

Riskante Zwerge

Von Niels Boeing und Christoph Niemann (Illustrationen)

Beinahe unbemerkt erobern Nano-Produkte unseren Alltag. Doch mögliche Gefahren der Technologie des Winzigen sind noch immer viel zu wenig erforscht.

Still ist es geworden um die große Wundertüte „Nanotechnologie“. Noch vor wenigen Jahren wurde uns ein Füllhorn spektakulärer Visionen präsentiert: Nanomedizinische Roboter würden bald Körperzellen reparieren, Nanoelektronik intelligente Computer ermöglichen, Nanodatenträger ganze Filmbibliotheken auf die Größe einer Münze schrumpfen lassen. Garniert wurde das mit bizarren Ideen wie dem Weltraumaufzug, dessen Kabel aus Kohlenstoffnanoröhren bestehen¹, oder dem Nano-Autolack, der je nach Laune des Fahrers die Farbe wechselt. Auch wenn Tausende von Forschern an solchen Visionen weiterarbeiten – über das Versuchsstadium sind sie bislang nicht hinausgekommen.

War „nano“ also nur ein weiterer Hype in einer schnelllebigen Zeit? Nein: Unter dem Radar der großen Erwartungen sind die winzigen Teilchen bereits im Alltag angekommen. Rund 580 Produkte zählt die Datenbank des Woodrow Wilson Center in Washington derzeit. Wer einen Wanderurlaub plant, kann zu einer „Jack Wolfskin“-Jacke greifen, die dank Nano-Tex-Fasern schmutzabweisend sein soll. Tennisspielern steht eine ganze Palette von Schlägern zur Verfügung, deren Rahmen mit Kohlenstoff-Nanoröhren verstärkt sind. Und mit der „Nanococeuticals Slim Shake Chocolate“ hat die US-Firma RBC Life sogar ein essbares Nano-Produkt im Angebot, das winzige Kügelchen mit Kokosaroma enthält.

Die Datenbank, die bisher umfangreichste zum Thema, soll interessierten Verbrauchern einen Überblick verschaffen, wo bereits überall die hochgelobte Technologie der Moleküle und Kleinstteilchen drinsteckt. Doch zugleich wirft sie viele Fragen auf: Was macht eigentlich all diese Produkte zu Nano-Produkten? Was ist über ihre Risiken bekannt? Und worum geht es den Verfechtern der Nanotechnik – welche Interessen sind da im Spiel?

Was ist Nanotechnik?

Trotz aller Hochglanzbroschüren und Medienberichte ist vielen Menschen bislang nicht klar, was Nanotechnik eigentlich ist. 70 Prozent der US-Bürger verbinden nach einer Umfrage des Wilson-Centers wenig oder gar nichts mit dem Begriff, in Großbritannien und Deutschland wurden ähnliche Zahlen ermittelt. „Die Anstrengungen, die Öffentlichkeit zu informieren, haben mit dem Wachstum dieses neuen Technikgebiets nicht Schritt gehalten“, sagt David Rejeski, der Leiter des Wilson-Centers. Das allgemeine Verständnis sei „enttäuschend niedrig“.

Die Nanotech-Gemeinde ist daran nicht ganz unschuldig. Mit ihrer Umschreibung der Nanotechnologie als „the science of the small“ – der Wissenschaft vom Kleinen – hat sie den Eindruck erweckt, alle Beteiligten würden

am selben technischen Gegenstand arbeiten. Dabei ist die international akzeptierte Definition nichts weiter als eine Größenangabe: Nanotechnologie umfasst danach die Manipulation materieller Strukturen, die kleiner als 100 Nanometer sind (ein Nanometer = ein Millionstel Millimeter).

Tatsächlich handelt es sich eher um einen „Megatrend“, wie der Zukunftsforscher John Naisbitt es nennen würde, als um eine zusammenhängende Technologie. Im Laufe des 20. Jahrhunderts haben Forscher verschiedener Disziplinen – zunächst noch unabhängig voneinander – gelernt, Bio- und andere Moleküle, Kleinstteilchen und materielle Strukturen auf neue Arten zu nutzen. Was das bedeutet, beschreibt der Physiknobelpreisträger Gerd Binnig so: „Der Mensch ist in diesem Moment Zeitzeuge und Gestalter einer zweiten Genesis, einer grundlegend neuen Evolution von materiellen Strukturen, die wir heute noch nicht einmal richtig benennen können.“

Die Voraussetzung dafür sind neue Verfahren und Werkzeuge wie das von Binnig im Jahr 1981 mit erfundene Rastertunnelmikroskop. Erst sie ermöglichten es den Wissenschaftlern, Atome und Moleküle genauer zu untersuchen, zu bearbeiten und gezielt Effekte zu erzeugen, die sie zwar seit Langem kannten, aber nicht technisch nutzen konnten (siehe Kasten).

Zur ersten Generation der dadurch möglich gewordenen Nano-Anwendungen – jene Produkte, die die Datenbank des Wilson-Centers auflistet – gehören vor allem Materialien, die spezielle Moleküle und Nanoteilchen enthalten. Sie verleihen zum Beispiel Textilien und Kosmetikprodukten neue Eigenschaften, machen Autolacke oder Brillengläser kratzfest oder finden sich in Computer-Festplatten: Sandwiches aus wenige Nanometer dicken Metallschichten erzeugen einen physikalischen Nanoeffekt, der ihre Speicherkapazität im Vergleich zu früheren Geräten drastisch erhöht. Für diese Entdeckung wurde übrigens der Physiknobelpreis 2007 an den Deutschen Peter Grünberg verliehen.

Die zweite Generation – erste Produkte werden in den kommenden Jahren erwartet – nutzt verstärkt quantenphysikalische Effekte und Stoffeigenschaften, macht sich also Wechselwirkungen zwischen kleinsten Teilchen zunutze. Hierzu werden Materialien für hochauflösende, energiesparende Bildschirme gezählt, für hauchdünne Solarzellen, nanomedizinische Therapien und molekulare Computerspeicher. Die dritte Generation hingegen – zum Beispiel einfache „Nanomaschinen“ – dürfte noch einige Zeit auf sich warten lassen.

So nützlich manche dieser Anwendungen auch sein mögen: Die Erfahrung lehrt, dass viele neue Technologien einen Haken haben – der oft zu spät erkannt wird.

Sind Nanopartikel toxisch?

Als erste schlug vor fünf Jahren kanadische ETC Group Alarm. „No small matter!“ – keine Kleinigkeit seien Nanoteilchen, denn sie könnten in Zellen eindringen und sich in Organen sammeln. Winzige Partikel aus Kohlenstoff, Gold, Metalloxiden, Lipiden oder anderen Stoffen, die aus wenigen bis zu einigen Tausend Atomen oder Molekülen bestehen, sind ein wichtiger Bestandteil zahlreicher Nano-Produkte der ersten Generation.

Während viele Forscher die Befürchtungen der ETC Group zunächst als übertrieben zurückwiesen, fanden

Toxikologen erste Hinweise auf gesundheitsschädigende Effekte. So zeigten Laborversuche an Ratten, dass eingeatmete Kohlenstoffnanoröhren über den Riechnerv ins Gehirn wandern. Andere Untersuchungen ergaben, dass Nanopartikel in Zellen sogenannten oxidativen Stress auslösen, der zu Entzündungsreaktionen führen kann. „Dieselben Eigenschaften, die Nanopartikel so attraktiv für Anwendungen in Nanomedizin und anderen industriellen Prozessen machen, könnten sich als schädlich herausstellen, wenn Nanopartikel mit Zellen wechselwirken“, konstatierte der Toxikologe Günter Oberdörster.

Schnell entzündete sich eine heftige Debatte, welche Konsequenzen aus den wenigen Befunden zu ziehen seien. Umweltorganisationen forderten eine strenge Regulierung sämtlicher Nanomaterialien, da sie als potenziell toxisch einzustufen seien. Industrie und Forschung erwiderten, die bestehenden Gesetze reichten aus.

Wie groß das Risikopotenzial ist, ist derzeit völlig ungewiss – einig sind sich die Experten nur darüber, dass man zu wenig weiß. „Wenn Sie fünf Teams zum Beispiel die Toxizität von Kohlenstoff-Nanoröhren untersuchen lassen, und die kommen zu fünf verschiedenen Ergebnissen, ist das schmerzlich und führt zu Ungewissheit“, sagt die US-Chemikerin Vicki Colvin von der Rice University in Houston. „Das Problem ist, dass wir zurzeit deutlich mehr als fünf Meinungen zur Nanotube-Toxizität haben.“

Im Jahr 2004 erregte eine Studie der US-Toxikologin Eva Oberdörster großes Aufsehen, die Forellenbarsche in einem Aquarium sogenannten Fullerenen ausgesetzt hatte, kugelförmigen Kohlenstoffmolekülen. Ihr Befund: Nach 48 Stunden hatten die sich in den Gehirnen der Fische angereichert und Hirnzellen geschädigt. Doch inzwischen hat sich herausgestellt, dass in Eva Oberdörsters berühmtem Versuch von 2004 Lösungsmittelmoleküle die Hirnzellen der Versuchsfische schädigten – und nicht die getesteten Nanokugeln. „Wir haben diese Versuche mit Daphnien, also sehr kleinen Krebsen, wiederholt und klar nachgewiesen, dass die Peroxide des Lösungsmittels die Schädigung auslösen“, sagt der deutsche Toxikologe Harald Krug, der an der Eidgenössischen Materialprüfanstalt im Schweizer St. Gallen forscht. „Pure Fullerene haben diesen Effekt nicht.“ Bei Kohlenstoff-Nanoröhren wiederum zeigte sich, dass Verunreinigungen aus den Katalysatoren, die zu ihrer Herstellung nötig sind, einen erheblichen Einfluss auf ihre mitunter zelltoxische Wirkung haben.

Kein Grund zur Entwarnung, findet Krug: Noch immer gebe es zu wenige aussagekräftige Studien – von systematischen Untersuchungsreihen ganz zu schweigen. Vor allem in der Eigenschaft von Nanopartikeln, tief in die Lunge einzudringen, sieht er eine potenzielle Gefahr, denn dort könnten sie sich anreichern und Erkrankungen hervorrufen. „Wir müssen aufpassen, dass es etwa an Arbeitsplätzen keine erhöhte Exposition gibt“, sagt er. Noch schlechter als Gesundheitsgefahren seien mögliche ökologische Auswirkungen untersucht. „Über die Akkumulation von Nanopartikeln und mögliche Umweltschädigungen gibt es kaum Daten und gar keine Projekte.“

Immerhin: Um Licht ins Dunkel der möglichen Nano-Gefahren zu bringen und Risikostudien besser vergleichbar zu machen, hat inzwischen das Projekt „NanoCare“ – an dem mehrere deutsche Universitäten, Forschungsinstitute und Unternehmen beteiligt sind – Standards für Toxizitätstests erarbeitet. Diese regeln zum Beispiel, wie die Wissenschaftler ihre zu untersuchenden Nanoteilchen vorbereiten müssen, bevor sie sie den Versuchstieren verabreichen. „Ab jetzt können relevante Daten produziert werden“, kündigt Harald Krug an, der NanoCare leitet.

Allerdings ist die Forschergemeinschaft auf die gewaltige Aufgabe nur unzureichend vorbereitet. „In Deutschland fehlt die Manpower“, kritisiert Krug, der deshalb vom Forschungszentrum Karlsruhe in die Schweiz wechselte. Dass die deutsche Toxikologie schwach aufgestellt ist, bestätigt Christian Steffen, Leiter für klinische Prüfungen am Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte. Dort gebe es seit 2005 keine eigenständige Toxikologie-Abteilung mehr. „Am Ende gibt es keinen mehr, der etwas davon versteht“, sagt Steffen.

In der Industrie scheint zumindest die Erkenntnis zu wachsen, dass sie die Befürchtungen Ernst nehmen muss und es mit unverbindlichen Beteuerungen nicht getan ist. So ließen der Pharma-Konzern Novartis und der Chemikalienhersteller Ciba das Risikopotenzial von Nano-Trägersystemen – Lipiden und Kohlenstoffnanoröhren – für medizinische Wirkstoffe untersuchen. Schließlich einigte man sich mit dem an der Studie beteiligten Freiburger Öko-Institut auf die Formel, dass vor allem in Hinblick auf den Arbeitsschutz das „Vorsorgeprinzip“ angewendet werden sollte, „bis eine bessere Datenlage aufgebaut ist.“ Novartis erklärte darüber hinaus, der Konzern werde sich vorerst auf „abbaubare Nano-Darreichungsformen“ von Medikamenten konzentrieren.

Der Deutsche Naturschutzring erkannte in dieser Ankündigung ein „Teilmoratorium“, allerdings dürften den Pharmakonzern auch wirtschaftliche Überlegungen bewogen haben, auf die teuren und noch schwierig zu handhabenden – nicht abbaubaren – Nanoröhren zu verzichten. Nanotech-kritische Gruppen wie die ETC Group oder Friends of the Earth monieren zudem, derartige Selbstverpflichtungen hätten vor allem das Ziel, staatliche Regulierungen wie ein obligatorisches Label für Nano-Produkte zu verhindern.

Die bisherige Rechtslage hat tatsächlich Lücken. Das im Juni 2007 in Kraft getretene europäische Chemikalienrecht REACH macht nur Stoffe registrierungspflichtig, von denen mehr als eine Tonne pro Jahr hergestellt oder in die EU importiert werden. Eine Regelung, die etliche Nanomaterialien – die naturgemäß oft nur in winzigen Mengen gebraucht werden – durch die Maschen schlüpfen lässt.

Wer setzt auf Nanotechnik?

Weltweit pumpen Unternehmen und Regierungen im Jahr 2006 fast zwölf Milliarden Dollar in die Nanoforschung – da lohnt es sich einmal genauer hinzuschauen, welche Interessen und Ziele damit eigentlich verfolgt werden. Der britische Physiker und Nanotech-Experte Richard Jones unterscheidet drei Lager: die Transhumanisten, die Transglobalisten und die Vertreter der „grünen Nanotechnik“.

Die überschaubare und eher exotische Gruppe der Transhumanisten sieht in den Nanotechnologien der dritten Generation die Grundlage für eine radikal technisierte Gesellschaft, die die Menschheit von allen Unzulänglichkeiten der Vergangenheit befreit. Nanosonden im Körper sollen die gesundheitliche Verfassung des Menschen überwachen und bei Bedarf sofort Zelldefekte reparieren, Hirnimplantate die geistigen Fähigkeiten dramatisch verbessern. Nanomaschinen wiederum werden eine künftige industrielle Produktion ermöglichen, in der Gegenstände Atom für Atom mit bislang unbekannter Präzision und Effizienz zusammgebaut werden. Diese gleichermaßen faszinierenden wie beunruhigenden Visionen existieren aber allenfalls als Computersimulationen – und werden dieses Stadium wohl größtenteils nie überwinden.

Den Mainstream bilden die sogenannten Transglobalisten, für die das wirtschaftliche Potenzial von Nanotechnologien der ersten und vor allem der zweiten Generation im Vordergrund steht. So schwärmt Bundesforschungsministerin Annette Schavan von der Nanotechnologie als einer der „chancenreichsten Querschnittstechnologien der Welt“, welche die „technologische Leistungsfähigkeit und internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft“ entscheidend mitbestimmen. Die Bundesregierung lässt sich die Nanotech-Förderung als Standortpolitik einiges kosten: 2007 stellte sie rund 330 Millionen Euro zur Verfügung. Das sind, gemessen am Bruttoinlandsprodukt, sogar mehr Fördermittel als in den USA.²

Ganz oben auf der Agenda steht die Nanoelektronik. Molekulare Transistoren, Prozessoren aus Nanodrähten und Speichertechnologien wie der „Millipede“ von IBM – eine Art winzige Lochkarte, die mit Siliziumhebelchen Löcher in einen Kunststoffuntergrund schreibt – sollen die Wachstumsraten der Computerindustrie sicherstellen. Denn in etwa zehn Jahren werden heutige Fertigungstechniken an die physikalischen Grenzen der Miniaturisierung stoßen.³ Die Bundesregierung steckt bis 2010 in die Förderung der Nanoelektronik so viel Geld wie in alle anderen Nanobereiche. Damit soll der Computertechnik-Standort Deutschland, der im internationalen Vergleich seit den 90er-Jahren zurückgefallen ist, wieder zur Weltspitze aufschließen.

Angesichts der Überalterung der Industriegesellschaften gilt auch die Nanomedizin als wichtiger Zukunftsmarkt. Nanobiochips etwa sollen schnelle und individuelle Diagnosen möglich machen. Und im Kampf gegen den Krebs setzen Forscher aufs „Targeting“: Wirkstoffe sollen mithilfe von Nanopartikeln zielgerichtet ins Tumorgewebe gebracht werden, indem man an deren Oberflächen Moleküle anbringt, die an Rezeptormoleküle auf der Hülle bestimmter Krebszellen andocken können. Schon Hunderte „Targeting“-Varianten wurden erdacht, allerdings ist noch keine von ihnen zur Therapie zugelassen.

In den USA sollen Nanotechnologien auch die Militärtechnik voranbringen. Bereits im Mai 2002 wurde das Institute for Soldier Nanotechnology am Massachusetts Institute of Technology gegründet. Dort untersucht man zum Beispiel, wie sich mit Hilfe von Nanofasern leichtere und kugelsichere Kampfanzüge herstellen lassen. Nanosensoren sollen außerdem den Atem des Soldaten auf Moleküle hin analysieren, die im Körper bei Stress oder Verletzungen gebildet werden. Per Funkübertragung, so die Vision, könnten dann Informationen über den Gesundheitszustand eines Soldaten direkt ans Feldlazarett übertragen werden.

Gibt es die grüne Nanotechnik?

Seit das Thema Klimawandel die Nachrichten beherrscht, wird auch die Idee einer „grünen Nanotechnik“ populärer. Im Energiesektor sind Nanotechnologien bereits im Einsatz oder kurz vor der Marktreife. „In den Lithium-Ionen-Akkus in jedem modernen Laptop finden sich heute Kohlenstoffnanoröhren“, sagt der Nanotube-Spezialist David Tománek von der Universität Michigan. „Dadurch lassen sich Akkus häufiger ohne Kapazitätsverringering wiederaufladen und ihre Lebensdauer verlängert sich.“

Hoffnungen ruhen auch auf Solarzellen aus Nanomaterialien, zum Beispiel auf der sogenannten Grätzelzelle, die Nanopartikel aus Titandioxid als Halbleiter und Farbstoffmoleküle als Lichtsammler enthält. „Die Energie, die man in die Produktion stecken muss, hat man bereits nach einem Jahr wieder drin, statt nach drei bis vier Jahren wie bei herkömmlichen Siliziumzellen“, sagt der Chemiker Michael Grätzel, der das Konzept in den 80er-Jahren mitentwickelte. Die stromerzeugende Schicht ist nur 200 Mikrometer dick und lässt sich über Druckwalzen auch auf flexible Plastikbänder auftragen – das könnte der Fotovoltaik ganz neue Einsatzfelder eröffnen. Die US-Firma Konarka Technologies hat angekündigt, demnächst in größerem Umfang Grätzelzellen zu produzieren – allerdings hat sich die Markteinführung bereits mehrfach verzögert.

Das britische Umweltministerium hat im Mai 2007 eine erste Abschätzung des Potenzials von Nanotechnik für den Klimaschutz vorgelegt. Ergebnis: Durch erhöhte Treibstoffeffizienz, verbesserte Dämmstoffe sowie Innovationen in der Fotovoltaik-, Energiespeicher- oder Wasserstofftechnik könnten die Treibhausgasemissionen der Inseln „kurzfristig um bis zu zwei Prozent und bis 2050 um 20 Prozent senken, verbunden mit einer ähnlichen Reduzierung der Luftverschmutzung.“ Birgt die Technologie der Winzlinge also mehr Chancen die Risiken?

Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir mehr wissen – und um Wissen zu sammeln, muss geforscht werden. Doch statt die Risikoforschung zu fördern und Präventionskonzepte zu entwickeln, moniert Hartmut König von der Verbraucherzentrale Hessen, würden öffentliche Gelder für Kampagnen bereitgestellt, die der Bevölkerung die Angst vor der Nanotechnologie nehmen sollen. „Das ist aus Verbrauchersicht zynisch“, ärgert sich König, „und bewirkt gerade das Gegenteil.“