

## Themenmodule zur Verbraucherbildung

# Nanotechnologien – Konzepte, Perspektiven, Risiken

Fachbeitrag  
von Nils Boeing

### Kurzinformation

---

Themenbereich:	Gesundheit, Umwelt
Titel:	Nanotechnologie – Konzepte, Perspektiven, Risiken
Autor/in:	Nils Boeing, Wissenschafts- und Technikjournalist Websites: <a href="http://www.bitfaction.com/index.html">http://www.bitfaction.com/index.html</a> <a href="http://nano.bitfaction.com">http://nano.bitfaction.com</a>
Stand:	Sommer 2008
Fächer:	Physik, Chemie, Ethik, Religion
Zielgruppe:	Lehrer/innen, Schüler/innen der Sek. II
Zeitbedarf:	1 - 2 Doppelstunden
Medien/Technik:	ggf. Computer mit Internetzugang

## Inhaltsverzeichnis

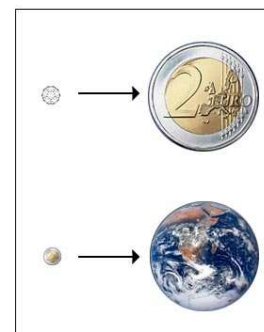
---

Einleitung .....	3
Was ist „Nanotechnologie“? .....	4
Exkurs 1: Nano-Effekte .....	5
Systematisierung der Nanotechnologien .....	5
Positionen zu Nanotechnologien .....	6
Nanoprodukte auf dem Markt .....	7
Exkurs 2: Nano oder nicht Nano? Zur Problematik der Beschreibungen von Nanoprodukten .....	9
Klassifizierung potenzieller Risiken von Nanotechnologien .....	9
Nanotoxikologische Erkenntnisse zu Auswirkungen auf Menschen .....	11
Exkurs 3: Wirkung von Nanopartikeln auf Zellen .....	13
Ausbreitung und Toxizität von Nanopartikeln in der Umwelt .....	13
Herausforderungen für Nanotoxikologie und Nanorisikoforschung .....	14
Der Streit um die gesetzliche Regulierung von Nanomaterialien .....	15
Instrumente der Selbstkontrolle in Industrie und Forschung .....	16
Risikowahrnehmung und Bürgerforen .....	17
Ansätze zur Gestaltung der weiteren Nanotechnologie-Entwicklung .....	19
Weiterführende Literatur, Reports und Online-Informationen .....	21
Glossar .....	22
Quellenverweise .....	24

## Einleitung

„Der Mensch ist in diesem Moment Zeitzeuge und Gestalter einer zweiten Genesis, einer grundlegend neuen Evolution von materiellen Strukturen.“ (Gerd Binnig, 2004<sup>1</sup>)

Seit den 1990-er Jahren wird „Nanotechnologie“ von Wissenschaft, Industrie und Forschungspolitik – unterstützt von den Medien – als die nächste große Hochtechnologie propagiert, die viele Lebensbereiche beeinflussen wird. Die Vorsilbe „Nano-“ bezeichnet dabei die dezimale Größeneinheit für ein Milliardstel (für einen Größenvergleich siehe Grafik rechts sowie Tabelle unten). Sie bringt zum Ausdruck, dass hier technisch Objekte und Strukturen genutzt werden, die eine Größenordnung von wenigen Nanometern, also Milliardstel Metern, haben. Was vor zehn Jahren noch weitgehend wie Zukunftsmusik klang, nimmt nun Gestalt an: Derzeit kommen pro Woche drei bis vier neue Produkte auf den Markt, die Nanotechnologien nutzen<sup>2</sup>. Während Nanotech-Befürworter nicht müde werden, auf das gewaltige wirtschaftliche Potenzial dieser und kommender Nanoprodukte hinzuweisen, weisen Kritiker auf die bislang kaum untersuchten Auswirkungen von Nanomaterialien auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt hin. Dass diese Risiken bergen, bestreiten zwar auch die Befürworter nicht mehr. Wie mit den Risiken umgegangen werden soll, wird jedoch nach wie vor heftig debattiert. Einig sind sich alle an der Debatte Beteiligten auch darin, dass angesichts der unterstellten Bedeutung von Nanotechnologien die Öffentlichkeit umfassend informiert werden sollte. Das ist allerdings leichter gesagt als getan: Nicht nur ist der Begriff der „Nanotechnologie“ wenig anschaulich, unklar ist auch, wie weit die nanotechnische Entwicklung bereits fortgeschritten ist. Hinzukommt, dass widersprüchliche Aussagen zum Bedeutungsgehalt von Nanotechnologien die Auseinandersetzung mit dem neuen Technikfeld erschweren.



Größenvergleich: Ein Molekül mit 1 Nanometer Durchmesser verhält sich zu einem 2-Euro-Stück ungefähr wie dieses zur Erde. (Grafik: Niels Boeing; Bilder: Wikipedia, NASA)

Der Fachbeitrag möchte deshalb zuerst Begriffe klären sowie Konzepte und Positionen systematisieren, um den Stand der Entwicklung besser einschätzen zu können. Zur Vertiefung der Risikodebatte werden dann Probleme der Produktkennzeichnung, der Nanotoxikologie, des Umweltverhaltens von Nanomaterialien und ihrer gesetzlichen Regulierung näher beleuchtet. Der Beitrag schließt mit einer Betrachtung der Risikowahrnehmung der Öffentlichkeit und gibt einen Ausblick auf die Herausforderungen, die sich mit der weiteren Entwicklung der Nanotechnologien stellen.

Wichtige Fachbegriffe, die häufig auftreten, sind im Anhang in einem Glossar aufgelistet.

Durchmesser/Breite in Nanometer	Objekt	Übliche Einheiten
12.740.000.000.000.000	Erde	12.740 km
33.000.000.000	Kugel des Berliner Fernsehturms	33 m
23.000.000	2-Euro-Stück	2,3 cm
1.000.000	Stecknadelkopf	1 mm
50.000	Haar (Durchmesser)	50 µm
10.000	Cyanobakterie	10 µm
3.000	Rotes Blutkörperchen	3 µm
130	Escherichia-coli-Bakterium	130 nm
<b>90</b>	<b>Leiterbahndicke in Computerchips</b>	<b>90 nm</b>
<b>20</b>	<b>Ribosom</b>	<b>20 nm</b>
<b>10</b>	<b>Quantenpunkt</b>	<b>10 nm</b>
<b>1</b>	<b>Kohlenstoff-Nanoröhre (Durchmesser)</b>	<b>1 nm</b>

Größenvergleich 2: Objekte im allgemein anerkannten Größenbereich der Nanotechnologien, die kleiner als 100 Nanometer, sind rot eingefärbt

## Was ist „Nanotechnologie“?

---

Aktuelle Umfragen zeigen, dass der Begriff „Nanotechnologie“ weiten Teilen der Öffentlichkeit nach wie vor nicht geläufig ist: In den USA wissen rund 70 Prozent der Befragten (Sept. 2007)<sup>3</sup>, in Großbritannien rund 60 Prozent (Dez. 2007)<sup>4</sup> und in Deutschland etwa die Hälfte (Dez. 2007)<sup>5</sup> mit dem Begriff nichts oder nur wenig anzufangen. Doch selbst Wissenschaftler und Ingenieure tun sich zuweilen mit dem Begriff schwer und streiten immer wieder, ob bestimmte Forschungsgebiete und Anwendungskonzepte der Nanotechnologie zuzurechnen oder nur modische Umbenennungen älterer Disziplinen seien.

Diese Unsicherheit ist bereits in der Entstehungsgeschichte des Begriffes „Nanotechnologie“ begründet. Er wurde erstmals 1974 in einem Fachartikel von dem Japaner Norio Taniguchi in der englischen Form „Nanotechnology“ benutzt, um die nächste Stufe der Miniaturisierung in der damaligen Fertigungstechnik zu bezeichnen: vom Mikrometer- in den Nanometerbereich, also von Millionstel zu Milliardstel Meter großen Strukturen. Die Wortschöpfung wurde aber von der Fachwelt zunächst nicht aufgegriffen. Als „Nanotechnology“ dann Anfang der 1980-er Jahre in den futuristischen Schriften des US-Ingenieurs Eric Drexler wieder auftauchte, bezeichnete dieser damit hingegen molekulare Maschinen, die Gegenstände Atom für Atom zusammenfügen. Erst in den 1990-er Jahren wurde er zu der Bedeutung erweitert, die laut der heute international akzeptierten Definition „die Untersuchung, Anwendung und Herstellung von Strukturen, molekularen Materialien und Systemen mit [mindestens] einer Dimension oder Fertigungstoleranz typischerweise unterhalb von 100 Nanometern“ umfasst (Bundesforschungsministerium 2006)<sup>6</sup>.

Damit werden dann aber sehr unterschiedliche Dinge wie die Messspitzen von Rastertunnelmikroskopen, biologische Zelleinheiten wie Ribosomen, Riesenmoleküle wie Kohlenstoff-Nanoröhren, Halbleiter-Bauteile in heutigen Computer-Prozessoren oder sehr kleine metallische Teilchen so behandelt, als seien sie vergleichbar oder zumindest ähnlich. Diese Darstellung ist problematisch, denn „Technologie“ bezeichnet im Deutschen üblicherweise den technischen Umgang mit einem ganz konkreten Gegenstand oder Verfahren. Tatsächlich haben sich verschiedene technische Gebiete zunächst unabhängig voneinander zur Manipulation von Molekülen, Clustern (Verklumpungen), Teilchen und winzigen Strukturen vorgearbeitet: Physik, Chemie, Biotechnik, Halbleitertechnik und Mikrotechnik haben dabei je eigene Verfahren und Konzepte entwickelt, die sich freilich zunehmend miteinander kombinieren lassen. Sinnvollerweise sollte man von „Nanotechnologien“ nur in der Mehrzahl sprechen, wenn die Gesamtheit des technischen Gebietes gemeint ist – eine Sprachregelung, die allmählich von Akteuren und Beobachtern aufgegriffen wird.

Eine zweite Klärung folgt aus der Frage, ob der technische Umgang mit Objekten auf der Nanoskala wirklich so neu ist wie behauptet. Tatsächlich sind bereits im Mittelalter die Wirkungen von Nanoteilchen genutzt worden: etwa zur Färbung von Fensterscheiben (mittels Gold-Nanoteilchen im Glas) oder zur Härtung von Schwertern (mittels Kohlenstoff-Nanoteilchen im Stahl). Die Chemie beschäftigt sich seit dem 18. Jahrhundert mit Molekülen, und die Biologie begann bereits in den 1960-er Jahren, die molekularen Bausteine der Gene technisch zu nutzen. Entscheidend ist dabei, dass in diesen und anderen Gebieten der Umgang mit dem, was man heute als Nano-Objekte oder -Strukturen betrachtet, entweder zufällig oder zumindest recht undifferenziert erfolgte. In den heutigen Nanotechnologien werden Nano-Objekte und -Strukturen jedoch gezielt und mit Absicht manipuliert und zuvor nur theoretisch bekannte Effekte praktisch genutzt.

Anders gesagt: Neu ist nicht der technische Umgang mit Molekülen, Nanoteilchen und Nanostrukturen in Werkstoffen an sich, sondern die Qualität, mit der diese für technische Zwecke hergestellt und genutzt werden (dieser Punkt spielt auch in der Debatte über

Nanopartikel eine Rolle, wie noch gezeigt wird). Nanotechnologien stellen sich damit derzeit zum größten Teil als Weiterentwicklungen oder Miniaturisierungen älterer Technologien dar.

### **Exkurs 1: Nano-Effekte**

*Nanotechnologien machen sich Effekte zunutze, die im Mikrometerbereich noch nicht auftreten, sondern erst bei Objekten mit einer Ausdehnung von unter 100 Nanometern. Drei der wichtigsten Effekte sind die relative Oberflächenvergrößerung, der Tunneleffekt und die Selbstorganisation.*

Je kleiner die Teilchen eines Materials werden, desto größer wird – bei gleicher Materialmenge – ihre Gesamtoberfläche. Ein Beispiel: 50 Kilogramm Quarzsand aus 1 Millimeter großen Körnchen haben eine Oberfläche von 120 Quadratmetern, während 50 Kilogramm aus 1-Nanometer-Partikeln es auf 12 Quadratkilometer bringen. Diesen Effekt nutzt man etwa in Sonnencremes, in denen Titandioxid-Nanoteilchen mit ihrer viel größeren Gesamtoberfläche mehr UV-Licht absorbieren. Katalysatoren aus Nanopartikeln sind effizienter als gröbere Materialien. Metallpulver aus Nanoteilchen schmelzen früher als solche aus Mikropartikeln.

Elementarteilchen haben nach den Gesetzen der Quantenphysik keinen fest definierten Ort. Für verschiedene Orte lässt sich nur eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit angeben. So kann es hin und wieder vorkommen, dass sich etwa ein Elektron in einem Moment diesseits einer Energiebarriere befindet, im nächsten Moment aber auf der anderen Seite. Physiker sagen: Das Elektron hat die Energiebarriere „durchtunnelt“. Diesen Tunneleffekt nutzt das Rastertunnelmikroskop: Hier „durchtunneln“ Elektronen das Vakuum zwischen den Atomen einer Metalloberfläche und der Mikroskopspitze, und aus diesem „Tunnelstrom“ lässt sich ein Bild der Oberfläche in atomarer Auflösung errechnen. Es gibt auch Konzepte für neuartige Nanotransistoren, die den Effekt nutzen wollen.

Unter bestimmten energetischen Bedingungen tritt das Phänomen der Selbstorganisation auf: Moleküle oder Atome ordnen sich von selbst zu regelmäßigen Mustern an. Diesen Effekt nutzt man etwa bei der Herstellung von neuen Lasermaterialien, die aus Milliarden winziger Halbleiterpyramiden bestehen, oder zur Bildung der molekularen Struktur, die Beschichtungen kratzfest, nichthaftend, wasserabweisend oder selbstreinigend macht.

### **Systematisierung der Nanotechnologien**

---

Da Nanotechnologien eine kaum überschaubare Vielzahl von Anwendungen – und damit auch von potenziellen Risiken – hervorbringen können, ist es hilfreich, sie grob in drei Felder einzuteilen: Nanowerkzeuge, Nanomaterialien und Nanosysteme. Andernfalls läuft man Gefahr, sich in endlosen Listen möglicher Anwendungen, wie sie in öffentlichen Vorträgen oder Broschüren gerne präsentiert werden, zu verlieren.

Unter Nanowerkzeugen lassen sich Instrumente und Sensoren fassen, die atomare Strukturen abbilden, Atome oder Moleküle bewegen sowie Moleküle nachweisen. Die wichtigsten Instrumente sind die so genannten Rastersondenmikroskope. Deren hauchdünne Spitzen treten in eine Wechselwirkung mit Atomen oder Molekülen etwa mittels Tunneleffekt (s. Exkurs 1), Magnetismus oder zwischenmolekularen Kräften. Als Sensoren dienen auch Kohlenstoff-Nanoröhren oder metallische Nanodrähte, deren elektrische Leitfähigkeit sich ändert, wenn sie mit den zu detektierenden Molekülen in Kontakt kommen.

Nanomaterialien sind neue Stoffe, deren Struktur ihnen besondere Eigenschaften verleiht.

Dazu gehören zum einen Beschichtungen, in denen Nanopartikel zu regelmäßigen Netzwerken angeordnet sind. Solche Strukturen machen Oberflächen zum Beispiel kratzfest, wasserabweisender oder hitzebeständiger. Mit Hilfe der so genannten Photokatalyse lösen sie, wenn UV-Strahlung auf sie fällt, Schmutzfilme aus organischem Material in kleinere Moleküle auf, die dann etwa von Regenwasser weggewaschen werden können. Schichten aus Halbleiter-Nanopartikeln oder aus elektrisch leitfähigen organischen Molekülen wiederum können Sonnenlicht in Strom umwandeln und deshalb als äußerst flache, biegsame Solarzellen dienen. Zum anderen handelt es sich um Nanoteilchen, die in Form von Suspensionen – einer Mischung aus flüssigen und festen Bestandteilen – in kosmetischen Produkten oder Lebensmitteln genutzt werden können. Ein besonderes Material sind die vor rund 20 Jahren entdeckten Kohlenstoff-Riesenmoleküle der Fullerene, die als Röhren („Nanotubes“) oder Kugeln („Buckyballs“) auftreten und für die Materialwissenschaft interessante Eigenschaften haben. Sie werden etwa als Medikamententräger in der Medizin gesehen. Beimischungen von Nanotubes können Kunststoffe härter oder elektrisch leitfähig machen.

Als Nanosysteme (im Englischen manchmal auch „nano-devices“ genannt) könnte man komplexere Gebilde bezeichnen, in denen Molekülen oder Nanostrukturen bereits nach einem ausgeklügelten Bauplan angeordnet sind. Ein Konzept sind „intelligente“ Medikamententräger in der Medizin. Sie bestehen aus einem Container, der den Wirkstoff enthält, und einer Hülle aus ausgewählten Molekülen, die nur an die Rezeptoren kranker Zellen andocken sollen. Passieren sie dann die Zellmembran, kann der Wirkstoff im Zellinneren freigesetzt werden. Weitere Konzepte sind molekulare Transistoren oder gar Prozessoren, die in der Computertechnik heutige Technologien ablösen sollen, sowie erste einfache Nanomaschinen, die als Nano-Elektromechanische Systeme (NEMS) bezeichnet werden.

## Positionen zu Nanotechnologien

---

Mag die Entwicklung der Nanotechnologien anfangs noch ein Selbstläufer gewesen sein, der in den 1980-er Jahren als neuer Trend in der Technikgeschichte erkennbar wurde, wird sie heute von Industrie und Forschungspolitik aktiv vorangetrieben. Nanotechnologien werden dabei vor allem als Möglichkeit begriffen, neue Milliardenmärkte im globalen Wettbewerb zu erschließen, die nebenbei Medizin, Computertechnik und andere Technologien revolutionieren. Den Ton für diese Perspektive gaben 2001 die US-Forschungsberater Mihail Roco und William Bainbridge in einem Report für die amerikanische National Science Foundation vor, in dem sie das Weltmarktvolumen für Nanoprodukte im Jahre 2015 auf „über eine Billion Dollar“ schätzten<sup>7</sup>. Diese Zahl wird bis heute von Industrievertretern und Politikern als Argument dafür präsentiert, dass die Förderung von Nanotechnologien eine kluge Standortpolitik sei, der man sich nicht verschließen dürfe. Da verwundert es nicht, dass inzwischen über 50 Staaten Förderprogramme für Nanotechnologien aufgelegt haben. Zusammen mit der Industrie haben sie 2007 weltweit etwa 13 Milliarden Dollar in die Nanotech-Forschung gesteckt (s. auch Tabelle auf S. 6). Der Darmstädter Wissenschaftsphilosoph Alfred Nordmann charakterisiert diese Mainstream-Position denn auch als ein „großes einheitliches Programm“, die Spitzenforschung neu zu organisieren.<sup>8</sup> Die rot-grüne Bundesregierung hat 2004 ihre Nanotech-Förderung ganz explizit als Branchenförderung konzipiert<sup>9</sup>: Die vier Leitinnovationen „NanoMobil“, „NanoFab“, „NanoLux“ und „NanoforLife“ sollen Autobau, Halbleitertechnik, Beleuchtungssysteme sowie Medizin- und Biotechnik stärken.

Seit der Klimawandel und das Energieproblem wieder ins Zentrum der Politik und der öffentlichen Wahrnehmung gerückt sind, entwickelt sich aus dem Mainstream heraus eine Position, die man als „grüne Nanotechnologien“ bezeichnen könnte. Hierbei werden vor

allein die Potenziale von Nanotechnologien für die klimaneutrale Erzeugung und Speicherung von Energie, für einen effizienteren Umgang mit Ressourcen und für eine bessere Umwelttechnik betont. Die „Green Nanotech“-Position genießt inzwischen vor allem in den USA eine gewisse Popularität. Stellvertretend hierfür steht die Einschätzung des US-Nanotech-Analysten Josh Wolfe von Lux Research: „Umwelt- und Energietechnik entpuppen sich zugleich als Nutznießer und Chance der Nanotechnologien. Meines Erachtens sind die Parallelen zwischen beiden so groß, dass man sie kaum noch auseinanderhalten kann.“<sup>10</sup>

Die Position der Nanotech-Kritik richtet sich dagegen, die Entwicklung von Nanotechnologien ohne eine ausreichende Begleitforschung zu deren Risiken voranzutreiben. Während Umweltbehörden und -organisationen in den Industrieländern sich derzeit vor allem auf mögliche Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt konzentrieren, kritisieren einige Gruppierungen zusätzlich die denkbaren sozio-ökonomischen Folgen von Nanotechnologien. Besonders die kanadische Umweltorganisation ETC Group befürchtet, dass Nanotechnologien in Medizin, Ernährung und Landwirtschaft zu Lasten der sozial Schwachen sowie der Bevölkerung in Entwicklungs- und Schwellenländern gehen werden. Es ist im Übrigen bemerkenswert, dass die großen Umweltorganisationen, gerade in Deutschland, erst mit einigen Jahren Verspätung Stellung zu Nanotechnologien bezogen haben.

Am Rande des Meinungsspektrums befindet sich eine futuristische Position zu Nanotechnologien, die von den Arbeiten des US-Ingenieurs Eric Drexler geprägt ist. Er propagiert seit über 20 Jahren eine „molekulare Nanotechnologie“, bei der Nanomaschinen beliebige Gegenstände Atom für Atom zusammenbauen oder kranke Zellen im menschlichen Körper reparieren sollen. Dieses Konzept ist unter den Vertretern des so genannten Transhumanismus populär, die von der molekularen Nanotechnologie eine Verschmelzung von Mensch und Maschine und damit eine „Optimierung“ des „Mängelwesens Mensch“ erwarten. Drexler ist auch einer der wenigen Forscher, der sich ausdrücklich auf den Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman bezogen hat. Dieser hatte 1959 in einem Vortrag eine Art „Bauen mit Atomen“ skizziert. Obwohl die Forschungswelt die Idee bereits in den 1970-er Jahren wieder vergessen hatte, ist Feynman nachträglich zum geistigen „Vater der Nanotechnologie“ erklärt worden.

### Öffentliche Fördergelder für Forschung und Entwicklung von Nanotechnologien<sup>11</sup>:

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008*
<b>Deutschland<sup>1</sup></b>	210	240	258	273	313	330	369	367
<b>USA<sup>2</sup></b>	464	679	863	989	1.200	1.351	1.392	1.445
<b>Japan</b>	465	720	800	800	950	975,0	–	–
<b>Weltweit</b>	1.535	2.367	3.024	4.450	5.300	6.400	6.500	–

<sup>1</sup> In Millionen Euro. Eingerechnet sind Fördergelder der Bundesregierung und von Bundesforschungsinstitutionen (z.B. Helmholtz-Gemeinschaft). <sup>2</sup> In Millionen Dollar. 2007 übertrafen die weltweiten Forschungsinvestitionen von Unternehmen erstmals die von Regierungen. Anders als in der Internet-Wirtschaft haben von Anfang an große Konzerne die Entwicklung von Nanotechnologien geprägt. \* geplante Ausgaben.

### Nanoprodukte auf dem Markt

Nanowerkzeuge wie Rastersondenmikroskope werden bereits seit Jahren von verschiedenen Herstellern als Spezialprodukte für die Forschung und Entwicklung verkauft. Sie werden in der Regel von Fachleuten in Laboren genutzt. Für Verbraucher von Bedeutung sind aber Alltagsprodukte, mit denen sie im Wortsinne in Berührung kommen können. Das derzeit einzige halbwegs umfassende Online-Verzeichnis solcher Nanoprodukte, die bereits auf dem Markt sind, bietet das „Consumer Products Inventory“

des Woodrow Wilson International Center for Scholars in Washington. Es listet derzeit rund 800 Produkte von über 420 Herstellern auf<sup>12</sup> (Stand: August 2008), unterteilt nach den Kategorien „Gesundheit und Fitness“ (darunter fallen auch Textilien und Kosmetika), „Haushalt und Garten“, „Elektronikprodukte“, „Lebensmittel“, „Autozubehör“, „Elektrogeräte“, „Beschichtungen“ und „Produkte für Kinder“ (darunter Spielzeug). Die Kategorie mit den meisten Produkten ist „Gesundheit und Fitness“. Sie verzeichnet zugleich auch das größte Wachstum: Seit dem Start des Verzeichnisses im März 2006 hat sich die Zahl der eingetragenen Produkte mehr fast vervierfacht.

Diese kann man als Nanoprodukte der ersten Generation bezeichnen, da sie fast alle Nanomaterialien enthalten, aber keine Nanosysteme (s. Seite 4-5). Eine Ausnahme sind die Elektronikprodukte (51 Einträge). Sie werden deshalb aufgelistet, weil einige Bauteile ihrer Elektronikkomponenten Strukturgrößen von unter 100 Nanometern haben und damit unter die formale Definition von Nanotechnologien fallen. Das hat zur Folge, dass die Prozessoren von Chipherstellern wie AMD und Intel ebenso von dem Verzeichnis erfasst werden wie das bekannte iPhone von Apple, Computerfestplatten oder Flachbildschirme. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um qualitativ neue Produkte, sondern um solche, die dem seit fast 40 Jahren ungebrochenen Miniaturisierungstrend der Computerindustrie folgen.

In den Produkten mit echten Nanomaterialien werden diese auf verschiedene Arten genutzt. Die Häufigsten sind:

- Kunststoffe, die Nanopartikel, vor allem Kohlenstoff-Nanoröhren, als Zusatz enthalten, um – vom Standpunkt des Herstellers – die Materialeigenschaften zu verbessern. Hierzu zählen etwa Golfbälle, Tennis- und Hockeyschläger oder Fahrradrahmen.
- Flüssigkeiten, die Nanopartikel enthalten (so genannte Suspensionen). Hierzu zählen Kosmetika wie die bereits erwähnten Sonnenschutzcremes, aber auch Getränke, Speiseöle und Reinigungsmittel.
- Textilfasern, die mit speziellen Molekülen beschichtet sind, um Schmutzfilme und Flecken zu verhindern. Hier findet sich auch Outdoor-Kleidung des deutschen Herstellers Jack Wolfskin.
- Silbrenanopartikel, die in Beschichtungen von Haushaltsboxen oder Elektrogeräten sowie in Textilien Mikroben abtöten und damit Schimmel bzw. Schweißgeruch vorbeugen sollen.
- Beschichtungen mit eingebetteten Nanopartikeln, die Fassaden oder Gartenmöbel haltbarer machen und vor Verschleiß oder Verschmutzung schützen sollen.

Mit der „Nanococeuticals Slim Shake Chocolate“ von RBC Life ist immerhin ein essbares Nanoprodukt aufgelistet: Es soll Nanokapseln mit Kokosaroma enthalten. Einen umfassenden Überblick zu existierenden oder geplanten Nanomaterialien in der Lebensmitteltechnik bietet ein im März 2008 veröffentlichte Report von BUND und Friends of the Earth.<sup>13</sup>

So aufschlussreich das Verzeichnis bereits ist: Die Informationen zu den Produkten basieren ausschließlich auf Angaben des jeweiligen Herstellers. Damit lässt sich weder entscheiden, ob wirklich echte Nanomaterialien verwendet werden, noch bedeutet es, dass nicht aufgelistete Produkte keine Nanomaterialien enthalten. Informationen zu toxikologischen Untersuchungen fehlen ebenfalls. Ein deutschsprachiges Nanoproduktverzeichnis wird derzeit von der Universität des Saarlandes aufgebaut<sup>14</sup>. Es enthält aber bislang erst 35 Produkte (Stand: August 2008). Zudem werden in dieses auch Dienstleistungen und Spezialprodukte aufgenommen.

## Exkurs 2: Nano oder nicht Nano? Zur Problematik der Beschreibungen von Nanoprodukten

Im März 2006 schien der Fall eingetreten zu sein, vor dem Nanotech-Kritiker seit 2002 bereits gewarnt hatten: Rund 80 Käufer des Badversiegelungssprays „Magic Nano“, das von der in Bayern ansässigen Kleinmann GmbH vertrieben wurde, klagten nach dem Gebrauch über Atembeschwerden. Waren die Nanopartikel, die laut Kleinmann dem Spray seine besondere Wirkung gaben, daran schuld? Schnell wurde der Vorfall von internationalen Medien aufgegriffen, und das britische Wirtschaftsmagazin *Economist* fragte: „Has all the magic gone?“ – ist der Zauber verfliegen?<sup>15</sup> Einige Wochen später gab das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), das das Mittel untersucht hatte, Entwarnung: Die Atembeschwerden waren nicht auf Nanopartikel, sondern auf Aerosole zurückzuführen. Die eigentlich gute Nachricht hinterließ jedoch einen schalen Beigeschmack: Das BfR hatte keine Nanopartikel in dem Spray finden können<sup>16</sup> – obwohl Kleinmann auf seiner Website ausdrücklich mit deren Vorzügen für das Produkt geworben hatte. Geschäftsführer Bernd Zimmermann räumte später ein, diese Darstellung sei „wissenschaftlich nicht ‚100 Prozent korrekt‘“ gewesen und erklärte: „Da unsere Zielgruppe aber nicht Fachleute sind, sondern Endverbraucher, die meistens zum ersten Mal Nanoprodukte kennenlernen, ist es wichtig, in einer knappen leicht verständlichen Form ‚eine Hochtechnologie in zwei Sekunden einer Hausfrau beizubringen‘.“<sup>17</sup> Die Kleinmann GmbH hat nach dem Zwischenfall „Magic Nano“ vom Markt genommen. Interessanterweise findet sich auf der Firmen-Website heute kein Hinweis mehr darauf, obwohl das Unternehmen nach wie vor „Nanoprodukte“ unter neuen Markennamen anbietet.

Während „Magic Nano“ keine Nanopartikel enthielt, mit diesen aber warb, gibt es vermutlich zahlreiche Produkte auf dem Markt, die Nanopartikel enthalten, ohne dass der Verbraucher davon erfährt. Denn bis heute gibt es keine Kennzeichnungspflicht für Nanomaterialien in Verbraucherprodukten. So hat etwa die Beiersdorf AG, der zahlreiche Kosmetikartikel herstellt, bereits 2004 erklärt, Nanomaterialien zu verwenden, aber „nicht das Label ‚nano‘“, weil man sich davon im Marketing keine Vorteile verspreche.<sup>18</sup> Für die Verbraucher gibt es bislang im Prinzip keine Möglichkeit, herauszufinden, ob in einem Produkt Nanomaterialien enthalten sind oder Nanotechnologien genutzt werden, wenn der Hersteller sie nicht von sich aus deklariert.

## Klassifizierung potenzieller Risiken von Nanotechnologien

---

Da Nanotechnologien keine einheitliche Technologie darstellen, ermöglichen sie nicht nur sehr unterschiedliche Anwendungen, sondern haben dementsprechend auch unterschiedliche Gefährdungspotenziale. In der Risikoforschung wird zudem zwischen Gefährdung und Risiko unterschieden. Der Zusammenhang zwischen beiden besteht in der folgenden Beziehung:  $Risiko = Exposition \times Gefährdung$ . Exposition bedeutet dabei, in welchem Maße, mit welcher Wahrscheinlichkeit Menschen und andere Lebewesen einer Technologie ausgesetzt sind. Das Risiko beispielsweise von Nanopartikeln (deren Gefährdungspotenzial unten näher erläutert wird) hängt also davon ab, wie stark etwa Menschen bei Herstellung, Nutzung oder Entsorgung mit ihnen in Kontakt kommen können. Hierauf aufbauend kann man grob drei Risikoklassen von Nanotechnologien unterscheiden.

### 1. Isolierte Nanotechnologien

Hierbei handelt es sich um Nanotechnologien, in denen ihre Nanokomponente fest in ein technisches System oder eine chemische Trägersubstanz eingebettet und damit von der Umwelt isoliert ist. Dazu zählen Nanowerkzeuge wie die Rastersondenmikroskope oder Nanosensoren, nano-elektronische Systeme wie Computerchips mit Bauteilgrößen unter

100 Nanometern oder die Beschichtungen der chemischen Nanotechnologie. Während die Nanokomponenten für sich genommen ein Gefährdungspotenzial haben könnten, ist die Exposition nicht sehr groß. Das Risiko dieser Nanotechnologien ist daher gering. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus ist es allerdings auch nicht gleich null. Denn während der Herstellung und nach einer Entsorgung könnte es durchaus zu einer Exposition kommen.

## 2. Bioaktive Nanotechnologien

Hierzu müssen alle Nanotechnologien gezählt werden, die mit neuartigen Nanopartikeln arbeiten, die nicht fest eingebunden sind. Diese können vom Menschen im Prinzip eingeatmet, verschluckt oder über die Haut aufgenommen werden. Wegen ihrer geringen Größe können sie im menschlichen Körper eigentlich undurchlässige Gewebebarrieren wie die Blut-Hirn-Schranke passieren und in den Zellen verschiedener Organe biologisch wirksam werden (zu Details s. Exkurs 3). In der Risikodebatte taucht immer wieder das Argument auf, Menschen seien bereits seit Jahrtausenden Nanopartikeln ausgesetzt, nämlich solchen, die bei Verbrennungsprozessen entstehen, vom Lagerfeuer bis zum Dieselruß. Insofern sei das Risiko freier Nanopartikel nichts Neues. Dieses Argument ist aber irrelevant, denn in dieser Risikoklasse geht es in erster Linie um die wachsende Zahl synthetischer Nanopartikel, die so in der Natur nicht vorkommen. Sie werden gerade im Hinblick auf neue Materialeigenschaften entwickelt, die natürlich auftretende Nanopartikel nicht haben.

Zu einer Exposition mit freien Nanopartikeln kann es, erstens, bei ihrer Herstellung in Laboren und Produktionsstätten kommen. Also dort, wo etwa Kohlenstoff-Nanoröhren oder metallische Nanopartikel als Rohstoff erzeugt werden. Diese Gruppe von bioaktiven Nanotechnologien untersucht vor allem die Arbeitsmedizin.

Im zweiten Fall wird eine Exposition zumindest in Kauf genommen. Das ist vor allem bei Kosmetika der Fall, in denen Nanopartikel in einem flüssigen Medium mit der Haut in Kontakt kommen. Hier muss untersucht werden, ob die Partikel durch die oberste schützende Hautschicht in tiefere Schichten vordringen können.

Im dritten Fall schließlich ist eine Exposition beabsichtigt. Hierzu zählen Anwendungen der Nanomedizin: Sie versucht bewusst, neuartige Nano-Objekte als Medikamentenfähren oder Diagnosewerkzeuge im Körper zu nutzen. Beim „Targeting“ werden Nanocontainer mit speziellen Molekülen umhüllt, die nur an Rezeptoren ganz bestimmter Zellen andocken können, um in diese dann den Wirkstoff hineinzuschmuggeln. Indem nur noch krankes Gewebe angesteuert wird, will man die Nebenwirkungen von Medikamenten verringern. Das setzt allerdings voraus, dass die chemischen Wechselwirkungen zwischen und innerhalb von Zellen hinreichend bekannt sind. Auch Nanopartikel in industriell gefertigten Lebensmitteln gehören in diese dritte Gruppe: Einige Hersteller setzen etwa auf Nanocontainer aus Lipiden, die Aroma- oder andere – aus ihrer Sicht gesundheitsfördernde – Zusatzstoffe enthalten. Diese werden im Verdauungstrakt freigesetzt, wenn die Containerhülle aufbricht.

Die letzte Gruppe verdient noch aus einem anderen Grund einen kritischen Blick: Konflikt- und Rüstungsforscher halten es für denkbar, dass sich nanomedizinische Anwendungen für neue biologische Waffen missbrauchen lassen, die Menschen gezielt auf der Zellebene angreifen.<sup>19</sup> Ob an solchen „Nano-B-Waffen“ in Militärlabors bereits gearbeitet wird, ist bislang nicht belegt.

## 3. Disruptive (zerstörerische) Nanotechnologien

Eine eigene Klasse stellen autonom agierende Nanosysteme dar, die man auch als „künstliche Mikroorganismen“ bezeichnen könnte. Sie sind zwar bis heute nicht realisiert,

aber in zwei Varianten bereits theoretisch beschrieben worden. Bei einer handelt es sich um die berüchtigten Nanoroboter, die Eric Drexler erstmals 1986 als Produktionsmaschinen vorgeschlagen hat.<sup>20</sup> Für diese „Assembler“ entwarf Drexler selbst ein GAU-Szenario, das unter dem Begriff „Grey Goo“ bekannt wurde: Um sich zu vervielfältigen, zersetzen außer Kontrolle geratene Assembler weiträumig Biomasse, also Menschen, Tiere und Pflanzen, auf der atomaren Ebene. Biomasse wird also in einen „Grauen Maschinenschleim“ verwandelt, der ganze Landschaften überziehen kann.<sup>21</sup>

Realistischer sind neuartige Bakterien, wie sie derzeit im neuen Forschungszweig der Synthetischen Biologie (manchmal auch Synthetische Genomik genannt) entwickelt werden. Hierbei handelt es sich um Bakterien mit teilweise oder vollständig durchentwickelten Genomen, die so in der Natur nicht vorkommen. Sie sollen als eine Art biologische Nanomaschinen Rohstoffe für die Pharmazie und die Energieerzeugung produzieren. Welche Wirkungen sie auf Mensch und Umwelt haben könnten, lässt sich noch nicht abschätzen. Disruptiv (zerstörerisch) wären sowohl Assembler als auch synthetische Bakterien in dem Sinne, dass ihr Gefährdungspotenzial ein Ausmaß annehmen könnte, das sich nur mit Epidemien durch biologische Krankheitserreger vergleichen lässt und damit das der bio-aktiven Nanotechnologien um ein Vielfaches übertrifft.

### **Nanotoxikologische Erkenntnisse zu Auswirkungen auf Menschen**

---

Bereits Anfang der 1990-er Jahre erkannten einige Toxikologen, dass mit Nanopartikeln eine neue Stoffklasse unterhalb der Ultrafeinstäube entsteht. Nach Aussage des deutschstämmigen US-Toxikologen Günter Oberdörster maßen viele Forscherkollegen Nanopartikeln zunächst aber keine große Bedeutung zu. Erst seit rund zehn Jahren beginnen sich die Erkenntnisse über eine mögliche toxische Wirkung zu mehren. Inzwischen ist die Nanotoxikologie als eigenes Fachgebiet fest etabliert. Zwei Fragen stehen hier im Vordergrund:

- Auf welchen Wegen und wie weit gelangen Nanopartikel in den Körper?
- Welche Wirkung haben sie auf Zellen?

Dabei arbeiten Nanotoxikologen bei Experimenten an lebenden Organismen (in vivo) meist mit Ratten, Mäusen, Fischen und Daphnien, einer sehr kleinen Flusskrebsart. Bei Experimenten an Zellkulturen (in vitro) können sie menschliches Gewebe auch direkt untersuchen.

Günter Oberdörster zeigte 2004 an Ratten, dass eingeatmete Kohlenstoff-Nanoröhren über den Riechkolben ins Riechzentrum des Gehirns wandern können.<sup>22</sup> Allerdings war die Menge der Nanoröhren, die den Versuchstieren direkt in der Nase verabreicht wurde, sehr groß. Aufsehen erregte 2004 eine Studie der US-Toxikologin Eva Oberdörster. Sie setzte Forellenbarsche in einem Aquarium für 48 Stunden Buckyballs aus. Weil die kugelförmigen Kohlenstoffmoleküle eigentlich nicht wasserlöslich sind, wurden sie in Form von wasserlöslichen Clustern verabreicht. Ergebnis war, dass die Buckyballs über die Kiemen in die Gehirne der Fische gelangt waren.<sup>23</sup> Andere Forscher wie der niederländische Toxikologe Paul Borm oder sein deutscher Kollege Harald Krug zeigten, dass eingeatmete Nanopartikel sich im Lungengewebe anreichern. Weitere Studien ergaben, dass Nanopartikel, die in die Blutbahn gelangten, sich in Milz, Leber, Nieren und Knochenmark ablagern können. Es lässt sich als gesichert feststellen, dass Nanopartikel die Gewebearrrieren im Körper passieren können.

Weil Nanopartikel auch in Kosmetika enthalten sind, haben sich zahlreiche Studien, unter

anderem im EU-Projekt „Nanoderm“<sup>24</sup>, mit der Frage beschäftigt, ob sie auch über die Haut in den Körper eindringen können. Untersucht wurden vor allem Zinkoxid- und Titandioxid-Nanoteilchen, weil diese heute in vielen Sonnenschutzcremes enthalten sind, aber auch Buckyballs und Halbleiter-Nanopartikel, so genannte Quantenpunkte, die als Kontrastmittel in der medizinischen Forschung genutzt werden. Diese Untersuchungen werden an abgelösten Hautpartien oder direkt auf der Haut vorgenommen.

Ein weitgehender Konsens unter Toxikologen besteht inzwischen darüber, dass Zinkoxid- und Titandioxid-Nanopartikel zumindest auf gesunder Haut die oberste Schicht der so genannten Epidermis (Oberhaut), das „Stratum corneum“, nicht durchdringen. Allerdings können sie sich in den Haarfollikeln, jenen Hauttaschen, in denen die Haarwurzeln sitzen, sammeln. Dass sie von dort in die zweite Hautschicht, die so genannte Dermis (Lederhaut) eindringen, konnte bisher nicht beobachtet werden. Die viel kleineren Buckyballs und Quantenpunkte hingegen konnten in der Dermis nachgewiesen werden, wenn die Hautpartie über längere Zeit hin und her gebogen wurde.<sup>25</sup> Offen bleibt nach den bisherigen Studien, wie sich Nanopartikel auf verletzten Hautpartien verhalten, etwa Stellen mit Sonnenbrand oder Abschürfungen. Die US-Toxikologin Nancy Monteiro-Riviere berichtete im Juni 2008, dass Quantenpunkte auf Proben abgeschürfter Schweinhaut in tiefere Hautschichten eingedrungen seien.<sup>26</sup>

Zur Frage, welche Wirkung Nanopartikel in Zellen entfalten, gibt es bislang widersprüchliche Ergebnisse. Die US-Chemikerin Vicki Colvin versetzte 2004 bei einem In-Vitro-Versuch Kulturen von Hautzellen mit Buckyballs. Bei einer Konzentration von 20 parts per billion (20 Buckyballs pro Milliarde Lösungsmolekülen) starb die Hälfte der Zellen ab. Das ist nur ein 50.000-stel der tödlichen Konzentration von dreiatomigem Kohlenstoff (C<sub>3</sub>), der auch in Ruß vorkommt. Colvin fand allerdings auch heraus, dass die Buckyballs eine geringere toxische Wirkung haben, wenn man sie mit anderen Molekülen umhüllt.<sup>27</sup> Paul Borm wiederum konnte zeigen, dass die Partikelgröße die Toxizität beeinflusst: Während 20 Nanometer große Titandioxid-Teilchen im Lungengewebe von Ratten Entzündungen hervorriefen, blieb dieser Effekt bei 250 Nanometer großen Partikeln aus.<sup>28</sup>

Ein besonderes Augenmerk haben Toxikologen auf Kohlenstoff-Nanoröhren geworfen. Zum einen, weil sie aufgrund ihrer ungewöhnlichen Eigenschaften für etliche Anwendungen in Nanomedizin, Nanoelektronik und Werkstoffentwicklung vorgesehen sind. Als Beimischung in Kunststoffen werden sie bereits genutzt. Zum anderen haben sie eine ähnliche Form wie Asbestfasern: Bei einem Durchmesser zwischen einem und mehreren Nanometern (für einwandige bzw. mehrwandige, ineinander geschachtelte Nanoröhren) können sie eine Länge von etlichen Mikrometern haben. Der Verdacht, dass Nanoröhren das „nächste Asbest“ sein könnten, kam 2002 auf.<sup>29</sup>

Forscher der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) berichteten 2007 von einer teilweisen toxischen Wirkung auf Bakterienkulturen. Während Bündel von Nanoröhren weniger toxisch als Asbest-Fasern waren, übertrafen Verklumpungen die Wirkung von Asbest. Zudem äußerten sie die Vermutung, dass diese von Verunreinigungen aus dem Herstellungsprozess der Nanoröhren herrühren könnte.<sup>30</sup> Im April 2008 veröffentlichte eine US-Forschungsgruppe in *Nature Nanotechnology* Ergebnisse einer mehrmonatigen In-Vivo-Untersuchung an Mäusen. Diesen hatte man mit anderen Molekülen versehene – „funktionalisierte“ – einwandige Nanoröhren in die Blutbahn injiziert. Fazit der Forscher: „Überlebens-, klinische und Labor-Parameter zeigen keine Anzeichen von Toxizität über 4 Monate.“<sup>31</sup> Zu einem ganz anderen Ergebnis, das im Juli 2008 ebenfalls in *Nature Nanotechnology* vorgestellt wurde, ist hingegen eine Gruppe um den britischen Toxikologen Ken Donaldson gekommen. In deren Versuchsanordnung wurde Mäusen eine 50-Mikrogramm-Dosis von mehrwandigen Nanoröhren in die äußere (ins Körperinnere gerichtete) Gewebeschicht der Bauchhöhle gespritzt. Diese Mesothel genannte Schicht kleidet die gesamte Körperhöhle aus und diente hier als Modell für das Gewebe der

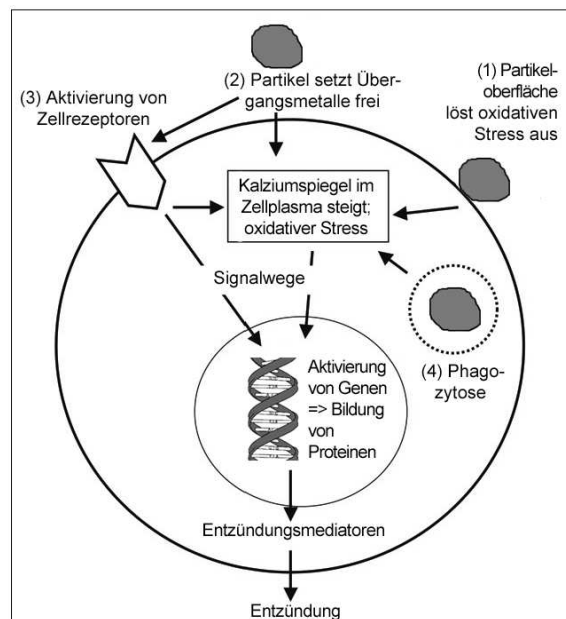
menschlichen Brusthöhle. Fazit dieser Studie: Es kam zu „einem Asbest-artigen, Längen-abhängigen, pathogenen Verhalten. Dies schließt Gewebentzündungen sowie Schädigungen, die als Granulome bekannt sind, ein.“<sup>32</sup> Über die Toxizität von Nanoröhren besteht derzeit unter Forschern kein Konsens.

Festhalten lässt sich Folgendes: Ob Nanopartikel in Zellen toxisch wirken, hängt entscheidend von ihrer Größe und Form ab. Auch Stoffe, die im Mikrometerbereich seit langem als nicht toxisch bekannt sind, können als Nanopartikel Toxizität zeigen. Anders gesagt: Es gibt bislang keine Möglichkeit, von der Nicht-Toxizität bekannter Stoffe zweifelsfrei auf ihre Unbedenklichkeit im Nanoformat zu schließen, ohne ausführliche Untersuchungsreihen vorzunehmen.

### Exkurs 3: Wirkung von Nanopartikeln auf Zellen

Toxikologen sehen vier Wege, auf denen Nanopartikel auf Zellen einwirken könnten:

(1) Die Oberfläche eines Nanoteilchens verursacht „oxidativen Stress“ an der Zelloberfläche: Es bilden sich freie Radikale, also Moleküle, die ein freies Elektron aufweisen und damit ausgesprochen reaktionsfreudig sind. Die Folge: Der Kalziumspiegel innerhalb des Zellplasmas steigt, und im Zellkern kann eine unerwünschte Transkription von Genen in Proteine ausgelöst werden. Diese können ihrerseits eine Entzündung im Gewebe auslösen. (2) Aus dem Nanoteilchen lösen sich Metallatome, die ebenfalls den Kalziumspiegel verändern und eine unerwünschte Gen-Aktivierung auslösen. (3) Sich ablösende Metallatome aktivieren Rezeptormoleküle an der Zelloberfläche, die über ein biochemisches Signal zur Gen-Aktivierung führen. (4) Das Nanoteilchen wird als Ganzes von der Zelle verschluckt – diesen Vorgang nennt man Phagozytose – und gelangt zum Beispiel in die Mitochondrien, die „Kraftwerke“ der Zellen, deren Funktion dann beeinträchtigt ist. Auch hier kann es zu oxidativem Stress kommen.<sup>33</sup>



(Grafik: Niels Boeing; adaptiert nach G. Oberdörster et al., Environmental Health Perspectives, Vol. 113, No. 7, Juli 2005, S. 826)

### Ausbreitung und Toxizität von Nanopartikeln in der Umwelt

Während die Forschung bereits einiges zu Nanopartikeln im menschlichen Organismus sagen kann, sind die Erkenntnisse zu ihrem Verhalten in der Umwelt vergleichsweise spärlich – etwa ob Nanoteilchen in offene Gewässer oder ins Grundwasser gelangen können und welche Wirkung sie auf Bakterien im Erdreich haben. Hier gibt es bislang nur eine Indizienkette.

Wo freie oder schwach gebundene Nanopartikel vorliegen, besteht die Möglichkeit, dass sie zunächst ins Abwasser gelangen. Eine naheliegende Probe aufs Exempel unternahm im März 2008 Forscher der Arizona State University mit Socken, die nach Herstellerangaben „Nanosilber“ enthalten, das geruchsbildende Bakterien abtöten soll. Die bakterizide Wirkung von Silberionen ist bereits seit langem bekannt. In zwei von sechs untersuchten Produkten war nach vier Waschgängen das Nanosilber fast vollständig ausgewaschen.<sup>34</sup> Gelangt es

über das Abwasser in Kläranlagen, könnte es die Mikroben in den Klärbecken beeinträchtigen. Wie groß das Gefährdungspotenzial ist, hängt allerdings davon ab, ob es sich bei dem vom Hersteller deklarierten Nanosilber um einzelne Silberionen handelt oder um echte Silber-Nanoteilchen. Einzelne Silberionen fallen im Abwasser schnell als Salz aus. Silber-Nanopartikel hingegen wirken wie ein Reservoir, von dessen Oberfläche sich ständig neue Silberionen ablösen. Es ist zumindest denkbar, dass sie Kläranlagen erreichen.

Dass Nanopartikel auch Kläranlagen passieren können, zeigte ein im Juni 2008 veröffentlichtes Experiment an der ETH Zürich. Die Wissenschaftler fanden heraus, dass aus einer Testanlage bis zu sechs Gewichtsprozent von Ceriumdioxid-Nanopartikeln, die in den Klärschlamm gegeben worden waren, entwichen. Jährlich werden etliche Tonnen Ceriumdioxid als Schleifmaterial für Computerbauteile und Linsen verwendet. Die Forscher waren nach eigener Aussage von dem Ergebnis überrascht, weil Nanopartikel zur Verklumpung neigen – ein Verhalten, das etwa Kosmetikherstellern immer wieder Kopfzerbrechen bereitet. Angesichts der hohen Testkonzentration von 100 Teilen pro Million (parts per million, ppm) gehen die Schweizer davon aus, dass bei niedrigeren Konzentrationen die Tendenz zur Verklumpung eher noch abnimmt.<sup>35</sup>

Haben Nanopartikel Kläranlagen passiert, gelangen sie in offene Gewässer. Ihr Verhalten dort wird seit längerem vor allem am Georgia Institute of Technology (Georgia Tech) untersucht. Studien mit Kohlenstoff-Nanoröhren und -kugeln (Buckyballs) zeigten, dass diese Cluster bilden, also verklumpen, und sich dann am Grunde eines Wasserbehälters absetzen, wenn das Wasser sehr sauber oder leicht salzhaltig ist. Schwebeteilchen aus organischem Material, wie sie in Flüssen und Seen vorkommen, verzögern das vollständige Absetzen hingegen um einige Wochen.<sup>36</sup> Georgia-Tech-Forscher stellten zudem bereits 2005 fest, dass in Wasser gelöste Buckyball-Cluster ab einer Konzentration von 0,4 Teilen pro Million (ppm) das Wachstum von Bodenmikroben verlangsamen. Ab 4 ppm wird darüberhinaus die Atmung der Mikroben behindert.<sup>37</sup> Zu einem ähnlichen Ergebnis ist eine dänische Forschergruppe gekommen: In einer Arbeit, die im September 2008 veröffentlicht wird, berichten sie, dass sich das Wachstum bestimmter Bakterien in einer Bodenprobe auf ein Drittel bis ein Viertel verlangsamt, wenn Buckyballs hinzugefügt werden.<sup>38</sup>

## **Herausforderungen für Nanotoxikologie und Nanorisikoforschung**

---

Die bisher vorliegenden nanotoxikologischen Daten sind noch lückenhaft und widersprüchlich. Das liegt daran, dass in dem jungen Fachgebiet der Nanotoxikologie bislang keine standardisierten Testverfahren zur Verfügung gestanden haben. Deshalb kommen Forscher immer wieder zu unterschiedlichen Ergebnissen. Ein Beispiel ist die bereits erwähnte Arbeit von Eva Oberdörster, bei der in Forellenbarschen Buckyball-Cluster über die Kiemen ins Gehirn gelangt waren. Oberdörster entdeckte in den Fischhirnen nach 48 Stunden Schädigungen des Gewebes. Der deutsche Toxikologe Harald Krug wiederholte diese Versuche später und wies nach, dass die Schädigungen auf Moleküle des Lösungsmittels zurückzuführen waren, das bei der Reinigung der Kugelmoleküle eingesetzt wird. Bei gründlich gereinigten Buckyball-Proben blieben sie hingegen aus.<sup>39</sup>

Das von mehreren deutschen Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen betriebene Projekt „NanoCare“, dessen Sprecher Krug ist, erarbeitet derzeit solche Standards für Toxizitätstests. Damit sollen die Ergebnisse verschiedener Forschungsgruppen künftig vergleichbar werden. Außerdem werden so genannte High-Throughput-Assays entwickelt. Das sind Testroboter, die mehrere Nanopartikelarten zügig in einem Durchgang untersuchen können. Ähnliche Testsysteme und -standards werden derzeit auch in anderen Ländern konzipiert.

Von einer international einheitlichen Strategie kann allerdings noch keine Rede sein. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit (BAuA), das Umweltbundesamt (UBA) und das Bundesinstitut für Risikoberwertung stellen in ihrer im Dezember 2007 veröffentlichten Forschungsstrategie zu Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanotechnologien<sup>40</sup> fest: „Die Mindestanforderungen für die Dokumentation und Publikation von toxikologischen und ökotoxikologischen Studien sind noch nicht definiert.“ An anderer Stelle heißt es: „Es besteht jedoch gegenwärtig kein Konsens, nach welcher Teststrategie bzw. nach welchen Bewertungsverfahren die gesundheitlichen Risiken der Nanomaterialien erforscht und bewertet werden sollen.“ In der Forschungsstrategie haben die drei Bundesbehörden folgenden Zeitplan aufgestellt:

- 2008 – 2009: Identifizierung der für die Nanotoxikologie relevanten Nanomaterialien;
- ab 2008: Bewertung der Nanomaterialien in der derzeitigen Rechtslage (s. dazu auch folgendes Kapitel);
- 2008 – 2009: Entwicklung von Mindestanforderungen für wissenschaftliche Veröffentlichungen;
- ab 2008: Bewertung und Überprüfung bereits bestehender In-Vitro-Studien, also Studien an Zellkulturen;
- 2009 – 2010: Verstärkte Durchführung von In-Vivo-Studien, also Studien an Versuchstieren, um die Risiken von Nanomaterialien zu bewerten.

Zusätzlich sollen bis spätestens 2010 Verfahren und Bewertungskriterien entwickelt werden, die auf die Problembereiche Arbeitsschutz, Verbraucherschutz und Umweltschutz zugeschnitten sind.

Ob der ehrgeizige Plan aufgeht, ist allerdings offen. Laut Nanocare-Sprecher Harald Krug ist die deutsche Forschungslandschaft auf die anstehende Aufgabe nur unzureichend vorbereitet, denn es gebe hierzulande nicht genug Ökotoxikologen.<sup>41</sup> So ist etwa am Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) erst 2005 im Zuge einer Umstrukturierung die Toxikologie-Abteilung abgewickelt worden.<sup>42</sup> Zudem nimmt sich die Förderung der Risikoforschung seitens der Bundesregierung im Vergleich zum gesamten Nanotech-Fördervolumen bescheiden aus: 2007 belief sie sich auf weniger als fünf Prozent. Die USA gaben bislang sogar nur knapp ein Prozent ihres Nanotech-Budgets für die Risikoforschung aus<sup>43</sup> – eine Gesetzesinitiative im US-Repräsentantenhaus will den Anteil nun auf zehn Prozent erhöhen.

Ein weiteres Problem ist, dass die geplante Ausweitung von In-Vivo-Studien mit den EU-weiten Bemühungen kollidiert, die Zahl der Tierversuche in den kommenden Jahren drastisch zu senken.

## **Der Streit um die gesetzliche Regulierung von Nanomaterialien**

---

Angesichts der Tatsache, dass zu den potenziellen Risiken für Mensch und Umwelt nur lückenhafte Daten vorliegen, drängt sich die Frage auf, warum bereits Hunderte von Nanoprodukten mit diversen neuen Materialien auf dem Markt sind. Die Antwort ist einfach: Nanomaterialien sind bislang im Wesentlichen durch das Raster der gesetzlichen Regelungen gefallen. Denn oft handelt es sich um Stoffe, die in nicht-nanoskaliger Form bereits seit Jahrzehnten, zum Teil erheblich länger – etwa Kohlenstoff in Form von Ruß oder Titandioxid als Weißpigment –, genutzt werden. Von Seiten der Industrie wurde wiederholt

das Argument vorgebracht, man brauche erst Risikonachweise, bevor eine weitergehende Regulierung angemessen sei. Und die Bundesregierung beschied noch im Juli 2006 auf eine Anfrage von Bündnis 90/Die Grünen: „Das bestehende gesetzliche... Regelwerk... bietet flexible Instrumente, um mögliche Risiken nanotechnologischer Entwicklungen zu erkennen und gegebenenfalls darauf zu reagieren. Nanomaterialien sind von diesen Regelwerken grundsätzlich erfasst.“<sup>44</sup>

Zwei Jahre zuvor waren in Großbritannien die Royal Society und die Royal Academy of Engineering in einem viel beachteten Technikfolgenabschätzungsbericht zu Nanotechnologien allerdings schon zu einem anderen Schluss gekommen. „Wir empfehlen, dass Chemikalien in Form von Nanopartikeln und Nanoröhren wie neue Stoffe behandelt werden“, weil Größe und Form ihnen neue Eigenschaften geben. Und: „Wir empfehlen, dass auf der Liste der Inhaltsstoffe von Verbraucherprodukten ausgewiesen wird, dass synthetisches nanoskaliges Material hinzugefügt worden ist.“<sup>45</sup>

Beide Empfehlungen sind bis heute nicht umgesetzt worden. Das im Juli 2007 in Kraft getretene neue EU-Chemikalienrecht REACH sieht eine Registrierungspflicht für Stoffe nur vor, wenn sie in einer Menge von über einer Tonne pro Jahr produziert werden. Erst dann muss ein Dossier an die zuständige Behörde in Helsinki geliefert werden, das Daten zu akuter Toxizität (oral), Hautreizung (in vitro), Augenreizung (in vitro), Haut-Sensibilisierung, Mutagenität (d.h. ob ein Stoff Veränderungen im Erbgut auslöst), akuter Daphnientoxizität, Algentoxizität und biologischer Abbaubarkeit enthält. Das eine Problem daran ist: Von manchen Nanomaterialien werden bislang nur einige Hundert Kilogramm pro Jahr hergestellt – sie fallen durchs Raster. Das andere: Für die Nano-Variante bekannter, in großen Mengen produzierter Stoffe wie Titandioxid genügen alte Daten, weil ihr Nanoformat allein sie nicht als neue Stoffe qualifiziert.

Auch bei nanomedizinischen Materialien, die nicht unter REACH fallen, gibt es eine Lücke. Handelt es sich bei ihrem Wirkprinzip um einen chemischen Effekt, fallen sie unter das Arzneimittelgesetz, das für eine Zulassung toxikologische Daten verlangt. Einige Materialien wie etwa magnetische Nanopartikel, die zur Bekämpfung von Tumoren eingesetzt werden sollen, entfalten ihre Wirkung allerdings aufgrund physikalischer Effekte, in diesem Fall Magnetismus, so dass sie nur als Medizinprodukte eingestuft werden. Für diese werden keine toxikologischen Daten verlangt. Stoffe, die in Lebensmitteln verwendet werden, werden ebenfalls nicht von REACH erfasst, sondern von eigenen EU-Regularien wie der Lebensmittelverordnung, der Novel-Food-Verordnung sowie der Richtlinie zu Nahrungsergänzungsmitteln oder vom deutschen Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetz. Zwar enthalten diese zum Teil so genannte Positivlisten der erlaubten Stoffe. Für diese müssen aber keine neuen toxikologischen Daten erhoben werden, wenn sie in Nanoform genutzt werden.

Qasim Chaudry von der University of York, der die europäische und die britische Rechtslage umfassend auf ihre Relevanz für Nanotechnologien geprüft hat, fasste 2006 das Ergebnis so zusammen: „Die bestehende Regulierung ist ineffektiv.“<sup>46</sup>

## **Instrumente der Selbstkontrolle in Industrie und Forschung**

---

Die Debatte um eine gesetzliche Regulierung von Nanomaterialien hat zwar noch nicht viel bewirkt, zumindest aber erste Ansätze für eine freiwillige Selbstregulierung hervorgebracht.

Eine weiche Variante sind Dialogprojekte zwischen Industrie und Umweltorganisationen wie das CONANO-Projekt. Moderiert von der Schweizer Stiftung Risiko-Dialog, untersuchten der Pharma-Konzern Novartis und der Chemikalienhersteller Ciba Spezialitätenchemie

gemeinsam mit dem Freiburger Öko-Institut und dem Wiener Ökologie-Institut das Risikopotenzial nanoskaliger Trägersysteme für medizinische Wirkstoffe. Zwei Jahre verglichen die Projektpartner verfügbare Daten zu Toxizität, Expositionswegen und Risikowahrnehmung von abbaubaren und nicht-abbaubaren Nanoträgern, konkret: Lipiden und Kohlenstoff-Nanoröhren. Im Abschlussbericht im Dezember 2007 einigten sie sich darauf, „dass das Vorsorgeprinzip (mit besonderem Schwerpunkt auf dem Arbeitsschutz) angewendet werden sollte, bis eine bessere Datenlage aufgebaut ist.“ Novartis erklärte zudem, dass sich der Konzern „zum jetzigen Zeitpunkt primär auf abbaubare nanoskalig aufbereitete Darreichungsformen von Medikamenten konzentriert. Andere Systeme werden erst nach Vorliegen von weiteren Daten evaluiert werden.“<sup>47</sup>

Zu einem vergleichbaren Ergebnis war bereits im Sommer 2007 der US-Chemiekonzern DuPont gekommen. In einer gemeinsam mit der Umweltorganisation Environmental Defense erstellten Fallstudie verkündete DuPont, Kohlenstoff-Nanoröhren würden bis auf weiteres als „Gefahrstoffe“ behandelt. Darüberhinaus haben beide das „Nanorisk Framework“ entwickelt, das anderen Herstellern von Nanomaterialien ein Modell für eine Risikobewertung und eine sichere Praxis anbieten will.<sup>48</sup> In eine ähnliche Richtung gehen Verhaltenskodizes für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanotechnologien. Auf europäischer Ebene hat die EU-Kommission im Februar 2008 einen solchen „Code of Conduct“ vorgelegt, der den Mitgliedstaaten nicht nur allgemeine Grundsätze wie Nachhaltigkeit und das Vorsorgeprinzip nahelegt. Er empfiehlt auch, Nanoforschungsprojekte zu Medizin, Lebensmitteln und Kosmetika ohne vorherige Risikobewertungen zu „vermeiden“.<sup>49</sup> Auf staatlicher Ebene erarbeitet zurzeit die britische Royal Society einen „Responsible NanoCode“<sup>50</sup>, auf Unternehmensebene hat sich der Chemiekonzern BASF einen Verhaltenskodex gegeben.<sup>51</sup>

Schon weiter geht das CENARIOS-Zertifikat, das der TÜV Süd und die Innovationsgesellschaft in St. Gallen 2007 eingeführt haben. Hersteller von Nanopartikeln müssen hierbei ein Risikomanagement für Produktion und Handhabung vorweisen, das den „Stand von Wissenschaft und Technik“ widerspiegelt. Dazu gehört die Erhebung von human- und ökotoxikologischen Daten, die allerdings aufgrund fehlender Standards nur bedingt aussagefähig sein können. Nach einem zweitägigen Audit durch den Zertifizierer TÜV Süd wird, wenn das Risikomanagement den Anforderungen entspricht, das CENARIOS-Zertifikat für ein Jahr vergeben. Derzeit sind zwei Unternehmen zertifiziert (Stand: August 2008).<sup>52</sup>

Ein vierter Ansatz ist das deutsche „forumnano-Gütesiegel“ von forumnano, einem Verband mittelständischer Nanotech-Unternehmen. Kriterium ist nicht nur ein verantwortungsvoller Umgang im Sinne des britischen „Responsible NanoCode“, sondern auch eine wissenschaftliche Überprüfung, dass ein Produkt auf Nanotechnologien basiert und überhaupt Nanotechnologie beinhaltet. Damit sollen Fälle wie „Magic Nano“ (s. Exkurs 2 oben) verhindert werden. Bislang haben zwei Unternehmen das Siegel verliehen bekommen (Stand: August 2008).<sup>53</sup>

Bis aus diesen Ansätzen für eine freiwillige Selbstverpflichtung ein tragfähiger internationaler Standard erwächst, dürften allerdings einige Jahre vergehen. Für Verbraucher sind allenfalls Gütesiegel bedingt hilfreich. Nanotech-kritische Gruppen wie die ETC Group oder Friends of the Earth weisen derartige Selbstverpflichtungen denn auch zurück, weil sie darin den Versuch sehen, eine notwendige staatliche Regulierung von Nanomaterialien zu verhindern.

---

## Risikowahrnehmung und Bürgerforen

---

In der Nanorisiko-Debatte ist von Forschern und Industrievertretern seit Jahren ein Satz immer wieder zu hören: „Wir müssen aus den Fehlern der Gentechnik-Debatte lernen.“ Man möchte verhindern, dass die Risiken die Bewertung einer neuen Technik dominieren und in

einer breiten Ablehnung derselben enden. Eine erste umfangreiche Studie, wie US-Verbraucher Nutzen und Risiken von Nanotechnologien beurteilen, stellte im Dezember 2006 das Fachjournal Nature Nanotechnology vor. Sie kam zu dem von den Autoren nicht erwarteten Ergebnis, dass die 4.542 befragten Verbraucher Nutzen und Risiken immer in Abhängigkeit voneinander bewerten: Die potenziellen Risiken für Gesundheit und Umwelt einer bestimmten Nanotechnologie wogen für die Verbraucher umso schwerer, je geringer der Nutzen wahrgenommen wurde. Ein hoher Nutzen kann demnach Risiken eher vertretbar erscheinen lassen.<sup>54</sup>

Im Juni 2008 veröffentlichte das Bundesinstitut für Risikobewertung eine noch tiefergehende Studie zur Risikowahrnehmung von Nanotechnologien in der Bundesrepublik, die neben einer Befragung auch eine psychologische Grundlagenstudie umfasste<sup>55</sup>. Die grundsätzliche Einstellung zu Nanotechnologien erwies sich als überwiegend positiv. Mehr noch: „In der Verbraucherschaft ist zurzeit keine ausgeprägte Risikowahrnehmung gegenüber der Nanotechnologie gegeben.“ Die Wahrnehmung sei bisher „nicht in den ‚Sog‘ negativer Bewertung wie etwa der Gentechnologie oder der Atomkraft“ geraten. Die Autoren führen dies zum einen darauf zurück, dass bislang das Staunen über die Möglichkeiten dominiert. Das Verständnis von Nanotechnologien bleibt oberflächlich und konzentriert sich auf den Aspekt der Miniaturisierung und auf Alltagserleichterungen vor allem durch neuartige Oberflächenbeschichtungen. Die Akzeptanz nimmt allerdings ab, je näher Nanoprodukte an den Körper heranrücken, vor allem bei nanotechnisch veränderten Lebensmitteln. Bei nanomedizinischen Anwendungen im Körper bleibt sie hoch, weil hier die Hoffnung auf Heilung überwiegt. Solche mit Nanotechnologien verbundene Hoffnungen könnten in Teilen der Bevölkerung sogar zu einem Unwillen führen, sich überhaupt mit Risiken auseinandersetzen, stellten die Autoren fest. Diese Barriere lasse sich überwinden, wenn Risikoinformationen immer für konkrete Nanotechnologien und nicht für ihre Gesamtheit vermittelt würden. Außerdem werde so einer pauschalen Verurteilung vorgebeugt, sollte es zu öffentlichkeitswirksamen Unfällen mit Nanotechnologien kommen.

Viele Nanotech-Akteure ziehen aus der als gescheitert eingeschätzten Gentechnik-Debatte und aus den ersten Befunden zur Risikowahrnehmung der Öffentlichkeit die Konsequenz, diese müsse nun rechtzeitig und umfassender über Nanotechnologien informiert und „aufgeklärt“ werden. Die Technikfolgenabschätzung selbst kann jedoch bei den Experten verbleiben. Angesichts der Tatsache, dass Nanotechnologien wegen ihrer umfassenden Anwendungsmöglichkeiten „systemische Risiken“ bergen – also solche, die zeitlich und räumlich nicht eingrenzbar sind –, halten Techniksoziologen diesen Ansatz für überholt. Die Komplexität, die Unsicherheit und die Ambiguität (Mehrdeutigkeit) von systemischen Risiken „erschweren ein effektives und faires Risikomanagement im Rahmen privatwirtschaftlicher Planung und staatlicher Regulierung durch demokratisch legitimierte Behörden“, stellen Ortwin Renn, Pia-Johanna Schweizer, Marion Dreyer und Andreas Klinke in ihrem 2007 erschienenen Buch „Risiko. Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit“ fest. Um die drei Problemfelder zu bewältigen, halten sie eine Diskurs-gestützte Zusammenarbeit zwischen Experten, Interessengruppen und betroffenen Bürgern für „unabdingbar“. Hierfür stehen inzwischen verschiedene Diskursformen zur Verfügung, die seit den 1970er Jahren entwickelt worden sind. Dazu gehören so genannte Stakeholder-Dialoge, Konsensus-Konferenzen und Bürgerforen.

Die ersten Bürgerforen zu Nanotechnologien zeigen bereits, dass die Risikowahrnehmung deutlich differenzierter ausfällt, wenn Laien in einem mehrwöchigen Prozess über Expertenhearings und Gruppendiskussionen tiefer in das Thema „Nanotechnologien“ einsteigen können. In der Bundesrepublik haben bisher zwei Bürgerforen stattgefunden: die „Verbraucherkonferenz Nanotechnologie“ zu Nanoanwendungen bei Lebensmitteln, Textilien und Kosmetika<sup>56</sup> und das dreiteilige „Jugendforum Nanomedizin“ mit bayrischen Schülern und Studenten<sup>57</sup>. Die Empfehlungen beider Foren decken sich in Teilen mit denen von Nanotech-kritischen Umweltorganisationen. Im abschließenden Votum der

„Verbraucherkonferenz“<sup>58</sup> forderten die Teilnehmer unter anderem, ein „Nano“-Kennzeichen für Lebensmittel einzuführen, Nanozusatzstoffe eigens auf ihre Unbedenklichkeit zu überprüfen sowie Lebenszyklusanalysen für Nanomaterialien vorzunehmen. Für eine Kennzeichnungspflicht von Nanoprodukten und eine intensiviertere Risikoforschung sprach sich auch das „Jugendgutachten Nanomedizin“<sup>59</sup> aus. Anders als das Verbrauchervotum hob es außerdem hervor, dass der Nutzen von Nanotechnologien allen Bevölkerungsschichten zukommen müsse, unabhängig von ökonomischen Bedingungen. Wie diese Empfehlungen letztlich von den Akteuren der Nanotechnologie-Entwicklung umgesetzt werden, bleibt abzuwarten. Eine erkennbare Berücksichtigung würde ihre Glaubwürdigkeit auf jeden Fall stärken.

### **Ansätze zur Gestaltung der weiteren Nanotechnologie-Entwicklung**

---

Die Entwicklung der Nanotechnologien hat bislang drei Phasen durchlaufen. In den 1980-er Jahren erkannte man, dass die neuen Möglichkeiten zur gezielten Manipulation von materiellen Strukturen ein ganzes neues Technikgebiet eröffnen. In den 1990-er Jahren folgte dann eine Verdichtung der „Nanotechnologie“ zu einem umfassenden Forschungs- und Innovationsprogramm, zunächst beschränkt auf die Industrieländer. Begleitet wurde diese Phase von einer medialen Berichterstattung, die gerade auch futuristisch anmutende Anwendungen hervorhob. Die Gründung der US-amerikanischen National Nanotechnology Initiative im Jahre 2000 leitete dann eine Akzentverschiebung ein: weg von Zukunftsvisionen hin zu einer stärkeren Markt- und Produktorientierung. Inzwischen ist die erste Generation von Nanoprodukten – Werkstoffe, Beschichtungen, Textilien und Kosmetika – auf dem Markt, während die zweite Generation komplexerer Anwendungen, vor allem in Nanomedizin und Nanoelektronik, aber auch in der Energietechnik, in den Entwicklungslabors zur Marktreife gebracht wird. Gleichzeitig ist aber sichtbar geworden, dass einige Nanotechnologien Risiken bergen, die noch nicht eindeutig abzuschätzen sind – und zwar andere, weitaus realere Risiken als etwa das hypothetische „Grey Goo“-Szenario (siehe oben), das noch zu Anfang des Jahrzehnts die Gemüter erhitzte.

In den kommenden Jahren werden Nanotechnologien immer mehr Lebensbereiche erfassen. An dieser Schwelle zum Mainstream wird aber auch klar, dass die Unsicherheiten über die Risiken nicht länger hintenan gestellt werden können. Derzeit steht vor allem der Umgang mit Nanomaterialien im Vordergrund. Umwelt- und Bürgerorganisation fordern:

- eine Kennzeichnungspflicht für Nanoprodukte,
- eine drastische Ausweitung nanotoxikologischer Untersuchungen,
- die Erstellung von Lebenszyklusanalysen für Nanoprodukte,
- eine lückenlose gesetzliche Regulierung von Nanomaterialien und –produkten,
- eine Standardisierung von Konzepten und Verfahren sowie
- viel umfassendere Informationsmöglichkeiten für Verbraucher.

Das Vorsorgeprinzip soll auf Nanotechnologien ohne Wenn und Aber angewendet werden.

Diese Auseinandersetzung, die jetzt entschlossen geführt werden muss, sollte aber nicht den Blick auf weitere Unsicherheiten verstellen. Der Wissenschaftsphilosoph und Nanotech-Beobachter Alfred Nordmann stellt kritisch fest: „Man tut so, als ob das einzige, worauf es den Menschen ankäme, die individuelle Sicherheit vor Schadstoffen wäre, die man einatmet

oder eben auch nicht. Diese Verkürzung ist problematisch.“ Neue nanotechnische Anwendungen werden über kurz oder lang auch gesellschaftliche und ökonomische Fragen aufwerfen:

- Werden sie die Entwicklung zu einer Zwei-Klassen-Medizin verschärfen?
- Werden sie die ökonomische Spaltung zwischen wohlhabenden und weniger entwickelten Weltregionen verschärfen?
- Werden sie die Möglichkeiten der Überwachung drastisch ausweiten?
- Werden sie den Trend zu einer „Leistungsoptimierung“ des Menschen verstärken?
- Werden sie neue Waffensysteme hervorbringen?

Die Umweltorganisation ETC Group hat 2003 ein Moratorium, also einen vorübergehenden Forschungsstopp für alle Nanotechnologien gefordert.<sup>60</sup> Das war zu pauschal, da Nanotechnologien nicht nur sehr unterschiedlich sind, sondern auch zahlreiche sinnvolle Anwendungen ermöglichen – gerade im Hinblick auf Klimaschutz, Ressourceneffizienz, Energieversorgung und Medizin. Für einzelne Nanotechnologien hingegen sollte jenseits der gegenwärtigen Debatte über einen sicheren Umgang mit Nanomaterialien die Möglichkeit eines Forschungsstopps sehr wohl in Betracht gezogen werden. Solche weitreichenden Entscheidungen müssten aber klar legitimiert sein und könnten nur bei einer internationalen Umsetzung wirksam werden. Die Debatte über die Nanotechnologien hat noch lange nicht ihren Höhepunkt erreicht.

## Weiterführende Literatur, Reports und Online-Informationen

---

### Literatur

Boeing, Niels: Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts, Rowohlt Science 2006, 192 S. Populärwissenschaftliche Einführung in die Nanotechnologien.

Grüne, Matthias u.a.: Nanotechnologie. Grundlagen und Anwendungen, Fraunhofer Irb Verlag 2005, 284 S. Vertiefender Überblick über Nanomaterialien und Produktanwendungen.

Nordmann, Schwarz, Schummer (Hg.): Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven, Akademische Verlagsgesellschaft 2006, 442 S. Vertiefende Betrachtung zur Debatte über Nanotechnologien.

### Reports

BAuA/BfR/UBA: Nanotechnologie. Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanotechnologien – Forschungsstrategie, Dezember 2007. ([PDF](#))

BfR: Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung. Repräsentativerhebung und morphologisch-psychologische Grundlagenstudie, Juni 2008. ([PDF](#))

BUND/Friends of the Earth: Aus dem Labor auf dem Teller. Die Nutzung der Nanotechnologie im Lebensmittelsektor, März 2008. ([PDF](#))

BUND: Für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Nanotechnologie. Eine erste Diskussionsgrundlage am Beispiel der Nanopartikel, Mai 2007. ([PDF](#))

BMBF: Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, November 2006. Nanotech-Strategie der Bundesregierung. ([PDF](#))

VDI Technologiezentrum: Nanotechnologien für den Umweltschutz, Dezember 2007. ([PDF](#))

### Online-Informationen

TechPortal Nanotechnologie, <http://www.nanonet.de>.  
Informationsseite des VDI Technologiezentrum, u.a. mit Nachrichten und Publikationen.

Nanotechnologie-Seite des BMBF, <http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>.

Consumer Products Inventory, <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>.  
Derzeit umfangreichstes Online-Verzeichnis von Verbraucher-Nanoprodukten, gepflegt vom Project on Emerging Nanotechnologies des Woodrow Wilson Center in Washington.

Nanotechweb, <http://www.nanotechweb.org>.  
Informationsseite des britischen Institute of Physics, mit Forschungsberichten und Fachartikeln (englisch).

Nanowerk, <http://www.nanowerk.com>.  
Empfehlenswerte Nachrichtenseite zu allen Aspekten von Nanotechnologien (englisch).

Soft Machines, <http://www.softmachines.org>.  
Empfehlenswertes Blog des britischen Physikers Richard Jones zu Entwicklung und Debatte der Nanotechnologien (englisch).

## Glossar

---

**Assembler:** hypothetische Nanomaschine, die Atome und Moleküle in beliebiger Struktur zusammenbauen kann, 1986 von Eric Drexler eingeführt.

**Buckyball, Buckminsterfulleren:** 1986 entdeckte Art von Kohlenstoffmolekülen, die kugelförmig oder ellipsoid sind. Die Kohlenstoffatome sind darin zu Fünf- und Sechsecken angeordnet.

**Cluster:** Materiehaufen, die größer als Moleküle sind, aber noch keine Festkörpereigenschaften haben.

**Exposition:** in Toxikologie und Risikoforschung das Ausmaß, in dem der menschliche Körper Umwelteinflüssen, Stäuben oder anderen Substanzen ausgesetzt ist.

**Genom:** Gesamtheit aller Gene.

**In vitro:** Bezeichnung für Untersuchungen, die außerhalb eines lebenden Organismus gemacht werden. Lat. „in vitro“ bedeutet „im Glas“ und meint die Petrischalen, in denen sich etwa zu untersuchende Zellkulturen befinden.

**In vivo:** Bezeichnung für Untersuchungen, die am oder im lebenden Organismus gemacht werden. Lat. „in vivo“ bedeutet „im Lebendigen“.

**Kohlenstoff-Nanoröhren:** Kohlenstoffmolekül, das die Form einer langen Röhre hat. Der Durchmesser beträgt einen bis mehrere Nanometer. In mehrwandigen Nanotubes sind mehrere Röhren ineinander geschachtelt.

**Molekül:** dauerhafte, geordnete Verbindung von mindestens zwei Atomen. Bei sehr vielen Atomen wie in Proteinen spricht man von Makromolekülen. Manche Stoffe bilden keine Makromoleküle aus, sondern Cluster.

**Nanomaterial:** Stoff, der mindestens in einer Raumdimension eine Strukturgröße unter 100 Nanometern hat.

**Nanometer:** ein Milliardstel Meter oder auch:  $10^{-9}$  Meter, ein Millionstel Millimeter.

**Nanopartikel, Nanoteilchen:** kleinste Festkörper, die aus einigen Hundert bis mehreren Zehntausend Atomen bestehen, keine Cluster mehr sind und in der Regel eine Ausdehnung zwischen 10 und 50 Nanometern haben.

**Nanotoxikologie:** Zweig der Toxikologie, der sich mit der Toxizität von Nanomaterialien befasst.

**Nanotube:** siehe Kohlenstoff-Nanoröhre.

**Quantenpunkt:** Festkörper von wenigen Nanometern Ausdehnung. Quantenpunkte können freie Partikel oder in Halbleiter eingebettete Inseln sein, die sich wie künstliche Atome verhalten.

**Quantenmechanik:** physikalische Theorie über den Aufbau der Materie.

**Rastertunnelmikroskop:** Mikroskop, bei dem das atomare Abbild einer elektrisch leitenden Oberfläche aus dem Tunnelstrom (s. Exkurs 1 Seite 4) zwischen Mikroskopspitze und Oberflächenatom errechnet wird.

**Ribosom:** molekulare „Fabrik“ in einer Zelle, in der aus Aminosäuren Eiweißmoleküle (Proteine) zusammengebaut werden. Ein Ribosom hat einen Durchmesser von etwa 20 Nanometern.

**Targeting:** Verfahren aus der Nanomedizin. Hierbei werden Medikamentencontainer an der Oberfläche mit Molekülen versehen, die nur an Moleküle auf der Oberfläche bestimmter Gewebezellen andocken können. Auf diese Weise soll das Medikament direkt ans Ziel (engl.: „target“), etwa einen Tumor, gebracht werden.

**Titandioxid:** Halbleiter, der in Form von Nanopartikeln vor allem als UV-Absorber in Sonnencremes oder in neuen Solarzellen eingesetzt wird.

**Toxikologie:** Lehre von den Giftstoffen (Toxinen), den Vergiftungen und der Behandlung von Vergiftungen.

## Quellenverweise

---

<sup>1</sup> Zitiert aus Boeing, Niels: Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts, Rowohlt Science 2006, S. 7

<sup>2</sup> The Project on Emerging Nanotechnologies: New Nanotech Products Hitting the Market at the Rate of 3-4 Per Week, 24.4.2008, <http://www.nanotechproject.org/news/archive/6697/>

<sup>3</sup> The Project on Emerging Nanotechnologies: Poll Reveals Public Awareness of Nanotech Stuck at Low Level, 25.9.2007, [http://www.nanotechproject.org/news/archive/poll\\_reveals\\_public\\_awareness\\_nanotech/](http://www.nanotechproject.org/news/archive/poll_reveals_public_awareness_nanotech/)

<sup>4</sup> Which?: Consumers unaware of nano-revolution, 20.12.2007, [http://www.which.co.uk/press/press\\_topics/campaign\\_news/other\\_issues/nanotechnology\\_201207\\_571\\_128032.jsp](http://www.which.co.uk/press/press_topics/campaign_news/other_issues/nanotechnology_201207_571_128032.jsp)

<sup>5</sup> BfR: Verbraucher stehen der Entwicklung der Nanotechnologie überwiegend positiv gegenüber, 19.12.2007, <http://www.bfr.bund.de/cd/10557>

<sup>6</sup> BMBF: Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, November 2006, S. 11 (PDF)

<sup>7</sup> Roco, Mihail & Bainbridge, William: Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, 2001, S. 11 (PDF)

<sup>8</sup> Boeing, Niels: „Nanotechnologie ist ein gesellschaftliches Konstrukt“, Interview mit Alfred Nordmann, nano.bitfaction.com (PDF der Langfassung), Kurzfassung erschienen in der ZEIT, 15.11.2007, <http://www.zeit.de/2007/47/P-Nordmann-Interview?page=all>

<sup>9</sup> Boeing, Niels: „Die Wahrheit über die Nanotechnologie“, Technology Review, Mai 2004 (PDF)

<sup>10</sup> Wolfe, Josh: „Nano Firms See Green in Cleantech“, Forbes.com, 21.8.2007, [http://www.forbes.com/guruinsights/2007/08/20/nanotech-cleantech-ge-pf-guru-in\\_jw\\_0820advisersoapbox\\_inl.html](http://www.forbes.com/guruinsights/2007/08/20/nanotech-cleantech-ge-pf-guru-in_jw_0820advisersoapbox_inl.html)

<sup>11</sup> Quellen: für Deutschland VDI TZ (2001 – 2004) und BMBF (2005 – 2008); für die USA National Nanotechnology Initiative und Plunkett Research; für Japan Mihail Roco (2001 – 2003), ?(2004), Plunkett Research (2005), ? (2006); für weltweite Gesamtsumme Mihail Roco (2001 – 2003)

<sup>12</sup> The Project on Emerging Nanotechnologies: Consumer Products Inventory, <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>

<sup>13</sup> BUND/Friends of the Earth: Aus dem Labor auf dem Teller. Die Nutzung der Nanotechnologie im Lebensmittelsektor, März 2008. (PDF)

<sup>14</sup> Universität des Saarlandes: Nanodata Produktverzeichnis, <http://www.nanodaten.de/index.php?lang=de&plD=11&cat=-1&aID=>

<sup>15</sup> „Has all the magic gone?“, Economist, 12.4.2006, [http://www.economist.com/science/displaystory.cfm?story\\_id=6795430](http://www.economist.com/science/displaystory.cfm?story_id=6795430) (Abstract, Volltext nur für Abonnenten)

<sup>16</sup> BfR: Nanopartikel waren nicht die Ursache für Gesundheitsprobleme durch Versiegelungssprays!, 26.5.2006, <http://www.bfr.bund.de/cd/7839>

<sup>17</sup> Boeing, Niels: „Wir arbeiten an der intensiven Aufklärung der Verbraucher“ – Interview mit Bernd Zimmermann, Kleinmann GmbH, Technology Review online, 18.7.2006, <http://www.heise.de/tr/Wir-arbeiten-an-der-intensiven-Aufklaerung-der-Verbraucher--/artikel/75588>

<sup>18</sup> Boeing, Niels: „Die Wahrheit über die Nanotechnologie“, Technology Review, Mai 2004 (PDF)

<sup>19</sup> Boeing, Niels: „Warnung vor dem Rüstungswettlauf“, Technology Review online, 21.2.2006, <http://www.heise.de/tr/suche/ergebnis/?rm=result;words=Jürgen%20Altmann;q=jürgen%20altmann;url=/tr/artikel/69870/>

<sup>20</sup> Drexler, Eric: Engines of Creation, 1986, Online-Ausgabe, [http://www.e-drexler.com/d/06/00/EOC/EOC\\_Table\\_of\\_Contents.html](http://www.e-drexler.com/d/06/00/EOC/EOC_Table_of_Contents.html)

- <sup>21</sup> Eine Abschätzung mit Zahlen bietet Freitas, Robert: Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations, April 2000, <http://www.foresight.org/nano/Ecophagy.html>
- <sup>22</sup> „Rochester Expert Warns of Toxicology in New Wave of Science“, ScienceDaily, 7.4.2004, <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/04/040407081930.htm>
- <sup>23</sup> Oberdörster, Eva: „Manufactured Nanomaterials (Fullerenes, C60) Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass“, Environmental Health Perspectives Vol. 112 No. 10, Juli 2004
- <sup>24</sup> Nanoderm, Projektseite: <http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/>
- <sup>25</sup> Hyun, Lee et al.: „Biodistribution of Quantum Dot Nanoparticles in Perfused Skin: Evidence of Coating Dependency and Periodicity in Arterial Extraction“, Nano Letters Vol. 7 No. 9, AOP 8.9.2007
- <sup>26</sup> Zhang, L. W. & Monteiro-Riviere, Nancy: „Assessment of Quantum Dot Penetration into Intact, Tape-Stripped, Abraded and Flexed Rat Skin“, Skin Pharmacology and Physiology, AOP 3.6.2008
- <sup>27</sup> Kalaugher, Liz: „Buckyball toxicity linked to surface modification“, Nanotechweb.org, 28.9.2004, <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/20355>
- <sup>28</sup> Persönliche Kommunikation mit Paul Borm, sowie: Borm, Paul: „Particle Toxicology: From Coal Mining to Nanotechnology“, Inhalation Toxicology, 2002
- <sup>29</sup> Brown, Doug: „U.S. Regulators Want to Know Whether Nanotech Can Pollute“, SmallTimes, 8.3.2002, [http://www.smalltimes.com/articles/article\\_display.cfm?ARTICLE\\_ID=267713&p=109](http://www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=267713&p=109)
- <sup>30</sup> Peter Wick et al.: „The degree and kind of agglomeration affect carbon nanotube cytotoxicity“, Toxicology Letters, No. 168 (2007), S. 121–131
- <sup>31</sup> NatureNano april 2008 zu CNT-tox
- <sup>32</sup> Poland, Craig et al.: „Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study“, Nature Nanotechnology Vol. 3 No. 7, Juli 2008, S. 423 - 428
- <sup>33</sup> Oberdörster, Günter et al.: „Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles“, Environmental Health Perspectives Vol. 113 No. 7, Juli 2005
- <sup>34</sup> McKenna, Phil: „Smelly sock treatment leaks silver nanoparticles“, NewScientistTech, 7.4.2008, <http://technology.newscientist.com/article/dn13602-smelly-sock-treatment-leaks-silver-nanoparticles.html>
- <sup>35</sup> „Unfreiwillige bakterielle Helfer“, ETH Life, 15.7.2008, [http://www.ethlife.ethz.ch/archive\\_articles/080715-nano\\_in\\_klaeranlage/index](http://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/080715-nano_in_klaeranlage/index)
- <sup>36</sup> Hyung, Hoon et al., "Natural Organic Matter Stabilizes Carbon Nanotubes in the Aqueous Phase", Environmental Science and Technology Vol. 41 No. 1, S. 179 - 184, Januar 2007
- <sup>37</sup> Fortner, J. D. et al.: „C60 in Water: Nanocrystal Formation and Microbial Response“, Environmental Science and Technology, Juni 2005
- <sup>38</sup> Nach Informationen des Woodrow Wilson Center; Abstract des Papers der dänischen Gruppe unter <http://www.setajournals.org/perlserv/?request=get-abstract&doi=10.1897%2F07-375.1>
- <sup>39</sup> Persönliche Kommunikation mit Harald Krug
- <sup>40</sup> BAuA/BfR/UBA: Nanotechnologie. Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanotechnologien – Forschungsstrategie, Dezember 2007. (PDF)
- <sup>41</sup> Persönliche Kommunikation mit Harald Krug
- <sup>42</sup> Persönliche Kommunikation mit Christian Steffen, Leiter klinische Prüfungen am Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte
- <sup>43</sup> Wilson Center PEN zu risikoausgaben der USA
- <sup>44</sup> Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage von Bündnis 90/Die Grünen durch Staatssekretär Michael Thielen am 28.7.2006, Faksimile liegt dem Autor vor.
- <sup>45</sup> Royal Society & Royal Academy of Engineering: Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and challenges, Juli 2004, <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>

<sup>46</sup> In einem Vortrag auf der NanoRegulation in St. Gallen, 13.9.2006

<sup>47</sup> CONANO-Dialogprojekt,

<http://www.risiko-dialog.ch/Themen/Nanotechnologie/dialoge/296?itemid=76>

<sup>48</sup> Nanorisk Framework, <http://www.nanoriskframework.com>

<sup>49</sup> EU-Kommission, Verhaltenskodex für verantwortungsvolle Forschung im Bereich der Nanowissenschaften und -technologien (PDF)

<sup>50</sup> Responsible NanoCode, <http://www.responsiblenanocode.org/>

<sup>51</sup> BASF Verhaltenskodex Nanotechnologie,

[http://www.corporate.basf.com/de/sustainability/dialog/politik/nanotechnologie/verhaltenskodex.htm?id=HkXqsCfIYbcp\\*xR](http://www.corporate.basf.com/de/sustainability/dialog/politik/nanotechnologie/verhaltenskodex.htm?id=HkXqsCfIYbcp*xR)

<sup>52</sup> Informationsseite des TÜV SÜD zu CENARIOS unter

[http://www.tuev-sued.de/technische\\_anlagen/risikomanagement/nanotechnologie](http://www.tuev-sued.de/technische_anlagen/risikomanagement/nanotechnologie)

<sup>53</sup> Informationsmaterial zum forumnano Gütesiegel (PDF)

<sup>54</sup> Currall, Steven et al.: „What drives public acceptance in nanotechnology?“, Nature Nanotechnology Vol. 1 No. 3, Dezember 2006, S. 153 - 155

<sup>55</sup> BfR: Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung. Repräsentativerhebung und morphologisch-psychologische Grundlagenstudie, Juni 2008. (PDF)

<sup>56</sup> Informationsseite des BfR zur Verbraucherkonferenz Nanotechnologie unter <http://www.bfr.bund.de/cd/8551>

<sup>57</sup> <http://www.nano-jugend-dialog.de/>

<sup>58</sup> Verbrauchervotum zur Nanotechnologie, November 2006 (PDF)

<sup>59</sup> Jugendgutachten Nanomedizin, Juni 2008,

<http://www.jugendgutachten-nanomedizin.de.tl>

<sup>60</sup> ETC Group: Nanotech Product Recall Underscores Need for Nanotech Moratorium: Is the Magic Gone?, 7.4.2006, (PDF).