

## Diskussionsbeiträge

## Synthetische Nanopartikel – Entwicklungschancen im Dialog

Frank Claus<sup>1</sup> und Uwe Lahl<sup>2</sup><sup>1</sup> Dr. Frank Claus, iku GmbH, Olpe 39, D-44135 Dortmund ([claus@iku-gmbh.de](mailto:claus@iku-gmbh.de))<sup>2</sup> Dr. habil. Uwe Lahl, Ministerialdirektor im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Robert-Schuman-Platz 3, D-53175 Bonn ([uwe.lahl@bmu.bund.de](mailto:uwe.lahl@bmu.bund.de))DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2006.07.126>**Zusammenfassung**

Der Beitrag gibt einen Überblick zu den Entwicklungschancen und den Risiken der Nanotechnologie. Er ist Ausfluss eines ersten nationalen Stakeholderdialogs, der im Oktober 2005 vom BMU durchgeführt wurde. Es werden Empfehlungen für die weitere Risikokommunikation gegeben.

**Schlagwörter:** Feinstaub; Nanopartikel; Nanotechnologie; Ökotoxikologie; PM0,1; PM1; PM2,5; PM10; Risikokommunikation; Toxikologie

**Abstract****Synthetic nanoparticles – Opportunities and risks of nanotechnology**

This article provides an overview on the opportunities and risks of nanotechnology. It is the outcome of a first national stakeholder dialogue carried out by the Federal Environment Ministry in October 2005. Recommendations are provided for further risk communication.

**Keywords:** Ecotoxicology; nanoparticles; nanotechnology; particulate matter; PM0.1; PM1; PM2.5; PM10; risk communication; toxicology

**Einleitung**

Nanotechnologie steht für Fortschritt und für Innovation. Vieles in diesem jungen Wissenschafts- und Anwendungsgebiet sieht vielversprechend aus. Gerade die Ökologie scheint von dieser neuen Technologie profitieren zu können. Aber es sind auch Probleme und Risiken zu beachten [1].

**1 Was ist Nanotechnologie?**

Sie gilt als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts (Nanotechnologie griech. nano = Zwerg). Wir stoßen mit der Nanotechnologie in die Welt kleiner Teilchen vor, produzieren auf der Basis weniger Atome oder Moleküle und erhalten Produkte mit ultradünnen Schichten oder ultrafeinen Partikeln, den Nanopartikeln. Nanopartikel sind Teilchen unterhalb von 100 Nanometer (1 nm = ein Millionstel Millimeter) Durchmesser. Sie sind ein Verbund von einigen bis zu mehreren hundert Atomen oder Molekülen.

Die wichtigsten im Einsatz befindlichen Nanopartikel sind:

- Carbon Black,
- Metalloxide wie Siliziumdioxid SiO<sub>2</sub>, Titandioxid TiO<sub>2</sub>, Aluminiumdioxid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zinkoxid ZnO und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>),
- Halbleiter wie Cadmium-Tellurit CdTe und Gallium-Arsenid GaAs und
- Metalle wie Gold und Silber.

Carbon Black, auch Industrieeruß genannt, wird z.B. in Reifen als verstärkender Füllstoff eingesetzt. Nanoskaliges TiO<sub>2</sub> wird in Sonnenschutzcremes eingesetzt, um die UV-Durchlässigkeit zu verringern. TiO<sub>2</sub> und ZnO wird u.a. in Kosmetika verwandt.

**Kohlenstoff-Nanoröhren** (Carbon Nano Tubes CNT) sind Röhren mit einem Durchmesser von 1 bis zu 50 Nanometern. Sie sind in der Regel nur einige Mikrometer lang, vereinzelt auch länger. Sie zeichnen sich durch eine besonders hohe Zugfestigkeit aus und sind je nach Struktur leitend oder halbleitend. Einige Strukturen haben bei tiefen Temperaturen auch die Eigenschaften eines Supraleiters. Wegen ihrer Eigenschaft als Halbleiter werden sie unter anderem für die Transistorherstellung bei Computerchips verwendet. Außerdem werden sie in der Display-Herstellung eingesetzt.

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

**Fullerene** sind ausschließlich aus Kohlenstoffatomen bestehende Makromoleküle. Besonders gut erforscht sind Fullerene in der Form C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>76</sub>, C<sub>80</sub>, usw. C<sub>60</sub> wird auch 'Buckminster Fulleren' oder 'Buckyball' genannt. Auf Fullerene setzt man besonders bei medizinischen Anwendungen.

**Quantenpunkte** sind 5 nm hohe und 100 nm große, pyramidenförmige Gebilde. Sie bestehen aus einigen tausend Atomen, und auf einen Quadratcentimeter lassen sich etwa 100 Milliarden Quantenpunkte unterbringen. Unter geeigneten Rahmenbedingungen ordnen sich diese Quantenpunkte selbstständig und regelmäßig an. Sie stellen u.a. die Grundlage für neue Lasersysteme [2].

**2 Produkte und Entwicklungschancen**

Die Zahl der heute auf dem Markt befindlichen Konsumprodukte auf Basis synthetischer Nanopartikel liegt schätzungsweise bei ca. 500. Dazu zählen Sonnenschutzcremes mit hohem UV-Schutz, nanoskalige Tonerpartikel für Kopierer und Drucker, kratzfesteste Autolacke, wasser- und schmutzabweisende Textilien, optimierte Elektronik-Bauteile (Chips, Festplatten, Diodenlaser, usw.), Golf- und Tennisschläger mit Carbonbeimischungen für erhöhte Stabilität, Beimischungen nanopartikulärer Materialien bei Babywindeln zur besseren Absorption der Feuchtigkeit, bei Frischhaltefolien zur höheren Reißfestigkeit und Gaspermeabilität, und einiges mehr [2].

Für die Zukunft deuten sich zahlreiche weitere Anwendungen an: Automobilindustrie, Maschinen- und Anlagenbau, Energietechnik, Optik und Medizin sind Branchen, in denen mit Hochdruck an neuen Produkten gearbeitet wird.

Das geht einher mit der Schaffung von Arbeitsplätzen. Schon heute sind in Deutschland Arbeitsplätze für ca. 25.000 Personen durch die Nanotechnologie entstanden.

**3 Nanotechnologie als Umwelttechnologie**

Für den Standort Deutschland ist die Nanotechnologie von herausragender Bedeutung. Gerade in der Chemischen Industrie sind hier Innovationen in einer Branche möglich, deren Standardproduktion ansonsten von Verlagerung bedroht ist.

Für die Umweltechnologie ist ein Ausbau der deutschen Vorreiterposition gut vorstellbar. Dazu einige Beispiele für den Einsatz von Nanotechnologie in der Umwelttechnik:

- Katalysatoren (z.B. beim Abgaskatalysator in Automobilen und in Produktionsprozessen; 80% aller chemischen Produktionen durchlaufen mindestens eine katalytische Stufe)
- Wasserstoffspeicher für die Brennstoffzelle
- Entspiegelung von Solarzellen mit gesteigerter Energieausbeute
- Membranen für große Li-Ionen-Batterien (Bleiersatz, Gewichtsreduzierung)

Diese Chancen für Produktion und Verwendung bringen neue Arbeitsplätze mit sich: Analysten rechnen mit weiteren 10.000 neuen Arbeitsplätzen im Bereich der Nanotechnologie bis Ende 2007 in Deutschland. Zurzeit setzen etwa 450 Unternehmen in Deutschland Nanotechnologie ein, 80% davon rechnen laut einer Befragung mit einem wachsenden Bedarf an Mitarbeitern.

#### 4 Risiken und offene Fragen

Die Versicherungswirtschaft (Swiss Re, Allianz [3]), die kanadische Umweltorganisation ETC-Group [4], die Royal Society und Royal Academy of Engineering in Großbritannien [5] und der deutsche VDI [6] sowie unterschiedliche Experten [7] haben wichtige Vorarbeiten geleistet. Sie fragten nach den Risiken der Nanotechnologie bzw. der Nanopartikel. Die Swiss Re verglich das Risikopotenzial mit dem von Asbest, die ETC-Group forderte ein Moratorium und verwies auf die mangelnde 'global governance', und die Royal Society untermauerte die Vielzahl und Bedeutung offener Wirkungsfragen.

Wir leben und handeln vielfach in Unwissenheit und Unsicherheit. Das gilt auch für Nanopartikel. Während immer mehr Produkte, auch Konsumartikel, auf Basis von Nanopartikeln auf den Markt kommen, ist eine Risikoabschätzung und -bewertung bis heute nicht möglich. Es ist unklar, welche synthetischen Nanopartikel in welcher Größe die Gesundheit schädigen können und wie Dosis-Wirkungsbeziehungen aussehen. Unklar ist zurzeit auch, welche Partikel sich ähnlich verhalten (z.B. kategorisiert nach Oberfläche, Größe, stoffliche Zusammensetzung, Coating, usw.) und ob eine Einteilung der Nanopartikel in Risikoklassen möglich ist.

Es ist ebenfalls unklar, an welchen Stellen des Lebenswegs synthetischer Nanopartikel relevante Expositionen entstehen können. Und es fehlt an Messstrategien für die Teilchen [8].

Wenn man mögliche Expositionen betrachtet, dann liegt es nahe, zunächst auf Arbeitsplätze zu schauen, an denen Nanopartikel hergestellt und verwendet werden. Experten nehmen an, dass die Expositions Wahrscheinlichkeit bei der Verwendung von Nanopartikeln eher gegeben ist als bei der Produktion, weil dort höhere Sicherheitsstandards existieren. Allerdings fehlt es noch an anerkannten Messstrategien (was sind die wesentlichen Parameter? Wie können sie erhoben werden?), an geeigneten Screeningverfahren und an epidemiologischer Forschung. In der Zwischenzeit komme es auf die Information der anwendenden Betriebe und Beschäftigten an, auch über die Kennzeichnung von (Zwischen-) Produkten.

Für die Umwelt sind noch weitere Fragestellungen zu klären:

- Wie gelangen synthetische Nanopartikel in die Umwelt?
- Wie verhalten sich die Nanopartikel in der Umwelt?
- Welche Wirkungen haben Nanopartikel in der Umwelt?
- Welche synthetischen Nanopartikel können als Transportmittel für andere schädliche Stoffe dienen? Oder durch welche anderen Stoffe werden synthetische Nanopartikel verbreitet?

#### 5 Ein Querbezug zur Feinstaubdiskussion

Relativ viel ist bekannt zum Komplex der Feinstaubbelastungen der Außenluft und ihrer Wirkung auf den Menschen.

Epidemiologische Untersuchungen zeigen, dass erhöhte Morbidität und Mortalität in der Bevölkerung einhergeht mit hohen Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft [9]. Diese Erkenntnisse werden gestützt durch Ergebnisse aus Tierversuchen und der medizinischen Forschung [10]. Die WHO nennt als aggregierte Auswirkung für Deutschland durch die aktuelle Feinstaubbelastung eine mittlere verkürzte Lebensdauer von gut 10 Monaten.

Die besonders feinen Partikel der Feinstäube liegen im Korngrößenbereich unter 500 nm oder sogar darunter. Die Tatsache, dass die Partikelgröße der Feinstäube der Außenluft den Bereich der synthetischen Nanopartikel umfasst, kann nicht gleichgesetzt werden mit deren Toxizität. Hier spielen zusätzlich auch Kriterien wie deren chemische Zusammensetzung eine Rolle. Die Querbetrachtung zwischen Feinstäuben aus der Umgebungsluft auf synthetische Nanopartikel kann daher nicht pauschal erfolgen. Aber die Erkenntnisse über gravierende Gesundheitsauswirkungen von Feinstäuben aus der Außenluft auf die Allgemeinbevölkerung berechtigt zu der Schlussfolgerung, dass eine genauere Analyse der Risiken von synthetischen Nanopartikeln erforderlich ist.

#### 6 Was leistet das existierende Recht und die zukünftige EU-Chemikalienpolitik (REACH)?

In der bisherigen Diskussion über Nutzen und Risiken der Nanotechnologie wird von einer Teilmenge der Stakeholder die Position eingenommen, dass keine rechtlichen Regelungen erforderlich sind, weil die vorhandenen Regelungen alle Risiken und erforderlichen Schutzmaßnahmen abdecken. Da wir gegenwärtig gar nicht wissen, ob es Risiken gibt und wenn ja, welcher Art diese sind, ist diese Einschätzung über die existierende Rechtslage gewagt.

Daher sollte die Frage eines gegebenen Regulierungsbedarfs unideologisch betrachtet werden und in dem Moment auf die Tagesordnung gesetzt werden, wenn wir mehr Fakten und mehr Wissen zur Verfügung haben. Natürlich hat die existierende Rechtslage das Thema Nanotechnologie noch nicht abgedeckt, weil vor 20 oder 30 Jahren, als das heutige Stoffrecht entwickelt wurde, die Nanotechnologie noch in ihren Kinderschuhen steckte, bzw. die Nanomaterialien als solche nicht als eigenständige Chemikaliengruppe mit gesonderter Aufmerksamkeit erkannt worden waren.

Und auch die zukünftigen Regelungen des neuen europäischen Stoffrechts sind auf diese Bewertungsproblematik nicht ausgerichtet. Unter dem Kürzel REACH geht es insbesondere um die Bewertung von Altstoffen, die bis heute nicht ausreichend geprüft worden sind. Hierfür werden alle Altstoffe oberhalb eines Vermarktungsvolumen von 1 Tonne zu registrieren sein. Die mit der Registrierung obligatorisch vorzulegenden Daten sind nach konventionellen toxikologischen und ökotoxikologischen Tests durchzuführen. Dies deckt die Fragestellungen der Nanotechnologie überhaupt nicht ab, kann es auch gar nicht, weil die für die Bewertung von Nanopartikeln erforderlichen Testmethoden und Kriterien noch gar nicht zugänglich sind bzw. noch entwickelt werden müssen. So wird – wie im derzeitigen Chemikalienrecht – ein Stoff nicht als neuer Stoff betrachtet, wenn er in sehr geringer Partikelgröße hergestellt und verwendet wird, auch wenn er beispielsweise mit der abnehmenden Partikelgröße sein toxikologisches Profil stark verändern würde. Allenfalls im Rahmen einer Stoffevaluierung, die auf der Basis der Registrierungsdossiers oder aus anderen Gründen durchgeführt werden kann, könnten zukünftig auch Fragestellungen von Partikelgröße und Wirkung vertieft werden.

## 7 Warum hat der BMU einen Stakeholder-Dialog begonnen?

Bei Technologien wie der Biotechnologie sind in Deutschland in der Vergangenheit Fehler gemacht worden, die bis heute zu erheblichen Akzeptanzdefiziten führen. Zu den Ursachen zählt, neben den real nicht zu leugnenden Risiken, der mangelnde Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Behörden und gesellschaftlichen Gruppen. Verstärkend kam die späte Erkenntnis hinzu, dass Strategien für Untersuchung und Regulierung eine gemeinsame Aufgabe sind, wenn die Gesellschaft sich zu Chancen und Risiken bekennen soll.

Bei der Nanotechnologie suchen heute alle beteiligten Kreise bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt das Gespräch und den Informationsaustausch. Sie wollen die Entwicklung der Technik diskursiv begleiten und gestaltende Verbraucherschutz- und Umweltpolitik betreiben.

Eine wichtige Voraussetzung dazu ist ein intensiver Informations- und Meinungsaustausch zwischen allen betroffenen Kreisen (Stakeholdern). Er ist mit einer Tagung in Bonn im Oktober 2005 begonnen worden [11]. Für die in dieser Situation erforderlichen Risikokommunikation hielten es die Tagungsteilnehmer für wichtig, einen gemeinsamen Weg zu beschreiten, der auf Grundlage einer verbindlichen Struktur zu Glaubwürdigkeit, Vertrauen und Akzeptanz führt.

Die Auftaktveranstaltung im Oktober 2005 hatte folgende Ergebnisse:

- Nanopartikel und nanotechnische Produktionsverfahren besitzen enorme Chancen für neuartige Produkte inkl. umwelttechnischer Einsatzzwecke.
- Nanotechnische Produktionsverfahren bieten Möglichkeiten zur Ressourcenschonung und besseren Energieeffizienz.
- Die Zahl nanotechnisch beeinflusster Produkte steigt steil an. Gleichzeitig liegen öffentlich nur wenige Daten über Exposition gegenüber synthetischen Nanopartikeln vor [12].
- Messtechniken für Nanopartikel liegen vor, werden bislang jedoch wenig eingesetzt. Daten über synthetische Nanopartikel in der Umwelt sind so gut wie nicht vorhanden.
- Es ist unbekannt, an welchen Stellen des Lebensweges von Nanopartikeln und daraus erzeugten Produkten eine Exposition auftreten kann und wer davon betroffen ist. Der Schwerpunkt liegt zurzeit bei Fragen des Arbeitsschutzes.
- Da die Kenntnisse derzeit zu gering sind, bleibt unklar, ob die bestehenden Regulierungsmechanismen (inkl. REACH als kommendem System) für die Begrenzung von Umwelt- und Gesundheitsrisiken ausreichen. Weitgehende Einigkeit besteht darüber, dass in der aktuellen Situation von Unwissenheit und Unsicherheit gerade die Expositionswahrscheinlichkeit ein Maßstab für vertiefende Untersuchungen sein sollte.
- Die Biokinetik von Nanopartikeln wird zurzeit untersucht, Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass es neuartige Wege gibt, auf denen Nanopartikel in den menschlichen Organismus gelangen können, z.B. über die Nase ins Gehirn.
- Die Wirkungsendpunkte von Nanopartikeln sind ungeklärt. Toxikologische Daten zu Nanopartikeln liegen nur sehr vereinzelt öffentlich vor. Harald Krug (Forschungszentrum Karlsruhe) weist auf die Bedeutung der Schwermetallaufnahme und -wirkung durch schwermetallhaltige Nanopartikel hin. Oberdörster (University of Rochester, USA) hat Hinweise auf Entzündungen durch Nanopartikel gefunden.
- Für eine Risikoeinschätzung und -bewertung sind die Daten unzureichend. Von der Risikokommission wird die Trennung von Einschätzung und Bewertung gefordert, die in verschiedenen besetzten Gremien erfolgen sollte.
- In der Öffentlichkeit sind mögliche Risiken von Nanopartikeln kaum bekannt. Wiedemann (Forschungszentrum Jülich) hat in einem Experiment gezeigt, dass Laien eher un-

bekanntere Risiken vermuten. Mögliche Risiken müssen unabhängig von dem mit der Technik oder Anwendung verbundenen Nutzen eingeschätzt werden.

Konkret wurde vorgeschlagen, eine Steuerungsgruppe einzurichten, an der neben mehreren Ministerien die Wirtschaft, Wissenschaft und gesellschaftliche Gruppen mitwirken sollen. Ihre Dialogthemen sollen in weiteren Kreisen bearbeitet werden. Außerdem ist eine verstärkte Kommunikation mit der Öffentlichkeit sowie die etwa jährliche Bilanzierung des Wissensstands in einer Konferenz vorgeschlagen worden.

## 8 Ausblick

Nanotechnologie ist gerade unter ökologischen Gesichtspunkten eine interessante Entwicklung (ressourcen- und energieeffizient, neue Anwendungsfelder). Sie kann damit zu einer Erfolgsgeschichte unter der großen Überschrift 'Arbeit und Umwelt' werden. Allerdings müssen hierfür parallel die Risikofragen intensiv bearbeitet und ein offener und transparenter Dialog über Nutzen und Risiken geführt werden. Hierzu sind die Anfänge gemacht [7,13]. Die Aufgabe der nahen Zukunft wird es sein, für diesen Prozess die wichtigen Meilensteine zu vereinbaren und die erforderlichen Arbeits- und Kommunikationsstrukturen zu schaffen.

## Literatur

- [1] Krug HF (2005): Auswirkungen nanotechnologischer Entwicklungen auf die Umwelt. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 17 (4) 223–230
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Hrsg) (2004): Nanotechnologie erobert Märkte. Deutsche Zukunftsoffensive für Nanotechnologie. Berlin Eigenverlag
- [3] Swiss Re (2004): Nanotechnologie: Kleine Teichen – Große Zukunft? Reihe 'Risk Perception'. <[http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/Download?ReadForm&Redirect=/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/ULUR-SYNGCZ/\\$FILE/Publ04\\_Nanotech\\_de.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/Download?ReadForm&Redirect=/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/ULUR-SYNGCZ/$FILE/Publ04_Nanotech_de.pdf)>
- [4] ETC Group (ed) (2003): The Big Down: From Genoms to Atoms. <<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>>
- [5] The Royal Academy of Engineering (The Royal Society) (ed) (2004): Nanoscience and nanotechnologies: Opportunities and uncertainties. <<http://www.raeng.org.uk/policy/reports/nanoscience.htm>>
- [6] Luther W (2004): Industrial applications of nanomaterials – Chances and risks. Technology Analysis. Düsseldorf Future Technologies Division of VDI Technologiezentrum
- [7] Krug HF (2003): Nanopartikel: Gesundheitsrisiken, Therapiechance? Nachrichten aus der Chemie 51, 1241–1246
- [8] Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J (2005): Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. Environmental Health Perspectives 113 (7) 823–839
- [9] Wichmann H-E (2005): Feinstaub: Lufthygienisches Problem Nr. 1 – Eine aktuelle Übersicht. Umweltmed Forsch Prax 10 (3) 157–162
- [10] Lahl U, Steven W (2005): Feinstaub eine gesundheitspolitische Herausforderung. Pneumologie, Heft 10
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – Nanotechnologie im Dialog, Tagung Bonn, 11.–12. Oktober 2005, siehe auch <[www.dialog-nanopartikel.de](http://www.dialog-nanopartikel.de)>
- [12] Kuhlbusch TA, Neumann S, Fissan H (2004): Number size distribution, mass concentration, and particle composition of PM1, PM2,5 and PM10 in bag filling areas of carbon black production. J Occup Environ Hyg 1 660–671
- [13] Krug HF, Kern K, Diabaté S (2004): Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuche einer Abwägung. Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis 13, 58–64

## Weitere Referenzen

- TAB Büro für Technikfolgenabschätzung [Hrsg]: Paschen H, Coenen C, Fleischer T, Grünwald R, Oertel D, Revermann C (2003): Nanotechnologie. TAB-Arbeitsberichte Nr. 92 (Auch als Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages unter Drucksache 15/2713 veröffentlicht)
- VDI-TZ ZTC Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg) (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. Innovations- und Technikanalyse

Eingegangen: 09. Januar 2006

Akzeptiert: 16. Juli 2006

OnlineFirst: 17. Juli 2006