

Die Risiken der Nanotechnik

Niels Boeing¹

Erste Studien zeigen, dass Nanotechnik – wie alle Technologien – Gefahren birgt. Die hier vorgeschlagene Klassifizierung in drei Risikoklassen: isolierte, bioaktive und disruptive Nanotechnik will eine Grundlage für die bevorstehende Nanoriskodebatte schaffen.

Es ist ein kühler Maitag in Chicago, als sich auf der Einkaufsmeile Michigan Avenue eine Gruppe junger Leute vor dem Eddie-Bauer-Store plötzlich entblößt. Phantasievoll bemalte Oberkörper kommen zum Vorschein. Doch es ist kein Kunst-Happening, das hier stattfindet. „Eddie Bauer Hazard“ ist auf einem nackten Rücken zu lesen, „Expose the truth about nanotech“ auf einem anderen, bringt die Wahrheit über Nanotechnik ans Licht. „Thong“, eine Gruppe von Umweltaktivisten, hat wieder zugeschlagen – und die Nanotechnik ihren ersten Fall einer medienwirksamen Protestaktion.

Denn Eddie Bauer, die amerikanische Bekleidungskette, verkauft Kleidung, die dank „Nanotex“-Fasern schmutzabweisend ist. Für die Nudisten von Thong ein Umweltrisiko, sollten die Fasern sich aus dem Gewebe lösen und ins Freie gelangen. Proteste gegen Kernkraft und Gentechnik, das war gestern. Jetzt ist offenbar Nanotechnik² dran, die uns eine „zweite industrielle Revolution“ beschert, den Krebs besiegt und unsere Energieprobleme lösen soll. Glaubt man Aktivisten wie Thong, ist das nur die halbe Wahrheit: Die Manipulation der molekularen Welt hat Schattenseiten, in denen ungeahnte Gefahren lauern.

Sie stehen mit ihren Befürchtungen nicht ganz allein da. Längst ist es nicht mehr nur die utopische Katastrophe außer Kontrolle geratener Nanoroboter, die ein paar versprengte Techniktheoretiker umtreibt. Seit zwei Jahren häufen sich Meldungen von Toxikologen, dass die Wundermaterialien der Nanowelt für Organismen

schädlich sein könnten. Schon werden erste Stimmen laut, dass die Nanotechnik reguliert, ja sogar eingeschränkt werden müsse. Müssen wir uns also Sorgen machen?

Der Streit

Nicht wenigen in der Nanotech-Community stoßen diese Bedenken sauer auf. Josh Wolfe, prominenter Analyst beim US-Investmentunternehmen Lux Capital, sieht hier eine „grüne Gang“ aus Maschinenstürmern am Werk, die nur auf die nächste Gelegenheit gewartet hat, sich in den Vordergrund zu spielen. „Das letzte, was wir jetzt brauchen, ist eine ‚gesellschaftliche Debatte‘ und eine scharfe staatliche Aufsicht“, wettete er vor einigen Monaten in der Online-Ausgabe des Wirtschaftsmagazins *Forbes*. Denn vor allem in Venture-Capital-Kreisen in den USA ist Nanotechnik längst das „next big thing“, von dem man das Entstehen neuer Milliardenmärkte erwartet.

Zwar bestreiten selbst Wolfe und seine Mitstreiter nicht, dass es Probleme geben könnte. Aber in einer Studie von Lux Research unterscheidet man dann zwischen „realen“ und „eingebildeten“ Risiken. Die Tendenz zur Verharmlosung von Bedenken, die aus dieser Formulierung spricht, zieht sich wie ein roter Faden durch die Äußerungen von Forschern und Unternehmern zu den möglichen Konsequenzen. „Wir dürfen nicht den Fehler der Gentechnik wiederholen, wir brauchen den Dialog mit der Öffentlichkeit“ – dieser Satz ist auf jeder Konferenz zum Thema zu hören. Und meint: Wenn man Nanotechnik nur hinreichend erklärt, erledigen sich alle Bedenken von selbst.

Für die meisten Zeitgenossen ist Nanotechnik nach wie vor ein Buch mit sieben Siegeln. Daran sei die Szene selbst schuld, meint der US-Kommunikationsforscher David Berube, der den „Nanohype“ in einem eigenen Blog³ beobachtet. „Was aus Laboren und Regierungen nach außen getragen wurde, hat das Verständnis nicht erhöht. Die Aufklärungsarbeit der Regierung bestand im Wesentlichen darin, sich selbst auf die Schulter zu klopfen, und hat nicht die Öffentlichkeit angesprochen.“

Geht es um Fördergelder, werden viele Forschungsprojekte flugs mit dem Etikett „nano“ versehen. Werden die Risiken thematisiert, heißt es plötzlich, der Begriff Nanotechnik sei viel „zu

¹ Site nano.bitfaction.com/ Email nbo@bitfaction.com

² Unter Nanotechnik werden alle Technologien zusammengefasst, die Objekte von weniger als 100 Nanometern Strukturgröße gezielt manipulieren. 1 Nanometer ist ein Milliardstel Meter. Ein Wasserstoffatom, das kleinste Atom im Universum, hat einen Durchmesser von 0,1 Nanometern.

³ nanohype.blogspot.com/

breit“, als dass man über ihn einen öffentlichen Dialog führen könne. Das müsse sehr viel differenzierter angegangen werden. Und während angesichts der nanotechnischen Möglichkeiten manchem Experten schon mal das Wort „revolutionär“ über die Lippen kommt, werden Rufe nach Sicherheitsregularien mit dem Argument abgewiesen, so neu und anders sei die Nanotechnik auch wieder nicht, dass man für sie neue Richtlinien erlassen müsse. Also, was denn nun? Eine kritische Bestandsaufnahme tut not.

Drei Klassen von Nanotechnik

Beginnen wir mit einer kurzen, aber unvermeidlichen Systematisierung der breit gefächerten Nanotechnik (NT). An ihr sind sehr verschiedene Disziplinen beteiligt, die bislang meist nebeneinander geforscht und konstruiert haben. Vor allem Biotechnik, Chemie, Physik und Halbleitertechnik haben sich in ihren Verfahren in den vergangenen Jahrzehnten beharrlich in den Nanokosmos vorgearbeitet und treffen nun aufeinander. Biologen entdecken, dass man mit Mikroben Drähte für elektronische Schaltkreise konstruieren kann, Physiker analysieren mit ihren Werkzeugen die Bestandteile im Zellinneren, und Chemiker entwickeln Kunststoffe, die Licht in Strom umwandeln können.

Dabei nutzen sie Effekte, die in der Mikrometerwelt noch nicht zum Tragen kommen. Drei Beispiele: Weil ein Häufchen aus Nanopartikeln eine drastisch größere Oberfläche hat als eine Menge von Mikroteilchen mit derselben Gesamtmasse, ist es ein viel wirkungsvollere Katalysator oder absorbiert deutlich mehr Licht. Weil sich so genannte Quantenpunkte, Halbleitergebilde aus einigen tausend Atomen, energetisch wie künstliche Atome verhalten, eignen sie sich als Medium für äußerst reines Laserlicht. Weil Nanopartikel so klein sind, dass sie leicht in das Innere von Zellen gelangen können, lassen sie sich als Fähren für Medikamente nutzen, die eine punktgenaue Behandlung von Tumoren ermöglichen. Das Neuartige an der Nanotechnik ist, dass diese Effekte zum ersten Mal gezielt genutzt werden. Zwar verdanken schon Samuraischwerter vor Jahrhunderten ihre außergewöhnliche Härte kleinen Nanopartikeln im Stahl, werden seit Jahrtausenden bei der Verbrennung Nanoteilchen freigesetzt. Aber das waren Zufallsprodukte, keine Ingenieurskunst.

Der britische Physiker Richard Jones hat vorgeschlagen, NT danach zu klassifizieren, wie

neu eine bestimmte Anwendung im Vergleich zu Vorläufertechnologien ist. Dann würde sich der Streit darum erübrigen, welche Probleme eigentlich schon alte Bekannte sind. „Inkrementelle NT beinhaltet, die Eigenschaften von Werkstoffen zu verbessern, indem man ihre Struktur auf der Nanoskala kontrolliert“, erläutert Jones in seinem lesenswerten Blog *Soft machines*⁴. Das trifft etwa auf kratzfeste oder wasserabweisende Beschichtungen zu. „Evolutionäre NT besteht darin, existierende Technologien auf Nanoformat zu verkleinern.“ Nanoelektronik wäre so ein Fall. Unter radikaler NT versteht er schließlich Nanomaschinen, die kein Vorbild in der Technikgeschichte haben. Dazu gehören die berühmtesten „Assembler“, winzigste Roboter, die der US-Visionär Eric Drexler in Computersimulationen erdacht hat.

Dieser historische Blickwinkel hilft für eine öffentliche Debatte über mögliche Risiken und den Umgang mit ihnen aber nur bedingt weiter. Denn entscheidend ist: Welche unmittelbaren Wirkungen können Nanoanwendungen auf Organismen haben? Ich schlage deshalb vor, NT für eine Risikodebatte in drei andere Klassen einzuteilen: 1. isoliert, 2. bioaktiv, 3. disruptiv.

Klasse 1: Isolierte NT

Der größte Teil der gegenwärtigen Nanotechnologien besteht aus Strukturen, in denen die Nanokomponente fest eingebettet und damit von der Umwelt isoliert ist. Zu dieser Kategorie gehören zum einen diverse Werkzeuge zur Untersuchung von Oberflächen und Molekülen. Die meisten sind eine Spielart des Mikroskops. Mit dem 1981 erfundenen Rastertunnelmikroskop lassen sich beispielsweise einzelne Atome oder Moleküle bewegen, allerdings nur über ungeheuer kurze Distanzen. Das Prinzip des Kraftmikroskops, bei dem mikroskopische Siliziumhebelchen unter Krafteinwirkung nachweisbar verbogen werden, kommt auch in einer Reihe von neuen Sensoren zum Einsatz.

Das zweite Feld umfasst Werkstoffe wie selbstreinigende oder Antihaft-Beschichtungen. Zwar verdanken sie ihre Eigenschaften Nanopartikeln. Doch die sind in einer Matrix aus Kunststoffen verankert. „Die Substanzen müsste man mit hohem Energieeinsatz zerkleinern, um die Nanopartikel wieder herauszubekommen“, sagt Helmut Schmidt vom Saarbrücker Institut für

⁴ www.softmachines.org/wordpress/index.php

Neue Materialien, einer der Pioniere der chemischen Nanotechnologie.

Ebenfalls zur isolierten NT wird wohl demnächst die Nanoelektronik zu zählen sein, die sich derzeit noch in Laborprototypen erschöpft. Die molekularen Schaltungen sind überhaupt nur dann sinnvoll, wenn sie zu Hunderttausenden, ja Millionen in einem Prozessor fixiert werden können. Die Computerindustrie erhofft sich davon die Sicherung des „Moore’schen Gesetzes“, nach dem sich bei gleichzeitiger Miniaturisierung die Zahl der Transistoren alle 18 Monate verdoppelt. Dieses Innovationstempo würde sich deutlich verlangsamen, wenn die Verkleinerung der elektronischen Bauteile aus physikalischen Gründen gestoppt werden müsste.

Eine Unwägbarkeit bleibt bei der isolierten NT: Was passiert mit den Nanokomponenten, wenn die Geräte und Materialien entfernt und entsorgt werden sollen? Konzepte für Recycling oder Wiederverwendung gibt es bisher nicht. Sollte es möglich sein, dass diese Nanoanwendungen sich am Ende ihres Lebenszyklusses zersetzen, würden sie in die nächste Klasse rutschen: die bioaktive NT.

Klasse 2a: Unbeabsichtigt bioaktive NT

Hier betreten wir erstmals heikles Terrain. „Als wir 1994 die These präsentierten, dass ultrafeine Teilchen unter 100 Nanometern Durchmesser zu gesundheitlichen Schäden führen könnten, wurde das mit freundlicher Skepsis bis hin zu rigider Ablehnung aufgenommen“, sagt Günter Oberdörster von der Universität Rochester im US-Bundesstaat New York, einer der führenden Nanotoxikologen weltweit. Was seine Zunft seitdem herausgefunden hat, ist durchaus beunruhigend. Denn wie es aussieht, sind künstlich hergestellte Nanopartikel, die nicht in einer Matrix stecken, bioaktiv. „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“, konstatiert Oberdörster in der bislang umfassendsten Bestandsaufnahme zur Problematik.⁵

⁵ Das Paper hat gemeinsam mit seinen Kindern Eva und Jan, beide ebenfalls Toxikologen, veröffentlicht: Oberdörster et al., EST Juli 2005, „Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles“; es kann unter www.km21.org/nano/risiken/ runtergeladen werden

Ausgerechnet die Stars unter den neuen Nanomaterialien sind hierbei die Hauptverdächtigen: die Buckminsterfullerene. Ihren Namen verdanken diese Kohlenstoffmoleküle der Anordnung ihrer Atome, die an die Kuppelarchitektur des Amerikaners Buckminster Fuller erinnert. Vor knapp zwanzig Jahren wurden sie erstmals bei Laborversuchen in Rußspuren identifiziert. Die eine bekannte Variante, „Buckyballs“ genannt, besteht aus 60 Atomen, die eine Kugel mit einem Durchmesser von 0,7 Nanometern formen. Dabei sind die Atome zu Fünf- und Sechsecken angeordnet wie die Lederflicken in einem Fußball. Sowohl in Plastiksolarzellen als auch in der Nanomedizin könnten sie eines Tages zum Einsatz kommen.

Die andere Variante sind die so genannten Kohlenstoff-Nanotubes. Dabei handelt es sich um Röhren ebenjener atomaren Sechsecke, die mehrere Mikrometer lang werden können und einzeln oder verschachtelt auftreten. Nanotubes sind reißfester als Stahl, leiten Wärme besser als Diamant, der zuvor beste bekannte Wärmeleiter, und können elektrisch leitend oder halbleitend sein. Kein Wunder, dass sie die Nanotechnologen inspirieren. Nanotubes eignen sich als Dioden, als Transistoren, als molekulare Transportbänder für winzige Tröpfchen, aber auch als verstärkende Komponente für Kunststoffe. Aus ihnen lassen sich leichte, äußerst reißfeste Kohlenstoffgarne spinnen oder transparente Folie ziehen, die Wärme abgeben oder leuchten kann. Nanotubes könnten die „eierlegende Wollmilchsau“ der Nanotechnik sein.

Das Problem ist, dass Körperzellen und Bakterien sich mit den neuen Kohlenstoffmolekülen nicht recht anfreunden können. Die Chemikerin Vicki Colvin vom Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN) an der Rice University in Houston, Texas, fügte bei In-vitro-Versuchen Buckyballs Kulturen von Hautzellen hinzu. Bei einer Konzentration von 20 parts per billion (20 Buckyballs pro Milliarde Lösungsmolekülen) starb die Hälfte der Zellen ab – das ist ein 50.000stel der tödlichen Konzentration dreiatomiger Russpartikel (C₃). Colvin fand allerdings auch heraus, dass die Buckyballs weniger giftig sind, wenn man sie mit einfachen Molekülen umhüllt. „Dieses Verfahren könnte nützlich sein, um die Toxizität von Nanopartikeln zu tunen“, sagt Colvin.

Für Aufsehen sorgte im vergangenen Jahr ein In-Vivo-Experiment von Eva Oberdörster. Sie hatte Buckyballs in Form wasserlöslicher Cluster in ein

Aquarium gegeben. Nach 48 Stunden waren die in den umherschwimmenden Forellenbarschen über die Kiemen ins Gehirn vorgedrungen und hatten Hirnzellen geschädigt. „Wir haben herausgefunden, dass solche C₆₀-Aggregate auch eine ordentliche antibakterielle Wirkung haben“, bestätigt Joseph Hughes, Umweltingenieur am Georgia Institute of Technology. Sein im Frühjahr veröffentlichter Befund lautet: Überschreitet die Konzentration einen Schwellenwert, behindern die Buckyball-Klumpen die Atmung von zwei verbreiteten Bakterienarten, die im Erdreich vorkommen. „Das könnte man für ungemein gute Anwendungen nutzen, es könnte aber auch Auswirkungen auf die Gesundheit von Ökosystemen haben.“

Bei den Nanotubes sieht es nicht viel besser aus. Verschiedene Versuche mit Mäusen und Ratten haben gezeigt, dass Kohlenstoffröhrchen in den Gewebezellen der Lungenbläschen Entzündungsreaktionen hervorrufen können. Eine laufende Studie der schweizerischen EMPA Materials Science and Technology in St. Gallen untersucht deren toxische Wirkung auf Bakterienkulturen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Zellaktivität sich nach einem Tag drastisch verringert, je nachdem in welcher geometrischen Form die Nanotubes vorliegen. Das von den Herstellern gelieferte Rohmaterial, das noch Katalysatorreste enthält, ist dabei deutlich toxischer als eine gereinigte Mischung oder gar Asbestfasern. Für Peter Wick, Molekularbiologe und Projektleiter, lautet die vorläufige Erkenntnis: „Man muss genau wissen, wie das Material beschaffen ist und auch, wie hoch der Anteil der Verunreinigungen ist.“

Die neuen Kohlenstoffmoleküle sind aber nur ein Teil des Problems. Der Toxikologe Paul Borm von der Zuyd-Universität Heerlen verweist darauf, dass selbst „chemisch träge Materialien reaktionsfreudig werden, wenn man sie kleiner macht“. Titandioxid (TiO₂) ist ein Beispiel: Versuche hätten gezeigt, dass 20 Nanometer große TiO₂-Teilchen zu Entzündungen in Rattenlungen führten, während dieselbe Menge von 250 Nanometer großem TiO₂ keine Wirkung gezeigt habe, so Borm.

Das Pikante daran: Nanoskaliges TiO₂ wird seit Jahren als besonders effizienter UV-Blocker in Sonnencremes verwendet, weil die Gesamtoberfläche viel größer ist als bei den früher verwendeten Mikropartikeln. Untersuchungen des Physikers Tilman Butz von der Universität Leipzig im Rahmen des EU-Forschungsprojektes

„Nanoderm“ geben zumindest für gesunde Haut vorläufige Entwarnung: Titandioxidpartikel von nur 20 Nanometern Durchmesser kommen in der Oberhaut nicht tiefer als 5 Mikrometer. „Zwischen der Hornschicht und dem so genannten Stratum spinosum bleiben die Nanopartikel hängen“, sagt Butz. Allerdings gebe es noch keine Ergebnisse, wie sich Titandioxid in sonnenverbrannter Haut oder in den Schweißdrüsen verhalte.

Was aber kann eigentlich passieren, wenn Nanopartikel auf Zellen treffen? Nach bisherigem Erkenntnisstand gibt es drei Möglichkeiten. Die Oberfläche eines Nanoteilchens verursacht entweder „Oxidativen Stress“ an der Zellhülle. Das bedeutet, dass sich freie Radikale bilden, also Moleküle, die ein freies Elektron aufweisen und damit ausgesprochen reaktionsfreudig sind. Die Folge: Der Kalziumspiegel innerhalb der Zelle steigt, und im Zellkern kann eine unerwünschte Transkription von Genen in Proteine aktiviert werden. Die können ihrerseits eine Entzündung im Gewebe auslösen. Ein zweiter Effekt ist die Aktivierung von Rezeptormolekülen an der Zellhülle, weil sich Metallatome aus den Nanopartikeln lösen. Mit denselben Konsequenzen wie im ersten Fall. Dritte Variante: Das Nanoteilchen wird als Ganzes von der Zelle verschluckt und gelangt beispielsweise in die Mitochondrien, die „Kraftwerke“ der Zellen. Deren Arbeit wird durch die Anwesenheit des Partikels empfindlich gestört.

Das „R-Wort“ oder: Was tun?

Die große Frage, die die Nano-Community derzeit plagt, ist nun: Welche Konsequenzen sollte man aus diesen ersten Erkenntnissen ziehen? Müssen Herstellung und Gebrauch von Nanomaterialien womöglich gesetzlich „reguliert“ werden? Oder gar für ein Jahr unter ein weltweites Moratorium gestellt werden, -wie das die kanadische ETC Group, die erste nanotech-kritische Umweltorganisation, seit drei Jahren fordert? Klar ist nur: Gilt das Vorsorgeprinzip, muss etwas geschehen.

„Wenn Sie eine Chemikalie vertreiben, müssen Sie ein Materialsicherheitsdatenblatt mitliefern“, sagt Annabelle Hett, Expertin für neu entstehende Risiken beim Rückversicherer Swiss Re. Auf diesen Listen stünden Anweisungen, was beim Umgang mit dem Material zu beachten ist. „Wenn Sie nun das Material bis auf Nanostrukturgrößen verkleinern, gelten immer noch dieselben Materialsicherheitsdatenblätter. Das ist

wahrscheinlich nicht ausreichend, weil Nanopartikel eine völlig andere Stoffklasse darstellen.“

Swiss Re hat deshalb in einem weithin beachteten Report 2004 vorgeschlagen, Nanoformate selbst bekannter Werkstoffe wie neue Materialien zu behandeln. Für die müssten dann die üblichen Sicherheitsbewertungen vorgenommen werden. Auch die britischen Royal Society und Royal Academy of Engineering haben in ihrem Nanotech-Report 2004 diese Empfehlung ausgesprochen.⁶

Andreas Gutsch von Degussa hält eine solche Vorgehensweise nicht für falsch, fordert aber zuerst Risikonachweise. „Sobald wir einen Risikonachweis haben, stimme ich zu, dass die Notwendigkeit einer Regulierung gegeben ist.“ Vorher sollten aber erst einmal die nötigen „Datenmassen“ gesammelt werden. An denen hapert es noch.

„Das Wissen, das wir bislang haben, ist für Unternehmen noch nicht ausreichend, um eine Risikobewertung vorzunehmen“, sagt Rob Aitken vom britischen Institut für Berufsmedizin. Für eine Risikobewertung genügt es nämlich nicht zu wissen, welche schädliche Wirkung ein Nanomaterial haben kann. Es muss auch untersucht werden, wo und in welcher Form es überhaupt vorliegt. Nanotubes etwa sind derzeit von mindestens einem Hersteller per UPS in Pulverform beziehbar. Auf dem Behälter fehlt jeder Hinweis, dass das Einatmen der Röhren der Gesundheit abträglich sein könnte. Eine mögliche Anwendung von Eisenoxid-Nanopartikeln liegt in der Entgiftung kontaminierter Böden. Die Anwesenheit solcher „Nanorosts“ kann die Zerlegung von Chemikalien in harmlose Bestandteile bewirken. Und dann? „Es wäre zu erwarten, dass sich die Nanomaterialien durch die Nahrungskette bewegen“, mutmaßt die Oberdörster.

Einmal aufgenommen, können Nanopartikel über die Gewebeschichten in Lunge und Darm in die Blutbahn wandern, von dort in Leber, Milz und Knochenmark vordringen und auch die Blut-Hirn-Schranke passieren. Das immerhin ist klar. Aber: „Wir benötigen noch viel mehr Information“, betont Rob Aitken. Vicki Colvin vom CBEN schätzt, dass es noch „mindestens ein Jahrzehnt“ dauere, bis genug Daten zur Verfügung stünden.

Eine internationale Datenbank, in der mögliche Schädigungen und Risiken durch Nanomaterialien aufgelistet sind, gibt es noch nicht, wohl aber erste Ansätze. Die EU-Kommission hat Anfang des Jahres die Datensammelungsprojekte „Impart“ und „Nanotox“⁷ gestartet. Das CBEN bietet seit September eine Sammlung von toxikologischen Artikeln auf seiner Website an,⁸ und auch die US-Umweltbehörde EPA arbeitet an einer systematischen Erfassung von Risikodaten. Aufeinander abgestimmt sind diese Vorhaben derzeit noch nicht. „Die internationale Zusammenarbeit ist gegenwärtig ziemlich unterentwickelt“, urteilt Günter Oberdörster.

Klasse 2b: Intendiert bioaktive NT

Bislang ist nur von Nanopartikeln die Rede gewesen, die unbeabsichtigt freigesetzt werden. Doch das ist noch nicht die ganze Geschichte. Lebensmittelhersteller wollen demnächst mit Nanopartikeln die geschmacklichen und gesundheitlichen Eigenschaften unseres Essens verbessern. Und in der Nanomedizin arbeitet man bereits an neuen Diagnoseverfahren und Tumorthérapien, bei denen die winzigen Teilchen gezielt in den Körper gebracht werden. So sollen die bereits erwähnten Quantenpunkte als Kontrastmittel für Magnetresonanztomographien genutzt werden. Der Kern der nanostrukturierten Mittel besteht bislang meist aus giftigen Schwermetallverbindungen wie Cadmiumselenid, der unter anderem zum Schutz mit Biomolekülen (z.B. Lipiden) umhüllt wird. Die US-Firma Evident Technologies hat vor kurzem immerhin die ersten, nach eigenen Angaben nicht-toxischen Quantenpunkte auf den Markt gebracht, die ohne Cadmiumselenid auskommen.

Auch im Kampf gegen den Krebs setzt man auf Nanopartikel, die hier als Medikamententransporter dienen sollen. Kandidaten dafür sind Käfige aus Peptiden, Proteinen oder gar aus DNA, dem Molekül, das in den Zellkernen die Erbinformation aller Organismen codiert. Es gleicht einer verdrehten Strickleiter, deren Sprossen von vier möglichen Basenpaaren gebildet werden: je zwei aus den Molekülen Adenin (A) und Thymin (T), je zwei aus Guanin (G) und Cytosin (C). Mit Hilfe von Enzymen lassen sich die beiden Stränge der DNA-Strickleiter voneinander lösen. An einer bestimmten Folge von Basen eines solchen Einzelstrangs kann sich immer nur ein zweiter

⁶ www.nanotec.org.uk/finalReport.htm

⁷ www.impart-nanotox.org/

⁸ cben.rice.edu/research.cfm

Strang anlagern, dessen Basen die exakten Gegenstücke zum ersten bilden. Zur Folge AGC passt nur TCG. Diese Eigenschaft aber macht DNA-Einzelstränge zu einer Art Baukastensystem, aus dem sich nicht-biologische Strukturen fertigen lassen: ausgedehnte Gitter, Würfel oder auch Kugeln.

Die entscheidende Frage für eine Risikoabschätzung dabei lautet: Ist es möglich, dass sich solche DNA-Partikel im Zellinneren auflösen? Wenn ja, könnten einzelne DNA-Stränge einen so genannten horizontalen Gentransfer auslösen, sich also in das Genom integrieren. In der Gentherapie ist genau das erwünscht. Hier aber könnte das Phänomen möglicherweise die Bildung von Proteinen auslösen, die die Signalwege in der Zelle durcheinander bringen – und etwa Entzündungen nach sich ziehen. Bislang ging es beim Streit um horizontalen Gentransfer um die Veränderungen von Nutzpflanzen in der Landwirtschaft, die über die Nahrungskette in Tiere und Menschen gelangen. Im Falle neuer nanomedizinischer Verfahren würden plötzlich die menschlichen Zellen unvermittelt zum Schauplatz der Problematik. Zwei weitere mögliche Folgen: Freie DNA-Stränge können sich auch ans Genom anlagern und die Aktivierung wichtiger Gene verhindern. Oder sie lagern sich an RNA-Stränge an, die die Information zur Proteinbildung innerhalb der Zelle transportieren. Diese würde dann blockiert. Angesichts solcher Szenarien ist zu erwarten, dass die Gentechnik-Debatte in absehbarer Zeit Bestandteil der Nanorisiko-Debatte wird.

Die Nanomedizin birgt noch ein weiteres Risiko. Eines ihrer Ziele ist, Kranke mit einer individuellen Therapie behandeln zu können. Genetische oder andere molekulare Eigenarten einzelner Menschen sollen mit auf diese zugeschnittenen Wirkstoffen angesprochen werden. Aber es ist durchaus vorstellbar, dass Therapien am Ende zu Waffen umfunktioniert werden, wenn man etwa eine hocheffiziente, gering dosierte „Nanoarznei“ für genetisch ähnliche Bevölkerungsgruppen maßschneidert und damit „ethnische Waffen“ bekommt.

Diese Befürchtung ist zwar umstritten. Denn weltweite Genomanalysen haben gezeigt, dass die Einteilung der Menschheit in „Rassen“ keine genetische Grundlage hat. Die Variationen rund um den Globus sind zu groß und korrespondieren nicht mit Merkmalen wie etwa der Hautfarbe. Seit die amerikanische FDA im Juni das

Herzmedikament BiDil zugelassen hat, ist aber klar, dass „ethnische“ Waffen sehr wohl denkbar sind. BiDil wurde nach klinischen Tests bereits als Fehlschlag eingestuft, bis eine erneute Auswertung der Daten zeigte, dass es bei afroamerikanischen Testpersonen deutlich häufiger wirkte. Nun wird es speziell für diese Zielgruppe verkauft.

Man kann solche Bedenken abwegig finden. „Man muss davon ausgehen, dass es im Zuge der weiteren Nanotechnik-Entwicklung Erkenntnisse geben wird, um gezielt neue Krankheitserreger zuzuschneiden“, warnt Jürgen Altmann, Physiker an der Universität Dortmund. Er untersucht seit 1988 die Folgen von militärischen Anwendungen neuer Technologien. Matthias Grüne vom Fraunhofer Institut Naturwissenschaftliche Trendanalysen hält für denkbar, dass Agentien, die bislang im Kontakt mit Luftsauerstoff nicht stabil sind, mit Hilfe von Nanoträgern in der Luft ausgebracht werden könnten. Noch seien wir mindestens zehn Jahre von solchen Möglichkeiten entfernt, so Grüne. Sein Fazit: „Es könnte sich ein Missbrauchspotenzial ziviler Nanomedizin entwickeln.“

Solche Arbeiten würden jedoch die B-Waffen-Konvention von 1975 unterlaufen, die Eingriffe in Zellprozesse verbietet, sagt Altmann. Dieses Abkommen ist seit damals von 143 Staaten unterzeichnet worden. Solange sich B-Waffen nicht gezielt einsetzen ließen, funktionierte die Konvention. Angesichts der neuen Möglichkeiten wäre aber eine genauere Überprüfung nötig. Die Verhandlungen darüber, wie solche Kontrollen aussehen könnten, wurden von den USA allerdings 2001 verlassen.

Solange es solche weltweiten Kontrollen nicht gibt, können Regierungen ungehindert neue B-Waffen im Verborgenen entwickeln. Deshalb plädiert Altmann zusammen mit dem amerikanischen Physiker Mark Gubrud dafür, als erstes ein „Verifikationsprotokoll“ zur B-Waffen-Konvention zu beschließen. „Außerdem haben wir vorgeschlagen, auf nicht-medizinische nanotechnische Eingriffe in den menschlichen Körper für zehn Jahre gänzlich zu verzichten.“

Hope Shand von der ETC Group fordert zusätzlich, dass „die Nanotechnik von einer internationalen Organisation geleitet werden soll“. Diese International Convention for the Evaluation of New Technologies (ICENT) wäre direkt bei der Uno angesiedelt. Ein solches Gremium schlägt übrigens auch der im Sommer veröffentlichte

„State of the Future 2005“-Report des UN University Millennium Project vor.

Klasse 3: Disruptive NT

Bis hierhin ist der Katalog möglicher Nanorisiken schon recht vielfältig – ganz ohne jene berüchtigten Nanoroboter, die den amerikanischen Computerwissenschaftler Bill Joy im Jahre 2000 zu einem düsteren Essay im US-Magazin *Wired* veranlassten. Verschweigen wollen wir sie nicht, denn sie sind ein Beispiel für „disruptive“ NT. Darunter können alle Versuche gefasst werden, künstliche Mikroorganismen herzustellen. Also autonom agierende Nanosysteme, die die Fähigkeit haben, sich zu vervielfältigen, und Lebewesen massiver und großflächiger schädigen könnten als die bioaktive NT.

Die Nanoroboter, die Drexler ursprünglich im Sinn hatte – inzwischen hat er sich davon distanziert – sollten im Wesentlichen aus diamantartigen Kohlenstoffverbindungen bestehen. Ihr GAU würde darin bestehen, dass sie sich plötzlich unkontrolliert vervielfältigen und das Rohmaterial hierfür aus der Zersetzung von Lebewesen gewinnen – bis sie schließlich als grauer Maschinenschleim („Grey Goo“) ganze Landstriche überziehen.

Inzwischen eröffnet sich auf dem Feld der synthetischen Biologie eine weitere Möglichkeit, künstliche Mikroorganismen zu designen. Daran arbeitet vor allem Craig Venter am Institute for Biological Energy Alternatives in Rockville, US-Bundesstaat Maryland, der mit seiner Arbeit maßgeblich zur Entschlüsselung des menschlichen Genoms beigetragen hat. 2003 stellte er bereits ein Virus vor, dessen 5386 Basenpaare zu einem in der Natur nicht existierenden Genom verbunden wurden. Derzeit entwirft er ein „neues“ Genom für das Bakterium *M. genitalium*. Natürlich treiben Venter genausowenig wie Drexler üble Absichten dabei um. Er sieht in den künstlichen Mikroben künftige Arbeitstiere für Energiegewinnung oder Schadstoffbeseitigung. Aber man kann nicht ausschließen, dass künstliche Viren zu einer unkontrollierbaren Bedrohung mutieren könnten.

Während die Chancen für Venters Konzept nicht allzu schlecht stehen dürften, ist bislang unklar, wann und ob überhaupt jemals Drexler'sche Nanosysteme möglich sind, die nicht auf der irdischen Biochemie aufbauen. Kann man deshalb disruptive Nanotechnik als Sciencefiction abtun, mit der man sich nicht weiter befassen müsse, wie

es der größte Teil der Nano-Community vorzieht? Außer Drexlers Foresight Nanotech Institute⁹, einem Thinktank namens Center for Responsible Nanotechnology und der ETC Group hat sich bislang niemand mit disruptiver NT befasst. Während die ETC Group für Forschung an dieser Art von NT ein Moratorium fordert, sind die ersten beiden vehement dagegen. Ihr Argument: Man müsse jetzt das nötige Know-how sammeln, um künftigen „Nanohackern“ das Handwerk legen zu können, die künstliche, aber höchst reale Viren oder Nanoroboter konstruieren.

Plädoyer für eine offene Nanotechnik

Auch wenn viele Anwendungen der NT noch in den Anfängen stecken: Sie ist kein Hype, sondern die Technik des 21. Jahrhunderts. Sie pauschal als gefährlich zu brandmarken oder stoppen zu wollen, ist weder machbar noch wünschenswert. Denn die Potenziale, die sie für ein nachhaltiges Energiesystem, für einen schonenden Umgang mit den Ressourcen des Planeten Erde oder für die Heilung bislang tödlicher Krankheiten bietet, sind gewaltig.

Die isolierte NT birgt ohnehin keine unmittelbaren Gefahren. Die bioaktive kann noch in ihrem jetzigen Frühstadium analysiert und auch reguliert werden. Für einen etwaigen militärischen Missbrauch reicht eine Regulierung allerdings nicht aus: Hier sind Politik und Nano-Community gefordert, wirksame Barrieren einzuziehen. Sei es durch eine Verschärfung der B-Waffen-Konvention, sei es über eine internationale Organisation auf der Ebene der Uno. Auf Gebieten, auf denen eine militärische Umnutzung klar absehbar ist, sollte auch die Idee eines Moratoriums für entsprechende Forschungsvorhaben nicht tabu sein.

Für Ansätze einer disruptiven NT ist ein Moratorium eigentlich die einzig vernünftige Option, die wir haben. Denn noch ist diese Büchse der Pandora geschlossen. Sollte sie erst weit geöffnet sein, werden wir sie wohl nicht wieder schließen können.

Bis hier war nur von unmittelbaren Gefahren die Rede. Die viel gescholtene ETC Group weist aber darüber hinaus seit drei Jahren – zu Recht – auf ein langfristiges Problem hin: die Verschmelzung von Nano-, Bio-, Informations- und Neurotechnologien, in Fachkreisen kurz „NBIC-Konvergenz“ genannt. Die ETC nennt dies

⁹ www.foresight.org/

„BANG“ – eine Technik, die zur selben Zeit Bits, Atome, Neuronen und Gene bearbeitet. Es ist die treffendste Beschreibung für die Nanotechnik in nicht ganz so ferner Zukunft – ein technologischer „Little BANG“, der die Komplexität von Technik drastisch erhöht und unbeherrschbar machen könnte. Gesellschaften und Volkswirtschaften könnten in einem Maße umgewälzt werden, das bislang nicht annähernd abzuschätzen ist.

Noch besteht die Chance, die Technik des 21. Jahrhunderts human zu gestalten – wenn wir sie als „offene Nanotechnik“ angehen. Der Begriff „offen“ meint dabei zweierlei. Zum einen im Sinne von „transparent“: Die Nanotechnik muss raus aus den Laboren, aber nicht in Form von Hochglanzbroschüren und Experten-dialogen. Die Konzepte müssen der Öffentlichkeit zugänglich und begreiflich gemacht werden, beispielsweise über das Instrument der Bürgerforen. Die „Nanjury“¹⁰ in Großbritannien, die im Mai 2005 ins Leben gerufen wurde, ist ein erstes Beispiel. Die Millionen Laien, die die Segnungen der Nanotechnik konsumieren sollen, haben ein Recht darauf, diese technische Zukunft mitzugestalten, gegen die sich das 20. Jahrhundert möglicherweise wie eine gemächliche historische Epoche ausnehmen wird.

Die andere Bedeutung von „offen“ ergibt sich aus dieser Forderung: Es ist die Übertragung des „Open Source“-Prinzips auf NT. Längst hat der Wettlauf um die Patentierung der neuen Entdeckungen eingesetzt. Ist er schon im Falle von Genen, Pflanzen und Tieren fragwürdig gewesen, könnte er diesmal sogar für die Industrie selbst zum Problem werden. Die eingangs erwähnten Marktforscher von Lux Research weisen in einer aktuellen Nanotech-Patentstudie daraufhin, dass die Entwicklung neuer Produkte wegen der Verschränkung bisher getrennter Technologien in der NT deutlich erschwert werden könnte, weil unüberschaubare Patentknäuel zu entwirren sind.

Und wenn wir für den Augenblick Prognosen Glauben schenken, nach denen NT die Möglichkeiten der industriellen Produktion radikal verändern wird, könnte ein ganz neuer Graben aufreißen zwischen denen, die Zugang zu den Grundlagen der neuen Technologien haben, und dem Rest. Eine „Nano-Divide“ könnte entstehen, die alle Gesellschaften weltweit erschüttert. Wir sollten den Nanokosmos zu der

Public Domain erklären, die er Milliarden Jahre gewesen ist – und von der alle profitieren können.

Niels Boeing ist Physiker, Wissenschaftsjournalist und Autor des Buches „Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts“ (Rowohlt Berlin 2004).

Links zu Nanorisiken befinden sich unter www.km21.org/nano/risiken/.



(Dieser Text ist durch die **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 Germany License** geschützt siehe: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/de/>)

¹⁰ www.nanojury.org/