

GDCh

# nano

EIN MAGAZIN DER  
GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER



CHANCEN

EINE TECHNOLOGIE  
IN DEN STARTLÖCHERN

RISIKEN

GIBT ES EINE KEHRSEITE  
DER MEDAILLE?

ZUKUNFT

WENN SCIENCE-FICTION  
ZUR REALITÄT WIRD



*»DIE GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER  
UND IHRE MITGLIEDER UNTERSTÜTZEN  
UND FÖRDERN EINE NACHHALTIGE UND DAUERHAFT  
ENTWICKLUNG IN GESELLSCHAFT, WIRTSCHAFT  
UND UMWELT. SIE HANDELN STETS AUCH IM BEWUSST-  
SEIN IHRER VERANTWORTUNG GEGENÜBER  
KÜNFTIGEN GENERATIONEN.«*

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit mehr als 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fach-

gruppen, Sektionen sowie weitere Arbeitskreise und Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemiker-Forum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

[WWW.GDCH.DE](http://WWW.GDCH.DE)

LIEBE LESERINNEN,  
LIEBE LESER,

»There's Plenty of Room at the Bottom« – »Unten ist eine Menge Platz«: So überschrieb der Nobelpreisträger Richard Feynman eine Rede vor Mitgliedern der American Physical Society. Was er dann sagte, klang wie Science-Fiction. Denn er sprach von mikroskopisch kleinen Motoren und davon, dass es eines Tages möglich sein würde, einzelne Atome sichtbar zu machen.

Das war im Dezember 1959. Heute können Wissenschaftler mit dem Rasterkraftmikroskop nicht nur einzelne Atome sehen, sondern auch bewegen. Wenn Feynmans Nachfahren jetzt von der Zukunft der »Nanotechnologie« sprechen, geht es um gänzlich neuartige Quantencomputer oder um »Nanofahren«, die sich durch die Blutbahn bewegen und gezielt Krebszellen angreifen.

Damit solche Visionen einmal Wirklichkeit werden, sind vor allem wir Chemiker gefordert. Denn wir sind es, die nach geeigneten Substanzen suchen – und neue erfinden –, die in submikroskopischer Winzigkeit genau die gesuchten Eigenschaften haben. Wir stellen die Materialien her, die als Grundbausteine der neuen Technologie ungeheure Potenziale bergen: für den Umweltschutz, für die Energieversorgung oder im Kampf gegen Krebs.

Doch kein Licht ohne Schatten. Heute schon finden sich Nanopartikel nämlich längst auch in alltäglichen Dingen wie Sonnenmilch, Schuhsprays und Ketchupflaschen. Ob und welche Gefahren sie für Umwelt und Gesundheit darstellen, ist indes noch weitgehend unbekannt. Der technische Fortschritt ist so rasant, dass Risikoforscher mit ihren Bewertungen schlichtweg abgehängt werden.

Auch die Bevölkerung ist nur unzureichend informiert: In einer Studie des Bundesinstituts für Risikobewertung von 2013 gaben zwar gut 67 Prozent der Befragten an, gegenüber der Nanotechnologie ein gutes oder sehr gutes Gefühl zu haben, fast die Hälfte der Befragten räumte aber auch ein, nichts oder nur wenig über die Nanotechnologie zu wissen.

Für die GDCh sind diese Zahlen Herausforderung und Verpflichtung zugleich. Denn als Schlüsseltechnologie wird »nano« in Zukunft für einen Großteil unserer Mitglieder weiter an Bedeutung gewinnen – im eigenen beruflichen Leben und als wirtschaftliche Basis von Unternehmen.

Langfristig wird sie jedoch nur dann erfolgreich sein können, wenn ihre Nebenwirkungen bekannt und schädliche Folgen bestmöglich erforscht sind. Und wenn die breite Öffentlichkeit informiert ist. Mit diesem Magazin wollen wir einen Schritt in diese Richtung tun.

ICH WÜNSCHE IHNEN EINE  
ANREGENDE LEKTÜRE!



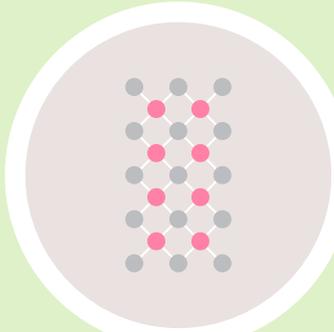
DR. THOMAS GEELHAAR  
PRÄSIDENT  
GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER

#### UMSCHLAGBILD

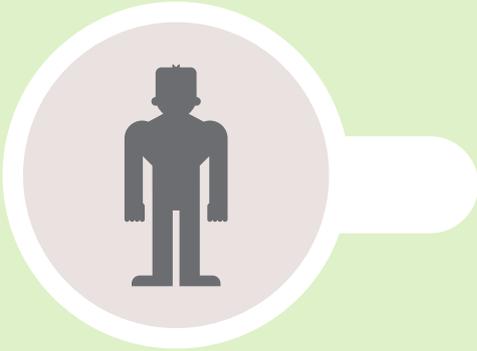
Sogenannte Einschlussverbindung: Im Kristallgitter eines Metalloxids sind Lithiumionen eingeschlossen, während sich die Elektronen im gesamten Partikel verteilen. Solche nano- bis mikrometergroßen Partikel sollen in Batterien und Akkus zum Einsatz kommen.

Mit freundlicher Genehmigung:  
Pressefoto BASF SE

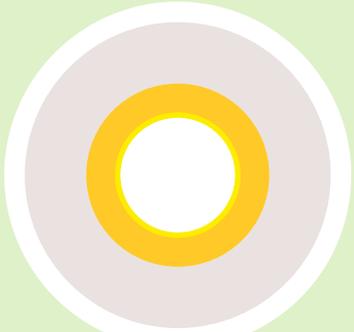
# ZEHN HOCH MINUS NEUN



10<sup>-9</sup> METER  
NANOPARTIKEL

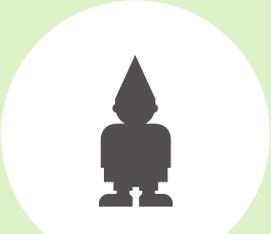


1 NANOMETER = 1 MILLIONSTEL MILLIMETER



10<sup>9</sup> METER  
SONNE

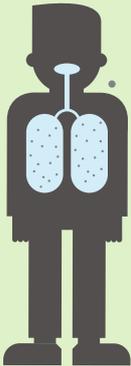
Ein Nanopartikel verhält sich in der Größe zum Menschen in etwa wie der Mensch zur Sonne.



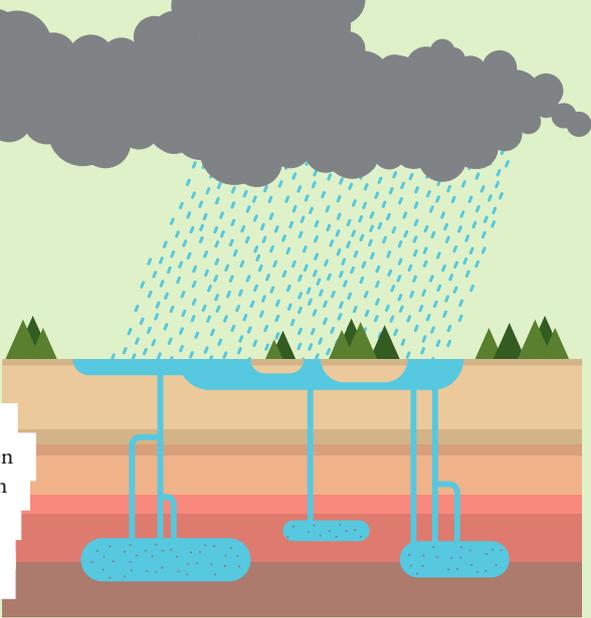
»NANO« KOMMT  
AUS DEM  
GRIECHISCHEN UND  
HEISST »ZWERG«.



Nanofine Rußpartikel und Stäube entstehen in der Natur, vor allem aber durch Industrieanlagen, Automobile und Privathaushalte.

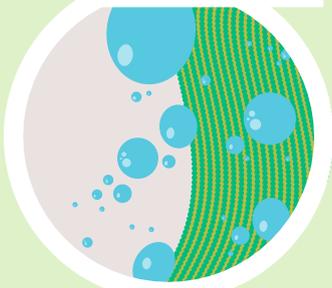


**GEFAHREN DURCH NANO?**  
Geraten Feinstäube beim Einatmen in die Lunge, kann es langfristig zu schweren Schäden kommen. Nanopartikel können sogar in die Blutbahn übergehen. Über die Auswirkungen von Nanopartikeln in Böden und Gewässern ist bis heute indes nur wenig bekannt.



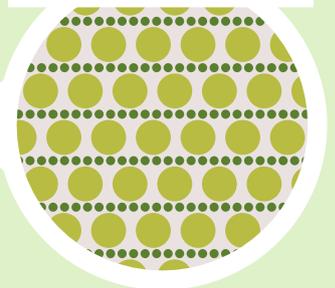
LOTUSEFFEKT

lässt Wasser abperlen.



QUARZPARTIKEL

schützen Lack vor Kratzern.

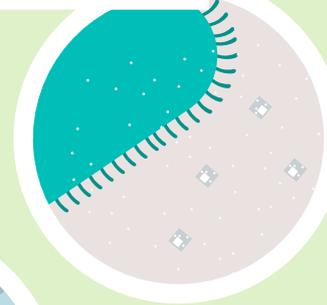


NANOKRISTALLE

sparen Energie beim Aushärten von Beton.

NANOSILBER

wirkt antibakteriell.



TITANDIOXID

absorbiert gefährliche UV-Strahlung.



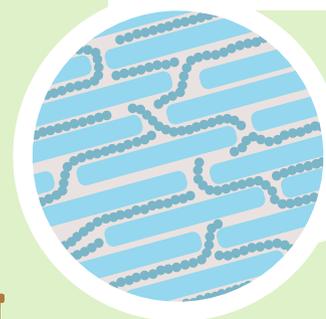
NANOSILIKATE

lassen Ketchup besser fließen.



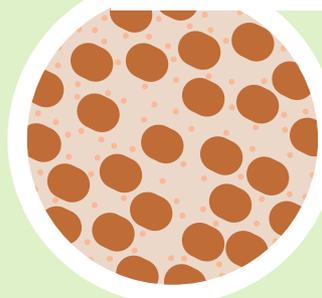
NANOBESCHICHTUNGEN

machen Plastik gasdicht.



SILIZIUMDIOXID

lässt Kaffeepulver rieseln.



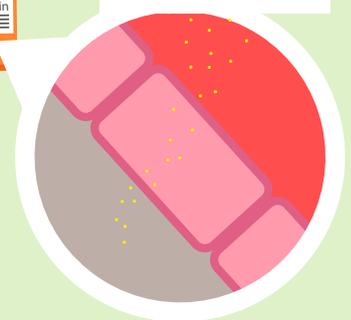
NANOFÄHREN

sollen Arzneien gezielt zu kranken Zellen bringen.



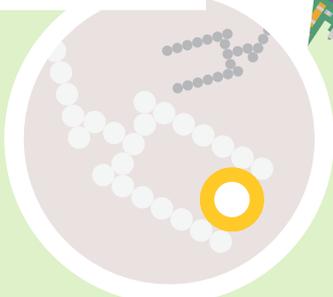
NANOGOLD

soll Krebsmedikamente durch die Blut-Hirnschranke schleusen.



RASTERKRAFTMIKROSKOPE

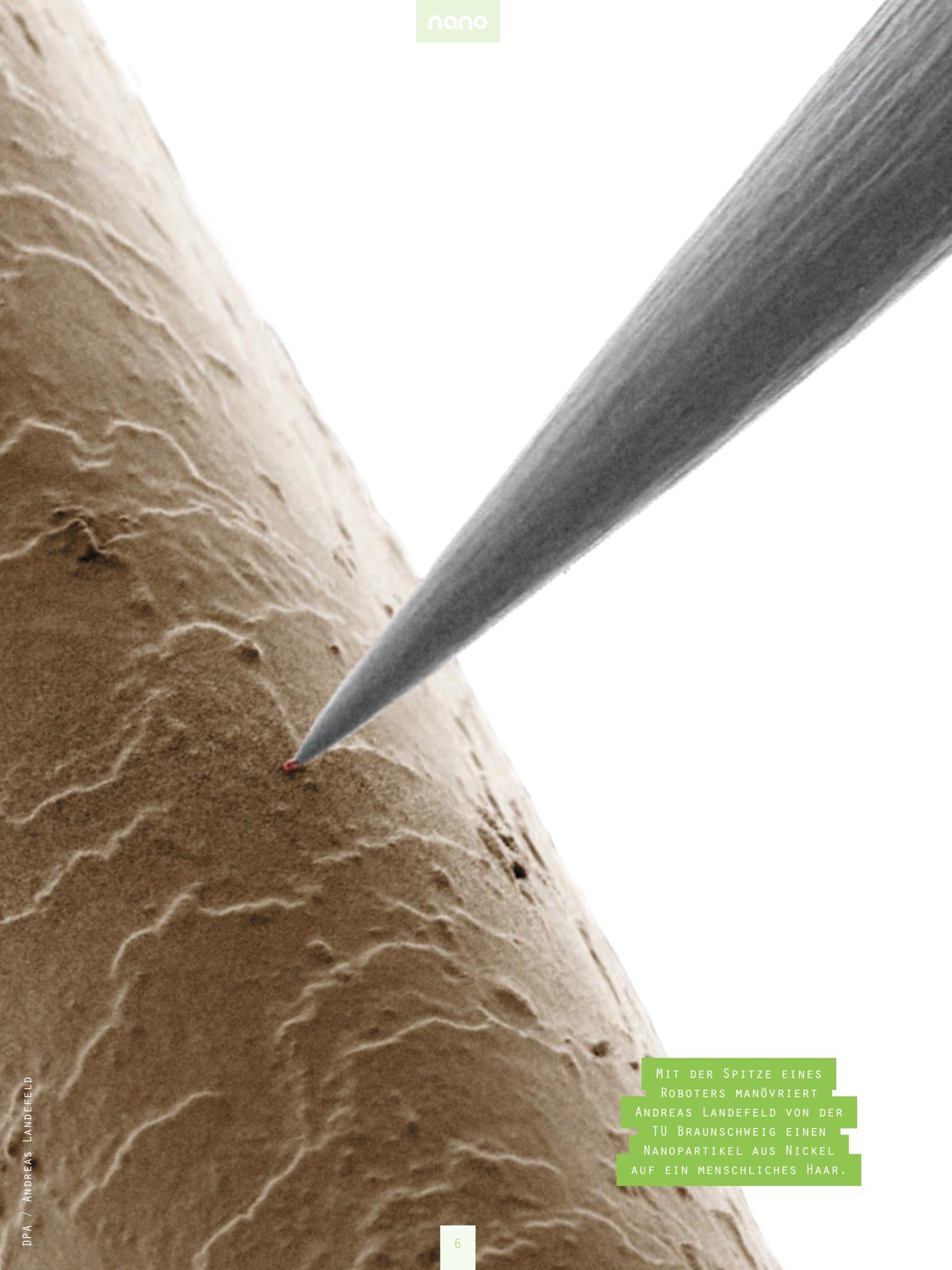
bewegen einzelne Atome.



INSULINGEFÜLLTE NANOKUGELN

könnten das Ende der Spritzerei bei Diabetes bedeuten.





MIT DER SPITZE EINES  
ROBOTERS MANÖVRIERT  
ANDREAS LANDEFELD VON DER  
TU BRAUNSCHWEIG EINEN  
NANOPARTIKEL AUS NICKEL  
AUF EIN MENSCHLICHES HAAR.

# REVOLUTION IM WINZIGEN

NANOMATERIALIEN SIND LÄNGST TEIL UNSERES ALLTAGS:  
MAN FINDET SIE IN DEOS, T-SHIRTS UND  
TENNISCHLÄGERN. DIE GANZ GROSSEN HOFFUNGEN  
HABEN DIE NANOTECHNOLOGIEN BISHER NICHT ERFÜLLT.  
DAS IST ABER WOHL NUR EINE FRAGE DER ZEIT.

**W**as haben eine Gartenschere, ein Telefon und eine Bierflasche gemeinsam? Natürlich nichts – außer dass diese Gegenstände von ähnlicher Größe sind. Doch würde deshalb jemand auf die Idee kommen, diese und alle anderen etwa gleich großen künstlichen Objekte unter der Überschrift »Zentimetertechnologie« zusammenzufassen?

Der Begriff »Nanotechnologie« steht sogar für noch viel mehr. Er umfasst nicht nur Dinge, die so winzig klein sind, dass sie lediglich unter dem Elektronenmikroskop sichtbar werden, sondern auch eine Vielzahl von Technologien und Materialeigenschaften. Dazu gehören jahrzehntealte und längst industrialisierte Methoden zur Herstellung von nanometergroßen Partikeln ebenso wie die noch im Forschungsstadium befindlichen Computerchips aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die kleiner und leistungsfähiger sein sollen, als herkömmliche Siliziumchips es je sein können.

In vielen Dingen unseres alltäglichen Lebens haben diese Materialien längst Einzug gehalten – in der Sonnencreme mit ihren vor UV-Strahlen schützenden Titandioxid-Partikeln etwa oder in den von innen beschichteten Ketchupflaschen, die das ewige Klopfen auf den Flaschenboden unnötig machen. Das mag nützlich sein, revolutionär sind solche Anwendungen nicht. Um einen Blick in die Zukunft der Nanotechnologien zu werfen, bedarf es daher eines Blicks hinter die Kulissen der Hightech-Labors von Industrie und Forschung. Hier entwickeln Wissenschaftler beispielsweise winzige Käfige aus gefaltetem Erbgutmaterial, die sich schon in rund einem Jahrzehnt mit dem Blut durch den Körper bewegen sollen, um Leukämiezellen zu erkennen – und zu bekämpfen. Andernorts ist es heute bereits möglich, mit Hilfe von Mikroskopen einzelne Atome sichtbar zu machen und diese von einem Ort zum anderen zu bewegen.

Das Einzige, was diese sonst völlig verschiedenen Produkte und Techniken gemein haben, ist die winzige »Nanoskala«, die von einem Nanometer bis 100 Nanometer reicht. Ein Nanometer: Das ist der milliardste Teil eines Meters. Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von ungefähr 50 000 Nanometern, ein Blutkörperchen misst etwa 10 000. Die Größe von Viren liegt zwischen 20 und 100 Nanometern und somit in der Größenordnung der kleinsten Schaltelemente von Mikroprozessoren.

**WENN GOLD UNEDEL WIRD**  
Nun hat der Mensch seine Technologien ja seit jeher stets verkleinert und verfeinert – von grobschlächtigen Mahlwerken über filigrane Uhrwerke bis zu Computerchips mit ihren unsichtbar kleinen Leiterbahnen und Transistoren. Doch in den Nanotechnologien sehen Experten mehr als nur eine Fortsetzung der Miniaturisierung. Denn in den Dimensionen,

von denen hier die Rede ist, geht es nicht nur um die räumliche Verkleinerung. Nein, in dieser submikroskopischen Welt verändern sich auch die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Materialien. Jenes vor UV-Strahlung schützende Titandioxid etwa ist in Sonnencremes nur einsetzbar, wenn die Partikel kleiner sind als 50 Nanometer. Denn dann werden sie durchsichtig und bilden keinen weißen Film auf der Haut.

Ein anderes, besonders eindrückliches Beispiel für diesen Effekt ist Gold. Das Edelmetall gilt eigentlich als chemisch träge: Es reagiert beispielsweise nicht mit Sauerstoff und bleibt somit rostfrei, weshalb man es für Schmuck oder Zahnkronen verwendet. Liegt das Edelmetall jedoch in Form von Nanopartikeln vor, verhält es sich vollkommen gegensätzlich:

Es bindet Sauerstoff- und Wasserstoffmoleküle nicht nur an sich, sondern fördert auch deren Verbindung zu Wasserstoffperoxid. Solche Kupplermaterialien – Chemiker nennen sie Katalysatoren – sind längst vielfach im Einsatz. Für die Zukunft sehen Fachleute wie Björn Mathes von der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (Dechema) gerade in diesem Bereich enorme Potenziale: »Mit Hilfe von Nanogold werden wir in der Lage sein, wichtige chemische Zwischenprodukte, beispielsweise für die Herstellung von Kunststoffen, aus nachwachsenden Rohstoffen zu erzeugen.« Angesichts schwindender Erdölressourcen ist das eine verheißungsvolle Botschaft.

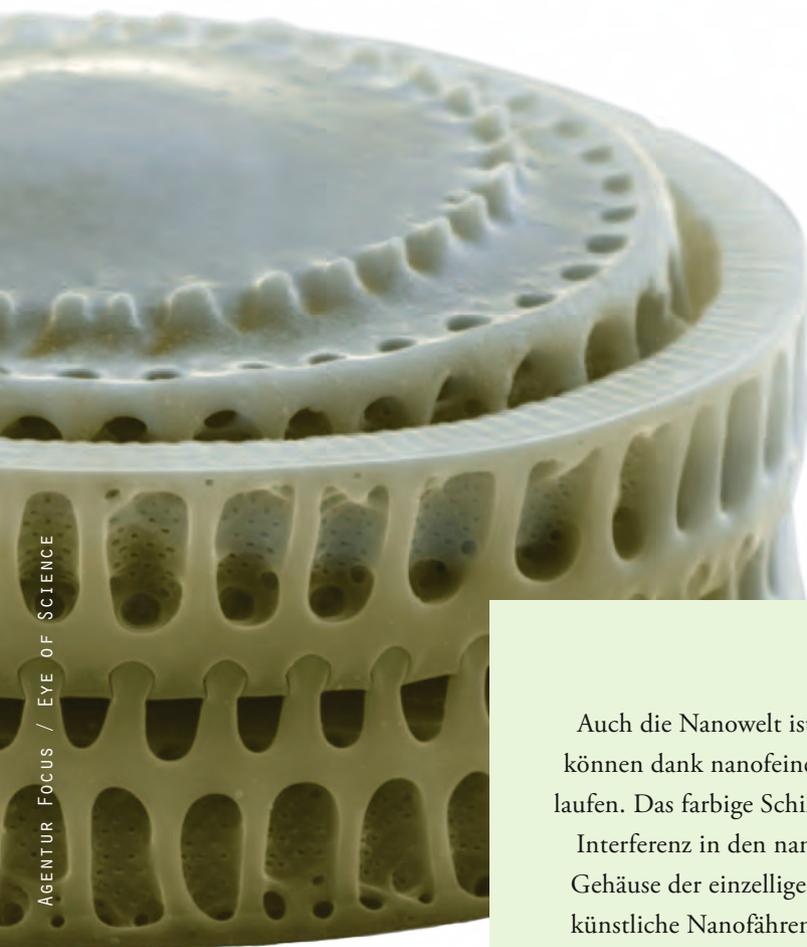
Nicht nur Partikel, auch komplexe Strukturen aus Nanomaterialien zeigen

Fähigkeiten, die im makroskopischen Maßstab undenkbar sind. Herkömmliche Materialien wie Halbleiter oder Kunststoffe werden durch periodisch angeordnete nanoskalige Hohlräume zu sogenannten photonischen Kristallen. Diese lenken Licht auf ähnliche Weise wie Halbleiterbauelemente elektrischen Strom. Damit sind »optische Computer« denkbar, die dank der lichtschnellen Weiterleitung von Signalen ungleich schneller rechnen als heutige Computer.

In den Solarzellen der Zukunft werden Stapel aus nanoskaligen Schichten verschiedener Halbleiter zudem das gesamte Wellenlängenspektrum des Sonnenlichts einfangen können. Heutige Zellen nutzen nur einen Teil davon, weshalb ihre Effizienz begrenzt ist. Mit Hilfe der neuen Materialien könnte der Wirkungsgrad auf über 60 Prozent steigen. Zum Vergleich: Moderne Anlagen erreichen kaum 25 Prozent! Wann es so weit ist, vermag jedoch niemand zu sagen – zu hoch sind noch die Hürden der technischen Umsetzung.

#### GEFANGENE ELEKTRONEN

Die Gründe für die teils gänzlich unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften nanometergroßer Stoffe sind vielfältig. Zu den wichtigsten gehört der Umstand, dass Elektronen neben ihrem Teilchencharakter auch die Eigenschaften einer Welle haben. Werden Elektronen in einen Raum eingesperrt,



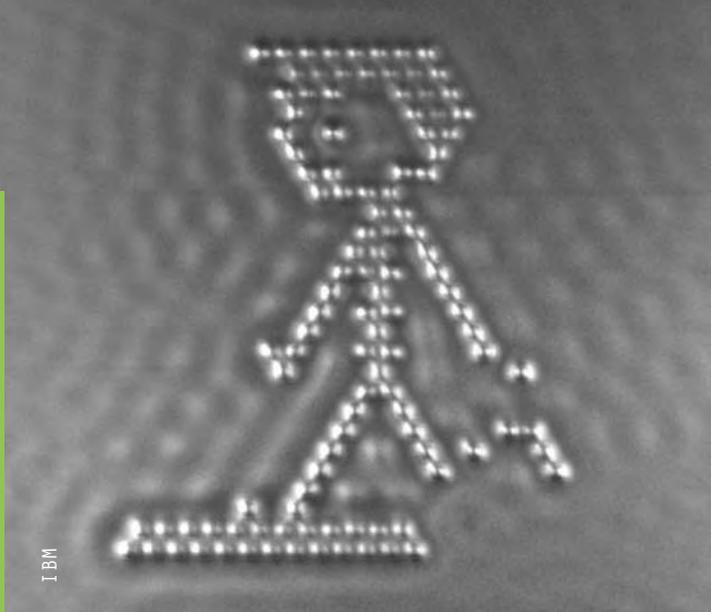
#### VORBILD NATUR

Auch die Nanowelt ist voller Leben – Beispiele dafür gibt es genug: Geckos können dank nanofeiner Härchen an den Füßen kopfüber die Decke entlanglaufen. Das farbige Schillern von Schmetterlingen beruht auf der Reflexion und Interferenz in den nanoskalig strukturierten Flügelschuppen. Die filigranen Gehäuse der einzelligen Kieselalgen (Bild) dienen Chemikern als Vorbild für künstliche Nanofahren, die eines Tages durch die Blutbahn schwimmen und Medikamente gezielt in erkrankte Regionen schleusen sollen.

## »A BOY AND HIS ATOM«

Mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops lassen sich atomare Oberflächen sichtbar machen – und gezielt manipulieren. Forscher des IBM Almaden Research Center haben auf diese Weise einzelne Kohlenmonoxidmoleküle auf einer Kupferplatte hin und her bewegt und von jedem Arrangement ein Foto gemacht. Am Ende entstand daraus der Film »A Boy And His Atom«:

[www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml](http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml)



dessen Größe ihrer Wellenlänge entspricht, ergeht es ihnen ähnlich wie der Saite eines Streichinstruments. Diese kann je nach Länge nur in ganz bestimmter Frequenz schwingen. Da die Wellenlänge von Elektronen im Nanometerbereich liegt, können sie je nach Dicke oder Durchmesser eines Partikels dann auch nur noch einige festgelegte Energiewerte annehmen. Sie ähneln darin Atomen, deren Elektronen ja auch nur definierte Energieniveaus besetzen, die sich von Element zu Element unterscheiden. Unterschiedliche Energien bringen unterschiedliche Eigenschaften mit sich. So variiert beispielsweise die Farbe verschieden großer Nanopartikel.

Dank dieses sogenannten Quanten-Confinements lassen sich »Quantendots« herstellen. Sie entstehen durch die Ummantelung eines Halbleiters mit einem anderen – das Ganze ähnelt einer Kirsche mit Fruchtfleisch und Kern. Die Elektronen des inneren Halbleiters werden durch den äußeren »eingesperrt«. Weil in Quantendots verschiedenen Durchmessers die Elektronen unterschiedliche Energien annehmen, absorbieren und emittieren sie charakteristische Farben. Solche Quantendots können die einzelnen Pixel neuartiger Bildschirme sein. Wegen ihrer Winzigkeit taugen sie für extrem dünne und biegsame Farbdisplays, die keine Hintergrundbeleuchtung benötigen. Das ist keine Zukunftsmusik:

Ein Tablet von Amazon nutzt bereits Quantendots für sein Display.

Ein weiterer Grund für die Andersartigkeit von Stoffen auf der Nanoskala ist die riesige Oberfläche, die beim Zerteilen eines Materials in immer kleinere Partikel entsteht. Ein Beispiel mag dies veranschaulichen: Spaltet man einen Würfel von einem Zentimeter Kantenlänge in nanometergroße Würfelchen, dann ergeben sich alles in allem eine Trilliarde, also  $10^{21}$  Teilchen. Während die Oberfläche des Ausgangswürfels der einer Briefmarke entspricht, sind die Oberflächen der Nanoteilchen zusammen so groß wie ein Fußballfeld.

### VIELES IST ZUKUNFTSMUSIK

Technisch interessant ist dies vor allem dann, wenn die Wirkung des Nanomaterials von dessen Oberfläche ausgeht. Denn dann reichen schon äußerst geringe Mengen des Stoffs, um einen Effekt zu erzielen. Nanopartikel aus Silber zum Beispiel geben Silberionen ab, die Bakterien töten, welche Körperschweiß in schlechten Geruch verwandeln. Wenige Milligramm Nanosilber reichen aus, damit ein Paar Socken nicht so schnell stinkt.

Ähnliches gilt für Siliziumdioxid – reinen Quarz also. In Lacken bilden  $\text{SiO}_2$ -Partikel zusammen mit Kunststoffmolekülen ein lockeres Netzwerk, das, so Michael Berkei von der Firma

BYK-Chemie, »nicht zerkratzt, sondern nach einer Belastung zurückfedert«. Um diese Wirkung zu erzielen, müsse man dem Lack lediglich ein bis zwei Gewichtsprozent der Siliziumdioxid-Nanopartikel zusetzen.

In Dimensionen von millionstel Millimetern lassen sich also auf Grund der verschiedenen Eigenschaften Materialien und Werkstoffe mit unzähligen neuen Funktionen designen. Deshalb steht »nano« gleichsam als Synonym für Innovationen.

Vieles davon ist allerdings noch Zukunftsmusik. Denn auch wenn die Nanotechnologien bis 2013 in Deutschland 70 000 Arbeitsplätze in über 1000 Firmen gebracht haben: »Killer-Applikationen«, die den Alltag grundlegend umwälzen – so wie das Auto oder das Telefon –, sind daraus noch nicht hervorgegangen. In die Praxis schafften es nur die eher unspektakulären Innovationen, die bereits bestehenden Produkten einen zusätzlichen Nutzen geben und ihren Mehrwert erhöhen. Jene kratzfesten Autolacke gehören dazu, aber auch selbstreinigende Textilfasern, gasdichte Flaschen, antibakteriell beschichtete Kühlschränke oder mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen verstärkte Surfbretter und Tennisschläger. Häufig deutet nur ein kleiner Hinweis auf die Verwendung von Nanomaterialien hin, die der Verbraucher kaum wahrnimmt. Auch das sei, so der Stuttgarter Risikoforscher Ortwin Renn,

ein Grund dafür, dass die Öffentlichkeit der Technologie eher indifferent oder positiv gegenübersteht (siehe S. 16). Probleme mit der Akzeptanz, wie im Fall von Gentechnik oder Atomenergie, gibt es im Fall von »nano« kaum.

Hinter den Türen der Forschungslabors geht es indes um weit mehr als die Trivialitäten des Alltags. Dort wachsen Ideen heran, die wirklich revolutionär sind. Besonders vielversprechend sind dabei Entwicklungen in den beiden gesellschaftlich relevanten Feldern Gesundheit und Umwelt.

Beispiel Chemotherapie: Seit Jahrzehnten suchen Mediziner nach einer Art »magic bullet« – einem Wirkstoff, der im Körper gezielt nur die kranken Zellen trifft, während er den gesunden nicht schadet. Eine herkömmliche Krebstherapie könnte man in ihrer Wirkung mit einer Schrotflinte vergleichen, denn nur ein Teil der über die Blutbahn verabreichten Medikamente erreicht den eigentlichen Tumor, während der Rest gesundes Gewebe schädigt. Schwere Nebenwirkungen und ungewisse Erfolgsaussichten sind die Folge.

Mit intelligenten Substanzen im Nanomaßstab wollen Wissenschaftler eines Tages den Kampf gegen den Krebs gewinnen – und zwar mit Nanopartikeln definierter Größe. Weil in Tumoren die Poren in Blutgefäßwänden im Vergleich zu denen im gesunden Gewebe häufig vergrößert sind, gelangen die entsprechend dimensionierten Partikel nur in die erkrankten Bereiche und beliefern nur sie mit der eigentlichen Arznei. Für diesen gezielten Wirkstofftransport wollen Mediziner Nanopartikel aus Kunststoff oder aus Proteinen verwenden.

Neben diesem passiven entwickeln Forscher auch ein aktives »drug targeting« – damit wollen sie den gezielten Wirkstofftransport noch effizienter machen. Dabei nutzen sie den Umstand, dass erkrankte Zellen an ihrer Oberfläche ganz bestimmte Rezeptormoleküle tragen. Verfügen die Nanopartikel über die passenden Gegenmoleküle, können sie an jene Rezeptoren andocken und sich wie

mit passenden Schlüsseln Zugang zu den Zellen verschaffen. Im Inneren entlassen sie ihre Wirkstoffe und vernichten die Zellen – trojanische Pferde im Nanomaßstab.

Auf die gleiche Weise ließen sich im menschlichen Körper auch biologisch überaus effektive Barrieren überwinden. So gelang es dem Mediziner Jörg Kreuter von der Universität Frankfurt, den Wirkstoff Doxorubicin durch die Blut-Hirnschranke zu schleusen, und weckte damit neue Hoffnung im Kampf gegen einen bislang unheilbaren Hirntumor.

#### KREBS BEKÄMPFEN – BEVOR ER ENTSTEHT

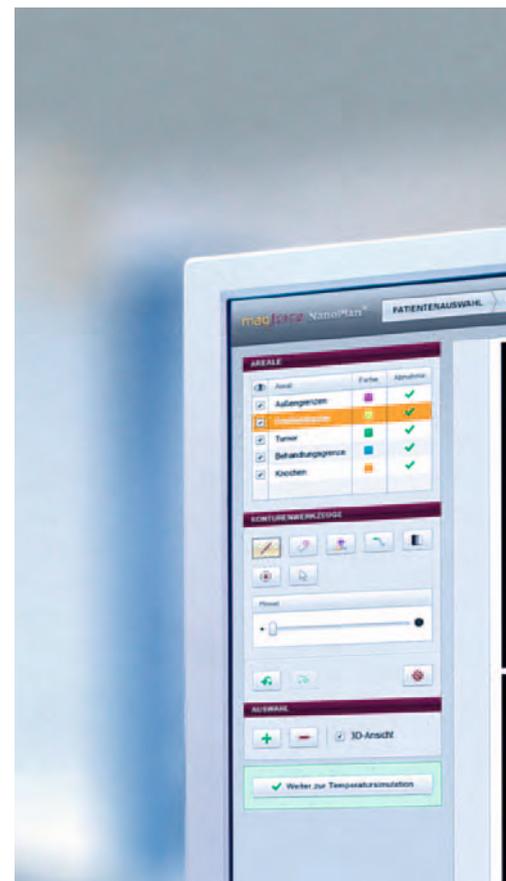
Auch für die Therapie anderer neurologischer Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson oder multiple Sklerose könnten diese Erkenntnisse große Fortschritte bedeuten – zumal sich die Früherkennung solcher Krankheiten dank nanotechnologischer Methoden verbessern wird. Bereits in einem frühen Stadium setzt der Körper nämlich oft ganz bestimmte Moleküle frei, sogenannte Biomarker. Sensoren aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind schon heute empfindlich genug, um einzelne von ihnen nachzuweisen. Eine Kombination vieler solcher Nanoröhrchen, integriert auf einem Biochip, macht es möglich, in einem Tropfen Blut nach einer ganzen Reihe dieser Biomarker zu fahnden – so hätte man ein komplettes Analyselabor auf winzigem Raum.

Die Beispiele zeigen, dass es berechtigte Hoffnungen gibt, aus dem »Reparaturbetrieb Medizin« eine vorsorgende Heilkunst zu machen. Viele der heute schwer belastenden Diagnosen wie Krebs oder Alzheimer verlieren eines Tages vielleicht ihren Schrecken, wenn die Erkrankungen frühzeitig erkannt und mit effizienten und nebenwirkungsarmen Medikamenten behandelt werden können.

Obwohl diese Entwicklungen noch am Anfang stehen, zeigt sich schon heute ein bedeutender Trend. So gab es Anfang 2013 bereits rund 250 nanomedizinische Produkte, von denen 100 zugelassen

waren und der Rest sich in der klinischen Testung befand. Das heißt jedoch nicht, dass die Nanomedizin von heute auf morgen die Kliniken und Praxen erobert: »Die Entwicklung entsprechender Arzneimittel ist teuer und mit einem erheblichen Entwicklungs- und Produktionsaufwand verbunden«, relativiert ein Sprecher des Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte. Hinzu kommen langwierige Zulassungsverfahren, so dass es wohl noch Jahre, vielleicht auch Jahrzehnte dauern wird, bis aus den Hoffnungen der Forscher reale Arzneimittel werden. Dass es diesen revolutionären Wandel in der Medizin eines Tages geben wird, daran zweifelt indes kaum jemand.

Eine ähnlich vielversprechende Zukunft dürften Nanotechnologien beim Schutz der Umwelt haben. So stellt das Ludwigshafener Chemieunternehmen BASF spezielle Nanopartikel her, die Beton schneller aushärten lassen. Das bei der Herstellung von Betonfertigteilen kostspielige Erwärmen könnte so entfallen. »Europaweit eingesetzt, ließen sich allein mit dieser Technik jährlich bis zu 2,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid



einsparen«, sagt Martin Möller vom Freiburger Öko-Institut. Zum Vergleich: Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Stadt Stuttgart beträgt derzeit rund 3,3 Millionen Tonnen pro Jahr.

Schon bald könnten Nanotechnologien auch den regenerativen Energien zum Durchbruch verhelfen. Neben den bereits erwähnten Solarzellen dürften insbesondere die Windkraftanlagen der Zukunft deutlich effizienter werden. Denn nanokleine Kohlenstoffröhrchen verleihen den mächtigen Rotorblättern mehr Stabilität – in Zukunft werden sie deshalb größer und dennoch leichter sein

(je größer die Rotoren sind, umso höher ist auch die erzeugte Energie pro Anlage – also deren Effizienz).

Und damit sich der so erzeugte Strom noch besser speichern lässt, arbeiten Wissenschaftler an neuartigen Batterien, die dank Nanomaterialien über mehr Kapazität, eine längere Lebensdauer und komfortablere Ladeigenschaften verfügen. Die grundlegende Schwäche heutiger Elektroautos stünde der nachhaltigen Entwicklung der Elektromobilität nicht mehr im Weg.

Da die preiswerteste Energie aber immer noch die ist, die gar nicht erst

verbraucht wird, ist die Effizienzsteigerung der vielleicht größte Beitrag der Nanotechnologien. So schätzten Forscher um Jochen Lambauer von der Universität Stuttgart, dass der deutsche Energieverbrauch bis 2030 allein durch Nanotechnologien um bis zu 6,7 Prozent oder rund 170 Terawattstunden sinken könnte. Auf diese Weise könnte hierzulande somit mehr als die gesamte Strommenge eingespart werden, die im Jahr 2007 von sämtlichen Atomkraftwerken erzeugt wurde (140,5 Terawattstunden).

Ähnlich große Hoffnung setzen Forscher in das Potenzial der Nanotechnologien, wenn es darum geht, giftige Substanzen durch weniger schädliche oder gar unproblematische zu ersetzen. Oder wenn sich der Ausstoß von Schadstoffen verringern und ihr Abbau verbessern lässt. Ein typisches Beispiel ist das antibakteriell wirksame Nanosilber, das für Wasserlebewesen viel weniger gefährlich ist als Triclosan, welches als Bakterienhemmer in vielen Kosmetika und Funktionstextilien zu finden ist. Die Silberpartikel dürften schon bald auch die bedenklichen Biozide in Holzschutzmitteln oder Farben ersetzen.

Zur Reinigung von Abwässern oder Aufbereitung von Trinkwasser – weltweit haben rund 800 Millionen Menschen keinen Zugang zu sauberem Wasser – sollen künftig vermehrt Filter mit nanoskaligen Poren eingesetzt werden. Da sie Viren und Bakterien zurückhalten, versprechen sie insbesondere in den armen und entlegenen Gegenden der Welt eine effiziente und praktikable Wasseraufbereitung. Organische Schadstoffe im Grundwasser sollen sich mit Hilfe von nanofinem Eisen in unschädliche Stoffe verwandeln lassen.

»Die Zukunft ist Nano«, so überschrieb der Chemiekonzern Bayer 2007 eine Pressemeldung. Seither haben sich unzählige nanotechnologisch optimierte Produkte im Alltag etabliert – manche mit großem, viele mit eher zweifelhaftem Nutzen. Die wirklich große Zukunft steht der Technologie aber noch bevor. 

## HEISSES EISEN GEGEN KREBS

Bei dem an der Berliner Charité entwickelten NanoTherm-Verfahren werden magnetische Nanopartikel direkt in einen Tumor injiziert und anschließend in einem magnetischen Wechselfeld erwärmt. Die Eisenoxid-Partikel sind nur 15 millionstel Millimeter groß und mit einer Aminosilanschicht umgeben – so lassen sie sich leicht im Wasser verteilen: In einem Milliliter schweben bis zu 17 Billionen davon. Durch die Erwärmung der Partikel auf bis zu 80 Grad Celsius kann der Tumor entweder direkt zerstört oder derart geschädigt werden, dass ihm in der anschließenden Bestrahlung oder Chemotherapie der Garaus gemacht wird.



# TICKT DA EINE ZEITBOMBE?

DASS NANOPARTIKEL AUF GRUND IHRER BESONDEREN EIGENSCHAFTEN NICHT NUR NÜTZLICH, SONDERN AUCH SCHÄDLICH SEIN KÖNNEN, LIEGT AUF DER HAND. ABER DIE TECHNOLOGISCHEN ENTWICKLUNGEN SCHREITEN SO RASCH VORAN, DASS EINE BEWERTUNG DES RISIKOS FÜR MENSCH UND NATUR KAUM MÖGLICH IST.

**J**eder Jeck ist anders«, sagen die Rheinländer. Und das beschreibt treffend auch die Vielzahl von Substanzen, die die Grundlage der Nanotechnologie bilden. Die Frage: »Sind diese Nanomaterialien gefährlich?« lässt sich somit genauso wenig pauschal beantworten wie die Fragen: »Sind Chemikalien gefährlich?« oder »Sind Getränke ungesund?« Zwei Liter Mineralwasser am Tag haben eine andere Wirkung als die gleiche Menge Limonade.

Im alltäglichen Leben kommen wir derzeit mit rund 100 000 künstlich hergestellten Stoffen in Berührung. Besonders besorgniserregend, weil gesundheits- oder umweltgefährdend, sind davon einige hundert. Um die Risiken chemischer Produkte abzuschätzen, schreibt der Gesetzgeber vor ihrem Einsatz in der Regel umfassende Tests und Unbedenklichkeitsnachweise vor. Für Nanomaterialien gibt es solche Regelwerke bisher jedoch nicht.

Risikoforscher wie Ortwin Renn von der Universität Stuttgart kritisieren das (siehe S. 16). Denn was die Partikel technologisch interessant macht – die infolge ihrer Winzigkeit besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften –, könnte sie auch zur Gefahr werden lassen. Die Nanomedaille hat somit, davon sollten wir unbedingt ausgehen, eine Kehrseite.

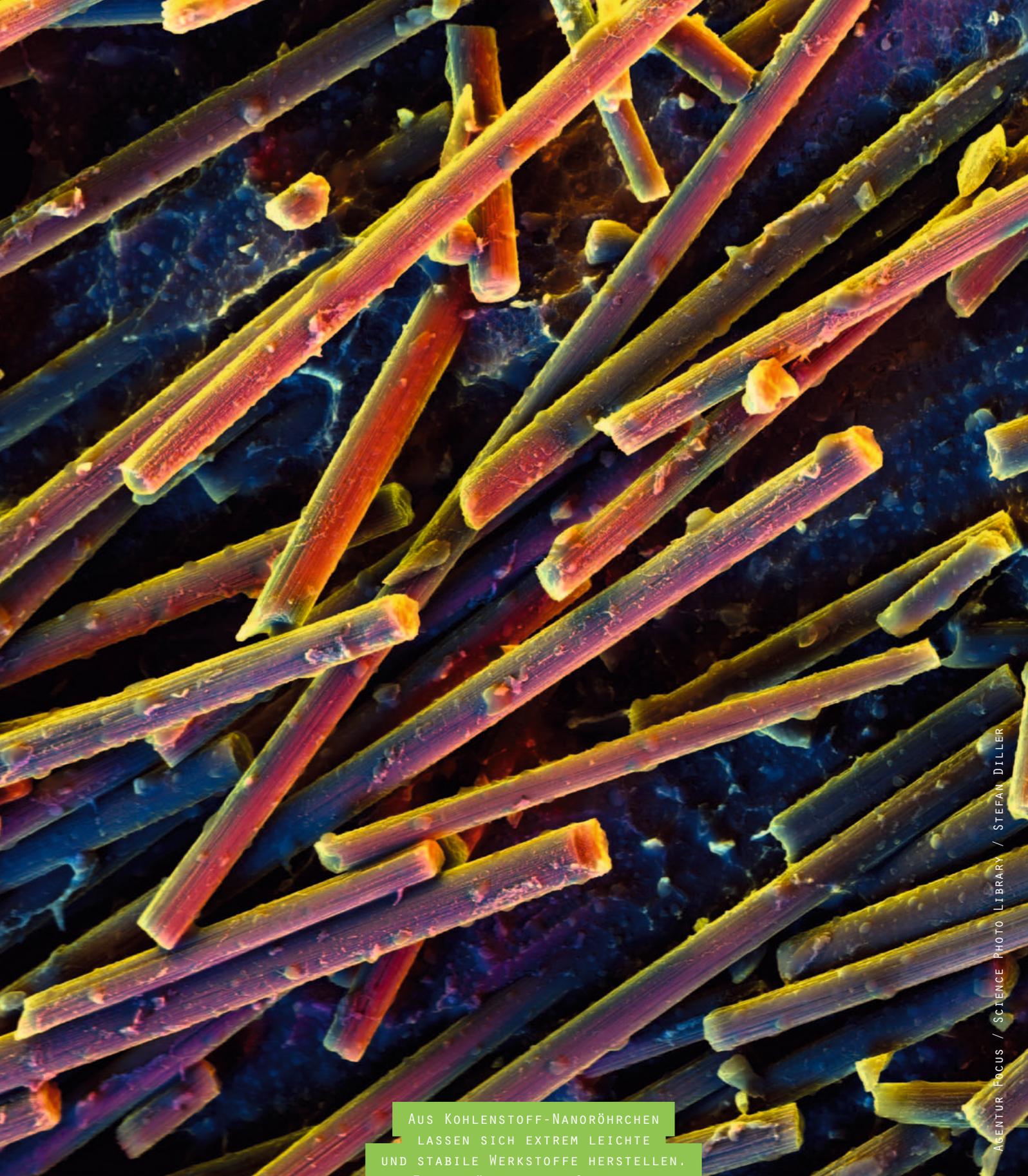
## KEINE »SMOKING GUN«

Wie berechtigt diese Sorge ist, demonstrierte im Jahr 2005 als Erster Guenther Oberdoerster vom University of Rochester Medical Center. Sein Team hatte Ratten und Mäusen Partikel aus Titandioxid in die Luftröhren injiziert: Einige der Tiere bekamen 20 Nanometer, die anderen 250 Nanometer große Teilchen. In allen Fällen kam es in der Folge zu Entzündungen der Lunge. Bei den feineren Titandioxid-Partikeln waren die Schäden indes viel schwerwiegender – obwohl sie

in einer geringeren Dosis verabreicht worden waren. Grund dafür: Das feinere Material hat eine viel größere und somit reaktivere Oberfläche als das gröbere.

Alarmierende Ergebnisse kamen im Jahr 2008 auch von Ken Donaldson von der University of Edinburgh. Er hatte Kohlenstoff-Nanoröhrchen in die Bauchhöhle von Mäusen injiziert, wo daraufhin Entzündungen und knötchenartige Narben, so genannte Granulome, entstanden. Beide Symptome gelten als Vorstufen von Lungenkrebs.

Schließlich fanden jüngst Forscher um Ralf Schulz vom Institut für Umweltwissenschaften Landau an der Universität Koblenz-Landau heraus, dass sich Wasserflöhe, die Titandioxid-Nanopartikeln ausgesetzt wurden, nicht mehr häuteten und schlechter bewegten. Außerdem beobachtete das Team, dass die nachfolgende Generation der kleinen Krebse nicht etwa Resistenzen ausbildete, sondern sogar noch empfindlicher auf die



AUS KOHLENSTOFF-NANORÖHRCHEN LASSEN SICH EXTREM LEICHTE UND STABILE WERKSTOFFE HERSTELLEN. ZUDEM DÜRFTEN SIE GRUNDLAGE ZUKÜNFTIGER SUPERCOMPUTER SEIN. DOCH BERGEN SIE WOMÖGLICH AUCH GEFAHREN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT.

## GUTES SILBER, SCHLECHTES SILBER

Das Edelmetall wird insbesondere wegen seiner bioziden Wirkung geschätzt. In Krankenhäusern schützen entsprechend beschichtete Schläuche vor gefährlichen Keimen. Zweifelhaft ist jedoch der Nutzen von Nanosilber im Alltag. Denn Mikroorganismen sind nicht per se schlecht und für die natürlichen Gleichgewichte sogar unabdingbar. Der breite Einsatz von silberbeschichteter Bekleidung kann beispielsweise die Bildung resistenter Keime fördern – vor allem, wenn die Partikel in die Umwelt gelangen. So fanden Forscher von der Swedish Chemicals Agency KEMI heraus, dass das Nanosilber aus Funktionswäsche nach dreimaligem Waschen etwa zur Hälfte, nach zehn Waschgängen fast vollkommen verschwunden war.

FOTOLIA / MARKUS BORWANN

Nanopartikel reagiert als ihre Eltern. Woran das liegt, wissen die Forscher bisher nicht. Als Bestandteil von Sonnencremes ist nanofines Titandioxid bereits in Badeseen nachweisbar – die für den Menschen als weitgehend unbedenklich geltende Zutat kann in solchen Gewässern somit durchaus Schaden anrichten.

Bislang sind solche Auswirkungen die Ausnahme. Zu diesem Schluss kommen jedenfalls Frank von der Kammer von der Universität Wien und Harald Krug von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt in St. Gallen. Die beiden haben die bisher veröffentlichten Publikationen zur Nanotoxikologie ausgewertet – insgesamt mehrere tausend Artikel. »Smoking guns« haben wir dabei nicht gefunden«, sagt der Umweltchemiker von der Kammer, der sich mit den ökologischen Auswirkungen von Nanomaterialien befasste.

»Smoking guns«, damit meint er Stoffe, die nur auf Grund ihrer geringen Größe besonders toxisch werden. Krug, der sich mit den Gefahren für die Gesundheit beschäftigt, bestätigt seinen Kollegen. Bis auf wenige Ausnahmen konnte auch er kein Nanomaterial identifizieren, das »nur annähernd so gefährlich ist wie Cadmium oder Asbest«.

Als Entwarnung wollen diese Ergebnisse aber weder von der Kammer noch

Krug missverstanden wissen. Denn noch klaffen in der Erforschung derart große Lücken, dass sich eine seriöse Abschätzung des Risikos verbietet. Vor allem die längerfristigen Folgen für Mensch und Umwelt durch Nanomaterialien sind derzeit weitgehend unerforscht. Die meisten der Studien drehen sich stattdessen immer wieder um die gleichen Themen. Dass Silber-Nanopartikel giftige Silberionen abgeben, sei besorgniserregend, aber schon lange bekannt – das tun auch größere Silberpartikel. Ebenso sei es wenig überraschend, so von der Kammer, dass Cadmium enthaltende Quantendots das giftige Schwermetall abgeben können. Oder dass Titandioxid-Nanopartikel unter Sonneneinstrahlung die Bildung freier Radikale katalysieren, die ihrerseits entzündlich wirken. »Deshalb werden Nanopartikel in Sonnencremes heutzutage mit einer Schutzschicht versehen.«

## VON DER LUNGE INS BLUT

Das Gros der Studien genüge zudem nicht den grundlegenden Standards toxikologischer Forschung, kritisiert Krug. Meist verwendeten die Wissenschaftler beispielsweise nur einzelne, meist sehr hohe Dosierungen – anstatt zu untersuchen, wie die Wirkung sich mit unterschiedlichen Dosen verändert. Da in

der Natur oder im Körper meist wesentlich niedrigere Dosen zu erwarten seien, taugten die Ergebnisse nicht für eine seriöse Risikoabschätzung.

Immerhin zeige die Fachliteratur aber, wo die Nanotoxikologen genauer hinschauen müssen. Die zentrale Frage sei, so Harald Krug in seiner jüngsten Publikation, ob künstlich hergestellte Nanomaterialien biologische Barrieren wie die Haut, die Blut-Luft-, die Darm-Blut- oder die Blut-Hirn-Schranke überwinden können. Während gesunde Haut Nanopartikel in bisherigen Tests nicht passieren ließ, gebe es »starke Hinweise«, dass eingeatmete Nanomaterialien durchaus über die Lunge ins Blut und damit in die Organe gelangen. Allerdings schaffe es in der Regel nur ein »sehr kleiner« Teil der eingeatmeten Dosis ins Blut. Der Großteil werde durch natürliche Reinigungsprozesse aus der Lunge entfernt und ausgeschieden.

Möglich ist auch die Aufnahme über die Darmwand. Über diese biologische Barriere schaffen es unterschiedliche Nanomaterialien unterschiedlich gut – nach Angaben des Max Rubner-Instituts in Karlsruhe sind es zwischen fast null und knapp 40 Prozent der verabreichten Dosis. »In der Regel sind es jedoch nur einige Promille«, wie Wolfgang Kreyling während seiner Arbeit am Helmholtz

Zentrum München herausgefunden hat. Partikel mit mehr als einem Mikrometer Durchmesser hingegen finde man im Blut gar nicht, sagt der Biophysiker und bestätigt damit, dass Nanomaterialien im Körper beweglicher sind als größere Partikel.

Wenngleich die bisherigen Studien auf eine nur geringe Aufnahme der Teilchen schließen lassen, sieht Harald Krug darin keinen Grund zur Entwarnung. Denn über die Langzeitfolgen sagen diese Zahlen nichts. Der Toxikologe fürchtet daher, dass sich solche Substanzen im Lauf eines Lebens in den Organen anreichern und diese womöglich langfristig schädigen. Hier sieht er dringenden Anlass für weitere Forschungen.

Auch hinsichtlich der Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt gibt es Grund zur Sorge. Denn eine Ausbreitung in Atmosphäre, Gewässern und Böden ist denkbar – und in einigen Fällen sogar nachgewiesen. Die meisten Nanopartikel, so Frank von der Kammer, werden zwar auf Grund ihrer Oberflächeneigenschaften und hohen Reaktivität im Boden rasch gebunden. Er fordert aber, vor allem bei neuen Stoffen frühzeitig über deren Wirkungen auf Ökosysteme zu forschen.

Die rasante Entwicklung der Nanotechnologien ist dabei für die Toxikologen

und Umweltforscher eine riesige Herausforderung. Über die langfristigen Folgen für Umwelt und Gesundheit durch cadmiumhaltige Quantendots etwa ist bis heute kaum etwas bekannt.

Für Harald Krug ist dieses Beispiel auch Anlass für Kritik an den Strukturen der eigenen Disziplin. So beklagt er, dass in Deutschland in der Vergangenheit viele Lehrstühle aufgelöst wurden. Es gebe einen riesigen Nachholbedarf, wobei die Entwicklung von theoretischen Modellen zur Wirkungsweise von Nanomaterialien verschiedenster Art besonders dringlich sei. Mit ihrer Hilfe könnten Vorhersagen über Giftigkeit oder Mobilität bestimmter Nanoteilchen auf der Basis ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften gemacht werden.

Nachholbedarf gibt es auch in den analytischen Möglichkeiten. Zum einen liegt das an der häufig geringen Konzentration künstlicher Nanopartikel in der Umwelt, zum anderen lassen sich künstlich hergestellte Nanopartikel nur schwer von natürlich vorkommenden unterscheiden, was die Risikobewertung weiter erschwert. Auch in Produkten sind Nanomaterialien schwierig zu identifizieren. Denn dort verbergen sie sich inmitten vieler anderer Komponenten,

etwa zwischen den übrigen Zutaten einer Sonnencreme.

Selbst wenn es gelingt, die Konzentration künstlicher Nanomaterialien zu bestimmen, ist dieser Wert von zweifelhaftem Nutzen. Denn die Gefährlichkeit der Nanomaterialien steht ja nicht, wie bei anderen Giften, in unmittelbarem Zusammenhang mit der Dosis. Vielmehr ist letztlich eine Vielzahl chemischer und physikalischer Eigenschaften für die positive, aber auch die negative Wirkung von Nanomaterialien entscheidend.

#### DIE KOSTEN-NUTZEN-FRAGE

Dass die Kritik aus den Reihen der Wissenschaft nicht gänzlich folgenlos bleibt, zeigt das Projekt »NanoDefine« der Europäischen Union. Zehn Millionen Euro stellt sie bereit, um neue Analysetechniken und Standardverfahren zu entwickeln. Doch angesichts der zukünftigen Bedeutung dieser Schlüsseltechnologie erscheint diese Summe nur als Tropfen auf dem heißen Stein. Damit ist der Wettlauf mit den Fortschritten industrieller Forschung nicht zu gewinnen.

Dabei könnte jeder jetzt investierte Euro in sichere Nanotechnologien auch deren Zukunft sichern. Fragt man die deutsche Bevölkerung heute nach ihrer Einschätzung des Risikos der Nanotechnologien, dann erhält man überwiegend positive und in weitaus geringerem Maß negative Antworten. »Gleichwohl ist ein beträchtlicher Teil der Bevölkerung diesbezüglich noch unentschieden«, heißt es 2013 im Abschlussbericht des NanoView-Projekts des Bundesinstituts für Risikobewertung.

Wachsame Wirtschaftsvertreter, die Nanoprodukte mit geringem Nutzwert einsetzen und somit vom guten Image der Technologie profitieren, könnten dies durchaus als Warnung verstehen. Sollte sich eines Tages nämlich wirklich zeigen, dass die Silberpartikel aus unseren Socken oder die Nanoteilchen aus der Ketchupflasche uns oder der Umwelt schaden, dann ist das Vertrauen der Verbraucher rasch verspielt – und die eigene Zukunft womöglich auch. 

#### NANO AUF DEM TISCH

Nanopartikel lassen Salz und Tütensuppen rieseln oder werden als Aufheller in Arzneien und Zahnpasta eingesetzt. Bald könnten essbare Beschichtungen aus Titandioxid den Grauschleier von Schokolade verhindern oder Obst haltbarer machen. Werben lässt sich mit diesen Eigenschaften jedoch nicht. Denn wie das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) 2013 im Rahmen des NanoView-Projekts herausfand, ist die große Mehrheit der Befragten gegen Nanoteilchen in Lebensmitteln. Wenn es allein um die Ansehnlichkeit von Lebensmitteln geht, sind sogar 84 Prozent dagegen. Kein Wunder also, dass sich Nahrungsmittelhersteller vehement – und bisher erfolgreich – gegen eine entsprechende europaweite Kennzeichnungspflicht wehren.

# »SO BLEIBT DIE ENTSCHEIDUNG BEIM KONSUMENTEN ...«

DER STUTTGARTER RISIKOFORSCHER ORTWIN RENN FORDERT EINE SCHÄRFERE ÜBERWACHUNG, WENN ES UM NANOPARTIKEL IN NAHRUNGSMITTELN ODER KOSMETIKA GEHT. DOCH DAS IST AUF GRUND DER VIELFÄLTIGEN EIGENSCHAFTEN DIESER TEILCHEN NICHT SO EINFACH.

## **Die Herstellung und der Einsatz nanometergroßer Partikel gehören zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Wie steht die Öffentlichkeit dieser Entwicklung gegenüber?**

Die Stimmung in der Bevölkerung zur Nanotechnologie ist überwiegend positiv oder indifferent. Der Grund dafür ist einfach: Einerseits werden Anwendungen im Alltag noch kaum wahrgenommen, andererseits gab es bis heute keine spektakulären Vorkommnisse, die ein schlechtes Licht auf die Nanotechnik hätten werfen können. Und so überwiegt wohl die Faszination für diese Technologie.

## **Könnte diese Stimmung kippen?**

Ängste werden sicher geweckt, wenn es um den eigenen Körper oder Eingriffe in die Natur geht. Die Gentechnik etwa – gleichfalls eine Schlüsseltechnologie – stößt aus diesem Grund in weiten Teilen der Bevölkerung auf Ablehnung. Das größte Akzeptanzproblem von Nanopartikeln liegt im Bereich Gesundheit – beispielsweise wenn die Gefahr besteht, die feinen Teilchen einzuatmen. Auch in Lebensmitteln oder Kosmetika wollen die meisten Menschen diese Substanzen lieber nicht sehen. In solchen Fällen sind die Ver-

braucher natürlich sensibel und verlangen eine vom Vorsorgeprinzip getragene Regulationspolitik.

## **Wie lässt sich denn das gesundheitliche Risiko überhaupt bewerten?**

Hier liegt in der Tat unser größtes Problem: der Nachweis einer toxikologischen Wirkung. Tatsächlich besteht bei Nanopartikeln zum einen die Gefahr, dass sie allein auf Grund ihrer geringen Größe potenziell die schützende Blut-Hirn-Schranke überwinden oder die Membranen von Zellen durchdringen können. Zum anderen aber gibt es – anders etwa als bei gelösten Stoffen im Blut – bei Nanopartikeln eben keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Höhe der Dosis und der Intensität der Wirkung.

## **Dann sind standardanalytische Verfahren, wie sie beispielsweise in der Lebensmittelkontrolle üblich sind, ungeeignet?**

Genau, denn bei Nanopartikeln spielt die Konzentration eine untergeordnete Rolle. Entscheidend sind ihre Wechselwirkungen mit biologischen Systemen, die sich etwa aus der Reaktivität der extrem großen Oberflä-

chen ergeben. Inzwischen gibt es zwar erste Regelwerke, mit denen sich diese reaktiven Eigenschaften von Nanopartikeln bewerten lassen, doch fehlt es bis heute an einer systematischen und anerkannten Methodik, die sich daraus ergebenden gesundheitlichen Risiken abzuschätzen.

## **Welche Konsequenzen müssen daraus gezogen werden?**

Es ist wichtig zu wissen, dass es gerade nicht nur auf die Größe, sondern vor allem auch auf die tatsächliche Wirkung der Partikel ankommt. Wenn Grenzwerte einzig auf der Größe basieren, könnten insbesondere Hersteller im Lebensmittelbereich einfach etwas größere Partikel einsetzen – beispielsweise solche, deren Durchmesser mehr als 100 Nanometer beträgt. Zwar hätten diese ebenfalls die gewünschten Eigenschaften, wären aber formal keine Nanopartikel mehr. Nur blieben dann auch die Risiken weitgehend unverändert. Daher wäre es sinnvoll, die Eigenschaften und Wirkungsweisen solcher Materialien zum Maßstab der Bewertung und damit auch der Regulierung zu machen. Das Problem liegt also weniger in der Diagnostik als im Fehlen klarer Definitionen.



## ZUR PERSON

Ortwin Renn ist Soziologe, Volkswirt und Risikoexperte. Er hat den Lehrstuhl für Technik- und Umweltsoziologie an der Universität Stuttgart inne und ist Mitglied des acatech-Präsidiums. Darüber hinaus leitet Renn das gemeinnützige Forschungsinstitut »Dialogik« und ist als Politikberater tätig – unter anderem für den Präsidenten der Europäischen Kommission. Kürzlich erschien von ihm: »Das Risikoparadox. Warum wir uns vor dem Falschen fürchten« (siehe S. 23).

### **Unterdessen geht der Einsatz neuer Materialien weiter.**

Ja, zumal Nanopartikel mittlerweile in unzähligen Produkten vorkommen. Zum Beispiel in Ketchup: Solange es nicht verboten ist, mit Hilfe von Nanoteilchen dessen Fließeigenschaften zu optimieren, so lange gibt es dieses Produkt auch zu kaufen. Obwohl die Welt sicher ohne eine derart veränderte Tomatensoße leben könnte und dieses Risiko damit leicht vermeidbar wäre. Aber so bleibt die Entscheidung beim Konsumenten – und das bedeutet, dass wir zumindest eine vollständige Transparenz über die Zusammensetzung von Produkten fordern müssen.

### **Anderes Beispiel: Jahrelang waren Imprägniersprays für Schuhe auf dem Markt, vor denen Lungenärzte heute warnen. Gibt es gerade im Bereich der Konsumgüter nicht eine fatale Trial-and-Error-Kultur?**

Auch dieses Beispiel illustriert das Problem der Nutzen-Risiko-Abwägung bei Innovationen, die einerseits von geringem Nutzen und andererseits weit verbreitet sind. Die Hersteller vertreten den Standpunkt, dass der gesellschaftliche Nutzen eines Produkts kein Maßstab dafür sein dürfe, was in diesem Produkt enthalten ist. Staatlichen Paternalismus lehnen sie ab. Wir Risikoforscher fordern indes klare Richtlinien für die Bewertung von Risiken, die auch zu einem Verbot entsprechender Produkte führen können. Wir denken, dass bei dieser Entscheidung auch der Nutzen für die Gesellschaft eine Rolle spielen sollte.

### **Nun gibt es in einer freien Wirtschaft naturgemäß auch Märkte für unnötige Anwendungen von Nanoteilchen. Wie könnte im Gegenzug die Risikoforschung gestärkt werden?**

Indem zum einen die öffentlich finanzierten Universitäten und Forschungsinstitute weiterhin genügend Ressourcen bereitstellen. Und zum anderen, indem Hersteller und Anwender zu systematischen Überwachungen verpflichtet werden, so dass sie eventuelle Nebenwirkungen frühzeitig erkennen – und im schlechtesten Fall eben auf den Einsatz von Nanopartikeln verzichten.

### **Das hört sich nach freiwilliger Selbstkontrolle durch die Industrie an.**

Ja, aber nur zum Teil. Wir halten es weiterhin für sinnvoll, bei einer gewissen Unsicherheit über mögliche Folgen das staatliche Vorsorgeprinzip anzuwenden und die Hersteller zu zwingen, ein Produkt erst dann zu vermarkten, wenn unabhängige Forscher signifikante Auswirkungen ausschließen. Natürlich bliebe selbst dann ein Restrisiko – etwa, dass auch unterhalb des Signifikanzniveaus unliebsame Effekte auftreten können oder noch unbekannte Wirkungen zu Tage treten. Gerade deshalb fordern wir die systematische Überwachung.

### **Diese Überwachung müsste auf politischer Ebene durchgesetzt werden. Hier gilt es jedoch, zwischen Experten, Industrie und Gesellschaft zu vermitteln. Wie kann das gehen?**

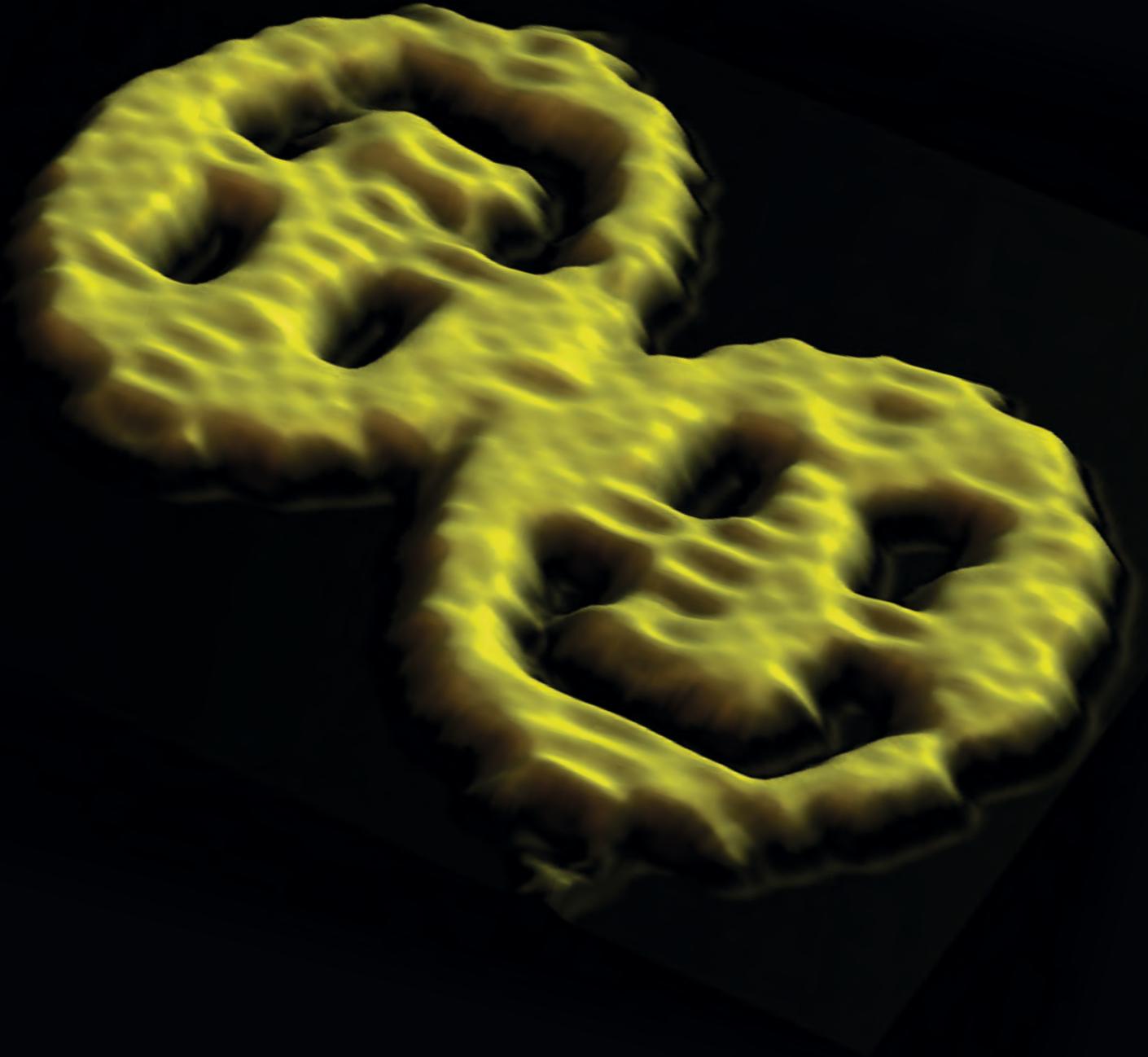
Wenn politische Entscheidungen allein auf Expertenurteilen basieren, entsprechen sie selten den Anforderungen an eine nicht nur sachlich gerechtfertigte, sondern gleichzeitig auch sozial verträgliche Lösung – das hat die Vergangenheit immer wieder gezeigt. Deshalb erwarten wir von unseren demokratisch legitimierten Vertretern, dass sie neben den rein fachlichen Argumenten auch gesellschaftliche Wertvorstellungen und Präferenzen beachten.

### **Politiker sind indes meist wissenschaftliche Laien. Müssen sie sich bei ihren Entscheidungen denn nicht allein auf die Expertise der Fachleute verlassen können?**

Nein, Wissenschaftler sind ja moralisch keineswegs bessere Menschen. Die Fachleute haben eine Bringschuld, wenn es um die Charakterisierung von Risiken geht. Ob diese aber akzeptabel sind und ob das Verhältnis von Risiko und Nutzen positiv zu bewerten ist, darf nicht von Forschern und auch nicht von Unternehmern bestimmt werden. Das muss entweder kollektiv vom Gesetzgeber oder – im Einzelfall – von den Verbrauchern selbst beurteilt werden. In beiden Fällen, also bei der staatlichen Regulierung und der persönlichen Gefahrenvorsorge, ist die Transparenz über Nutzen und Risiko Grundvoraussetzung für eine vernünftige Entscheidung.

### **Und welche Verantwortung sehen Sie bei den Unternehmen?**

Der gute Ruf der Nanotechnologie ist ja für sie ein hohes Gut. Er sichert ihnen den Verkauf ihrer Produkte. Schon aus diesem Eigeninteresse sollten bei ihnen die Transparenz über die Zusammensetzung sowie die akribische Überwachung der Risiken während der Produktion erste Priorität haben. Und sie sollten den Mut haben, sich zu fragen, ob der Nutzen eines Nanomaterialien enthaltenden Produkts das Risiko wirklich rechtfertigt – auch wenn dies bedeutet, auf kurzfristige Marktgewinne zu verzichten. ☺



DNA-KOMPLEXE LASSEN SICH IN  
BEINAHE BELIEBIGE FORMEN  
FALTEN – ZUM BEISPIEL IN  
100 NANOMETER GROSSE SMILEYS.

# KEINE SCIENCE-FICTION!

WENN ES UM DIE NANOTECHNOLOGIE DER ZUKUNFT GEHT,  
IST DIE NATUR DAS GROSSE VORBILD. SCHON JETZT KÖNNEN  
FORSCHER IM LABOR BEDINGUNGEN SCHAFFEN, UNTER  
DENEN SICH ATOME UND MOLEKÜLE SELBSTSTÄNDIG  
ZU NEUEN STRUKTUREN ZUSAMMENFINDEN.

**W**ährend Nanomaterialien heute vor allem die Eigenschaften bereits bekannter Produkte verbessern, werden sie in Zukunft die Grenzen heutiger Techniken sprengen und bisher Unmögliches möglich machen. Nehmen wir das Beispiel der Kohlenstoffröhrchen: Der Werkstoff ist 50-mal so zugfest wie Stahl und doch nur ein Sechstel so schwer. Zu größerem Einsatz kommt er bisher aber nur in Surfbrettern oder Tennisschlägern – und das ist wie Perlen vor die Säue zu werfen. Das Problem: Als Zuschlag in Kunststoffen liegen die Röhrchen wirt durcheinander (Bild S. 13) – man bräuchte eine Art »Nanokamm«, mit dem sie sich gleichmäßig ausrichten lassen, so dass ihre Festigkeit gezielt genutzt und ihr riesiges Potenzial vollständig ausgeschöpft werden kann. Ob und wann es einen solchen Kamm geben wird, vermag bislang aber niemand zu sagen.

Es zeigt sich also: Die Herstellung neuartiger Nanomaterialien ist das eine. Sie maßzuschneidern eine ganz andere.

Anschauliches Beispiel dafür, wie die einzelnen Steine eines Nanobaukastens zu etwas funktionellem Neuen zusammengesetzt werden könnten, zeigten Wissenschaftler um Huisheng Peng von der Fudan University in Shanghai. Sie überzogen feine Stahldrähte mit Nanopartikeln aus Titandioxid, auf dem sie ihrerseits das Halbleitermaterial Calciumtitanat abschieden. Auf Grund der riesigen Oberfläche der Partikel entstanden auf diese Weise effiziente Solarzellen, die sich in Stoffen verarbeiten lassen, preiswert herzustellen sind und kleinere elektronische Geräte versorgen können.

Solche und andere funktionelle Materialien sind laut dem »nano.DE-Report 2013« der Bundesregierung bei der zukünftigen Entwicklung der Nanotechnologie von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Hier gilt es beispielsweise, antibakterielle Wirkstoffe dauerhaft in Lacke, Farben oder auf andere Oberflächen einzubringen, so dass sie weder ausgewaschen werden noch ausdampfen. Auch Beschichtungen mit schaltbaren

Eigenschaften räumt der Bericht großes künftiges Marktpotenzial ein. Darunter fallen etwa Klebstoffe, die sich bei Anlegen eines Magnetfelds lösen. Oder »Geckskin«, eine Entwicklung von Forschern um Al Crosby von der University of Massachusetts. Dabei handelt es sich um Haftstreifen nach dem Vorbild des Geckofußes. So wie das Reptil einzig dank Adhäsion kopfüber an der Decke laufen kann, vermag ein kreditkartengroßes Stück »Geckskin« gut 130 Kilogramm Gewicht zu tragen (Bild S. 20).

Überhaupt wird die Natur immer mehr zum Vorbild – insbesondere wenn es darum geht, auf atomarer und molekularer Ebene Neues zu erschaffen. »Zu den ganz großen Themen der kommenden 20 Jahre«, sagt der Nanotechnologieexperte Uwe Hartmann von der Universität des Saarlandes, »gehört sicher die gezielte Nutzung molekularer Prozesse der Selbstorganisation.« Gemeint ist die selbstständige Anordnung von Molekülen und Atomen zu ganz bestimmten Strukturen. Auf diese Weise entstehen

etwa die Organellen und Strukturen in den Zellen, und so falten sich auch die Proteine in genau die dreidimensionale Form, die sie für ihre Funktion, beispielsweise als Enzym, benötigen. Auch die helixförmige DNA findet auf diese Weise ihre Form. Dass diese sich in erstaunlichem Maß künstlich manipulieren lässt, zeigte Paul Rothemund vom California Institute of Technology in Pasadena: Stimmen im Reagenzglas die Zutaten und Rahmenbedingungen, dann faltet sich die DNA in beinahe jede zwei- oder dreidimensionale Form – von selbst, ohne weiteres äußeres Zutun. Anfang 2010 zeigte er im Wissenschaftsmagazin »Nature« Bilder von DNA-Komplexen, die sich in 100 Nanometer große Smileys gefaltet hatten (Bild S. 18). »Das ist wie Kuchenbacken – ohne dass man sich um die Mengen der einzelnen Zutaten kümmern muss«, schwärmt Rothemund, der den Begriff »DNA-Origami« prägte.

Was die Zukunft der künstlichen DNA-Faltung bringen wird, lässt sich kaum absehen. Denkbar sind künstliche Ribosomen, die gezielt bestimmte Enzyme erzeugen. Solche DNA-Strukturen könnten auch die Grundlage nanoelektrischer Stromkreise sein. Kurt Gothelf von der Universität Aarhus in Dänemark stellte 2009 in »Nature« ein 42 mal 36 mal 36 Nanometer großes Behältnis vor, das sich aus DNA gefaltet hatte und mit Hilfe eines DNA-Schlüssels öffnen und schließen ließ.

Vielleicht erlauben solche Container einmal den gezielten Arzneitransport im Körper. So wie auch die Dendrimere (von griechisch: dendron = Baum), chemische Verbindungen, deren Moleküle stufenweise wachsen und sich baumartig verzweigen. Im dichten Geäst der maßgeschneiderten Dendrimere entstehen Hohlräume unterschiedlicher Form und Größe, in denen beispielsweise modifizierte Antikörper enthalten sein können, die in ultraviolettem Licht fluoreszieren. Treffen die Dendrimere im Körper auf Krebszellen mit den passenden Antigenen, werden diese durch die leuchtenden Antikörper sichtbar.



DANK ADHÄSIVER KRÄFTE  
HAFTET EIN STREIFEN  
»GECKSKIN« AUF EINER  
GLASPLATTE UND HÄLT EIN  
GEWICHT VON GUT 130  
KILOGRAMM.

Mit Hilfe der Selbstorganisation können aus nano- auch makroskalige Dinge werden. So gelang es Forschern um Monika Fritz von der Universität Bremen bereits, Perlmutter synthetisch herzustellen. Dieses Material ist dank seiner komplexen inneren Struktur von großer Härte und zugleich überaus zäh – zwei Eigenschaften, die sich in künstlichen Materialien nur schwer vereinen lassen. In der Muschelschale sind sie einer nanoskaligen Sandwichstruktur zu verdanken, in der sich Schichten aus Calciumcarbonat und einem organischen Mix aus Chitin und Proteinen abwechseln. Die Bremer Forscher sehen ihr künstliches Perlmutter in ungiftigen Beschichtungen von Schiffsrümpfen, verträglichen Zahnprothesen oder kugelsicheren Westen.

Auch die Biochemiker um Thomas Scheibel von der Universität Bayreuth arbeiten an der Synthese eines Naturstoffs mit einzigartigen Eigenschaften: der Spinnenseide. Die hauchdünnen Fäden sind reißfester als Stahl und zugleich dehnbar wie Gummi. Diese gleichfalls unmöglich erscheinende Kombination liegt im nanostrukturellen Aufbau faden- und quaderförmiger Proteine

begründet. Die aus biotechnologisch erzeugten Proteinen bestehenden Fasern der Bayreuther Forscher tragen den markigen Namen »Biosteel« und übertreffen ihre natürlichen Pendanten in ihren mechanischen Eigenschaften sogar. Eines Tages könnten sie beispielsweise zu biologisch abbaubaren Fischernetzen verarbeitet werden. Auch unzählige medizinische Anwendungen sind denkbar.

### »CARBON VALLEY«

Wenn von den ganz großen Versprechen der Nanotechnologie die Rede ist, fällt neben »Selbstorganisation« meist auch der Begriff »Nanocomputer« – hyperschnelle Rechner, deren Herz nicht mehr aus herkömmlichen Siliziumchips besteht. Da die permanente Miniaturisierung der Computertechnologie und die damit verbundene Leistungssteigerung mit derzeitiger Technik allenfalls weitere 10 bis 15 Jahre gewährleistet sind, arbeiten Wissenschaftler in aller Welt mit Hochdruck an nanoelektronischen Entwicklungen – insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff: Aus »Silicon Valley« könnte »Carbon Valley« werden.

In besagten Nanoröhrchen etwa bewegen sich Elektronen rund 100-mal schneller als in herkömmlichen Bauteilen auf Siliziumbasis. In den Labors hantiert man gerade erst mit einzelnen Bausteinen der neuen Technologie. So berichteten Forscher um Andreas Heinrich vom kalifornischen IBM Almaden Research Center Anfang 2012 in »Science«, wie sie ein Speicherbit herstellten – aus nur zwölf Eisenatomen. Zum Vergleich: Auf heutigen Festplatten belegt ein Bit ungefähr eine Million Atome. Ein Team um Max Shulaker von der Stanford University ging noch einen Schritt weiter und stellte im Herbst 2013 in »Nature« einen Computer aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen vor. Wenngleich er nur aus gerade einmal 178 Transistoren besteht und kaum mehr als ein paar Zahlen sortieren kann (auf heutigen Siliziumchips befinden sich einige Milliarden Transistoren), überschrieb Franz Kreupl

von der Technischen Universität München seinen Kommentar zu Shulakers Arbeit optimistisch mit »The carbon-nanotube computer has arrived«. Und resümiert: »Wenn wir Shulakers Nanoröhrencomputer weiterentwickeln, werden wir schon bald auf einem tippen.« Wer weiß, vielleicht gerade rechtzeitig, wenn die siliziumbasierte Computertechnologie in 20 Jahren am Ende ihrer Miniaturisierung angekommen ist.

Eine vielversprechende Alternative zu den Nanoröhren ist Graphen. Das nur eine Atomlagen dicke, extrem leichte und zugleich zähste aller bekannten Materialien leitet Strom und Wärme bestens – und verfügt zudem über einzigartige elektronische Eigenschaften. Noch ist Graphen extrem schwierig herzustellen und entsprechend teuer: Ein briefmarkengroßes Stück kostet einige zehntausend Euro. Diesen Wunderstoff alltagstauglich zu machen, ist daher Ziel vieler Forscher – unter anderem der Arbeitsgruppe um den Chemiker Klaus Müllen vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Sie können bereits Graphenschichten herstellen, an deren Rändern jedes Atom genau am richtigen Platz sitzt. Für den Einsatz in Computerchips ist diese Präzision notwendig, umsetzbar ist sie bisher allerdings nur mit großem Aufwand und in kleinem Umfang. Auch jene IBM-Forscher brauchten Tage, um mit dem Rastersondenmikroskop aus zwölf Eisenatomen ein einziges Bit zusammenzubauen. Für einen Computerhersteller ist das natürlich ein absurdes Unterfangen.

Doch wer weiß, ob sich das nicht bald schon ändert. Im April 2014 stellte ein Team um Jonathan Coleman vom Trinity College Dublin in Irland im Fachblatt »Nature Materials« eine Methode vor, mit der sich Graphen vielleicht in großem Stil herstellen lässt – und zwar mit eindrucksvoll simplen Mitteln: Die Forscher hatten ein paar Esslöffel Graphit in einen halben Liter Wasser gemischt, einige Spritzer

Spülmittel hinzugegeben und das Ganze für eine halbe Stunde in einer normalen Küchenmaschine ordentlich durchgemixt. Am Ende fanden sie »eine große Zahl mikrometergroßer Graphenflocken«, die wohl nicht von höchster atomarer Präzision waren, aber belegen, dass auch Nanotechnologie nicht immer Hightech sein muss.

Vielleicht werden es eines Tages ohnehin ganz andere schaffen, hochwertiges Graphen in größeren Mengen

### IMMER SCHNELLER!

Vor 50 Jahren entdeckte der amerikanische Chemiker und spätere Mitbegründer des Halbleiterkonzerns Intel, Gordon Moore, dass sich die Anzahl der elektronischen Bauteile einer integrierten Schaltung in der Vergangenheit in jedem Jahr verdoppelt hatte. Er prognostizierte daraufhin, dass sich diese Entwicklung in Zukunft fortsetzen würde – und sollte damit ziemlich richtig liegen. Zwar wurde das »mooresche Gesetz«, wie es bald hieß, später etwas korrigiert. Die regelmäßige Verdoppelung der Leistungsfähigkeit von Computerchips setzt sich aber bis heute ungebremst fort – und zwar ungefähr alle 20 Monate.

herzustellen. Dann nämlich, wenn es Biochemikern gelingt, die DNA von Bakterien entsprechend zu programmieren. Nanobauteile würden dann in Reaktoren der chemischen Industrie »heranwachsen«.

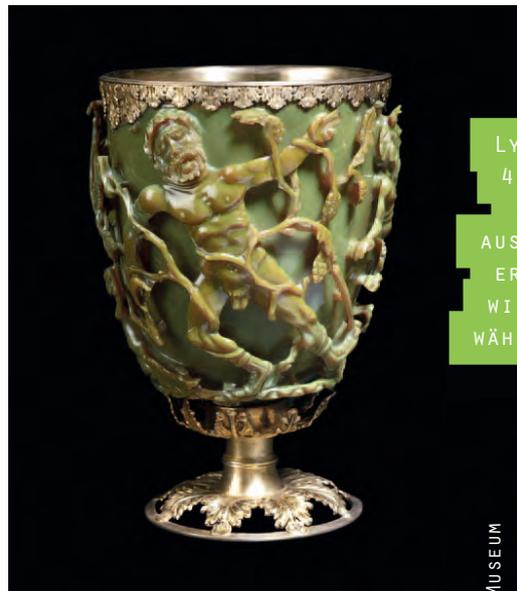
»There's Plenty of Room at the Bottom« – »Unten ist eine Menge Platz«, so hatte der Physiker und spätere Nobelpreisträger Richard Feynman Ende 1959 einen Vortrag überschrieben, in dem er über die Miniaturisierung der Technologien sprach und Mikroskope vorhersah, mit denen man Atome sehen und manipulieren kann. Damals klangen seine Ausführungen so visionär, dass sein Vortrag rasch in Vergessenheit geriet. Erst Anfang der 1990er Jahre entdeckte man die Aussagen Feynmans ein weiteres Mal – nämlich, als sein vorhergesagtes Mikroskop zur Manipulation von Atomen Wirklichkeit geworden war. Heute gilt Feynman als einer der Begründer der Nanotechnologie und dient als Beispiel dafür, dass sich selbst die kühnsten Prophezeiungen bewahrheiten können – und das gilt angesichts des immer schnelleren Fortschritts heute sicher mehr als je zuvor.

# ANTIKE NANOTECHNOLOGIE

**B**is heute streiten die Gelehrten, wie die spätrömischen Glashandwerker solche kostbaren Objekte herstellten. Die sogenannten Netzbecher bestehen nämlich aus einem Gefäß, das von einer filigranen Glashülle umgeben ist – verbunden über feine Stege. Die Hülle ist kunstvoll bearbeitet und zeigt in diesem Beispiel Szenen aus dem Leben des Thrakerkönigs Lykurgos.

Gewiss ist, dass beide Teile nicht einzeln hergestellt und anschließend zusammengefügt wurden. Die »Diatretgläser« (diatreton, griechisch: durchbrochen, durchbohrt) bestehen vielmehr aus einem Stück und wurden nach Ansicht vieler Forscher in mühevoller Kleinstarbeit aus einem massiven Glasblock geschliffen. Einer anderen Theorie zufolge stellten die Handwerker zunächst perforierte Zwischenbecher aus Gips her, die sie dann von innen und außen mit flüssigem Glas belegten. Dank der Löcher in der Form entstanden die Verbindungsstege zwischen Gefäß und Hülle; der Gips ließ sich vor der weiteren Feinbearbeitung herauskratzen.

Der hier gezeigte Lykurgosbecher aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. fasziniert aber auch aus ganz anderem Grund – nämlich durch sein beeindruckendes Farbenspiel: Wird er von vorne beleuchtet, erscheint er in sattem Jadegrün, gegen das Licht funkelt er hingegen in feurigem Rubinrot. Weil niemand wusste, wie Kunsthandwerker vor 1600 Jahren diesen Effekt künstlich erzielen konnten, spekulierten manche, dass der Becher gar nicht aus Glas, sondern aus einem natürlichen, opalisierenden Mineral gefertigt wurde.



DAS GLAS DES  
LYKURGOSBECHERS AUS DEM  
4. JAHRHUNDERT N. CHR.  
ENTHÄLT NANOPARTIKEL  
AUS GOLD UND SILBER. WENN  
ER VON VORNE BELEUCHTET  
WIRD, ERSCHEINT ER GRÜN,  
WÄHREND ER GEGEN DAS LICHT  
ROT LEUCHTET.

**D**och der Lykurgosbecher besteht in der Tat aus Glas – das ist spätestens seit 1950 sicher. Erst 40 Jahre später konnten Wissenschaftler auch das Farbenrätsel lösen. Im Glas entdeckten sie winzige, nur rund 70 millionstel Millimeter große Nanopartikel aus einer Silber-Gold-Legierung. Weil sowohl die Größe als auch das genaue Verhältnis der Edelmetalle – sieben Teile Silber, drei Teile Gold – für das besondere Leuchten des Bechers von entscheidender Bedeutung sind, gehen Fachleute davon aus, dass jener römische Kunsthandwerker den eindrucksvollen Farbwechsel nicht zufällig erzeugte – sondern nach vielen Experimenten genau wusste, was er tat. Er wäre auch heute noch ein ganz Großer seiner Zunft.

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM



## LINKS

DANA2.0 – DATEN UND WISSEN ZU NANOMATERIALIEN

[WWW.NANOPARTIKEL.INFO](http://WWW.NANOPARTIKEL.INFO)

NANOTRUCK – TREFFPUNKT NANOWELTEN

[WWW.NANOTRUCK.DE](http://WWW.NANOTRUCK.DE)

NANOREISEN – ABENTEUER HINTERM KOMMA

[WWW.NANOREISEN.DE](http://WWW.NANOREISEN.DE)

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU  
UND REAKTORSICHERHEIT – NANOTECHNOLOGIE

[WWW.BMUB.BUND.DE/THEMEN/GESUNDHEIT-CHEMIKALIEN/  
NANOTECHNOLOGIE/](http://WWW.BMUB.BUND.DE/THEMEN/GESUNDHEIT-CHEMIKALIEN/NANOTECHNOLOGIE/)

UMWELTBUNDESAMT – NANOTECHNIK

[WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/THEMEN/CHEMIKALIEN/  
NANOTECHNIK](http://WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/THEMEN/CHEMIKALIEN/NANOTECHNIK)

BUNDESINSTITUT FÜR RISIKOFORSCHUNG – BEWERTUNG  
VON NANOMATERIALIEN

[WWW.BFR.BUND.DE/DE/GESUNDHEITLICHE\\_BEWERTUNG\\_  
VON\\_NANOMATERIALIEN-30413.HTML](http://WWW.BFR.BUND.DE/DE/GESUNDHEITLICHE_BEWERTUNG_VON_NANOMATERIALIEN-30413.HTML)

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG –  
NANO.DE-REPORT 2013

[WWW.BMBF.DE/PUB/NANO.DE-REPORT\\_2013\\_BF.PDF](http://WWW.BMBF.DE/PUB/NANO.DE-REPORT_2013_BF.PDF)

NANOMAGAZIN

[WWW.NANOMAGAZIN.NET](http://WWW.NANOMAGAZIN.NET)

BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND –  
DATENBANK FÜR NANOPRODUKTE

[WWW.BUND.NET/NANODATENBANK](http://WWW.BUND.NET/NANODATENBANK)

DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG –  
NANO-PORTAL

[NANO.DGUV.DE](http://NANO.DGUV.DE)

SWISS NANO CUBE – PLATTFORM FÜR WISSEN UND  
BILDUNG ZU NANOTECHNOLOGIEN

[WWW.SWISSNANOCUBE.CH](http://WWW.SWISSNANOCUBE.CH)

DEUTSCHER VERBAND NANOTECHNOLOGIE

[WWW.DV-NANO.DE](http://WWW.DV-NANO.DE)

## BÜCHER

JOACHIM  
SCHUMMER

NANO-  
TECHNOLOGIE

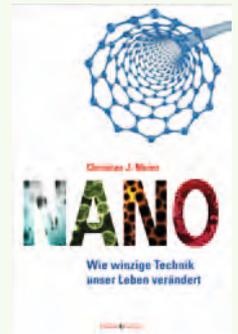
2009  
Suhrkamp  
171 Seiten  
€ 10,00



CHRISTIAN  
J. MEIER

NANO

2014  
Primus  
224 Seiten  
€ 24,95



ORTWIN  
RENN

DAS  
RISIKO-  
PARADOX

2014  
Fischer  
608 Seiten  
€ 14,99





GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER  
VARRENTAPPSTR. 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN  
EINE PUBLIKATION VON: SPEKTRUM CP  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH  
SLEVOGTSTR. 3-5, 69126 HEIDELBERG  
[WWW.SPEKTRUM-CP.COM](http://WWW.SPEKTRUM-CP.COM)  
LEITUNG: DR. JOACHIM SCHÜRING  
TEXTE: DR. CHRISTIAN J. MEIER (S. 6-18)