



**Lebensrettender Strohhalm:** Der LifeStraw kann 700 Liter von Viren und Bakterien befreien – genug, um einen Menschen ein Jahr mit Trinkwasser zu versorgen

VESTERGAARD FRANDSEN, HELGA LADE

## Nanotech im grünen Gewand

**Nach einigem Hype ist es ruhig geworden um die Nanotechnologie. Dabei hilft sie längst vielfältig und zunehmend auch im neuen Trendmarkt Umweltschutz. Weitere Erfolge sind zu erwarten – wenn keine Schreckensmeldungen dazwischenkommen**

VON NIELS BOEING

Es war kein Aprilscherz, als die renommierte Investmentbank Merrill Lynch am 1. April 2004 die Einrichtung eines „Nanotech-Index“ bekannt gab. Nanotechnik, darin waren sich die meisten Hightech-Beobachter einig, würde schon bald die nächste große Welle der Innovation einleiten, die das Internet samt anschließendem Zusammenbruch der New Economy vergessen machen könnte. Es kam anders: Das Internet erlebte als „Web 2.0“ ein beeindruckendes Comeback, Merrill Lynch geriet in der aktuellen Finanzkrise an den Rand des Untergangs – und der Nano-Hype hat sich verflüchtigt. Wenn Nanotechnologien derzeit Schlagzeilen machen, dann meist wegen Risiken für Gesundheit und Umwelt.

Das könnte sich wieder ändern: Seit der UN-Klimarat IPCC den Klimawandel in die Weltpolitik gebracht hat, ist auch die Nanotech-Szene in Bewegung gekommen. Das neue Schlagwort lautet „green nanotechnology“, grüne Nanotechnik also. Reports und Konferenzen sondieren zunehmend das Potenzial der Kleinsttechnologien für Energie, Klima und Umwelt. „Cleantech entpuppt sich gleichermaßen als Nutznießer und Chance der Nanotechnik. Meines Erachtens sind die Parallelen zwischen beiden so groß, dass man sie kaum noch auseinanderhalten kann“, schwärmt Josh Wolfe, umtriebiger Nanotech-Analyst und „Forbes“-Kolumnist.

Tatsächlich könnten Nanotechnologien in den kommenden Jahren einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Lebens-

und Wirtschaftsweise leisten. Dabei dürfte es Schritt für Schritt vorangehen: „Die kurzfristigen Cleantech-Anwendungen von Nanotechnik werden eher recht unspektakuläre Dinge wie Katalysatoren, Beschichtungen und Materialzusätze sein, noch nicht ein großer Wurf wie die Photovoltaik der nächsten Generation“, sagt Jaideep Raje vom New Yorker Marktforschungsunternehmen Lux Research.

Setzt man etwa Diesel Nanopartikel aus Cer-Oxid in geringen Konzentrationen zu, entfalten sie eine unterstützende Wirkung: Der Kraftstoff wird in der gesamten Brennkammer gleichmäßiger verbrannt und auch gründlicher, weil Sauerstoffatome aus den Partikeln die Verbrennung unterstützen. Das senkt nicht nur die Emission von Schadstoffen. Versuche des britischen Nano-Unternehmens Oxonica, das den Nano-Zusatz entwickelt hat, haben gezeigt, dass so der Dieserverbrauch um fünf bis zehn Prozent abnimmt.

Ähnlich sieht es bei der derzeit wohl heißesten Antriebsalternative für Autos aus, nämlich Elektromotoren. Die Elektroden der dafür nötigen hochwertigen Lithium-Ionen-Akkus enthalten inzwischen einen Anteil von fünf Prozent Kohlenstoffnanoröhren, kurz Nanotubes; dadurch lassen sie sich häufiger wieder aufladen. Von Evonik Degussa gibt es eine weitere Nano-Neuerung für bessere Batterien: Keramische Nanopartikel in der Membran verhindern, dass sie – wie in der Vergangenheit immer wieder vorgekommen – bei Überhitzung



**Faser mit Filter:** Das Polymermaterial von Inge Watertechnologies ist mit 10 bis 20 Nanometer großen Poren durchsetzt

anfangen zu brennen. Und die MIT-Ausgründung A123 Systems (s. TR 5/08) hat das Lithium-Ionen-Material selbst optimiert, sodass ihre Akkus drei- bis viermal so lange halten wie herkömmliche. Die werden nun in Profi-Werkzeugen von DeWalt eingesetzt und bald vielleicht sogar im Chevrolet Volt, dem von General Motors angekündigten Elektroauto.

Nanobeschichtungen wiederum lassen sich in ganz unterschiedlichen Anwendungen nutzen: „Bei der Entformung, also dem Herauslösen fertiger Teile aus Gussformen in der Industrieproduktion, kann die Standzeit dieser Werkzeuge durch Antihafbeschichtungen bereits verlängert werden“, erklärt Ralf Zastrau, Vorstandsvorsitzender der saarländischen Nanogate AG. Die Formen müssen zudem seltener gereinigt werden, was Energie und Material spart. Versieht man Wärmetauscher mit einer Nano-Schutzschicht gegen Korrosion und Ablagerungen, bleibt ihr Wirkungsgrad auch bei langer Nutzungsdauer nahezu konstant.

Es gibt eine ganze Menge solcher unspektakulären Nano-Anwendungen, die bereits auf dem Markt sind oder kurz davor stehen. Aber lässt sich deren Umweltentlastungspotenzial beziffern? Im Auftrag des Umweltbundesamtes haben Forscher der Universität Bremen und des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung in Leipzig vier verschiedene Nano-Anwendungen genauer unter die Lupe genommen.

Eine davon ist der thermoplastische Kunststoff „Ultradur“, der im Spritzguss verarbeitet wird und von BASF in zwei Varianten produziert wird. Das mit Nanopartikeln angereicherte „Ultradur High Speed“ erreicht eine höhere Fließgeschwindigkeit, weil die Teilchen die Viskosität des geschmolzenen Stoffes erhöhen (s. auch S. 60). Folge: In der Ökobilanz liegen Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Highspeed-Variante

**Nano im Bohrer:** Optimiertes Material erhöht die Kapazität der Akkus von A123 Systems deutlich



um zehn Prozent niedriger. Auch die anderen Anwendungen – Hybrid-Busse mit Nanotech-Batterien, Elektronik-Schutzfolien aus Nanotubes und Oberflächenbeschichtung mit einem Nano-Metall – zeigten teils erhebliche Entlastungseffekte.

Eine erste systematische Abschätzung, wie viel Kohlendioxid in einem Industrieland dank Nanotechnologien eingespart werden könnte, hat im Mai 2007 Ben Walsh vom Beratungsunternehmen Oakdene Hollins im Auftrag des britischen Umweltministeriums erstellt. In fünf bis sechs Jahren könnten demnach dank Nanomaterialien in Kraftstoffen, der Wärmedämmung von Gebäuden und der Photovoltaik in Großbritannien jährlich etwa zwölf Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden werden – immerhin knapp zwei Prozent des derzeitigen britischen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von etwa 680 Millionen Tonnen im Jahr.

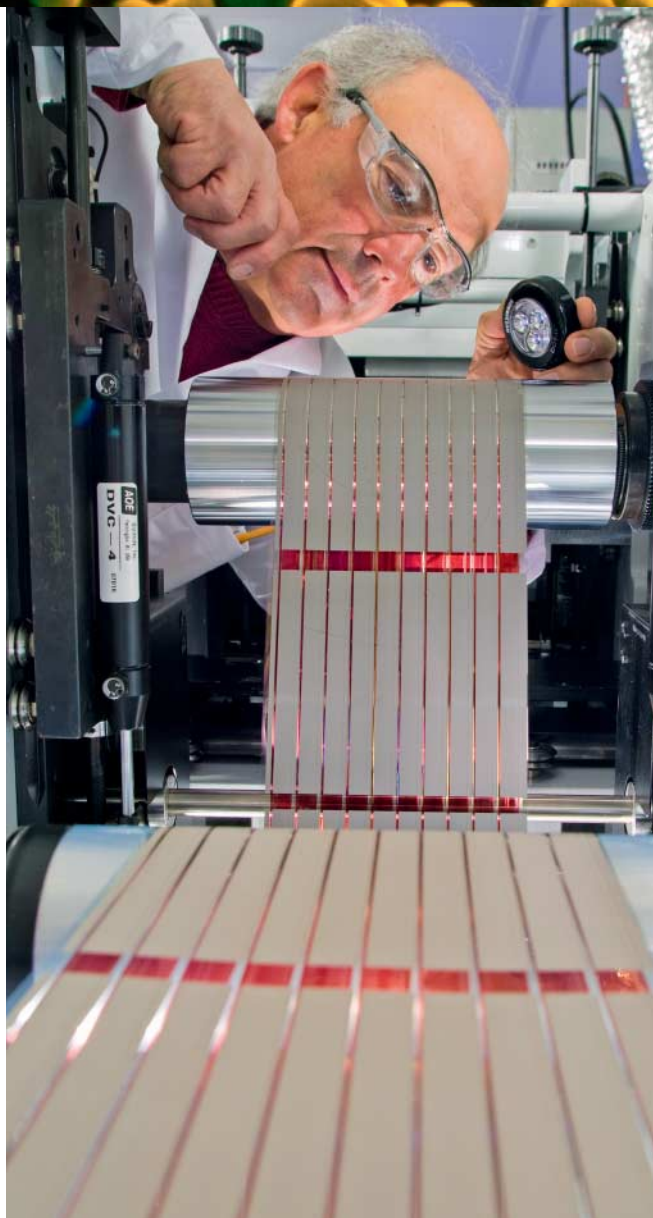
Für Deutschland haben Jochen Lambauer und Alfred Voß vom Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung an der Universität Stuttgart erste Zahlen vorgelegt. Nach ihren Berechnungen könnten Nanotechnologien den Endenergieverbrauch bis 2030 im günstigsten Szenario um bis zu 6,7 Prozent senken.

Knapp sieben Prozent im besten Fall klingen noch nicht bahnbrechend. Allerdings seien in dieser Analyse nur Effizienzsteigerungen aufgrund von Nanomaterialien in der industriellen Fertigung oder bei Endprodukten erfasst, sagt Lambauer. Direkt für die Energieerzeugung genutzte Nanotechnologien seien dagegen noch nicht berücksichtigt. Und genau hier könnte die Killerapplikation liegen, die der Nanotechnik bisher fehlt.

## DURCH DIE SOLARE SCHALLMAUER

Die ersten Kandidaten sind Solarzellen aus nanostrukturierter Materialien, die sich mit Schichtdicken von weniger als einem Mikrometer drucken lassen – wahlweise auf Glas oder auf Kunststoffolie. Wie in einer Druckerei werden bis zu einen Kilometer lange Plastikbänder durch eine Straße aus Walzen geschickt und kommen am Ende als lichtsammelndes Band wieder heraus. Derartige Größen sind mit der üblichen Vakuumprozessentechnik bei Siliziumzellen nicht denkbar.

Der kommende Platzhirsch auf dem neuen Feld ist die kalifornische Firma Nanosolar, die nahe Berlin eine 620-Megawatt-Anlage und in Kalifornien eine 430-Megawatt-Anlage errichtet hat (s. TR 9/08). Sie verarbeitet ein Gemisch aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen (CIGS). Für Erik Oldekop, Deutschland-Chef von Nanosolar, ist die CIGS-Technologie eine typische Ausnutzung von Nanoeffekten: „Um die vier Bestandteile drucken zu können, müssen sie nanoskalig sein. Im Mikrometerbereich bekommen sie keine chemische Verbindung hin, nur Verklumpungen.“ Erst die exakte Anordnung zu einem Kristall-



**Energie vom Band:**  
Die US-Firma Konarka Technologies druckt Nanosolarzellen auf flexible Plastikstreifen

Prozent – verglichen mit rund 20 Prozent bei Siliziumzellen. Für die Nanotech-Verfechter sind jedoch nicht die Wirkungsgrade entscheidend, sondern die Herstellungskosten pro Watt Zelleistung. Die liegen bei herkömmlichen Zellen bei über zwei Dollar pro Watt. „Die Kunden sind nicht bereit, für einen größeren Wirkungsgrad einen Preisaufschlag zu zahlen“, sagt Nanosolar-CEO Martin Röscheisen. Aufgrund seiner hochskalierbaren Drucktechnik sei er zuversichtlich, dass die neuen Materialien in den nächsten Jahren die Schallmauer von einem Dollar pro Watt als Erste durchbrechen werden.

### SPALTEN UND SPEICHERN

Mithilfe von Nanotechnik könnte selbst die etwas in Verruf geratene Vision einer Wasserstoffwirtschaft (s. TR 4/06) ein Comeback erleben. Die „Powering the Planet“-Initiative von drei US-Forschungsgruppen lässt sich hierfür von der Photosynthese inspirieren. Die wird in Pflanzen von einer molekularen Maschinerie vollzogen, die jedem synthetischen System zur Ehre gereichen würde: Licht wird zunächst in positive und negative Ladungen umgewandelt, um dann die Trennung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu bewirken.

Nate Lewis vom California Institute of Technology setzt für den ersten Schritt auf einen Wald aus Silizium-Nanostäben. Fällt Sonnenlicht auf das Halbleitermaterial, entstehen bewegliche Elektronen und positiv geladene Elektronenlöcher – wie in einer Solarzelle. Allerdings ist die Gesamtoberfläche des Silizium-Waldes sehr viel größer und fängt damit auch mehr Photonen ein. Und im Unterschied zu Silizium-Wafern lassen sich die Nanostäbe als Einkristalle relativ billig, für 40 bis 70 Dollar pro Kilogramm, produzieren.

Mithilfe von Katalysatoren sollen Löcher und Elektronen aus dem künstlichen Nanowald im nächsten Schritt bewirken, dass sich Wassermoleküle aufspalten und Sauerstoff- sowie Wasserstoffgas entsteht. Ein vielversprechendes Material dafür auf Kobalt-Basis hat Daniel Nocera vom MIT im Juli vorgestellt (s. TR 9/08). Allerdings erleichtert es bislang nur die Bildung von Sauerstoffgas und lässt sich noch nicht mit Lewis' lichtwandelnden Nanostäben kombinieren, weil es eine äußere Spannungsquelle benötigt.

Einen etwas anderen Ansatz verfolgt Martin Demuth vom Max-Planck-Institut für Bioorganische Chemie in Mülheim an der Ruhr. Sein Herzstück ist Titandisilizid, das unter Licht einstrahlung Wasser oxidiert; dadurch bilden sich Protonen und Sauerstoffionen. Einige davon verbinden sich mit Titan- und Siliziumatomen just zu dem Katalysator, der Sauerstoffbildung ermöglicht. Die dabei frei werdenden Elektronen werden über eine Elektrode abgeleitet und verbinden sich an einer zweiten Elektrode mit den Protonen, die sich hinter einer halb durchlässigen Membran sammeln, zu Wasserstoffgas. Wie viel davon entsteht, will Demuth nicht verraten, weil seine Arbeit noch nicht publiziert ist.

gitter von je einem Kupfer-, Indium- und Galliumatom sowie zwei Selenatomen macht die Verbindung zu einem Halbleiter.

Große solare Hoffnungen werden auch in zwei weitere Materialien gesetzt: zum einen ein Gemisch aus Farbstoffen und Titandioxid-Nanopartikeln, zum anderen eine Verbindung aus Polymeren und sogenannten Fullerenen, käfigartigen Kohlenstoffmolekülen. Beide entwickelt vor allem die US-Firma Konarka Technologies, die bei den neuen Solarzellentechniken das größte Patentportfolio hat. Eine erste Anwendung des Polymer-Materials, von Konarka „Power-Plastic“ getauft, sind kleine faltbare Solarmodule, die sich an Handys oder Laptops anschließen lassen. „Den Zwei-Watt-Akku eines Handys können Sie in der prallen Sonne schon mit einer Farbstoffzellfläche von 0,04 Quadratmetern in einer Stunde aufladen“, rechnet Konarka-Technikchef Christoph Brabec vor. Das entspricht einer Fläche von 20 mal 20 Zentimetern.

Die Wirkungsgrade der neuen Materialien können bislang zwar nicht mit Siliziumzellen konkurrieren: Für CIGS-Zellen liegt er bei fünf, für Farbstoff- und Polymerzellen bei bis zu elf

Weil Wasserstoff in Gasform nur mit sehr hohem Druck auf handhabbare Volumen gebracht werden kann, wird außerdem intensiv an Materialien geforscht, in denen sich das leichteste aller Gase einfacher lagern und transportieren lässt. Ein Kandidat sind sogenannte Metal-organic Frameworks (MOF). „Die ähneln einem Fachwerkhäus: Die langen organischen Moleküle bilden die Balken und die Metallatome die

Verbindungspunkte zwischen den Balken“, erklärt Ulrich Müller, leitender Forscher bei BASF, das unter dem Markennamen „Nanocubes“ bereits erste MOFs verkauft.

Nanoskalig sind hier nicht die Würfel selbst, sondern die vielen Hohlräume zwischen den molekularen Balken. Ein Gramm MOF hat eine Gesamtoberfläche von 3000 Quadratmetern – fast so viel wie ein halbes Fußballfeld. Pro Liter Materialvolumen können sich dadurch in den Hohlräumen bei minus 196 Grad Celsius – was eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff voraussetzt – 42 Gramm Wasserstoff anlagern. Ein 100-Liter-Tank aus Nanocubes würde ein Brennstoffzellenauto so rund 400 Kilometer fahren lassen. Das Betanken lasse sich in Minuten bewerkstelligen, sagt Müller, und die Produk-



**Würfel für Wasserstoff:** Mit den „Nanocubes“ von BASF lässt sich das flüchtige Gas in Tanks festhalten

tion von MOFs im großen Maßstab sei mit Standardanlagen möglich. Allerdings müssten auch die Autotanks dann energieaufwendig gekühlt werden.

#### PORENTIEF REINES WASSER

Neben einer nachhaltigen Energieversorgung gibt es eine zweite gewaltige Herausforderung, die es aber nur selten in die Schlagzeilen schafft: sauberes Wasser. Industrieländern machen vor allem Arzneimittelrückstände im

Abwasser zu schaffen. Die können in den biologischen Reinigungsstufen von Kläranlagen nicht abgebaut werden, und die gängigen technischen Verfahren verbrauchen entweder viel Energie oder filtern auch wertvolle Mineralstoffe heraus.

Die Arbeitsgruppe um Günter Tovar am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik entwickelt deshalb ein Verfahren mit Polymernanopartikeln, „NanoMIPs“ genannt. Bei der Synthese werden ihnen verschiedene winzige Einbuchtungen aufgeprägt, in denen sich später jeweils nur ganz spezielle Moleküle anlagern können. „Dieser Mechanismus wird molekulare Erkennung genannt und unter anderem auch für die Nanomedizin verfolgt“, sagt Tovar. Erfolg versprechende Tests gab es bereits mit der Entfernung des Wirkstoffs Diclofenac, der unter anderem gegen Prellungen und Zerrungen eingesetzt wird und sehr häufig im hiesigen Abwasser zu finden ist. Um die NanoMIPs nach der Anwendung leichter aus dem Wasser entfernen zu können, sollen sie mit einem magnetisierbaren Kern hergestellt werden, der das Abfischen mithilfe eines Magnetfeldes erlaubt.

In trockenen Regionen allerdings geht es eher darum, überhaupt genügend Trinkwasser zu haben. Nicht selten müssen hier Reservoirs genutzt werden, die stark verschmutzt, mit Viren und Bakterien infiziert oder gar mit Arsen vergiftet sind.

Statt nur mithilfe von Chemikalien kann solches Wasser auch mit nanoskaligen Filtermaterialien gereinigt werden. Bakterien und Viren filtert etwa der tragbare Filterstab „LifeStraw“ des Schweizer Unternehmens Vestergaard Frandsen heraus. Ein Stab reicht für 700 Liter Wasser – genug, um einen Menschen ein Jahr lang mit Wasser zu versorgen. Einen noch dichteren Filter, der auch Kleinstpartikel zurückhält, hat die US-Firma Seldon Technologies aus einem Geflecht von Kohlenstoffnanoröhren entwickelt, die einen Durchmesser von wenigen Nanometern haben. In denen nimmt die Fließgeschwindigkeit des Wassers deutlich zu, weil die Röhrenwände den Wassermolekülen kaum Widerstand entgegensetzen. Seldons „WaterStick“ reinigt so in einer Minute 200 Milliliter Wasser von organischen und anorganischen Bestandteilen, reicht jedoch nur für 265 Liter.

Noch sind Nanoröhren aber ein teurer Werkstoff. Das bayerische Unternehmen Inge Waternanotechnologies AG stellt nanoporöse Filter deshalb aus Polymerverbindungen her. Die Poren entstehen dabei in einem Selbstorganisationsprozess: Das Polymer wird in ein warmes Wasserbad zusammen mit einem Füllstoff eingespritzt. Dabei bilden sich in ihm lange, hauch-

## Nano oder nicht?

Unter Fachleuten wird immer wieder darüber gestritten, welche Technologien wirklich zu den Nanotechnologien zählen. Die international übliche Definition besagt nur, dass Nanotechnologien materielle Strukturen untersuchen, herstellen oder nutzen, deren Ausdehnung in mindestens einer Raumrichtung unter 100 Nanometern liegt. Am Anfang dieses Forschungsgebiets stand aber nicht eine einzige bahnbrechende Entdeckung oder Erfindung. Tatsächlich wurden Nanoteilchen unwissentlich bereits im Mittelalter genutzt: Sie gaben etwa dem Stahl von Schwertern ihre Härte. Seit dem 19. Jahrhundert haben sich dann Physik und Chemie, später auch die Biologie zunehmend mit dem beschäftigt, was man jetzt als „Nano-Objekte“ bezeichnet: Atome, Moleküle und Kolloide sowie Gene, Proteine und andere Zellbausteine. Neu ist an den Nanotechnologien, dass sie Stoffe und Objekte nicht mehr zufällig, sondern ganz gezielt manipulieren.

Dabei will man vor allem Effekte nutzen, die erst auf der Nanoskala unter 100 Nanometer Ausdehnung auftreten:

- Die Gesamtoberfläche eines Pulvers oder einer Dispersion aus Nanopartikeln ist sehr viel größer als bei grobem Pulver – und kann damit mehr Licht absorbieren oder katalytische Prozesse effizienter machen.
- Weil Nanoteilchen im Verhältnis viel mehr Oberflächenatome haben, ändern sich ihre Stoffeigenschaften: Der Schmelzpunkt kann sinken, die Kristallstruktur sich anders anordnen. Auch zeigen Nanopartikel ein anderes magnetisches Verhalten oder werden zu Halbleitern, obwohl der Stoff in makroskopischen Festkörpern nicht halbleitend ist.


dünne Röhrchen, sogenannte Kapillaren. Indem das Lösungsmittel aus dem Polymer durch die Kapillarwände diffundiert, hinterlässt es in diesen Poren von 10 bis 20 Nanometer Durchmesser. Je sieben solcher Kapillaren sind in einer Faser miteinander verbunden, die Fasern werden als Bündel in ein Filterrohr gesteckt. Das gefilterte Wasser, das aus den Kapillarwänden tritt, wird an der Innenwand des Filterrohrs herausgeleitet.

Filter mit noch kleineren Poren kann das saarländische Unternehmen ItN Nanovation aus keramischen Nanopartikeln herstellen. Dabei nehme der Aufwand, eine möglichst regelmäßige Porenstruktur zu erreichen, mit abnehmender Porengröße zu, sagt ItN-Produktmanager Kay Gabriel: „Eine echte Nano-Membran mit einem Porendurchmesser unter einem Nanometer ist richtig viel Arbeit. Da muss man sehr penibel und sauber arbeiten.“ Dies sei auch der Grund, warum solche Membranen bisher anders als etwas gröbere Filter noch nicht in Großserie hergestellt würden.

Kritiker werden geneigt sein, den neuen grünen Anstrich der Nanotechnik als vorbeugende Propaganda abzutun. Denn tatsächlich fürchten Industrie und Forschung seit Langem einen Umschwung der bislang positiven öffentlichen Meinung zur Nanotechnik, sollten sich die Hinweise mehr, dass

Nanomaterialien toxisch sein können. Und tatsächlich haben beispielsweise einige Studien gezeigt, dass Kohlenstoffnanoröhren in bestimmten Anordnungen wie die ähnlich geformten Asbestfasern wirken. Weitere Studien kamen aber zu anderen Befunden. Weil internationale Standards für nanotoxikologische Untersuchungen gerade erst entwickelt werden, sind die Ergebnisse bisher noch widersprüchlich.

#### **VORSICHT, NANOTECHNIK!**

In den meisten grünen Nanotech-Anwendungen sind die Materialien fest eingebunden – eine unmittelbare Gefahr für Menschen stellen sie so nicht dar. Unklar ist aber, ob sie nach einer Entsorgung in die Umwelt gelangen könnten und wie sie sich dort verhalten. Die Forschung hierzu steht gerade erst am Anfang. Damit grüne Nanotechnologien ihrem Namen gerecht werden, müssen diese Fragen gründlich untersucht werden. Denn es wäre sicher nicht hilfreich, damit alte Probleme zu lösen und zugleich neue, womöglich noch gravierendere, in die Welt zu setzen. 

*Reports und Studien zum Thema finden Sie unter [www.technologyreview.de/nanotech](http://www.technologyreview.de/nanotech)*

Anzeige