtigsten Interessensgebiete zu bezeichnen, nannten mehr als 60 % Medizin- und rund 45 % Umweltthemen, gefolgt von Internet, Wirtschaftsfragen und Geisteswissenschaften. Zwischen den Ergebnissen für die EU25 und den Zahlen für Deutschland gibt es nur geringfügige Abweichungen. Nanotechnologie landete mit 11 % (EU25: 8 %) auf dem letzten Platz der möglichen Antworten. Auch bei der Frage nach Techniken, von denen in den nächsten 20 Jahren positive Effekte auf unseren Lebensstil erwartet werden, könnte sich Nanotechnologie nur im letzten Drittel platzieren. Detailliertere Länderstudien in den USA, Großbritannien und Deutschland liefern ein ähnliches Bild: In der Regel hatten etwa 30 % der Befragten schon etwas von Nanotechnologie gehört und zwischen 10 und 20 % hatten konkretere Vorstellungen zu diesem Gebiet.

All dies legt den Schluss nahe, dass die überwiegende Mehrheit der allgemeinen Öffentlichkeit gegenwärtig nicht an Nanotechnologie interessiert ist oder sie ignoriert. Wenn überhaupt, nehmen die Bürger Nanotechnologie eher als unscharfes oder unspezifisches Konzept wahr, ihre Einschätzungen zu Möglichkeiten und Risiken von Nanotechnologie entsprechen in etwa ihren Erwartungen zu Wissenschaft und Technik allgemein, so dass Nanotechnologie gegenwärtig als ‚No specific attitudes‘-Technologie beschrieben werden kann. Quantitative Studien, die sich speziell der Thematik synthetische Nanopartikel widmen, sind uns nicht bekannt.

Anhaltspunkte zur Risikowahrnehmung zu diesen Materialien und daraus resultierenden Handlungserwartungen können jedoch den Ergebnissen von einer ganzen Zahl von partizipativen Veranstaltungen mit Laien entnommen werden, die in den vergangenen Jahren unter anderem in den Niederlanden, Dänemark, Großbritannien, den USA, Australien, der Schweiz und in Deutschland durchgeführt wurden. Zwar unterscheiden sich diese in Bezug auf Verfahren und Zielsetzung, und sie treten auch nicht mit dem Anspruch auf Repräsentativität an. Sie zeigen jedoch einige Gemeinsamkeiten, deren Verallgemeinerbarkeit hier plausibel angenommen werden kann (wenngleich doch noch wissenschaftlich zu bestätigen bleibt). So wird allgemein eine hohe Besorgnis vor allem in Bezug auf unbekannte Gesundheits- und Umweltrisiken von synthetischen Nanopartikeln geäußert. Dies erfolgt allerdings nicht kontextunabhängig - während Anwendungen im Bereich der Medizin, für den Umweltschutz oder die Energietechnik als weniger problematisch gesehen werden, muss die Verwendung von Nanopartikeln in Lebensmitteln als besonders sensibel gelten. Forderungen nach Moratorien werden - zumindest was die Forschung angeht - abgelehnt. Zugleich wünschen sich die Bürger einen wachsenden und handelnden Staat, der seinen Schutzaufgaben nachkommt und sich verstärkt der systematischen Erforschung von nanotechnologie-bezogenen Risiken widmet. Bei letztgenanntem sehen die Bürger zudem Hersteller und Vertreiber von entsprechenden Produkten in der Verantwortung, der diese in ihrer Wahrnehmung gegenwärtig nicht angemessen nachkommen. Weitere Punkte sind die Wünsche nach mehr Information und Offenheit in Bezug auf Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten

sowie Ergebnisse der Risikoforschung und die Forderung nach klarer Deklaration von Stoffen in nanopartikulärer Formulierung bzw. nach Kennzeichnung von nanopartikelhaltigen Produkten.

Offenheit und Transparenz zu demonstrieren und zu informieren sind auch die Ziele von so genannten Dialogveranstaltungen, wie sie derzeit von einer Reihe von Organisationen durchgeführt werden. So hat das Bundesumweltministerium im Oktober 2005 einen „Dialog zur Bewertung von synthetischen Nanopartikeln in Arbeits- und Umweltbereichen“ durchgeführt. Im September 2005 startete der Verband der Chemischen Industrie eine Dialogreihe zum Thema Nanomaterialien. BASF, Siemens und ecosense waren im Mai 2006 Gastgeber eines Dialoges „Chancen nutzen - Risiken managen. Weichen stellen für eine nachhaltige Nanotechnologie“. Im Rahmen des EU-Projektes Nanologue wurde im Oktober 2006 am Deutschen Museum ein „Nano-Dialog“ durchgeführt. Hessen verhandelt Nanotechnologie im Dialog (November 2006), Vertreterinnen aus Wirtschaft, Forschungsinstituten und Behörden haben unter der Projektbezeichnung CoNano einen „Risikodialog“ gestartet, die Aufzählung ließe sich beliebig fortsetzen... Abgesehen von der problematischen Tendenz, den Dialogbegriff hier inzwischen beinahe ähnlich ubiquitär wie „Nanotechnologie“ zu verwenden (ohne dabei wirklich innovative Kommunikationsformen gefunden zu haben), gehen die meisten Veranstaltungen an der allgemeinen Öffentlichkeit im Grunde vorbei. Vermutlich macht man mit derartigen Aktivitäten nicht viel falsch (wenngleich eine kritische Begleitung und Evaluierung noch aussteht und eine spannende Forschungsaufgabe wäre), eine offene Risikokommunikation durch Wissenschaft, Behörden und Unternehmen werden sie jedoch nicht ersetzen können - und verantwortungsbewusstes staatliches Handeln auch nicht.

Resümee

Soviel Potenzial in den neuen Nanomaterialien enthalten ist, soviel Unwissenheit besteht aber auch über ihre möglichen nachteiligen Wirkungen in der Umwelt oder im Organismus. Sei es am Arbeitsplatz, bei der Herstellung, bei der technischen Anwendung oder bei der Verwendung als Medikament, immer werden diese Nanoteilchen auch „Nebenwirkungen“ haben, die genauestens gegen die Vorteile abgewogen werden müssen, bevor sie bedenkenlos zum Einsatz kommen. Allerdings hat zu den technischen Entwicklungen neuer Nanomaterialien bereits frühzeitig eine Diskussion in der Öffentlichkeit eingesetzt, die mittlerweile dazu geführt hat, dass umfangreiche Untersuchungen möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen eingeleitet wurden und werden. Dabei müssen die Aktivitäten sowohl von der Umwelttoxikologie, den Hygieneinstituten und auch anderer akademischer Forschungseinrichtungen verstärkt werden, um eventuelle Nachteile und unerwünschte Nebenwirkungen der neuen Materialien frühzeitig zu erkennen. Dazu werden auch Projekte beitragen, die mit Mitteln des BMBF gestartet wurden (INOS, NanoCare, Tracer) und zum Ziel haben, sehr verschiedene Materialien auf ihre möglichen negativen Folgen hin zu untersuchen, die Daten in einer Datenbank interpretiert zur Verfügung zu stellen (NanoCare-Website: www.nanopartikel.info) und mit wichtigen gesellschaftlichen Gruppen wie auch der allgemeinen

Öffentlichkeit ins Gespräch zu kommen. Neben der Darstellung, Erläuterung und Diskussion des aktuellen Forschungsstandes wird es bei letzterem auch darum gehen müssen, Anregungen für eine stärkere Problemorientierung und Prioritätensetzung in der nanotoxikologischen Forschung zu gewinnen und in fokussierte interdisziplinäre Forschungsprogrammatiken einzubringen.

Auf der Basis des bisher aufgezeigten Wissensstandes können abschließend 5 wichtige Überlegungen zum Risikomanagement von Nanomaterialien angestellt werden:

1. Bei den bisherigen Untersuchungen zur Toxikologie von Nanomaterialien handelte es sich eher um eine Beschreibung der Symptome; es ist daher dringend notwendig, mehr über die Wirkmechanismen auf zellulärer und molekularer Ebene zu erfahren.
2. Die Weiterentwicklung von Modellen und Modellsystemen ist notwendig, um zelluläre und physiologische Prozesse besser erfassen und die Kommunikation zwischen den Zellen in die Untersuchungen mit einschließen zu können.
3. Es sollte eine Beziehung zwischen molekularen, zellulären und patho-physiologischen Endpunkten mit ökologischen Konsequenzen hergestellt werden können.
4. Eine präzisere vorbeugende Abschätzung möglicher schädigender Einflüsse von neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie sollte durch eine verbesserte Datenlage möglich sein.
5. Von zentraler Bedeutung ist ein wachsendes Verständnis der vollständigen Kette von der Fertigung und Anwendung der Nanopartikel bis hin zu deren Verbleib. Dies beinhaltet mögliche Pfade für eine Exposition und deren systemische Wirkungen auf Mensch und Umwelt. Hier sind Lücken zu erkennen und zu schließen, wobei diskutiert werden sollte, ob nicht zunächst Screening-Studien gegenüber Detailanalysen zu priorisieren wären.

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

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

Aufgrund der sich als äußerst schwierig gestaltenden Risikoerfassung und wegen zahlloser Interaktionen von Nanomaterialien mit chemischen Nachweisverfahren und der sehr dünnen Datenlage zu diesen neuen Materialien ist eine „echte“ Risikobewertung aktuell sehr schwierig. Dennoch zeigt sich, dass Nanomaterialien nicht nur technisch, sondern auch toxikologisch durchaus ernst genommen werden müssen. Neben nützlichen und wünschenswerten Quanteneffekten in der Physik deuten sich auch für gewisse Materialien ebensolche Phänomene in der Biologie (Toxikologie) an. Nanomaterialien sollten daher weiterhin eingehend auf ihre möglichen negativen Folgen für Mensch und Um-

welt untersucht werden, um eine abschließende Risikobewertung nach hergebrachten Mustern und Verfahren durchführen zu können, wie wir sie heute bereits von Chemikalien her kennen.

(Teile des Beitrags basieren auf einen Vortrag anlässlich der 6. Umweltmedizinischen Tagung der Verbände dbu, DGUHT, IGUMED und ÖAB am 7.10.2006 in Berlin im Rahmen des Workshops „Umwelt, Technik und Gesundheit: Chancen und Risiken“)

Nachweise

- DONALDSON, K., STONE, V., TRAN, C.L., KREYLING, W., BORM, P.J.A. (2004): Nanotoxicology. *Occup Environ Med* 61: 727-728.
- GRUNWALD, A. & FLEISCHER, T. (2007): Nanotechnologie - wissenschaftliche Basis und gesellschaftliche Folgen. In: GAZSÓ, A., GRESSLER, S. & SCHIEMER, F. (Hrsg.): nano - Chancen und Risiken aktueller Technologien, Springer Verlag, Wien - New York.
- FÜHR, M., HERMANN, A., MERENYI, S., MOCH, M., MÖLLER, M. (2006): Rechtsgutachten Nano-Technologien - ReNaTe. Bestehender Rechtsrahmen, Regulierungsbedarf sowie Regulierungsmöglichkeiten auf europäischer und nationaler Ebene, Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Darmstadt und Freiburg.
- KRUG & DIABATÉ (2003): Ultrafeine Partikel: Gesundheitsrisiko versus Therapiechance! *umwelt-medizin-gesellschaft* 16: 250 - 255.
- KRUG, H.F. & GRUNWALD, A. (2006): Risk Assessment and Risk Management. In: BRUNE, H., ERNST, H., GRUNWALD, A., GRUNWALD, W., HOFMANN, H., JANICH, P., KRUG, H.F., MAYOR, M., SCHMID, G., SIMON, U., VOGEL, V., GETHMANN, C.F. (eds.): Nanotechnology. Assessment and Perspectives. Springer, Berlin, pp. 329-397.
- KRUG, H.F., KERN, K. & DIABATÉ, S. (2004): Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuch einer Abwägung. *Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis* 13: 58-64.
- KRUG, H.F. (2005): Auswirkungen nanotechnologischer Entwicklungen auf die Umwelt. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 17: 223-230.
- LAM, C.W., JAMES, J.T., MCCLUSKEY, R. & HUNTER, R.L. (2004): Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol. Sci.* 77: 126-134.
- OVERDÖRSTER, E. (2004): Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environ. Health Perspect.* 112: 1058-1062.
- OVERDÖRSTER, G. (2001): Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 74: 1-8.
- OVERDÖRSTER, G., FINKELSTEIN, J.N., JOHNSTON, C., GELEIN, R., COX, C., BAGGS, R., ELDER, A.C. (2000): Acute pulmonary effects of ultrafine particles in rats and mice. 96, Health Effects Institute, Cambridge, MA.
- REIBOLD, M., PAUFLER, P., LEVIN, A.A., KOCHMANN, W., PATZKE, N. & MEYER, D.C. (2006): Materials: carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature* 444: 286.
- ROYAL SOCIETY (2004): Royal Society and Royal Academy of Engineering: Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. London.
- TAB (2004): Endbericht zum TA-Projekt Nanotechnologie. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Bundestags-Drucksache 15/2713. Download <http://dip.bundestag.de/btd/15/027/1502713.pdf>.
- WALTER, P., WELCOMME, E., HALLEGOT, P., ZALUZEC, N.J., DEEB, C., CASTAING, J., VEYSIERE, P., BRENIAX, R., LEVEQUE, J.L. & TSOUCARIS, G. (2006): Early use of Pb nanotechnology for an ancient hair dyeing formula. *Nano Lett.* 6: 2215.
- WARHEIT, D.B., LAURENCE, B.R., REED, K.L., ROACH, D.H., REYNOLDS, G.A. & WEBB, T.R. (2004): Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicol. Sci.* 77, 117-125.
- WARHEIT, D.B., WEBB, T.R., SAYES, C.M., COLVIN, V.L. & REED, K.L. (2006): Pulmonary Instillation Studies with Nanoscale TiO2 Rods and Dots in Rats: Toxicity Is not Dependent upon Particle Size and Surface Area. *Toxicol. Sci.* 91: 227-236.
- WÖRLE-KNIRSCH, J.M. & KRUG, H.F. (2007): Risikoforschung und toxikologische Bewertung von Nanomaterialien. In: GAZSÓ, A., GRESSLER, S. & SCHIEMER, F. (Hrsg.): nano - Chancen und Risiken aktueller Technologien, Springer Verlag, Wien - New York.
- WÖRLE-KNIRSCH, J.M., PULSKAMP, K. & KRUG, H.F. (2006): Oops they did it again! Carbon nanotubes hoax scientists in viability assays. *Nano Lett.* 6: 1261-1268.
- WOTTRICH, R., DIABATÉ, S. & KRUG, H.F. (2004): Biological effects of ultrafine model particles in human macrophages and epithelial cells in mono- and co-culture. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 207: 353-361.
- ZHANG, Q., KUSAKA, Y., ZHU, X., SATO, K., MO, Y., KLUZ, T. & DONALDSON, K. (2003): Comparative toxicity of standard nickel and ultrafine nickel in lung after intratracheal instillation. *J. Occup. Health* 45: 23-30.