



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

IDEEN ZÜNDEN!
Die Hightech-Strategie für Deutschland

Nanopartikel – kleine Dinge, große Wirkung

Chancen und Risiken



Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat „Nanomaterialien; Neue Werkstoffe“
53170 Bonn

Bestellungen

Schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn
oder per
Tel. : 01805 - 262 302
Fax: 01805 - 262 303
(0,14 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)
E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Redaktion

VDI Technologiezentrum GmbH
Dr. Wolfgang Luther
Dr. Gerd Bachmann
Abt. Zukünftige Technologien Consulting

Autor

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

Gestaltung

Suzy Coppens, Köln
www.bergerhof-studios.de

Druck

WAZ Druck, Duisburg

Bonn, Berlin 2008

Bildnachweis

Titelseite: Atomwiese: Gruppe Prof. Köhler, RUB Bochum; Gecko: Dr. Stanislav Gorb, MPI für Metallforschung, Stuttgart; Menger Schwamm: University of California, Berkeley, USA; Nanopartikel: University of Notre Dame, Indiana, USA; Pyramide: Universität Karlsruhe (TH); Portrait, Himmel, Montage: Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln
S. 5: Links von oben nach unten: 1, 2: BergerhofStudios, Köln; 3–5: REM-Labor Universität Basel; 6: Universität Bielefeld, Fachschaft Chemie; Mitte: BergerhofStudios, Köln; rechts von oben nach unten: 1, 2: BergerhofStudios, Köln; 3: REM-Labor Universität Basel; 4: REM-Labor Universität Basel; 5: Center for Nanotechnology, Münster; 6: Bernd Thaller, Advanced Visual Quantum Mechanics
S. 6: Hintergrund: Haseke GmbH & Co. KG, Porta Westfalica
S. 7: von links nach rechts: Philipps-Universität Marburg; Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin; GSF-Forschungszentrum GmbH, Neuherberg; K/T GeoServices, Inc., USA
S. 8: oben: NASA/ ESA; unten: BergerhofStudios, Köln
S. 9: oben: BergerhofStudios, Köln; unten links: NASA/ESA; rechts: Institut für Geophysik, Uni München
S. 10: links: Saito Laboratory, Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Japan; rechts: Nanotechnologiezentrum, Uni Duisburg-Essen
S. 11: links: INM, Saarbrücken; rechts: BergerhofStudios, Köln
S. 12: BergerhofStudios, Köln
S. 13: von links nach rechts: 1–4, 7, 8: BergerhofStudios, Köln; 5: Duales System Deutschland GmbH, Köln; 6: e-Letter Universität Stuttgart
S. 14: von oben nach unten: Princeton Art Museum, Princeton, NJ; K/T GeoServices, Inc.; links: Musée Guimet, Paris; rechts: Technische Universität Dresden
S. 15: BergerhofStudios, Köln
S. 16: oben: BergerhofStudios, Köln; unten: Gezelter Lab, University of Notre Dame, Indiana, USA
S. 17: Forschungszentrum Rossendorf
S. 18: links: Forschungszentrum Rossendorf; rechts: Evonik Industries AG, Essen
S. 19: Evonik Industries AG, Essen
S. 20: BergerhofStudios, Köln
S. 21: Bio-Gate AG, Nürnberg
S. 22, 23: Evonik Industries AG, Essen
S. 24: links: Institut für physikalische Chemie, Uni Hamburg; oben: Institut für Wissenschaftliches Rechnen, TU Dresden; unten: Universität Karlsruhe (TH)
S. 25: NASA; Department of Physics University of California, USA; Montage: BergerhofStudios, Köln
S. 26: Capsulation NanoScience AG, Berlin
S. 27, 28: MagForce Nanotechnologies AG, Berlin
S. 29: BergerhofStudios, Köln
S. 30: Aquanova AG, Darmstadt
S. 31: oben: BergerhofStudios, Köln; unten: Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie, Itzehoe
S. 32–33: BergerhofStudios, Köln
S. 34–37: GSF-Forschungszentrum GmbH, Neuherberg
S. 38: Beiersdorf AG, Hamburg
S. 38: Tilmann Butz
S. 40: Max-Planck-Institut für Biochemie und Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie, Bremen
S. 41: Forschungszentrum Karlsruhe und Max-Planck-Institut FKF Stuttgart
S. 43: links: Daimler AG, Stuttgart; rechts: GSF-Forschungszentrum GmbH, Neuherberg
S. 44–45: BergerhofStudios, Köln
S. 46: R. Wang, National Center for Electron Microscopy
S. 47: Flad & Flad Communication GmbH, Heroldsberg
S. 48: Empa - Materials Science & Technology, St. Gallen
S. 50: Bio-Gate AG, Nürnberg
S. 51: Quelle: Nanotechnologieportal Hessen; Grafik, BergerhofStudios, Köln
S. 52–53: BergerhofStudios, Köln
S. 54: Universität Ulm
S. 55: links oben: Universität Bielefeld, Fachschaft Chemie; rechts oben: Universität Duisburg/Essen; links unten: Saito Laboratory, Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Japan; rechts unten: Saito Laboratory, Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Japan



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Nanopartikel – kleine Dinge, große Wirkung

Chancen und Risiken

Vorwort



Obwohl kaum wahrnehmbar, sind Nanomaterialien aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken: Nanomaterialien machen unsere Automobile umweltfreundlicher und sicherer, Medikamente wirksamer und gleichzeitig schonender und Handys oder Laptops immer kleiner und leistungsfähiger. Die Nanotechnologie bietet daneben auch große Potenziale für den Klima- und Ressourcenschutz. Denn erst durch die Nanotechnologie werden eine Reihe wirksamer Umwelttechnologien und die effizientere Nutzung regenerativer Energien möglich.

Mit der 2006 im Rahmen der Hightech-Strategie verkündeten „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ wurde erstmals ein einheitlicher und ressortübergreifender Aktionsrahmen geschaffen, der alle Facetten der Nanotechnologie unter einem Dach bündelt – von der KMU-Förderung über neue Leitinnovationen und verstärkte Risikoforschung bis hin zu einem umfassenden Dialog mit der Öffentlichkeit über Chancen und Auswirkungen.

Die vorliegende Broschüre gibt einen Einblick in die Welt der Nanopartikel, erläutert deren Herstellung und Gebrauch und beschreibt auch das Vorkommen von Nanopartikeln in der Natur. Darüber hinaus will die Broschüre über die bisher bekannten gesundheitlichen Auswirkungen von Nanopartikeln, über die öffentliche Wahrnehmung und die tatsächlichen Risiken und deren Vorbeugung informieren. Damit wollen wir einen Beitrag leisten zu einer fundierten und sachlichen Debatte.

Informieren auch Sie sich über Nanotechnologie, erfahren Sie Neues aus der Welt der Nanopartikel und beteiligen Sie sich an der Diskussion um die Gestaltung der Nanotechnologie, einer der wichtigsten Zukunftstechnologien. In dieser Broschüre finden Sie dazu wichtige Informationen und Erkenntnisse.

A handwritten signature in black ink that reads "Annette Schavan".

Dr. Annette Schavan, MdB
Bundesministerin für Bildung und Forschung



Inhalt

Alles Nano, oder was?	4
Infokasten: Nanos auf der Sommerwiese	5
Nanopartikel-Zoo	7
Wie kommen Nanopartikel in die Welt?	8
Industrielle Erzeugung von Nanopartikeln	10
Unbeabsichtigte Erzeugung von Nanopartikeln	12
Hausgemachte Nanopartikel	12
Stoffkreislauf	13
Nanopartikeltechnik der Altvorderen	14
Nanopartikel in der Technosphäre	16
Palladium-Nanos auf Bakterienhäuten für die Katalyse	17
Nanomaterialien für neue Lithiumakkus	18
Einsatz von Nanopartikeln: Silber als Bakterienkiller	20
Erfahrungen mit der industriellen Herstellung von Nanomaterialien	22
Interview mit Dr. Markus Pridöhl	22
Quantenpunkte	24
Nano-Exoten: Graphene	25
Nanopartikel in der Biosphäre	26
Nanotechnologie für Gesundheit und Medizintechnik	26
Nanotechnologie für Lebensmittel	28

Gesundheitliche Wirkungen von Nanopartikeln	32
Einfallstore für Nanopartikel	32
Infokasten: Asbest – eine Geschichte, die sich nicht wiederholen darf	33
Nanopartikel – wie gefährlich?	34
Forschung zu lungengängigen Aerosolen	35
Gefährdung von Herz und Gefäßen	37
Wirkungen von Nanopartikeln auf die Haut	38
Interview mit Prof. Tilman Butz	38
Öffentliche Wahrnehmung und gesellschaftliche Debatte	40
Nano – die Anfänge	40
Nano-Hype	40
Ende der Nanobots	41
Nano-Fakes	42
Nano-Mythen	42
Nano-Dispute	43
Risikomanagement in der Nanotechnologie	46
Nanoanalytik als Grundlage der Risikoanalyse	46
Nanotechnologie-Aktivitäten der Bundesregierung	47
Nanosicherheitsforschung des BMBF: NanoCare	48
Interview mit Prof. Dr. Harald Krug	48
Aktivitäten der Industrie	50
Kleine Teilchen, große Wirkungen – Chancen und Risiken der Nanopartikeltechnologie	52
Glossar	54
Weiterführende Informationen	56
Abkürzungsverzeichnis	57

Alles Nano, oder was?

Ein Nanometer ist der millionste Teil eines Millimeters. Das ist schon sehr klein; Atome, die Grundbausteine des Alltags, sind nur noch zehnmal kleiner. In den Punkt über dem i würden weit mehr als 10 hoch 10 Punkte mit dem Durchmesser eines Nanometers passen, also über 10.000.000.000.

Nanotechnologie ist die Kunst, Strukturen im Bereich zwischen einem und 100 Nanometern, die nützliche Funktionen tragen, kenntnisreich für die eigenen guten Zwecke zu nutzen. Das Wort „kenntnisreich“ ist wichtig, sonst wäre schon die Butterherstellung Nanotechnologie, denn Milch enthält unzählige nanoskalige Partikel, was man für das Buttern aber nicht wissen muss. Die Zellen jedes Lebewesens, jeder Mohnblume, sind mit Nano-Natur gestopft voll.

Die Nanopartikeltechnologie beschränkt sich auf künstliche Partikel. Ihr kommt derzeit die größte wirtschaftliche Bedeutung zu. Nanoskalige Partikel findet man bereits in Farben, die Geruchsstoffe zersetzen, auf chirurgischen Instrumenten, die sich selbst keimfrei halten; in Sonnencremes, die keine weiße Nase machen; in Tabletten, die ihren Wirkstoff blitzschnell freisetzen und so weiter. Das Wort „Nano“ ist für viele Marketingmanager so attraktiv geworden, dass sie „Nano“ manchmal auch dort auf die Packung schreiben, wo gar keins drin ist.

Nanopartikel haben in der Regel andere Eigenschaften als das gleiche Material in größerer Form. Während das Gold im Ehering gelb glänzt, können Goldnanopartikel ein Weinglas rot färben, das liegt in diesem Fall an den Gesetzen der Quantenmechanik, die für ganz kleine Dinge andere Regeln vorsieht. Auch ist Gold im Großen ein sehr reaktionsträges Material; als Nanocluster, Nanohäufchen, kann es dagegen katalytisch aktiv sein, wie das Platin im Autokat.

Nanopartikel sind schon aus geometrischen Gründen reaktionsfreudiger, weil der Anteil der Oberflächenatome mit sinkender Größe eines Partikels steigt. Oberflächenatome haben eine starke Neigung, ihre Bindungsmöglichkeiten zu nutzen. Manche Nanopartikel müssen deshalb unter Schutzgas aufbewahrt werden, weil sie an Luft sofort ver-

brennen würden. Auch Staubexplosionen sind denkbar; das aber ist keine Nano-Eigenheit, sondern schon bei Mehlstäuben möglich. Teuren Nanostaub wird man schon aus finanziellen Gründen behüten, aus Gründen der Arbeitssicherheit erst recht.

Der hohe Anteil von Oberflächenatomen in Nanoclustern und deren hoher Anteil an unabgesättigten chemischen Bindungen machen diesen Materiezustand auch für die Katalyse – die Beschleunigung einer chemischen Reaktion ohne Verbrauch des Katalysators – hoch interessant.

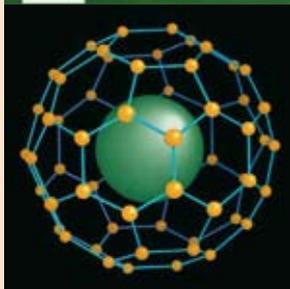
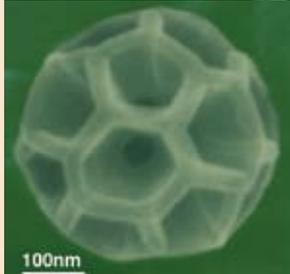
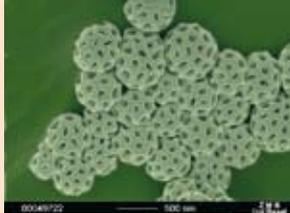
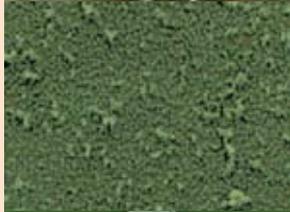
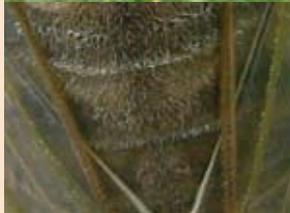
Weil Nanopartikel so reaktionsfreudig sind, verbinden sie sich auch gerne untereinander. Das muss gegebenenfalls mit speziellen Beschichtungen verhindert werden, wenn der Vorteil der Nanoskaligkeit nicht verloren gehen soll. Andererseits entschärfen sich frei gewordene Nanopartikel mit ihrer Verbindungsfreudigkeit in der Regel selbst, indem sie zu größeren Einheiten zusammenfinden.

Gleichwohl: Soweit anorganische feste, keramische oder metallische Nanopartikel betroffen sind, hat die Wissenschaft Forschungsbedarf bezüglich ihrer Sicherheit für den Menschen ausgemacht. Im Hintergrund droht das Schreckenswort „Asbest“, dessen krebserzeugende Potenz jahrelang in Abrede gestellt wurde, obwohl eindeutige Hinweise auf dessen Gefährlichkeit vorhanden waren (siehe Kasten Seite 33).

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt deshalb die Sicherheitsforschung zur Nanopartikeltechnologie in mehreren Projekten. Im Folgenden werden die Risiken dieser Technologie näher beleuchtet, vor allem aber auch die Chancen. Die nämlich sind so groß, dass sie die für die kommenden Jahre absehbaren Risiken einer offenbar unvermeidbaren Industrialisierung der ganzen Welt zumindest teilweise neutralisieren können sollten. Die möglichen Risiken sind daher abzuwiegen gegen verpasste Chancen durch einen Verzicht auf den Einsatz von Nanopartikeln. Über das Ausmaß möglicher Risiken können natürlich erst nach erfolgter Nanosicherheitsforschung verbindliche Aussagen getroffen werden. Bis dahin werden Forschung und Industrie bemüht sein, alle möglichen Schadwirkungen zu untersuchen und zu vermeiden.

Nanopartikel sind im übrigen kein Privileg der Technik; sie sind Bausteine der Natur und finden sich auf jeder Blumenwiese.

Nanos auf der Sommerwiese

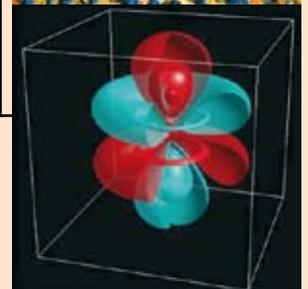
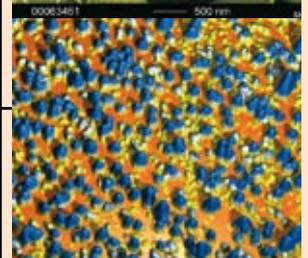


Die Natur steckt voller nanotechnologischer Raffinessen.

Zikaden etwa schützen sich vor Wasser und Schmutz gleichermaßen durch einen Überzug, der zahllose „Brochosomen“ enthält, luftige Protein-Kügelchen, die zum Teil eine ähnliche Form wie das berühmte C₆₀-Fulleren, auch Buckyball genannt, zeigen. Unmittelbar nach dem Häuten tritt am Hinterleib der Zikade ein milchiges Tröpfchen aus, das mit den Beinen über den ganzen Körper verteilt wird und dort zu einer wachsartigen Schutzschicht erstarrt.

Das C₆₀-Buckminsterfulleren ist mit einem Nanometer Durchmesser noch hundertmal kleiner als ein Brochosom. Es findet sich auch in der Natur, etwa in der Luft nach einem Waldbrand; die Befüllung mit Fremdatomen, etwa einem Stickstoff-Atom, gelingt aber wohl nur im Labor. Solche Nano-Exoten könnten einmal Rechenelemente für einen Quantencomputer werden.

Wer nur nahe genug an einen Schneckenkopf heranzoomt, findet submikrometerfein ausgestaltete Raspelzähne aus mineralischen Komponenten. Bakterien natürlich auch. Deren Häute sind, wie die anderer Zellen, mit zahlreichen nanoskalierten Noppen bedeckt. Sensoren für die Außenwelt, deren Betätigung komplexe Reaktionskaskaden im Zellinneren auslöst. Am Ende dieser Reise steht ein Wasserstoffatom, mit einem Zehntel Nanometer Durchmesser, das kleinste aller Atome. Wenn es durch Energiezufuhr „angeregt“ wird, kann seine Elektronenhülle beträchtlich groß werden und ausgesprochen komplizierte Strukturen annehmen. Beim Wasserstoffatom endet alle Nanotechnologie, die darunter liegenden Strukturen entziehen sich dem konstruktiven Zugriff.



Nanopartikel-Zoo

Nanopartikel gibt es in zahlreichen Variationen, was technisch ja auch gerade den Reiz ausmacht. So lassen sich verschiedene Eigenschaften in einem Partikel vereinen, etwa harte mineralische Kerne mit Wasser abstoßenden chemischen Hüllen. Daraus kann ein kratzfester, Schmutz abweisender Autolack werden.

Nanopartikel lassen sich mit zahlreichen Raffinessen versehen. So können Nanopartikel mit einem magnetischen Kern mit einer für Krebszellen giftigen ersten Schicht umhüllt werden, der eine zweite Schicht aus Antikörpern folgt, die nur an Krebszellen haften. Wenn das im Körper eines Patienten geschehen ist („drug targeting“), erhitzen elektromagnetische Wechselfelder die jetzt genau am richtigen Ort befindlichen magnetischen Kerne, durch die

Wärme wird die Antikrebssubstanz der ersten Schicht frei. Die Hoffnung ist groß und wohl auch berechtigt, dass solche raffinierten Rezepte in naher Zukunft wertvolle Therapieinstrumente darstellen. In jedem Fall eröffnet das Nanopartikel-Konzept Möglichkeiten, die die klassische Stoffchemie nicht besitzt (siehe Kapitel Medizintechnik S. 26).

Die Unzahl von Variationen, in denen Nanopartikel auftreten können, macht andererseits den Toxikologen das Leben schwer. Während bei einer einfachen Chemikalie wie Natriumchlorid (Kochsalz) die Substanz mit der Angabe der chemischen Formel, NaCl, und des Reinheitsgrades festgelegt ist, müsste etwa bei einem wasserunlöslichen Metalloxid-Nanopartikel mindestens noch die Größe, die Form und die Kristallklasse der Partikel angegeben werden, bevor toxikologische Studien vergleichbar wären, denn alle diese Eigenschaften können die

Nanopartikel finden eine weite Verbreitung.



mögliche Toxizität beeinflussen. Eigentlich wäre auch noch der Herstellungsprozess anzugeben, der etwa die Verunreinigungen an der Partikeloberfläche bestimmt. Die Charakterisierung, also die verlässliche Erfassung der Eigenschaften, ist bei Nanopartikeln in der Regel ungleich schwerer als bei klassischen Chemikalien.

Um alle Möglichkeiten des Nanopartikel-Konzeptes auszuloten, benötigte man eigentlich eine vieldimensionale Darstellung, vielleicht einen

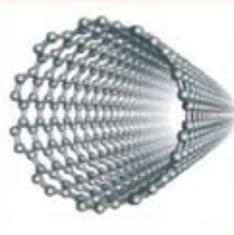
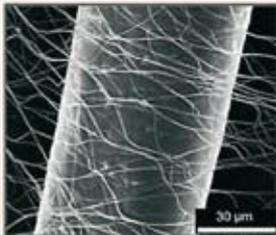
„Morphologischen Kasten“ nach Art des 1974 verstorbenen schweizerisch-amerikanischen Astrophysikers Fritz Zwicky. Das Denkkonzept trug Zwicky seinerzeit zahlreiche Erkenntnisse ein, darunter profitabel patentierbare. Das untenstehende Schema ist ein erster Versuch.

Nanopartikel lassen sich in zahllosen Varianten herstellen.

Eigenschaften von Nanomaterialien

Form/Struktur:

Nanostrukturierte Materialien, zu denen auch die Nanopartikel zählen, unterscheiden sich stark in ihrer geometrischen Form, darunter Nadeln, Fasern, Hohlfasern mit variierenden Atomlagen, Kugeln, Hohlkugeln, mehrschichtige Kugeln, Kristalle mit geometrischen Ausformungen, Plättchen, usf.



Nanopartikel entstehen:

natürlich als Rußpartikel bei Bränden, in Salz-Aerosolen, als Magnetitkristalle in Bakterien, etc.
ungewollt in Dieselabgasen, bei Arbeitsprozessen wie Schweißen, Laserbearbeitung, etc.
gewollt für Pigmente, Füllstoffe, Fasern, u. a. m.

Besonderheiten:

- Chemisch: erhöhte Reaktivität durch hohe spezifische Oberfläche
- Physikalisch: Quanteneffekte führen zu außergewöhnlichen Materialeigenschaften
- Biologisch: bestimmte Nanopartikel können aufgrund ihrer Kleinheit Zellmembranen durchdringen

Dynamik, Aggregationsstatus:

Nanopartikel neigen aufgrund ihrer hohen Reaktivität zur Anbindung an andere Substanzen; es gibt:

- Einzelpartikel
- Aggregate (s. Glossar)
- Agglomerate (s. Glossar)

Einbindung in Stoffgemische (Matrizes):

Nanopartikel treten in Gemischen auf:

- in der Gasphase (Aerosole)
- in Flüssigkeiten (Kolloide, Dispersionen)
- in Festkörpern (Komposite, Kristallite, etc.)

Chemische Zusammensetzung:

Nanopartikel lassen sich aus einer Vielzahl chemischer Verbindungen erzeugen. Technisch bedeutend sind:

- Metalle / Metalloxide
- Metallsalze (Halogenide, Sulfide, etc.)
- Polymere, Kohlenstoff
- Biomoleküle

Oberflächenmodifikation:

Die Oberfläche von Nanopartikeln hat wesentliche Auswirkungen auf ihr chemisches und biologisches Verhalten. Sie sind u. a.:

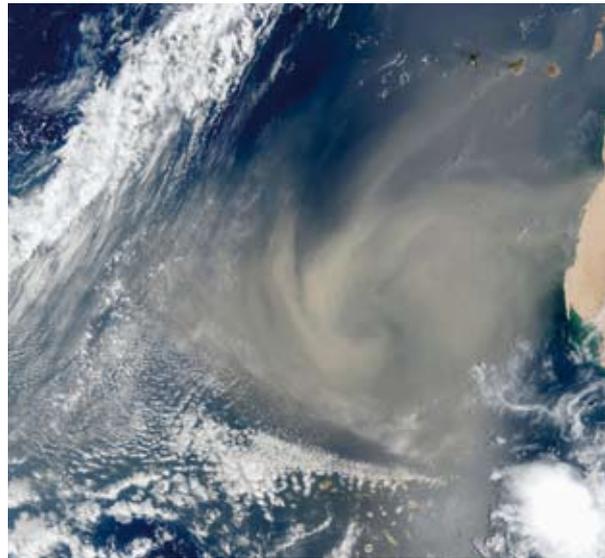
- unbehandelt (wie im Produktionsprozess erhalten)
- beschichtet (z. B. Konjugate, Polymerfilme)
- Kern-/Hülle-Verbundpartikel (Kugeln, Kapseln)

Wie kommen Nanopartikel in die Welt?

Nanopartikel sind keine Erfindung des Menschen, sie kommen auch in der Natur vor, wenngleich meist in anderen Formen als denen, die in der Industrie von Nutzen sein sollen. Der Sand der Mark Brandenburg etwa rührt von der Verwitterung des sogenannten baltischen Schildes her, eines Gebirges, dessen Gipfel einst in die Reiseflughöhen heutiger großer Verkehrsflugzeuge gereicht hätte. Seine Zerlegung muss Millionen Tonnen Nanometer feiner Partikel in die Umwelt entlassen haben, denn es gibt kein Naturgesetz, dass der Verwitterung vor dem Nanometermaßstab eine Grenze setzt.

Allerdings neigen Verwitterungsprodukte im Nanometermaßstab dazu, sich wieder zu größeren Teilchen zusammen zu finden, technische Nanopartikel werden davor in der Regel durch spezielle Überzüge bewahrt, damit die technischen Vorzüge der Nanoskala nicht verloren gehen. Gleichwohl, die Staubstürme der Sahara, die so viel Sand über das

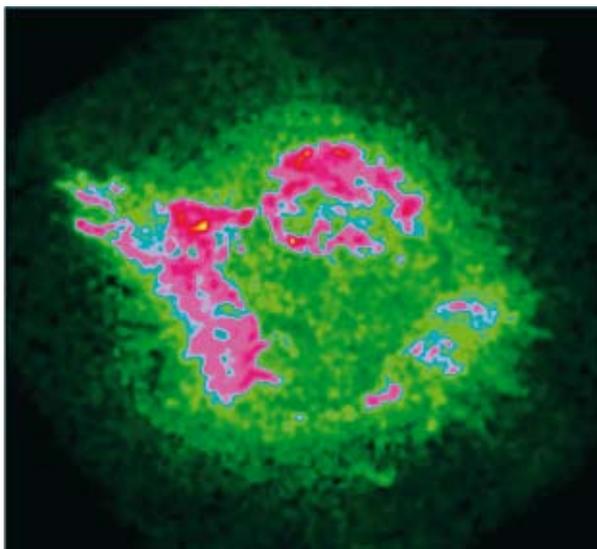
Meer wehen, dass die Wolken vom Weltraum aus zu sehen sind, geben ein Bild davon, was an nanoskaligem Quarz, Siliziumdioxid (SiO_2), in der Luft unterwegs sein mag, unsichtbar, natürlich.



Die Sahara entlässt jährlich gewaltige Mengen Mineralstaub, darunter nanoskalige Partikel. Solcher Staub besteht vornehmlich aus Mischoxiden der Elemente Silizium, Aluminium, Titan, Eisen, Kalium und Kalzium.

Der Saharastaub enthält auch eisenhaltige Verbindungen, die die Meeresregionen, über denen er absinkt, regelrecht düngen. Dann geben schnell wachsende Algen Dimethylsulfid ab, das in der Luft kleine Kriställchen bildet – zweifellos auch Nanopartikel. In großer Höhe kondensieren daran Wassertropfen aus, es bilden sich Wolken: Nanopartikel als Regenmacher.

Der Staub landet sogar auf deutschen Autodächern; der nanoskalige Anteil ist aber unsichtbar.



Elemente wie Silizium werden in Sternen synthetisiert, sie finden sich als Nanopartikel in der Sternatmosphäre, im interstellaren Raum und gehen ständig auf die Erde nieder.



Auch das Eisen im Meerwasser findet zu Nanopartikeln zusammen, in magnetotaktischen Bakterien. Die bilden daraus Ketten aus Nanometer feinen Magnetitkristallen. Aus guten Gründen, denn die Magnetketten wirken wie Kompassnadeln, die die Bakterien am geneigten Erdmagnetfeld in verschiedene Wasserschichten lenken können. So erreichen sie die Schichten mit besonders guten Lebensbe-

Vulkaneruptionen setzen große Mengen Nanopartikel frei.

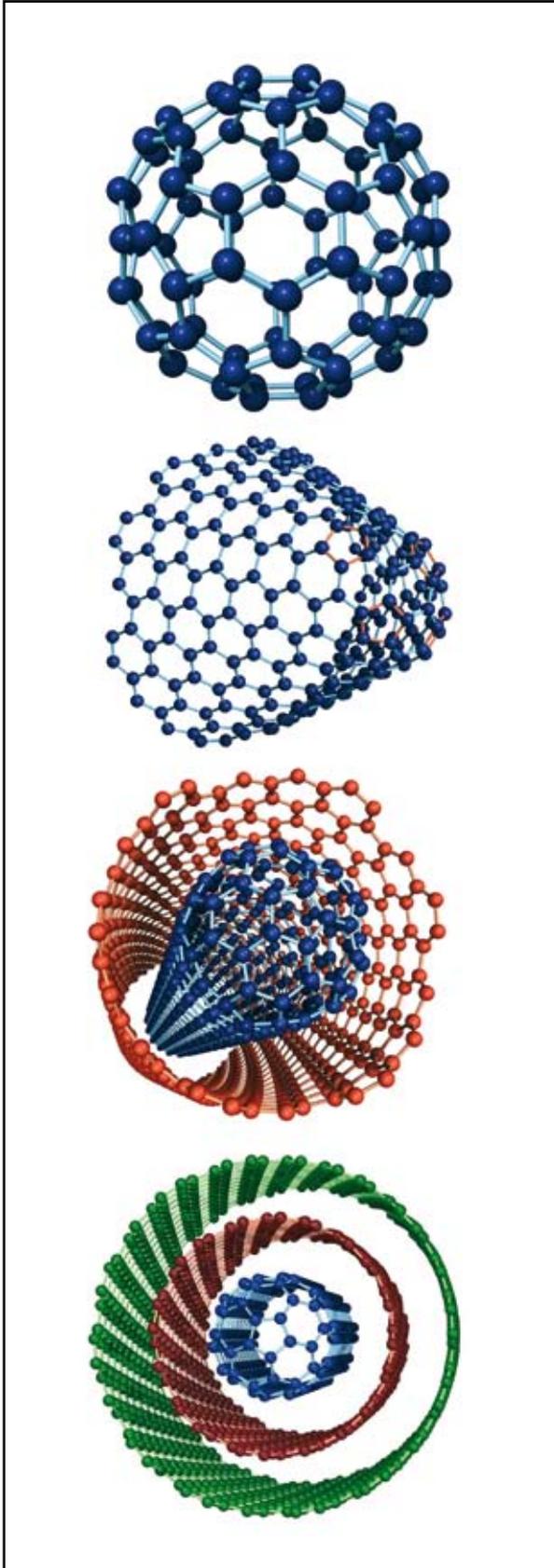


Sandlagerstätten sind die Reste von verwitterten Gebirgen. Der Verwitterungsprozess erzeugt auch Nanopartikel, bei exponiertem Sand vor allem durch Winderosion.

dingungen. Die Bakterien sinken in solchen Massen zum Meeresboden, dass sie als Kandidaten für die Bildung von Eisenerzlagerstätten gelten. Und wenn sie zu Boden gesunken sind, haben sie sich parallel zum jeweils herrschenden Erdmagnetfeld gelegt und damit dessen Richtung für die Nachwelt festgehalten. Damit sind Nanopartikel zum Zeugen für das sogenannte Sea Floor Spreading geworden, das Auseinanderdriften von Teilen der Erdkruste am Meeresboden. An Magnetitpartikeln ist also auch nie Mangel gewesen. Badende können sie selbst im Süßwasser verschlucken, denn magnetotaktische Bakterien sind allgegenwärtig. Ihre Nanopartikel aus Magnetit sind im übrigen so perfekt, dass sie für hochtechnologische Anwendungen in der Medizintechnik erforscht werden.



Magnetotaktisches Bakterium.



links: Netze aus Kohlenstoffatomen nehmen zahlreiche Formen an, darunter, von oben: C_{60} -Fulleren, Kegel, doppelwandiges Kohlenstoffnanoröhrchen (DWNT), dreiwandiges Kohlenstoffnanoröhrchen (MWNT).

Auch vermeintlich exotische Partikel werden von der Natur erzeugt. Schon ein Waldbrand genügt, um die ganze Palette der sogenannten Fullereene hervorzubringen: Buckyballs, Buckytubes, Graphene – alles, was in der jüngsten Kohlenstoffchemie Rang und Namen hat.

Industrielle Erzeugung von Nanopartikeln

Es gibt zwei prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten, zu Nanopartikeln zu kommen. Man kann ein großes Stück Materie immer weiter zerlegen, bis die Bruchstücke die Dimension von Nanometern annehmen. Ein Beispiel ist die in der Industrie weit verbreitete Methode, mineralische Komponenten mit Kugelmøhlen zu zerkleinern. Um in Nanodimensionen zu kommen, werden Pulver mit typischen Partikelgrößen von $50\ \mu\text{m}$ zusammen mit Kugeln aus gehärtetem Stahl oder Wolframcarbid in einen geschlossenen Behälter gegeben, der dann heftig bewegt wird. Mit dieser Methode erzielt man Partikelgrößen von drei bis $25\ \text{nm}$. Solche Verfahren gehören in die Rubrik „top-down“, von oben nach unten, d. h. von großen zu kleinen Strukturen. Dieses Prinzip der Miniaturisierung wird in der Informati-



Plasmareaktor am Nanotechnologiezentrum der Universität Duisburg-Essen. Das gelbliche Leuchten im oberen Bereich der Plasmafackel wird durch die heißen Partikel hervorgerufen. Ähnlich werden viele Nanopartikel industriell hergestellt.

onstechnik seit Jahrzehnten angewendet, um immer leistungsfähigere und handlichere Elektronikgeräte wie Notebooks, Handys oder MP3-Player zu erzeugen.

Die andere Methode besteht darin, nanoskalige Partikel aus den kleinsten verfügbaren Bausteinen, also Atomen oder Molekülen, aufzubauen. Solchen Methoden wird das Etikett „bottom-up“ zugewiesen, von unten nach oben. Das ist die bevorzugte Methode der Natur.

Ein Beispiel für die „top down“-Methode: Wenn Nanopartikel eines ganz bestimmten Materials hergestellt werden sollen, müssen geeignete Ausgangssubstanzen gefunden werden. Für die Produktion von Eisennanopartikeln etwa kann man eine Chlorverbindung des Eisens, FeCl_3 , in einer Kugelmühle unter Schutzgas fein mit Natrium vermahlen. Beide Substanzen reagieren dabei miteinander und es entsteht nanoskaliges Eisen und Natriumchlorid, Kochsalz, das sich einfach mit Wasser auswaschen lässt. Eisennanopartikel bleiben übrig.

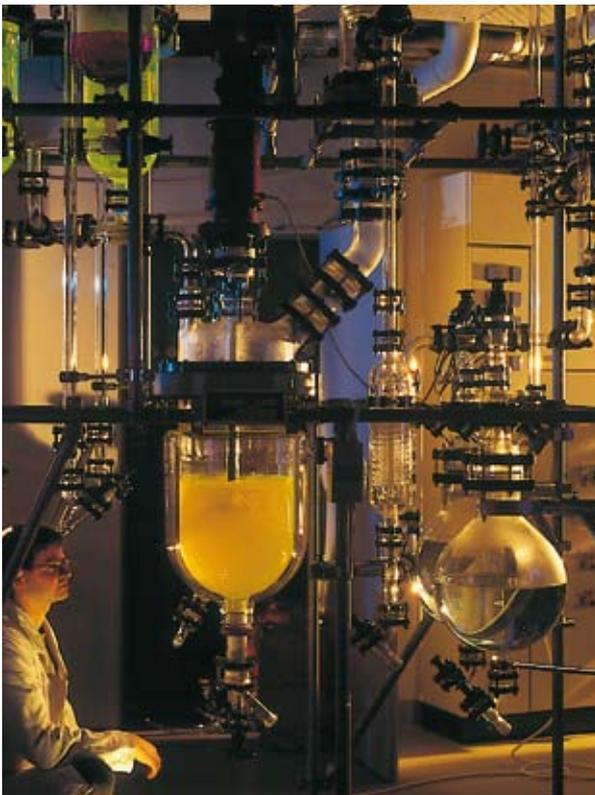
Eine besonders spektakuläre „top down“-Methode ist die Elektro-Explosion. Dabei wird ein dünner metallischer Draht von einem sehr kurzen, aber auch

sehr starken Stromimpuls durchflossen. Der Draht wird dabei so heiß, 20.000 bis 30.000 °C, dass er sich in seine atomaren Bestandteile zerlegt und nur mehr als glühende Plasma-Wolke existiert, die von dem starken, den Stromimpuls begleitenden Magnetfeld zusammengehalten wird. Das Ganze findet in einem geschlossenen, gasgefüllten Behälter statt. Die Metallwolke reagiert dann mit diesem Gas zu einer Verbindung; im Falle eines Edelgases bilden sich Nanopartikel aus reinem Metall. Diese Partikel sind so bindungsfreudig, dass sie sich schon bei niedrigen Temperaturen zu Legierungen fügen; so entsteht aus elektro-explodierten Kupfer- und Zinkpulvern schon bei 200 °C Messing.



Hausgemachte Nanopartikel in der Mayonnaise, ein kräftiger Mixer genügt. Die Mehrzahl der Fett-/Essigtröpfchen ist aber mikrometerskali-g, sonst wäre die Mayonnaise klar.

Fit für feinste Teilchen: Sol/Gel-Teilchenreaktor.



Eine sehr beliebte „bottom-up“-Methode, die sogenannte Sol-Gel-Technik, macht von Tricks Gebrauch, die durchaus an Küchen-Praktiken wie die Erzeugung von Mayonnaise denken lassen. Mayonnaise besteht aus einem Gemisch feinsten Essigtröpfchen in Öl, unter anderem erzeugt durch heftiges Rühren. In der Industrie werden ähnliche Stoffgemische verwendet, um Nanopartikel herzustellen. Wenn etwa diese Partikel durch die Reaktion zweier Komponenten entstehen, von denen sich eine nur in den Tröpfchen aufhalten kann und die andere über die Trägersubstanz herangeführt wird, reagieren beide Stoffe in den begrenzten Reaktionsvolumina der Tröpfchen miteinander und die Reaktion kommt bei nanoskaligen Partikeln zum Stillstand.

Unbeabsichtigte Erzeugung von Nanopartikeln

Die Methoden zur Erzeugung von Nanopartikeln sind zahlreich, und es kommen immer neue hinzu. Bei der Frage der Giftigkeit, Toxizität, von beabsichtigt wie unbeabsichtigt erzeugten Nanopartikeln besteht derzeit – noch – mehr Grund, sich um *unw*ilentlich erzeugte Nanopartikel zu sorgen. In einer Studie der Europäischen Union, „Industrial application of nanomaterials – chances and risks“, heißt es:

„Unbeabsichtigt freigesetzte Nanopartikel, die etwa durch Verbrennungsprozesse im Verkehr oder bei der Energieumwandlung, bei mechanischen Verschleißvorgängen oder konventionellen industriellen Prozessen entstehen, tragen gegenwärtig mehr zur anthropogenen Nanopartikelemission bei als die industrielle Nanopartikelproduktion.“

Auch im heimischen Kamin entstehen beim Verbrennen von Holz Fullerene wie Buckyballs oder Buckytubes.



Die ungefilterten Abgase von Dieselaautos enthalten große Mengen potenziell schädlicher Nanopartikel aus der unvollständigen Kraftstoffverbrennung.

Hausgemachte Nanopartikel

Organische Nanopartikel lassen sich ohne Weiteres mit Küchenmitteln herstellen, ein kräftiger Mixer, Essig und Öl, genügen. Wer es auf die Stars der heutigen Nanopartikel-Szene abgesehen hat, muss nur Blei gießen: Im Ruß, der am Boden des Löffels kondensiert, finden sich Buckyballs, Buckytubes, Graphene – und Nanodiamanten.

Nanos beim Bleigießen: Der Ruß einer Kerzenflamme enthält Kohlenstoffpartikel in zahllosen Formen, darunter Fullerene und Diamanten.

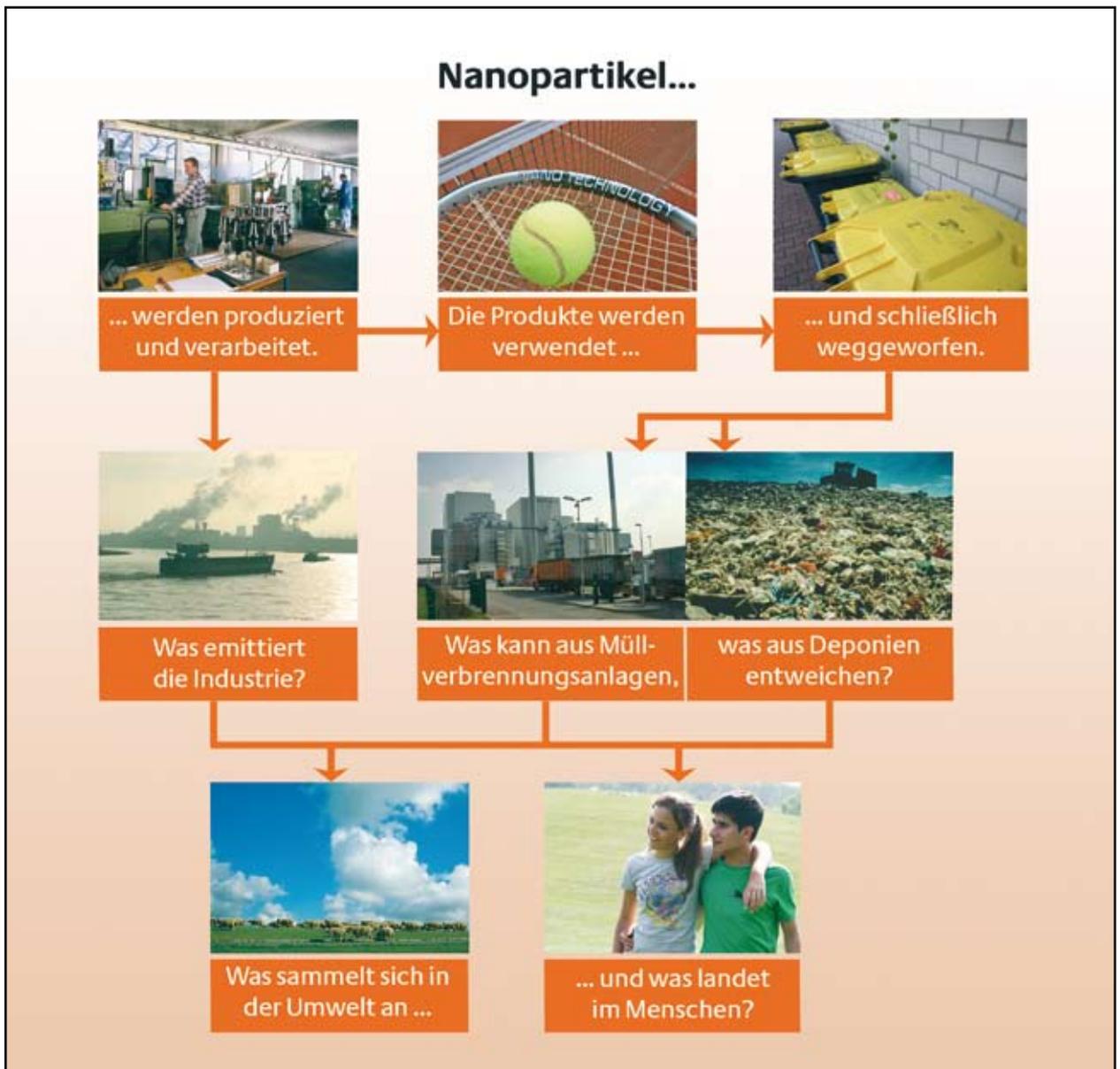


Stoffkreislauf

Menschen können an fast allen Stationen des industriellen Stoffkreislaufes mit Nanopartikeln in Berührung kommen. Die Sicherheitsforschung ist darauf angelegt, alle Risiken auszuschalten, die die absehbar vielen positiven Folgen der Nanopartikeltechnologie begleiten können.

Hinzu kommt, dass sich mit Nanopartikeltechnologie viele ausgewiesenen schädliche Stoffe durch nicht-toxische, weit verbreitete Substanzen werden ersetzen lassen, die überdies mit weniger Energieaufwand herstellbar sind. Nur ein Beispiel: der Ersatz von toxikologisch bedenklichem Kobaltblau durch eine Farbe aus Lehmteilchen und Indigo, nach einem alten Rezept der Mayas (siehe S. 14).

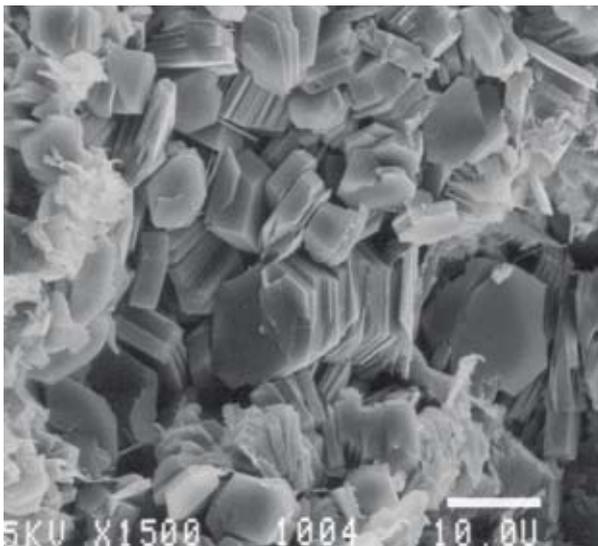
Nanopartikel im Stoffkreislauf.



Nanopartikeltechnik der Altvorderen

Menschen haben schon seit einer Ewigkeit die Eigenheiten von Nanopartikeln technisch genutzt, nur: Sie wussten es nicht. Das älteste Beispiel dürften Gegenstände aus Ton sein. Ton besteht zu einem guten Teil aus dem Mineral Kaolinit, das aus sehr dünnen, nur wenige zehn Nanometer dicken Plättchen aufgebaut ist. Die sind weiß, weich und gut verformbar, vor allem aber gleiten sie leicht aufeinander, wenn das Mineral Wasser aufgenommen hat. Deshalb ist Ton so schmierig und gut verformbar.

Tonfiguren hätten die Mayas, beginnend im achten Jahrhundert, mit einer geradezu hochtechnologischen Farbe bemalen können, die wieder



Oben: Kaolinit-Partikel im Elektronenmikroskop. Das Mineral ist ein wichtiger Bestandteil des Tons.

links: Nanotechnik aus der Steinzeit, 3.000 v. Chr.: Mehrgarh-Figurine aus Ton, ausgestellt im Musée Guimet.



Das Blau der alten mexikanischen Figur ist ein hochstabiles Nanokomposit aus einem porösen Tonmineral und organischer Farbe. Als Mayacrom® wird die Nanofarbe jetzt neu produziert und ersetzt giftige Schwermetallverbindungen.

ein Tonmineral enthielt, diesmal Palygorskit. Das durchscheinende Mineral bildet an seinen Fundstätten mitunter filzige Matten, weshalb es den Beinamen „Bergleder“ hat. Das Mineral ist von Nanometer dünnen Kanälen durchzogen, die mit Wasser gefüllt sind. Durch Erwärmung des mutmaßlich pulverisierten Materials und Zugabe blauer organischer Indigo-Farbe gelang es den Mayas, ein anorganisch-organisches Verbundmaterial, eine Farbe hoher Stabilität zu synthetisieren, die dem Zahn der Zeit etwas entgegenzusetzen hatte. In den USA produziert *MCI Mayan Pigments, Inc.* die alte Farbe neu.

Damaszener-Klingen waren im Mittelalter wegen ihrer damastartigen Musterung, ihrer Schärfe, vor allem aber ihrer Bruchzähigkeit wegen hoch berühmt. Die moderne Metallurgie war lange Zeit nicht in der Lage, diese Eigenschaften wissenschaftlich zu erklären; Ende 2006 aber entdeckten Wissenschaftler des Instituts für Strukturphysik an der

Damaszener Klingen verdanken ihre Bruchfestigkeit eingelagerten Nanoröhrchen aus Kohlenstoff.



Technischen Universität Dresden die mutmaßliche Lösung des Rätsels: Damaszener-Klingen enthalten Kohlenstoff-Nanoröhren, sogenannte Buckytubes, die teilweise mit Zementit gefüllt sind, einer Verbindung von Eisen und Kohlenstoff. Es ist offenbar diese Nanodrahtverstärkung, die den Damaszenerklingen ihre legendären Eigenschaften verleiht, zumindest ihre Bruchzähigkeit erklärt. Die frühen Schmiede können vom nanoskopischen Glücksfaktor nichts gewusst haben, hatten aber wohl eine glückliche Hand, die sie – vermuten die Forscher heute – mit Zusätzen von Holz und Blättern und speziellem Eisenerz aus Indien experimentieren ließ.

Auch die Glasfenstermacher des Mittelalters verstanden sich auf Färbung mit Nanopartikeln. Das leuchtende Rot der Kirchenfenster wird von kolloidalem, also feinst, nanoskalig, verteiltem Gold hervorgerufen. Diese Farbe hat über Jahrhunderte Bestand.

Kathedrale von Amiens. Das Rot in den mittelalterlichen Fenstern ist kolloidalem, nanoskaligem Gold gedankt.



Nanopartikel in der Technosphäre

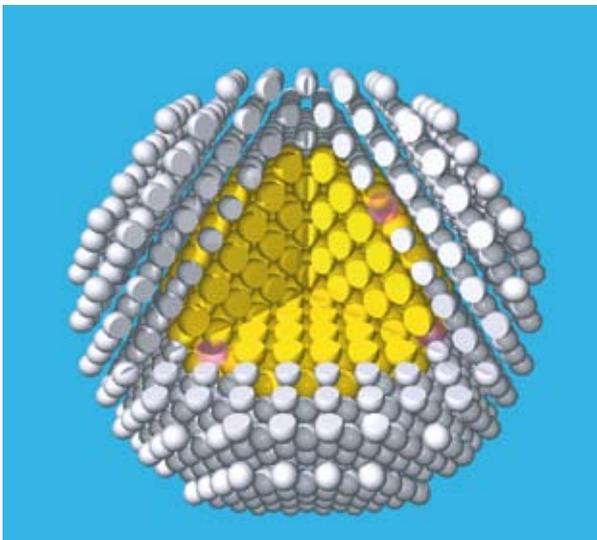
Wenn alle gegenwärtig vorhandenen 800 Millionen Fahrzeuge auf eine umweltfreundliche Brennstoffzellentechnologie, die Platin als Katalysator benötigt, umgestellt würden, wären die wirtschaftlich nutzbaren Platinvorräte der Erde innerhalb von 15 Jahren erschöpft, schätzen Wissenschaftler.

Indium, das u. a. in der Computerindustrie zur Herstellung von Flachbildschirmen unentbehrlich ist, könnte nach Angaben des U.S. Geological Survey als erstes Hightech-Element zur Neige gehen, womöglich schon in zehn Jahren.

Wenn auch nicht für alle, für viele der knapp werdenden Hightech-Elemente wird die Nanopartikeltechnologie vollwertigen Ersatz schaffen können, großenteils sogar aus unerschöpflichen Elementen wie Kohlenstoff und Silizium. Zuvor kann sie die raffinierten Gesetzmäßigkeiten des Nanokosmos für Verbesserungen erforschen und nutzen, Effizienzen erhöhen und so massiv Material sparen, auch Platin.

Platin ist meist in der Form submikroskopisch kleiner Kristalle katalytisch – eine chemische Reak-

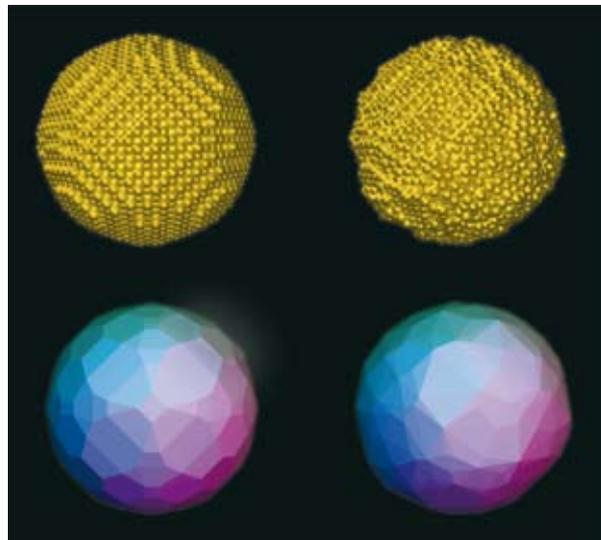
Computersimulation eines Nanopartikels mit Goldkern und Silberschale. Auch in den Atomstapeln sind Vorzugsebenen zu erkennen.

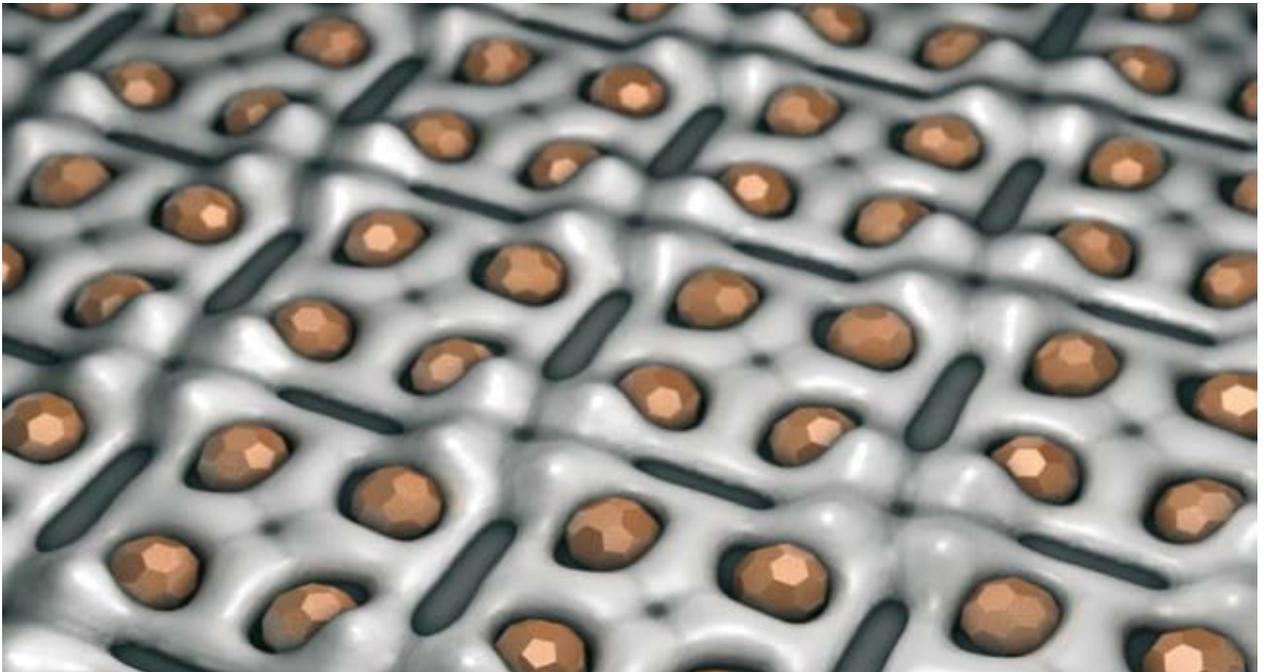


In einem Kristall sind die Atome gestapelt wie die Früchte im Basar. Wenn die Tomaten ganz bleiben sollen, lassen sich nur bestimmte Ebenen durch den Stapel legen, die je nach Neigung mehr oder weniger stufig sind.

tion beschleunigend, ohne dabei aufgebraucht zu werden – aktiv. In Kristallen sind die elementaren Bausteine – Atome oder Moleküle – regelmäßig

Simulation eines Goldclusters, darunter Modelle der Kristallflächen. Im Grundzustand links sind vornehmlich atomar glatte Flächen ausgebildet; der angeregte Zustand rechts hat atomar rauhe Flächen, die in einem Katalysator in der Regel aktiver wären.





Perfekte Palladium-Nanokristalle wachsen in den Poren einer Bakterienhaut.

gestapelt, wie die Tomaten beim Gemüsehändler. Durch solche Kugelpackungen kann man keine beliebigen Ebenen legen, weil sich Atome, anders als Tomaten, nicht zerschneiden lassen. Unter den vielen dennoch möglichen Begrenzungsebenen des Kristalls werden von der Natur atomar glatte bevorzugt, bei denen möglichst viele Oberflächenatome feste Bindungspartner haben. Dann ist in der Regel aber auch die katalytische Aktivität nicht so hoch, für die vornehmlich freie Bindungen („dangling bonds“) verantwortlich sind, wie sie an atomar rauhen Grenzflächen auftreten. Diese „exotischen“ Kristallflächen lassen sich auch durch Zulegieren verschiedener Elemente stabilisieren.

Nanoskalige Partikel bieten weiter die Möglichkeit, für die Katalyse auf weniger aktive Substanzen auszuweichen, denn im Nanometermaßstab werden auch sonst träge Metalle wie Gold aktiv, Halbleiter werden zu Metallen, Metalle zu Halbleitern.

Eine besonders raffinierte Nanopartikelvariante hat jetzt Peter Strasser an der University of Houston, Texas, USA, synthetisiert. Die Partikel haben einen Kern aus Kupfer und Kobalt, eine Hülle aus Platin und entfalten in einer Brennstoffzelle bei der dort notwendigen Sauerstoffzerlegung die vier- bis fünffache katalytische Aktivität reinen Platins.

Palladium-Nanos auf Bakterienhäuten für die Katalyse

Mitunter treten den Nanopartikeltechnologien ganz unvermutete Helfer zur Seite, wie *Bacillus sphaericus* JG-A12. Das Bakterium wurde von einem Biologenteam des Forschungszentrums Rossendorf (FZR) 1997 auf der Uranerzabfallhalde Johannegeorgenstadt in Sachsen entdeckt, wo es zum Schutz gegen das Schwermetall Uran eine sehr robuste Proteinhülle entwickelt hatte. Die Hülle ist über weite Strecken mit einem sehr regelmäßigen Muster nanometerfeiner Poren überzogen. Als FZR-Wissenschaftler die Bakterienhaut mit einer Salzlösung des Edelmetalls Palladium in Kontakt brachten, konnten sie infrarotspektroskopisch eine enge Verbindung der Salzkomplexe mit ihrer Unterlage beobachten. Bei der chemischen Überführung des Palladiumsalzes in das reine Metall schließlich wuchsen in den Poren winzige Nanocluster, kleine regelmäßige Atomkollektive mit gerade 50 bis 80 Mitgliedern. Diese Nanocluster zeigen eine wesentlich höhere katalytische Aktivität als konventionell verteiltes Palladium, etwa bei der Entgiftung von Autoabgasen.

Die FZR-Wissenschaftler wollen ihre bakterielle Clustererzeugungsmethode auf weitere Edelmetalle wie etwa Gold ausdehnen. Da sie Art und den Ort der Bindung zwischen dem Edelmetall und der Haut von *Bacillus sphaericus* JG-A12 sehr genau kennen, sollten sie die Hülle des Bakteriums hierfür gentechnisch trimmen können. Dann wären mit dem Uranhaldenbewohner selbst Materialien mit neuen magnetischen und optischen Eigenschaften herstellbar.

Überraschungen also sind im Nanokosmos jederzeit möglich. Die Nanopartikeltechnologie wird eine ganz wesentliche Rolle bei der Behebung künftiger Stoffknappheiten spielen.



Uranerz-Abraumhalde, Wohnort von „*Bacillus sphaericus* JG-A12“, das über eine zähe Haut mit regelmäßig angeordneten Poren verfügt.

Davon abgesehen war die Geschichte der Rohstoffe schon immer sehr wechselvoll. Das 17. Jahrhundert etwa war von Sorgen um mangelndes Platin gänzlich unberührt. In der kolumbianischen Region Chocó galt das bei der Goldgewinnung mitgeförderte Metall sogar als unerwünschte Beimengung, die teuer per Hand aussortiert werden musste. Schließlich fand sich doch eine – wenn auch illegale – Verwendung: Ein vergoldeter Platinbarren ließ sich als Goldbarren verkaufen, weil Platin eine ähnliche Dichte wie Gold hat. Damit war die Fälschung schwer zu entdecken. Um dem Unfug ein Ende zu machen, ließ die Regierung einfach große Mengen Platin einsammeln und im Bogotá-Fluss versenken.

Nanomaterialien für neue Lithiumakkus

Die Fahrzeuge der Zukunft müssten nicht unbedingt mit chemischen Treibstoffen betankt werden, wenn es Akkumulatoren gäbe, die große Mengen elektrischer Energie in kurzer Zeit aufnehmen könnten.



Mit nanoskaligen Sinterhilfsmitteln versehen, kann die Folie bei vergleichsweise niedriger Temperatur gebrannt (gesintert) und so kostengünstig „roll to roll“ produziert werden.

Die gibt es noch nicht, ihre Realisierung aber scheint denkbar, wenn man die bisherige Entwicklung der Lithiumionenakkumulatoren optimistisch fortschreibt. Dazu berechtigt die Verfeinerung bestimmter Details, wie des „Separators“. Lithiumionenakkumulatoren brauchen eine Trennschicht, die zwei unterschiedlich mit Lithiumionen beladene Elektroden einerseits elektrisch trennt, separiert, andererseits im Bedarfsfall Lithiumionen passieren lässt. Ein besonders attraktiver Separator kommt aus Deutschland, von der Evonik Industries AG, vormals Degussa. Die Firma hat ein Polymervlies mit hauchdünnen Schichten aus Aluminiumoxidkeramik entwickelt, was gelingt, weil nanoskalige Sinterhilfsmittel das Verbacken, Sintern, der Aluminiumoxidpartikel schon bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen ermöglichen. Das Verbundmaterial ist – anders als der Begriff „Keramik“ vermuten lässt – so flexibel, dass es sich in einem Rollenprozess, wie Papier, herstellen und wickeln lässt. Das SEPARION® genannte Material verspricht, Lithiumionenakkumulatoren noch sicherer zu machen und die Zyklen-

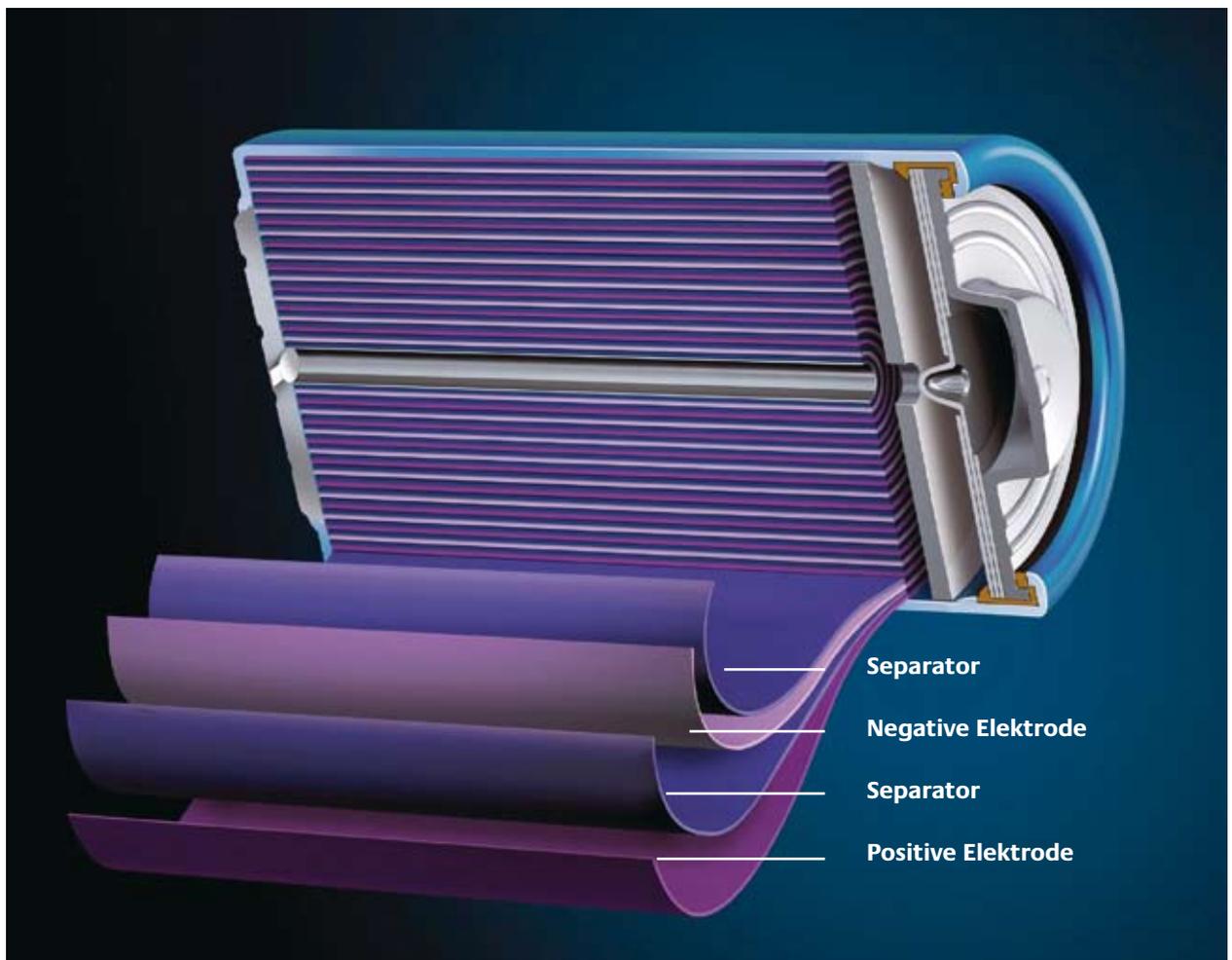
festigkeit – die Zahl der ohne wesentlichen Qualitätsabfall möglichen Lade- und Entladezyklen – drastisch zu erhöhen. Die Evonik Industries AG nennt für SEPARION®-bestückte Akkus zehntausend Zyklen, das ist zwanzigmal mehr, als einem gegenwärtigen Notebookakku zugetraut werden kann.

Die Energiespeicherdichte auch neuer Akkus aber lässt immer noch zu wünschen übrig; allerdings kann man durch Nanopartikel, die sich in einer Plasmafackel gewinnen lassen, auf eine Verbesserung um den Faktor drei und mehr hoffen – wenn verschiedene Komplikationen behoben werden. Im Erfolgsfall läge die Verwendung für Elektrofahrzeuge tatsächlich nahe, zumal mittlerweile preiswerte Leistungselektronik zur Verfügung steht, Elektromotoren effizient anzusteuern. Auch gibt es neue Magnetwerkstoffe für leichte, leistungsfähige Mo-

Lithiumionenakkus der neuesten Generation haben eine keramische Separatorfolie, die sie thermisch und mechanisch sehr viel belastbarer macht.

toren – möglich auch mit Nanopartikeltechnologie. Weiter stünden den Lithiumionenakkumulatoren sehr schnell be- und entladbare Superkondensatoren (Supercaps) mit nanoskaligen Dielektrika zur Seite, mit denen etwa der beim Bremsen eines Elektrofahrzeugs erzeugte Strom schnell aufgefangen und dann wohldosiert an den Li-Akku weiter gegeben würde. Umgekehrt würden Supercaps Stromspitzen zum Beschleunigen beisteuern. Die Entwicklung neuer Lithiumionenakkumulatoren und Superkondensatoren wird in den Verbundprojekten LiBaMobil und NanoCap vom BMBF mit erheblichen Mitteln gefördert.

Die hohe Zyklenfestigkeit der neuen Lithiumionenakkumulatoren würde sie auch für ortsunabhängige, effiziente Elektrizitätsspeicher für Regenergie geeignet machen und damit den Ausbau erneuerbarer Energien wie Wind und Solar mit ihren naturgegebenen Schwankungen vereinfachen.



Einsatz von Nanopartikeln: Silber als Bakterienkiller

Von den im Zusammenhang mit Nanopartikeltechnologie zitierten Metallen wird Silber derzeit am zweithäufigsten erwähnt, lobend wie warnend, von seriösen wie unseriösen Quellen. Das Metall ist ein alter Begleiter der Technikgeschichte und seit mindestens 8000 Jahren in Gebrauch. Schon Alexander der Große soll die keimtötende Wirkung des Metalls geschätzt und deshalb Wasserbehälter aus Silber bevorzugt haben. In letzter Zeit ist die früher häufig genutzte antibakterielle Eigenschaft des Silbers wiederentdeckt worden, weil die wachsende Resistenz vieler Keime Alternativen zu den gängigen Antibiotika wünschenswert macht.

Wie bei anderen Metallen, verändert auch beim Silber die Überführung in den Nanopartikelzustand einige Eigenschaften. So haben Silbernanopartikel im Vergleich zum greifbaren Metall pro Masse gerechnet eine stärkere Wirkung auf Bakterien und Viren, schon wegen des höheren Anteils an Oberflächenatomen.

Während Teile der Alternativmedizin Silberionen nahezu magische Wirkungen auf Leib und Seele zuschreiben, sehen Umweltschutzorganisationen in Silbernanopartikeln eine große Gefahr und fordern deshalb, den Vertrieb von Waschmaschinen mit eingebauten Silbernanopartikelherzeugern einzustellen. Der Hersteller gibt zu bedenken, dass in seiner PR „zwar von Silber-Nanopartikeln die Rede ist, diese weisen jedoch keine veränderten Eigenschaften auf, sondern sind chemisch betrachtet nach wie vor Silber-Ionen. Denen wird allerdings die stärkste antibakterielle Wirkung zugeschrieben.“

Der Vielklang der streitenden Stimmen signalisiert vor allem eines: Forschungs- und Aufklärungsbedarf. Ohne die Ergebnisse entsprechender Forschung vorwegzunehmen, lässt sich doch sagen, dass die Industrieländer durchaus langjährige Erfahrungen mit in der Umgebung feinstverteiltem Silber haben, unfreiwillig und flächendeckend. Allein die Stadt Wien beklagte im Jahr 2000 eine Silberlast von 1 Tonne pro Jahr in ihren Abwässern, die in den Klärschlamm gelangten, der verbrannt und dessen Asche als Dünger über die Felder verteilt wurde. Da die Überschreitung des Grenzwertes von 50 mg Silber pro Kilogramm Klärschlamm asche drohte, wurde die Aussetzung des Verfahrens empfohlen. Anderenorts, auch in Deutschland, ist die Ausbringung unverbrannter Klärschlammkomponenten als



Allein durch die Fixierung von Schwarzweißfotografien sind im Lauf der Jahrzehnte hunderte Tonnen nanoskaligen Silbers in die Umwelt gelangt, ohne erkennbare Folgen.

Dünger möglich. Diese Massen müssen zwangsläufig feinstverteiltes Silber enthalten. Die Silberlasten der Wiener Abwässer wurden, wie die Abwässer anderer Kommunen auch, durch die weggekippten Abfälle photochemischer Prozesse (Fixierbäder) verursacht. Die beliefen sich weltweit auf 500 Tonnen Silber pro Jahr. Katastrophale Folgen wurden bislang nicht publik. Allerdings dokumentiert die Zahl eine heftige Verschwendung. Die statische Reichweite von Silber, errechnet aus – jeweils gleichbleibend angenommen – Bedarf, Produktion und geologischer Verfügbarkeit, schätzte der vielzitierte Materialwissenschaftler Armin Reller von der Universität Augsburg 2005 auf ganze zwölf Jahre.

Wären alle geschätzten 400.000 Waschmaschinen Wiens Silbermaschinen und würden die vom Hersteller angegebenen 0,05 Gramm Silber pro Jahr abgeben, käme man auf 20 Kilogramm pro Jahr bzw.

2% dessen, was leichtsinnige Photoamateure jährlich an Silber in den Abfluss gekippt haben – vor der Digitalisierung der Fotografie.

Derzeit forschen eine ganze Reihe von kleinen und mittleren Unternehmen an Möglichkeiten, die antibakteriellen Wirkungen feinverteilten Silbers für sinnvolle Produkte zu nutzen, darunter Bio-Gate in Nürnberg, die in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Fraunhofer-Instituts IFAM in Bremen die Oberflächen medizinischer Instrumente mit antibakteriellem Silber beschichten. Das kann sehr nützlich sein, denn über kontaminierte Katheter und Skalpell können Keime in den Körper gelangen, die



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Silber-Nanopartikeln, mittlere Primärpartikelgröße 50-200 nm

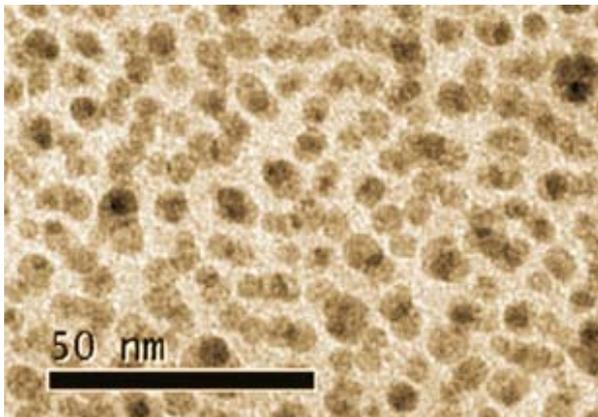


Bild oben: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen von Silbernanopartikeln, eingebettet in einen Siliziumoxid Plasmapolymersfilm.

im schlimmsten Fall zu einer Sepsis, einer hochrisikanten Blutvergiftung, führen. Durch Entzündungen aufgrund infizierter Katheter sterben mehr Menschen als im Straßenverkehr.

Die potenziellen Risiken der Nanopartikeltechnologie müssen immer mit denjenigen Risiken in eine Beziehung gesetzt werden, die sie ausschalten.

Bild unten: Prototyp eines mit Silber beschichteten Katheters. Das Silber wird auch noch mit Keimen fertig, die gegen Antibiotika resistent geworden sind.



Erfahrungen mit der industriellen Herstellung von Nanomaterialien

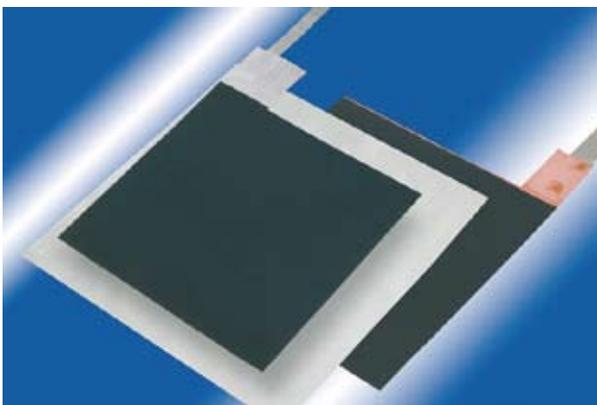
Die Industrie hat Jahrzehnte Erfahrung im Umgang mit Nanomaterialien, die früher nur nicht als solche hervorgehoben wurden. Die Produktionsmengen etwa für den nanostrukturierten Reifenfüllstoff Carbon Black belaufen sich auf Millionen Tonnen jährlich. Die große Expertise macht den Standpunkt der Industrie natürlich besonders interessant.

„Die gesetzliche Regulation sagt, vereinfacht formuliert, dass wir verpflichtet sind, Produkte sicher in Umlauf zu bringen. Und damit ist schon alles gesagt. Dabei ist es egal, ob die Produkte nano, mikro oder makro sind.“

Dr. Markus Pridöhl, Koordinator Nanotechnologie bei der Evonik Industries AG

Dabei lässt sich ein starkes Eigeninteresse der Industrie erkennen: Die wirtschaftliche Bedeutung der Entwicklung ist so groß, dass Rückschläge etwa durch mangelndes Sicherheitsbewusstsein sehr teuer zu stehen kämen – warnendes Beispiel ist hier die Gentechnik.

Die Separatorfolie trennt im Li-Akku die auf eine Kupfer- bzw. Aluminiumfolie aufgetragenen Materialien von Anode und Kathode.



Interview mit Dr. Markus Pridöhl, Koordinator Nanotechnologie bei der Evonik Industries AG

Wie groß ist ein Nanopartikel?

Die aktuell vorgeschlagene Nanopartikel-Definition der Internationalen Organisation für Normung, ISO, sagt: etwa zwischen 1 und 100 nm.

Man liest aber auch „zwischen 0,1 und 100 nm“. Da läge die untere Grenze ja im Bereich der Atome?

Diese Definitionen müssen harmonisiert werden; wenn jedes Institut seine eigene Definition macht, dann werden wir noch lange aneinander vorbeireden. Daher setze ich mich sehr dafür ein, dass die international vereinheitlichten Begriffe konsequent genutzt werden, um Missverständnisse zu vermeiden und in der Sache voranzukommen.

Was bedeutet das für Ihre Produkte?

Nach dieser Definition stellt Evonik Industries AG, vormals Degussa, keine Nanopartikel her, sondern nanostrukturierte Materialien, und zwar in Form von Aggregaten. Diese Aggregate sind aus Bausteinen aufgebaut, die Nanogröße haben und deshalb dieselbe spezifische Oberfläche wie Nanopartikel aufweisen, sie sind aber deutlich größer als die einzelnen Bausteine.

Gibt es noch weitere Gründe für Normen und Standards?

ISO-Normen sind außerdem für die Aufbereitung von Nanomaterialien und Nanopartikeln für toxikologische Tests wichtig. Sehr viele Literaturstellen können Sie heute praktisch nicht verwerten, weil die Materialien beispielsweise für einen Inhalations- oder einen Zellkulturtest nicht nachvollziehbar präpariert wurden. Wenn Sie nicht wissen, wie groß diese Partikel sind oder wie sie verteilt sind, können Sie im Nachhinein keine partikelgrößenbezogenen Effekte aus diesen Studien ableiten. Deshalb ist es sehr wichtig, in die wissenschaftliche Arbeit zum Thema Toxikologie mit Nanopartikeln bzw. Nanomaterialien deutlich höhere Qualitätsstandards einzubeziehen, und da helfen dann auch Normen im Bereich der Probenvorbereitung.

„Nanopartikel“, „nanostrukturierte Materialien“, ist das wirklich mehr als eine feinsinnige Unterscheidung? Durchaus. Wir stellen zum Beispiel unsere Oxide in Flammenreaktoren her. In diesen Reaktoren treffen sich die zuerst gebildeten Nanopartikel bei so hohen Temperaturen in der Gasphase, dass sie verschmel-

zen und so Aggregate aufbauen, die richtig miteinander verwachsen sind. Diese Aggregate besitzen eine Oberflächenchemie, die dazu führt, dass sie sich wiederum sehr stark anziehen und in der Folge weiter agglomerieren, also noch größer werden.

Wenn Sie Ihre Pulver also am Ende in einen Sack packen und auf die Bahn geben, dann sind das Agglomerate, also größere Partikel?

Exakt.

Welche Erfahrungen hat Evonik im sicheren Umgang mit ihren nanostrukturierten Materialien?

Die Verstärkerfüllstoffe Siliziumdioxid und Carbon Black produzieren wir seit 60 Jahren, nanostrukturiertes Titandioxid seit mehr als 35 Jahren. Von diesen Materialien stellen wir heute weit mehr als eine Million Tonnen her. Wir haben also wirklich außerordentlich große und langjährige Erfahrung mit unseren Produkten, auch was deren sichere Handhabung betrifft. So haben wir hierfür bereits vor Jahren eine eigene Abteilung eingerichtet, in der Experten an Techniken zur staubarmen Handhabung unserer Produkte arbeiten. Mit diesem Wissen unterstützen wir zum einen unsere Kunden beim richtigen und sicheren Handling. Zum anderen trägt es aber auch zur Staubminderung an Arbeitsplätzen bei uns im Unternehmen bei. Bei der Herstellung der nanostrukturierten Produkte arbeiten wir weitgehend in geschlossenen Anlagen, oft zusätzlich auch im Unterdruck, was die Sicherheit selbst bei Leckagen gewährleistet. Außerdem werden die Mitarbeiter seit mehr als 33 Jahren arbeitsmedizinisch untersucht. Dazu gehören u. a. Lungenfunktionstests, Ruhe-EKG, Blutdruckmessungen und ein übliches Anamnesegespräch, in dem der Mitarbeiter zu gesundheitlichen Beschwerden befragt wird. Die Untersuchungen ergaben keinerlei Hinweise auf Auffälligkeiten im Vergleich zur „normalen“ Bevölkerung.

Was ist an dem von Evonik produzierten Titandioxid so besonders?

Der Clou an unserem nanostrukturierten Titandioxid ist, dass es für sichtbares Licht transparent ist, die UV-Strahlung aber absorbiert bzw. reflektiert. Man nutzt diese Eigenschaften in Kosmetikprodukten, vor allem in Sonnenschutzmitteln. Der Vorteil ist, dass man die Sonnencreme auf der Haut nicht sieht, die Haut aber besonders wirksam vor UV-Strahlen geschützt wird.

Der Hautkontakt scheint ja unbedenklich zu sein!

In der Tat belegt eine Vielzahl von unabhängigen Untersuchungen die sichere Verwendung von Titandioxid in Kosmetikprodukten.

Wie gehen Sie mit offenen Fragen zur Sicherheit um?
Wir beteiligen uns an den weltweit laufenden

Aktivitäten für einen verantwortlichen Umgang mit Nanotechnologie. Dazu zählen national das BMBF-Projekt NanoCare zur Sicherheitsforschung und entsprechende VCI-, DECHEMA- und DIN-Arbeitskreise. International sind sicher ECETOC, OECD und ISO zu nennen. Zusätzlich führen wir eigene Forschungsprojekte durch, die diese Aktivitäten ergänzen bzw. den spezifischen Zusammenhang zu unseren Produkten herstellen.

Was heißt das konkret?

Zum Beispiel sind wir für unsere nanostrukturierten Produkte der Frage nachgegangen, ob sie sich in der Lunge zu entsprechend kleinen Nanopartikeln zersetzen können. Sowohl mit Experimenten als auch mit theoretischen Kalkulationen haben wir am Beispiel Titandioxid geprüft, welche Energie nötig ist, um die Agglomerate zu zerlegen. Das Ergebnis: Wir konnten nachweisen, dass die Agglomerate in Lungenflüssigkeit stabil sind. Die Lipide in der Flüssigkeit, die die Agglomerate umschließen und theoretisch zu kleineren Nanopartikeln dispergieren könnten, bringen den Energiebetrag einfach nicht auf, der notwendig wäre, um die Bindungsenergie zwischen den Agglomeraten und erst recht nicht die zwischen den Aggregaten aufzubrechen. Und das haben wir dann auch in entsprechenden In-vitro-Versuchen verifizieren können. Dies bestätigen aber auch aktuelle Versuche im Rahmen von NanoCare: Die Agglomerate aus Titandioxid finden sich genauso in der Lunge der Tiere wieder, wie sie vorher bei sorgfältiger Messung der Partikelgröße in der Gasphase eingeatmet wurden. Es gibt also einige Indizien dafür, dass diese Agglomerate in der Lunge nicht zerfallen.

Für die makroskopischen „Muttersubstanzen“ der Nanopartikel gibt es Regularien wie Arbeitsschutzverordnungen, toxikologische Einstufungen, etc. Lassen sich diese Regularien auf die entsprechenden Nanopartikel übertragen, denen ja doch neue Eigenschaften zugeschrieben werden?

Die gesetzliche Regulation sagt, vereinfacht formuliert, dass wir verpflichtet sind, Produkte sicher in Umlauf zu bringen. Und damit ist schon alles gesagt. Dabei ist es egal, ob die Produkte nano, mikro oder makro sind. Das heißt, wir sind verpflichtet, Produkte hinsichtlich ihrer Sicherheit zu bewerten, und das tun wir auch. Es gibt also keinen zusätzlichen Regulationsbedarf. Es besteht allerdings Bedarf bei der Entwicklung zusätzlicher, verfeinerter Prüfmethoden. Und das ist der Grund, warum wir uns auch sehr aktiv auf verschiedenen Ebenen, national wie international, daran beteiligen, die entsprechenden verfeinerten Methoden zu erarbeiten.

Quantenpunkte

Selbst modernste Konzepte wie der Nano-Quantenpunkt, Quantum Dot, fanden – unwissentlich – schon in der Antike Anwendung. Zweitausend Jahre alte griechische Rezepte zur Abdunkelung unerwünschter heller oder grauer Haare sehen eine Paste von Bleioxid und Calciumhydroxid (Löschkalk) vor, die bei wiederholter Anwendung auch heute noch Haare dunkel macht. Forscher des *Centre de recherche et de restauration des musées de France* konnten jetzt mit Hilfe eines Elektronenmikroskops zeigen, warum: Das Haar-Protein Keratin bildet offenbar Kristallisationsmulden aus (siehe auch Nanos auf Bakterienhäuten, S. 9), in denen sich Quantum-Dots aus Bleisulfid bilden, Nanokristallite von ungefähr 5 Nanometern Durchmesser. Der Schwefel stammt aus den schwefelhaltigen Aminosäuren des Keratins.

Quantenpunkte, Kristallite wie die im antiken Haarfärbemittel, verdanken ihre Besonderheiten den Einschränkungen, die die Winzigkeit für die Bewegungsmöglichkeiten ihrer Elektronen bedeutet. Während Elektronen in einem ausgedehnten Metallstück eine Unzahl verschiedener Energiezustände einnehmen können, sind im Quantendot, je nach Größe, nur mehr eng begrenzte Bereiche möglich. Das macht, zum Beispiel, mausgraue Materialien bunt.

Natürlich erhofft man sich von Quantenpunkten mehr. So gelten sie als mögliche Elemente für einen Quantencomputer, der bestimmte mathematische Problemklassen in ungleich kürzerer Zeit als jeder denkbare klassische Computer lösbar machen sollte.

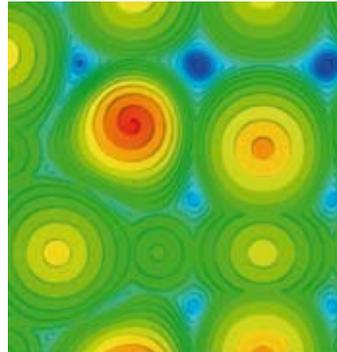


Alle Gläser enthalten Cadmiumdiselenid-Nanopartikel, nur die variierenden Partikelgrößen bewirken die verschiedenen Fluoreszenzfarben.

Selbstorganisierte Quantenpunkte könnten die Speicherelemente der Terabyte-Festplatten der nächsten Generation sein. Wird etwa eine Eisen-Platin-Verbindung auf einen Siliziumwafer aufgedampft, so entstehen von selbst winzige Inseln, die sich magnetisch prägen lassen, also ein Bit Information tragen können. Um den Effekt technisch nutzen zu können, muss das Wachstum dieser Inseln exakt steuerbar

werden, womöglich mit Computersimulationen.

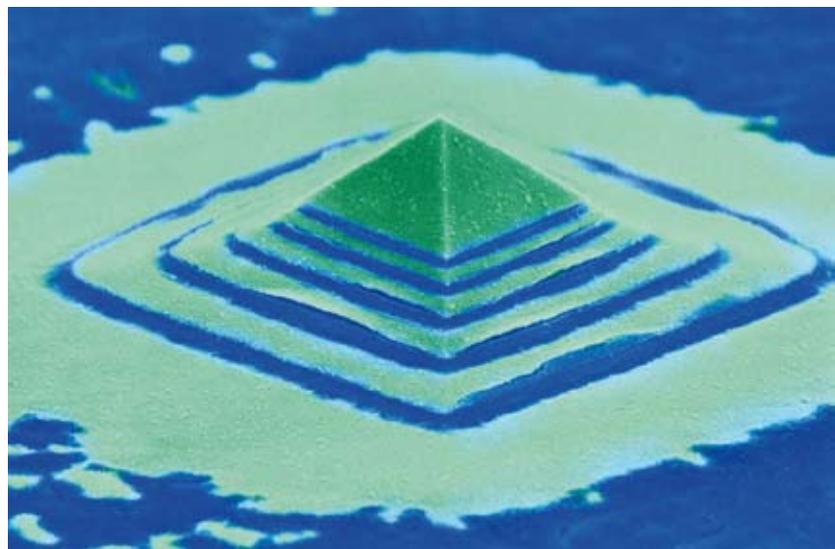
Ein Wissenschaftlerteam von der Toronto Universität, Kanada, hat 2006 vorgeführt, wie dicht an der antiken Haarfärbemethode Quantenpunkt-Hochtechnologie liegen kann.



Am Institut für Wissenschaftliches Rechnen der TU Dresden wollen die Forscher im Rahmen des EU-Projekts „MagDot“ durch mathematische Simulation herausfinden, wie sich regelmäßige Quantenpunktstrukturen herstellen lassen – für die Terabyte-Speicher von morgen.

Die Forscher tunkten ein dünnes Glasröhrchen, 75 Mikrometer im Durchmesser, in eine Lösung von Bleisulfid-Nanopunkten, PbS, die sie durch Erhitzen einer Mischung von Ölsäure (dem Hauptbestandteil von Olivenöl), Blei- und Schwefelverbindungen erhalten hatten und trockneten das Ganze mit einem Fön. An der Innenseite des Röhrchen setzte sich eine gleichförmige PbS-Quantenpunkt-Schicht ab, fertig war der Welt erster flüssigkeitsgeborener Infrarotlaser, in dem das Licht spiralförmig an der Innenwand des Röhrchens entlangläuft und dabei kohärent, also Laserlicht, wird.

Der Mikrometer kleine „Optische Resonator“ enthält Quantenpunkte in Nanometer-Größe. Mit dieser Struktur untersuchen Karlsruher Wissenschaftler Licht-Materie-Wechselwirkungen.

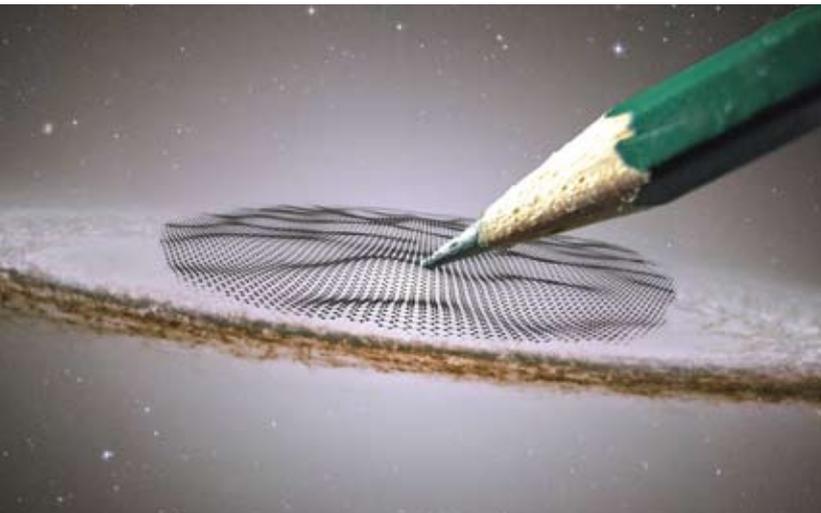


Nano-Exoten: Graphene

Bei der Reise der Naturwissenschaften in den Nanokosmos treten immer wieder echte Überraschungen zutage, Dinge, mit denen niemand gerechnet hat. Dazu gehört die Kunst, sich allein mittels eines weichen Bleistifts in Verhältnisse begeben zu können, die denen am Rande eines Neutronensterns ähneln, und das kommt so:

Graphit ist reiner Kohlenstoff in einer besonderen kristallinen Form, die aus Stapeln von Kohlenstoffnetzen besteht. Innerhalb eines Netzes sind die Kohlenstoffatome fest miteinander verbunden, die einzelnen Netze oder Schichten aber nur sehr

Graphene sind 0,15 nm dünne Netze allein aus Kohlenstoffatomen. Mit ihrer Physik lassen sich auch Phänomene am Rande eines Neutronensterns beschreiben, wie sie sich in einer Galaxis finden.



lose, sodass sie leicht aufeinander gleiten. Deshalb kann ein Bleistift, dessen Mine ja größtenteils aus Graphit besteht, „weich“ sein: Beim Schreiben löst sich Schicht um Schicht von den in der Bleistiftmine befindlichen Graphitkriställchen.

Natürlich dachten Wissenschaftler schon früh daran, eine solche ein-atomare Schicht zu Studienzwecken zu isolieren, indes: Die Theorie sagte einen sofortigen Kollaps voraus. Ohne eine stützende Unterlage war eine „Graphen“ genannte Einzelgraphitschicht nicht herstellbar. Jedenfalls nicht bis zum Jahr 2004, als entsprechende Schichten experimentell gefunden wurden. Im März 2007 konnten Experimentatoren u. a. der Max-Planck-Gesellschaft von freitragenden Graphen-Flöckchen von der Fläche eines Quadratmikrometers mit immerhin

30 Millionen Atomen berichten. Solche Areale sind winzig, könnten aber doch als Netze für Elektronenmikroskope dienen, die im Elektronenstrahl keinen Schatten werfen und womöglich ein einziges Molekül für die Untersuchung halten. Die Graphenschichten verdanken ihre Stabilität dem Umstand, dass sie leicht gekrumpelt sind, wie zerknülltes und dann wieder geglättetes Papier.

Die krumpeligen Graphitnetze gelten in der Physik derzeit als ausgesprochen heißes Stöfchen, natürlich nicht ihrer Eignung für die Elektronenmikroskopie allein wegen. Die monoatomaren Schichten verblüffen vielmehr durch ihre elektrischen Eigenschaften. So zeigen sie den sogenannten Quantenhalleffekt, für den Klaus von Klitzing noch Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt hatte bemühen müssen, schon bei Zimmertemperatur, dazu noch eine Reihe verwandter Effekte. Und dann drückt die Einschränkung des Leitvermögens auf nur eine atomar dünne Schicht den Elektronen ein bizarres Kollektivverhalten auf: Sie bilden Quasiteilchen aus, die als lichtschnelle Elektronen erscheinen – schon taucht in der Literatur die Idee von superschnellen elektronischen Schaltern auf. Mehr noch: Die elektrischen Eigenschaften der Graphitflöckchen werden mit einer Mathematik beschrieben, die auch für extreme Zustände zuständig ist, wie die am Rande eines Neutronensterns herrschenden. Und wer mit einem Bleistift schreibt, produziert Graphitflöckchen zuhauf, also führen Bleistifte geradewegs in stark strapazierte Bereiche des Kosmos.

Die Methoden zur Herstellung freitragender monoatomarer Graphitschichten sind derzeit nicht von der Art, dass sie die Chipindustrie begeistern könnten – eine Methode ist tatsächlich, Graphitschichten mit Tesafilm zu bekleben und diesen abzuziehen, bis nur mehr eine Einzelschicht übrig geblieben ist. Aber wenn einmal größere, sauber reproduzierbare, in Massen herstellbare Graphene verfügbar wären, würden sich gewiss zahlreiche Anwendungen finden. Die Kohlenstoffnetze sollten sich nämlich einfach photolithographisch strukturieren, also mit beliebigen Mustern versehen lassen. Womöglich entstehen so quantenmechanische Modellsysteme für die verzwicktesten Aufgabenstellungen, wie auch die mathematische Abbildung eines Neutronensterns.

Nicht untypisch für Nano: Aus einem Nichts wie einer Bleistiftspur entsteht durch Wissen (und ein vergleichsweise bescheidenes Budget) das Potenzial für eine ganz große Sache.

Nanopartikel in der Biosphäre

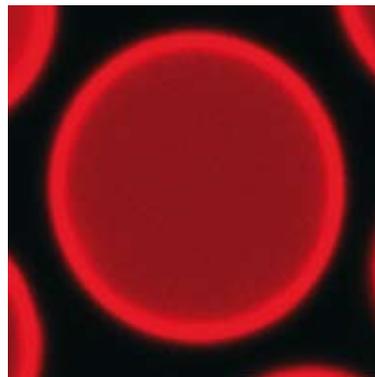
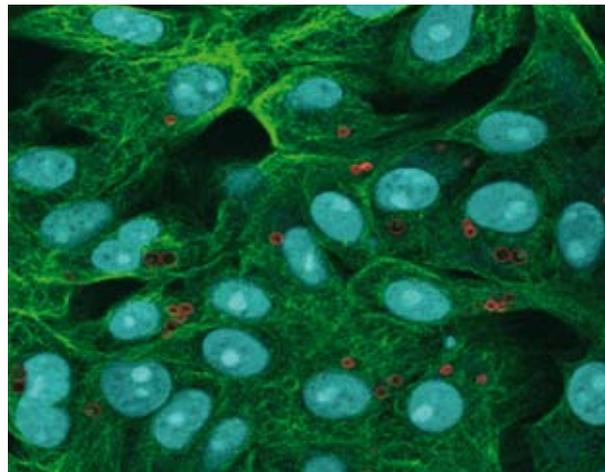
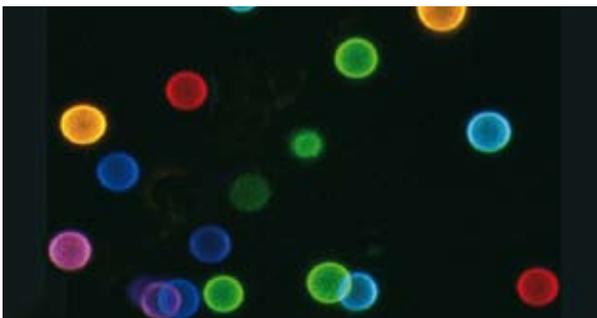
In medizinische Anwendungen der Nanopartikeltechnologie werden besonders große Erwartungen gesetzt. Nanopartikel lassen sich mehrschichtig oder als Hohlkugeln herstellen, sodass sich eine große Zahl von Funktionen in den kleinen Teilchen unterbringen lässt. Ihre Fähigkeit, sich im Körper scheinbar schrankenlos bewegen zu können, ist dabei Vorzug und Nachteil zugleich.

Nanotechnologie für Gesundheit und Medizintechnik

Ein großes Problem herkömmlich verpackter Medikamente besteht darin, dass sie meist nicht nur am vorgesehenen Ort zur Wirkung kommen, sondern im ganzen Körper. Hochpotente Krebsmittel ziehen so meist auch nicht erkranktes Gewebe in Mitleidenschaft. In mit Antikörpern beschichtete Nanopartikel verpackt, könnten sie künftig unmittelbar am Tumor freigesetzt werden. Eine weitere Komplikation: Wenn Therapeutika nicht wasserlöslich sind, können sie – unverpackt – auch nicht vom Blut aufgenommen und zum Wirkort transportiert werden.

Diese und andere Probleme lassen sich mit neuen, hoch variierbaren Verkapselungstechniken angehen, die etwa das Problem mangelnder Wasserlöslichkeit des Wirkstoffs so beheben: Zuerst werden die ausgesuchten Wirksubstanzen in Nanopartikel zerlegt, die in einer Lösung zum Schweben gebracht

Nanoskalige Leuchtmarker, ein innovatives Diagnostiksystem für die hochsensitive und präzise Früherkennung von Krankheiten.



Capsulation hat ebenfalls begonnen, Drug Delivery Systeme für den Transport von Wirkstoffen in die menschlichen Zellen zu entwickeln, was beispielsweise für eine Gentherapie von großer Bedeutung ist. Diese hochkomplexen Systeme sollen im Vergleich zu anderen Produkten vor allem gezielter und mit geringeren Nebenwirkungen eingesetzt werden können.

und mit einem Überzug aus Polyelektrolyten versehen werden. Ein Polyelektrolyt ist ein Polymer, dessen Einzelbausteine einen Elektrolyten tragen, der in Wasser Ionen abspaltet. Der zurückbleibende Polyelektrolytüberzug der Nanoteilchen ist dann elektrisch geladen und die Hülle mit Inhalt im Wasser frei beweglich, als Einheit also wasserlöslich. Es muss nicht bei *einer* Hülle bleiben, die Zugabe eines in Lösung entgegengesetzt geladenen Polyelektrolyten führt zum Aufwachsen einer zweiten Schicht, die Wiederholung der Prozedur zu einer dritten usw., „Layer-by-Layer“. Die typischen Kapselwände haben 4 bis 20 Schichten und Wandstärken zwischen 8 und 50 nm. Die in einem vom BMBF unterstützten



Präzise Planung in 3D: Der Arzt kann die Menge der zu applizierenden Nanopartikel vor dem Eingriff bestimmen.

Verbundprojekt unter anderem am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam entwickelte und von der Ausgründung Capsulation patentierte und kommerzialisierte Technik lässt die Herstellung von Nanokapseln verschiedener Größe mit nahezu beliebigen pharmazeutischen, biochemischen, elektrischen, optischen und magnetischen Eigenschaften zu, entsprechend groß ist das Interesse.

Ambivalenz mit MagForce Nanotechnologies

Nanopartikel sind so klein, dass sie sich in wässrigem Gewebe – und der Mensch besteht nun mal zu 70 % aus Wasser – sehr viel leichter bewegen können als größere Partikel. Soviel ist bekannt, an eingehenden Studien über die Beweglichkeit von Nanopartikeln in Geweben aber fehlt es. In den wenigen verfügbaren Studien wurden überdies unrealistisch hohe Partikelkonzentrationen verwendet, sodass für die meisten Nanopartikelarten nicht klar ist, ob und wie sie vom Körper aufgenommen werden, wie sie sich im Körper verteilen, gegebenenfalls umwandeln, sammeln oder ausgeschieden werden.

Was das Eindringen und die Ablagerung von Nanopartikeln angeht, gilt die Lunge aus nahe liegenden Gründen als das gefährdetste Organ. Sie verfügt für den Gasaustausch über eine sehr große innere Oberfläche, die von gegebenenfalls in der Luft befindlichen Nanopartikeln so durchdrungen werden kann, dass die Partikel anschließend mit dem Blutkreislauf über den ganzen Körper verteilt werden können. Bestimmte Nanopartikel können Lipid-Doppelmembranen passieren und so in Zellorganellen wie etwa Mitochondrien oder in den Zellkern eindringen. Zu den negativen Folgen zählen Entzündungsreaktionen, Störungen der Blutgerinnung, Ablagerungen wie Plaques, Herzrhythmusstörungen und Störungen der Atemwege.

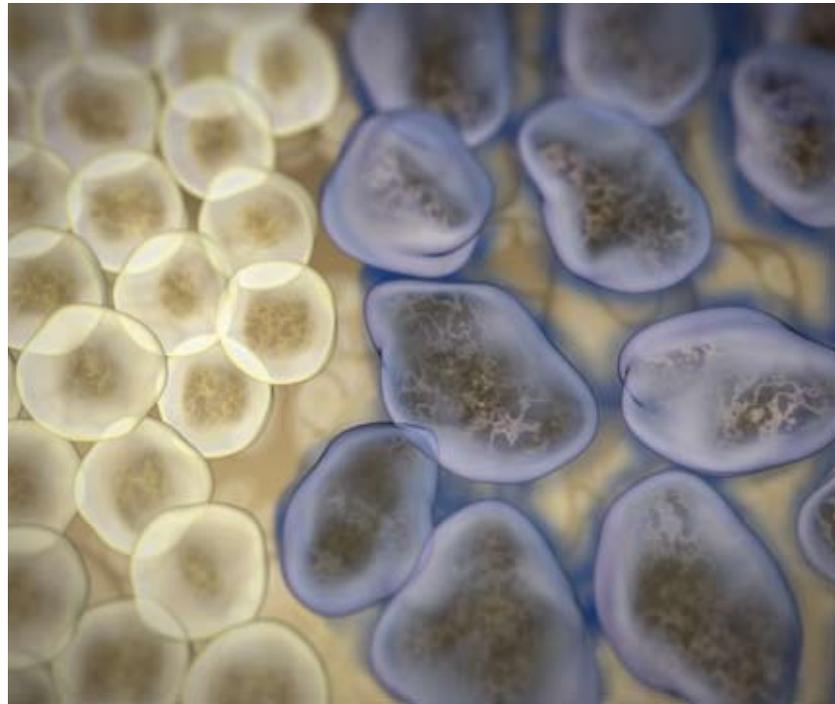
Andererseits versucht die Medizin seit kurzem, die Aufnahmefähigkeit der Lunge für Nanopartikel für eine bessere Medikation, etwa gegen Lungenkrebs, zu nutzen. So sollen spezielle organische Nanokapseln das Enzym Telomerase in die Kerne von Lungenkrebszellen bringen und so deren Teilung und damit den Krebs stoppen.

Dieser Doppelcharakter der Nanopartikeltechnologie, Risiko und Chance, ist kein Einzelfall; eisenhaltige Partikel etwa, die toxikologisch als bedenklich gelten, werden, nun in spezieller Verkleidung,

ebenfalls für die Therapie von Krebs erprobt. Beim Berliner Unternehmen MagForce Nanotechnologies etwa werden spezielle Eisenverbindungen so umhüllt, dass Krebszellen, in deren Nähe sie gespritzt werden, sie dauerhaft aufnehmen. Ein von außen angelegtes magnetisches Wechselfeld erhitzt dann die Partikelkerne, damit auch den Tumor, zerstört ihn oder macht ihn für Chemotherapeutika empfänglicher. Die Methode, erhoffen sich die vom BMBF geförderten Entwickler, könnte eines Tages gleichberechtigt neben strahlentherapeutische Methoden treten, nur eben ohne deren Nebenwirkungen. Das Verfahren sollte speziell bei der Bekämpfung besonders heimtückischer Hirntumoren wie dem Glioblastom hilfreich werden können.

Nanopartikel, die magnetische Kerne enthalten, wie sie etwa von magnetotaktischen Bakterien synthetisiert werden (siehe Seite 9), lassen sich mit speziellen Hochleistungsmagneten, die ein besonders inhomogenes Feld erzeugen, sogar an ihre Wirkungsstätte ziehen. Ihre Hüllen wären mit Wirkstoffen beladen; ein angelegtes starkes Ultraschallfeld, das gleichwohl das gesunde Gewebe nicht beschädigt, würde dann die Hüllen zum Platzen bringen und den Wirkstoff freisetzen.

Ideen wie diese gibt es viele, der Oberbegriff heißt Drug Targeting, die auf das erkrankte Gewebe zielende Verabreichung von Wirkstoffen. Bisher ist es ja nötig und üblich, zur Behandlung etwa eines kleinen Entzündungsherdes den ganzen Körper



Nanopartikel im Tumorgewebe: Links die gesunden Zellen, rechts die Krebszellen, die mit Nanopartikeln beladen wurden.

einem Medikament auszusetzen. Bei einem effizienten Drug Targeting ließe sich die Dosis nur für diesen Entzündungsherd steigern, ohne vermehrte Nebenwirkungen fürchten zu müssen.

Nanotechnologie für Lebensmittel

Nanotechnologie kommt schon heute in der Lebensmitteltechnologie zum Einsatz, auch auf ganz unvermuteten Sektoren wie z. B. der Herstellung feinsten Schokoladen. Nanotechnologie hat auch im Lebensmittelsektor großes Potenzial. So sollen Nano-Sensoren künftig über Alter und Zustand von Lebensmitteln Auskunft geben (siehe „Nanosensorik für die Lebensmittelindustrie“ Seite 31). Nach Rechnungen der BBC landen in den Industrieländern 40% der erzeugten Lebensmittel auf dem Müll. Verlässliche Informationen über Frische und Verträglichkeit kann einer solchen Verschwendung entgegen wirken, denn heute werden Lebensmittel allein nach Verfallsdatum, nicht ihres tatsächlichen Zustands wegen weggeworfen. Auch im Bereich der Sterilisation bei niedrigen Temperaturen werden an den Einsatz von Nanomembranen große Er-



Hochgradientenmagnet zur Steuerung von Magnetpartikeln im Körper. Der im Rahmen des Projektes „Nanomagnetomedizin“ des BMBF entwickelte Magnet ist mit 47 kg leicht genug, um am Bett des Patienten geschwenkt werden zu können. Der Vorgängermagnet wog 1,5 Tonnen.



Ein Glas mit Weizenbier. Die großen Blasen wachsen auf Kosten der kleinen, ein in der Natur verbreitetes Phänomen.

wartungen geknüpft. Im Hinblick auf potenzielle Risiken eines solchen Einsatzes wird die Entwicklung vom Verbraucherministerium und dem Bundesinstitut für Risikobewertung aufmerksam beobachtet.

„Nanotechnologie für Lebensmittel“ spielt sich auf ganz unterschiedlichen Technikgebieten ab, einige können als harmlos eingestuft werden, von Natur aus.

Siebe, Filter, Membranen

Siebe, Filter und Membranen sind schon lange Teil der Lebensmitteltechnik; die Nanotechnologie bedeutet auf diesem Sektor lediglich eine Verfeinerung. Filter mit Porengrößen unter einem Mikrometer können Bakterien zurückhalten, noch feinere sogar Viren; mithin eignen sie sich zur kalten Sterilisierung von Säften, Milch und anderen Flüssigkeiten, um wichtige Inhaltsstoffe wie Vitamine zu schonen. Wo besondere Zuverlässigkeit nötig ist, werden heute sogar Filter aus Siliziumwafern gleich denen für die Herstellung von Halbleitern verwendet. Durch photolithographische Methoden werden in diese Filter submikroskopischer Löcher geätzt, deren Dimensionen sehr genau festgelegt sind. Solche Filter erlauben eine genaue mechanische Sortensor-

tierung von Stoffgemischen. Die Membrandicken sind in der Regel kleiner als die Lochdurchmesser, was Stoffdurchsätze zur Folge hat, die zwei bis drei Größenordnungen größer als bei konventionellen Filtern sind.

Umgekehrt lassen sich solche Filter gleichsam als Düsen zur Herstellung stabiler Gemische von Stoffen verwenden, die von Natur aus zur Entmischung neigen, wie Fette und Wasser. Ein derartiges Gemisch findet sich etwa in Speiseeis, zusammen mit Luft, und wenn das lange in der Tiefkühltruhe liegt, überzieht es sich in der Regel mit Eisstacheln: Luft, Fett und Wasser haben sich teilweise entmischt. Mit Nanodüsen aber lassen sich ultrafeine und gleichförmige Tröpfchengemische herstellen, die sehr viel langsamer zerfallen; so hergestelltes Speiseeis bliebe also lange stabil.

Ursache hierfür sind zwei Regeln, die für feine, in Tröpfchen oder Schäume zerteilte Stoffgemische gelten.: „Die Großen fressen die Kleinen“ und „Wenn etwas ganz Kleines wachsen will, muss ihm geholfen werden“. Beide Regeln lassen sich an einem Glas mit Weizenbier studieren: Die anfänglich ziemlich homogene Schaumkrone zerfällt in unterschiedlich große Blasen, wobei die großen erkennbar auf Kosten der kleinen wachsen. Hauptquellen der Bierblasen sind – wenn sich der große Trubel des Eingießens gelegt hat – ganz bestimmte Stellen an der Glaswand, kleine Störungen, Fusseln oder Ätzgruben, an denen die sogenannte Keimbildungsarbeit für entstehende Gasblasen herabgesetzt ist, denn erst bei einer gewissen Mindestgröße ist die Energiebilanz für das Blasenwachstum positiv. Die Störungen setzen diese Mindestgröße herab, dann schäumt 's. Bei Stoffgemischen, die stabil bleiben sollen (wie Mayonnaise), ist also darauf zu achten, dass die Bläschen/Tröpfchen sehr gleichförmig sind und nach Möglichkeit unter der kritischen Größe bleiben, die ihnen ein Wachstum erlaubt.

Micelle, my Belle

Viele gesunde Substanzen wie Omega-3-Fettsäuren schmecken nicht gut, und Fette und Öle – Lösungsmittel und Träger wichtiger Vitamine – mischen sich nicht mit Wasser. Beide Probleme könnten mit Nanoverkapselungen gelöst werden, deren Außenhaut gern Wasser an sich bindet und die sich erst im Magen öffnen, der für schlechten Geschmack nicht empfänglich ist. Nanokapseln haben auch den großen Vorteil, dass sie mit bloßem Auge nicht zu sehen sind, optisch also nicht stören.

Die Herstellung von Nanoverkapselungen gelingt mittlerweile mit einer ganzen Reihe von Verfahren, darunter solche, die Tenside verwenden. Die haben längliche Moleküle, die am einen Ende Wasser mögen, am anderen Fett. Also lagern sich die Fett liebenden Enden der Tensidmoleküle am Fett, die Wasser liebenden am Wasser an. In der Folge bilden sich zahllose kleine Fettkügelchen, die von Tensidmolekülen wie Igelstacheln besetzt sind und wie ein Nebel im Wasser schweben – Fett und Wasser sind vermischt, was ohne Tenside nicht möglich ist. Nach diesem Prinzip wurden raffinierte, von zahlreichen Patenten geschützte Rezepturen entwickelt, mit denen sich verschiedene Wirkstoffe in Kapseln von 30 Nanometern Durchmesser einschließen lassen.

Eine weitere mögliche Anwendung der Nano-Verkapselung: Unsichtbar verkapseltes Vitamin C, fachsprachlich Ascorbinsäure, als Oxidationsschutz für Speiseöle. Nanoverkapselt kann Ascorbinsäure sogar Milch- und Joghurtprodukte schützen, sodass diese nicht mehr sauer werden. Das Verfahren ist Gegenstand einer lebensmittelrechtlichen Prüfung.

Die Bedenken, die in letzter Zeit vermehrt im Zusammenhang mit Nanopartikeln in Lebensmit-

teln geäußert wurden, sind etwa für mineralische Substanzen diskussionswürdig, können aber auf Stoffgruppen wie Fette etc. nicht zutreffen. Der Körper arbeitet hier selbst mit Nanopartikeln: Wer Milch trinkt oder ein Ei verzehrt, schluckt Unmengen Micellen, außerdem: die Zerlegbarkeit in kleinste Partikel ist sogar die Voraussetzung für die stoffliche Verwertung der Nahrungsmittel.

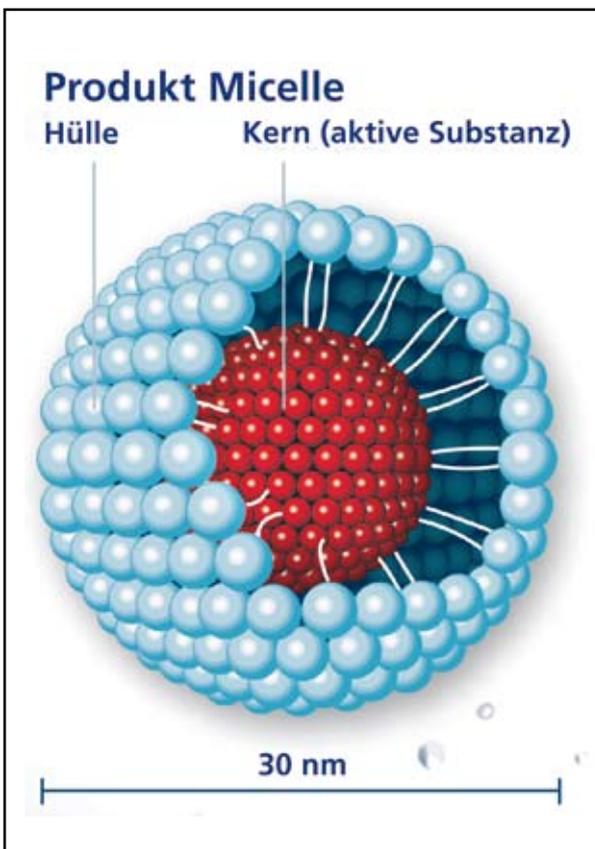
Richard Jones, Professor an der University of Sheffield und Verfasser einer gewichtigen Studie zu den Risiken der Nanotechnologie, sagt dazu:

„Die meisten Nahrungsmittel sind von Natur aus nanostrukturiert oder enthalten Nanopartikel. Wer keine Nanopartikel will, darf keine Milch mehr trinken. ... In dem Moment, da die Inhaltsstoffe den Blutstrom erreichen, sind sie allesamt nanoskalig.“

Umstrittene Visionen: Proteinnahrung der Zukunft

Drei Viertel des verfügbaren Frischwassers, ein Drittel des bewirtschaftbaren Landes und ein Fünftel der verwendeten Energie werden gegenwärtig für die Nahrungsmittelproduktion aufgewendet. Für das Jahr 2050 werden 9 Milliarden Menschen erwartet, denen nach den Maßstäben der Industrieländer pro Jahr 450 Milliarden Tonnen Fleisch zur Verfügung stehen müssten – ein Fleischwürfel mit 700 m Kantenlänge.

Die Fleischerzeugung ist aus naturgegebenen Gründen sehr ineffizient, für ein Kilo tierisches Protein müssen drei bis zehn Kilo pflanzliches Protein aufgewendet werden. Einige Fachleute fordern daher eine *protein transition*, die nicht den völligen Verzicht auf naturgewachsenes Fleisch bedeuten würde, wohl aber bei verschiedenen Nahrungsmitteln den Ersatz durch hochwertiges Pflanzenprotein. Die Akzeptanz wird ganz wesentlich von der Struktur der Novel Protein Foods (NPF) abhängen. Die Vorteile einer solchen Technologie für Mensch und Umwelt sind nicht durchweg überzeugend, werden aber von der Lebensmittelindustrie intensiv erforscht. Die Niederlande sind auf diesem Gebiet führend (insbesondere die Universität Wageningen), unter anderem aus einem sehr einleuchtenden Grund: Das Land hat seiner intensiven Viehhaltung wegen ein schweres Gülleproblem.





Die wachsende Weltbevölkerung wird neue, umweltverträglichere Formen der Nahrungsmittelproduktion neben die traditionellen Methoden stellen müssen. Entsprechende Techniken, die Nanobiotechnologie einschließen, werden besonders intensiv in den Niederlanden erforscht, wo die Böden unakzeptabel mit Gülle belastet sind.

Nanosensorik für die Lebensmittelindustrie

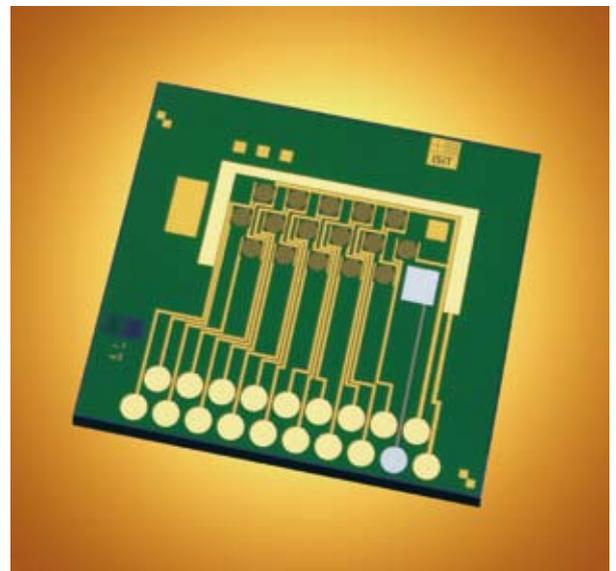
Viele Lebensmittel werden nur weggeworfen, weil ihr Haltbarkeitsdatum überschritten ist. Das Haltbarkeitsdatum ist aber nur eine Mindesthaltbarkeitsschätzung. Hätte die Lebensmittelpackung ein billiges Analysegerät an Bord, könnte das die Genießbarkeit anstelle des Haltbarkeitsdatums signalisieren und so ein viel sparsameres Wirtschaften ermöglichen. Umgekehrt werden auch verdorbene Lebensmittel verkauft. Nanosensoren könnten bei beiden Problemen hilfreich sein, etwa solche mit Nanodrähten aus verschiedenen Materialien, die nur wenige Millionstel Millimeter dünn sind. Wenn an so dünne Drähte eine Fremdsubstanz andockt, verändern sich ihre elektrischen Eigenschaften so drastisch, dass im Prinzip neben Bakterien sogar winzige Viren, sogar einzelne Moleküle nachweisbar werden.

Was gemessen wird, bestimmt die Beschichtung des Nanodrahtes; sollte etwa Ammoniak nachgewiesen werden, müsste die Beschichtung bevorzugt Ammoniakmoleküle aufnehmen, möglichst hoch selektiv. Es können natürlich auch Antikörper sein, die nur passende Antigene binden und so schnell nachweisbar machen.

Nanodraht-Sensoren hätten den großen Vorteil, dass sie nur sehr wenig Energie in der Größenordnung eines Picowatts verbrauchen, etwa das Millionste eines Millionstels der Leistung einer Taschenlampe. Solche Leistungen können ohne weiteres von angefunkten RFID-Funketiketten bereit gestellt werden.

Mit der Kombination von Funketikett, Plastikdisplay und Nanodrahtsensor könnte man endlich jedem einzelnen Käse im Supermarktregal Gerechtigkeit widerfahren lassen: Die un- und überreifen Käse würden ihren Zustand mit einem niedrigeren, die gerade richtigen mit einem höheren Preis signalisieren, weggeworfen würde keiner mehr. Gut: Im Tante-Emma-Laden hätte Tante Emma das allein mit Hilfe ihrer Nase geschafft, Tante Emma aber ist nicht mehr.

Mit Chips des Fraunhofer Instituts für Siliziumtechnologie, ISIT, werden schnelle DNA-Sensoren für die Entdeckung pathogener Bakterien und anderer biogener Stoffe entwickelt.



Gesundheitliche Wirkungen von Nanopartikeln

Die größte Aufmerksamkeit gilt derzeit anorganischen Nanopartikeln, an denen großes kommerzielles Interesse besteht, die daher in großen Mengen hergestellt werden könnten, die auch beständig genug sind, sich in lebendem Gewebe oder in der Umwelt anzureichern und für die es plausible Pfade in die Umwelt und den Menschen gibt.

Wie alle Technologien wird auch die Nanopartikeltechnologie Licht- und Schattenseiten zeigen. Die besonderen Eigenschaften bestimmter Nanopartikel machen sie einerseits für den Einsatz in einer Art Nanomedizin interessant, die gleichen Eigenschaften lassen aber auch neue Risiken erwarten.

Harald Krug, Professor am Institut für Toxikologie und Genetik im Forschungszentrum Karlsruhe und Koordinator des BMBF-Projektes NanoCare (siehe Interview S. 48), sagt es in seinen Vorträgen so:

„Wir haben gelernt, mit Metallen umzugehen und haben Werkzeuge hergestellt, die uns das Leben leichter machten, aber auch Waffen. Wir haben das Auto erfunden, und der Autoverkehr tötet jedes Jahr weltweit eine halbe Million Menschen und verletzt 23 Millionen weitere. Wir haben neue Substanzen wie Pestizide hergestellt, die, soweit sie beständig sind, die Umwelt und unsere Lebensqualität beeinträchtigen. Daraus ist zu schließen: Neue, nanoskalige Materialien werden zumindest einige unerwünschte Nebenwirkungen haben.“

Damit aber Nanopartikel im menschlichen Körper Nebenwirkungen oder gesundheitliche Beeinträchtigungen hervorrufen können, müssen sie erst einmal in ihn hineinkommen.

Einfallstore für Nanopartikel

Ein mit 2 m² Fläche schon großes mögliches Einfallstore ist die Haut. Allerdings haben Untersuchungen gezeigt, dass gesunde, unverletzte Haut eine zuverlässige Barriere darstellt. Anders sieht es bei verwundeter oder – etwa durch einen Sonnenbrand – vorgeschädigter Haut aus; hier raten Experten von

vermeidbaren Expositionen ab (siehe Interview mit Prof. Dr. Tilman Butz auf Seite 38).

Der Gastro-Intestinale Trakt (GIT) – also Mundhöhle, Speiseröhre, Verdauungsapparat – bietet mit 2000 m² eine ungleich größere Fläche, allerdings weist die Forschungsliteratur keine Fälle aus, wonach die Gefäßwände des GIT anorganische Nanopartikel aufnehmen oder durchlassen würden, es sei denn, sie wären gezielt hierfür präpariert worden. Anderes gilt für nanoskalige Gemenge etwa von fetthaltigen Tröpfchen, Nahrung, mit denen feine Kapillargefäße die Zellen versorgen. Bei der intravenösen Ernährung werden ebenfalls nanoskalige Tröpfchen verwendet, die künstlich mit Hochdruckdüsen hergestellt werden. Nanoskalige Tröpfchen sind auch für den Transport von Wirkstoffen vorgesehen. Das olfaktorische Epithelium, die Nasenschleimhaut, ist mit 5 cm² Fläche klein, verdient ihrer Nähe zum Gehirn wegen aber besondere Aufmerksamkeit.

Die 140 m² große aktive Fläche der Lunge gilt derzeit als das wichtigste Einfallstore für anorganische Nanopartikel. Die Partikelgängigkeit der Lunge ist von Studien an Rauchern bekannt. Es gibt eine Reihe von gut erforschten Krankheitsbildern in Zusammenhang mit Staubbelastungen, die auch für die Epidemiologie von Nanopartikeln bedeutsam sein können.

Die Lunge hat eine innere Oberfläche von der ungefähren Größe eines Tennisplatzes und bietet damit potenziell gefährlichen Partikeln die wichtigste Eintrittsfläche. Die Eintrittswahrscheinlichkeit hängt auch von der Atemart ab; Sport ist bei Partikelbelastung ungünstig.



Asbest – eine Geschichte, die sich nicht wiederholen darf

Asbest hat eine glanzvolle Geschichte. Den alten Griechen diente die „Karpasischer Steinflachs“ genannte Variante verflochten als unverwüstlicher Docht für Öllampen. Kaiser Karl V. soll eine aus Asbest gewebte Tischdecke besessen haben, die er nach dem Mahl gern ins Feuer werfen ließ, aus dem sie zum Erstaunen der Gäste unversehrt geborgen werden konnte.

Auch in der Technik der Neuzeit galt Asbest als Wundermaterial. Nicht ganz zu unrecht, denn der Stoff besitzt eine hohe Festigkeit, ist ein hervorragender Wärmeisolator, hitze- und säurebeständig und, abhängig von der Modifikation, mechanisch so fest, dass er sogar in Bremsbelägen eingesetzt werden konnte.

Asbest ist ein mineralischer Naturstoff, vornehmlich aus Silizium und Sauerstoff bestehend, darin in verschiedenen Proportionen eingebettet Kalzium, Magnesium, Eisen, Nickel. Es gibt Asbest also in

Das ehemals von der Deutschen Welle genutzte Kölner Hochhaus ist ein Asbest-Sanierungsfall.



vielen Varianten. Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie nennt als „Asbest schlechthin“ den Chrysotilasbest, „parallelfaserige Massen von schimmerndem Seidenglanz, lichtgelb, braungelb, lichtgrün.“ Was Asbest als Werkstoff in den Industriegesellschaften unerwünscht machen sollte, war die Eigenschaft „faserig“. Wird Asbest nämlich mechanisch strapaziert, gelangen Bruchstücke dieser Fasern in die Luft, und wenn diese eingeatmet werden, kann das schlimme Folgen haben, z. B. Lungenkrebs. Und Asbest war in den Industriegesellschaften reichlich verwendet worden. Schon 1820 wurden die Fasern zu feuerfester Kleidung für Feuerwehrleute verarbeitet. 1900 wurde ein österreichisches Patent für das so genannte Eternit erteilt, einen Asbest enthaltenden Baustoff, aus dem fortan große Mengen von Dachschindeln, wellblechartigem Dachmaterial, Rohre, usw. gefertigt wurden. Das Eternit war nicht, wie der Name vermuten ließ, für die Ewigkeit, sondern verwitterte und setzte Asbestfasern frei. Schon 1900 wurde die Asbestose als Krankheit erkannt, eine entzündliche Reaktion des Lungengewebes, die dieses schwer beschädigen und nach langer Latenzzeit schließlich zu Lungenkrebs führen kann.

Unterdessen wurden Gebäude im großen Stil mit Spritzasbest als Brandschutz versehen, in jüngerer Zeit der Palast der Republik in Berlin, oder das Hochhaus der Deutschen Welle in Köln.

1979 wurde Spritzasbest in Deutschland verboten, 1993 der Einsatz von Asbest generell, und seit 2005 gibt es auch ein EU-Verbot.

Die lange Latenzzeit zwischen Exposition und Ausbruch der Krankheit hat dazu geführt, dass Asbest noch lange ein Thema bleiben wird. Im Jahr 2003 verzeichneten die Berufsgenossenschaften 3500 neue beruflich bedingte Erkrankungen, Tendenz steigend. Die jährlichen Kosten dieser Erkrankungen liegen inzwischen bei über 314 Millionen €. Eine solche Geschichte, darin sind sich alle einig, darf sich nicht wiederholen.

Die Asbest-Erfahrung ist ein wesentlicher Hintergrund der die Nanopartikeltechnologie begleitenden Sicherheitsdebatte. Wichtig in diesem Zusammenhang: Gebundener Asbest, der in der Erde ruht oder mit Beton fixiert wurde, ist harmlos. Auch gebundene synthetische Nanopartikel dürfen als ganz und gar harmlos gelten. Die folgende Risikobetrachtung bezieht sich denn auch ausschließlich auf ungebundene Nanopartikel, die über die Atmung, Nahrungsaufnahme oder andere Wege in den menschlichen Körper gelangen könnten.

Nanopartikel – wie gefährlich?

Derzeit ist die übergroße Mehrzahl der Nanopartikel, mit denen Menschen in Kontakt kommen, unbeabsichtigt durch industrielle Aktivitäten, im Straßenverkehr, durch die ganz normale technische Zivilisation entstanden. Zunehmend rücken aber auch industriell hergestellte Nanopartikel ins Augenmerk: Schon für das Jahr 2007 wird die Produktion etwa von Fullerenen auf einige 1000 t geschätzt. Was als eine Laborkuriosität begann, erreicht jetzt den industriellen Maßstab und wird damit auch für die Toxikologie interessant, die Wissenschaft von der Verträglichkeit der Stoffe, und selbstverständlich für den Arbeits- und Verbraucherschutz (siehe Seite 50).

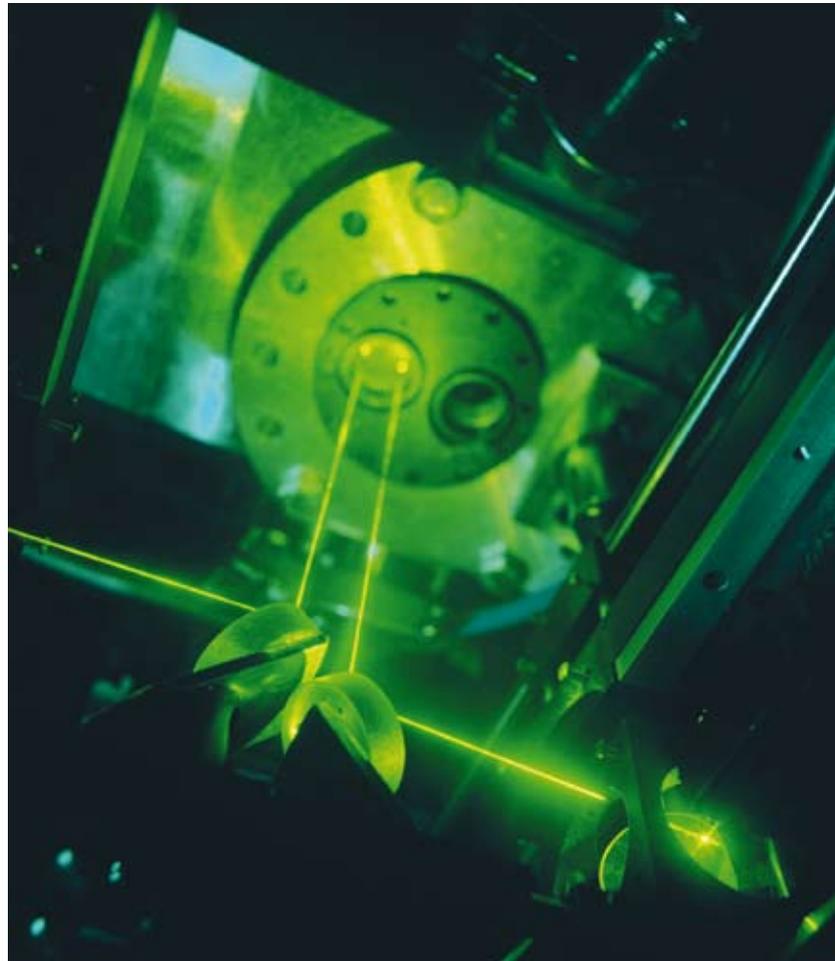
Nanopartikel sind insofern einzigartig, als sich beim Übergang in die Nanometerdimension die für die Partikel gültigen physikalischen Modelle zu ändern beginnen: Während oberhalb 100 nm die klassische Physik gilt, ist es darunter die Quantenphysik, mit ganz anderen Gesetzmäßigkeiten. Der Übergang ist verschwommen. Mit Nanopartikeln lässt sich folglich zaubern: Allein durch die Variation ihrer Größe verändern sich (abhängig vom Material, aus dem die Partikel bestehen) Eigenschaften wie Löslichkeit, Transparenz, Farbe, Leitfähigkeit, Schmelzpunkt.

Bei Nanopartikeln besteht überdies ein großer Teil der Atome aus Oberflächenatomen. So hätte ein kugelförmiges Eisenpartikel mit einem Durchmesser von 5 nm etwa 27 % Oberflächenatome, ein Teilchen mit einem Mikrometer Durchmesser dagegen nur noch 0,15 %. Oberflächenatome aber sind nicht rundherum mit Nachbaratomen verbunden, sie haben deshalb freie Bindungen, und die sind sehr reaktiv. Deshalb bleiben sie auch nicht lange ungebunden, sie lagern sich aneinander oder an verfügbare freie Moleküle oder Oberflächen an. Das hat – wie Langzeit-Luftmessungen in der Stadt Erfurt ergaben – den kuriosen Effekt, dass eine Reduktion des Feinstaubes die Zahl der Nanopartikel in der Luft, also die Konzentration des Feinstaubes, erhöhen kann, denn mit weniger größeren Partikeln in der Luft fehlen den feinsten Partikeln Möglichkeiten, sich anzulagern.

Die hohe Zahl von Oberflächenatomen fördert auch die katalytische Aktivität dieser Partikel, also die Fähigkeit, chemische Reaktionen zu beschleunigen, ohne dabei aufgebraucht zu werden, was sie für die Industrie interessant macht. Wenn freilich die aktiven Oberflächen nicht abgeschirmt werden können, agglomerieren die Partikel schnell zu größeren Einheiten, die weniger aktiv sind, und die

interessanten Eigenschaften gehen verloren. Eine hohe Anzahl von bindungsfreudigen, katalytisch aktiven Oberflächenatomen kann natürlich auch unerwünschte Folgen haben und Nanopartikel toxisch werden lassen. In der Literatur wird stellenweise sogar angenommen, dass die potenzielle Nanopartikel-Toxizität mit sinkender Größe stetig zunimmt. Der Zusammenhang kann aber nicht zwingend sein, denn dann müssten Moleküle und Atome, die kleinsten Bestandteile der Stoffchemie, von Natur aus toxisch sein. Sie sind aber das Material, aus dem wir aufgebaut sind.

Partikelanalyse mit dem ATOFMS – Aerosolmassenspektrometer. Einzelne Partikel werden im Flug erfasst und mit Lichtschranken nach ihrer Größe sortiert. Nach anschließender Verdampfung und Ionisation kann die Zusammensetzung der Partikel innerhalb von Sekunden bestimmt werden, gleichsam in Echtzeit.

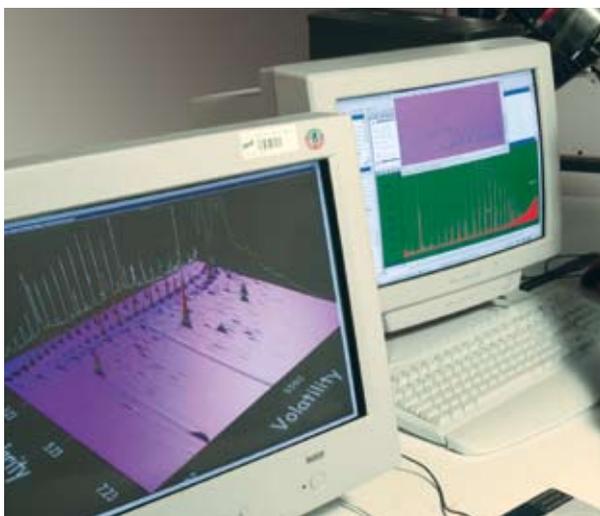


Forschung zu lungengängigen Aerosolen

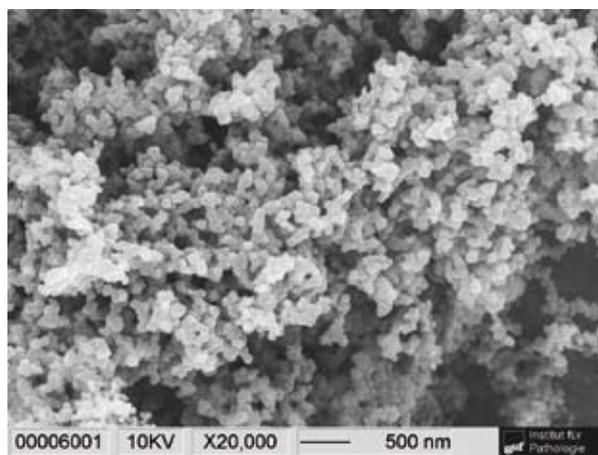
Die wichtigste Informationsquelle über die Toxizität von Nanopartikeln ist derzeit die von der Aerosolforschung gesammelte Literatur über die Wirkung von Feinstaub, PM10, der aber nicht mit industriell hergestellten Nanopartikeln gleichzusetzen ist. PM10 steht für Partikel mit einem Durchmesser kleiner 10 μm (1 Mikrometer = 1.000 Nanometer). Die körpereigenen Mechanismen zur Neutralisierung von Partikeln dieser Größenordnung im Atemtrakt – etwa durch Einbettung in Schleim, der schließlich entsorgt wird – versagen bei nanoskaligen Partikeln; ein Grund, weshalb dem Eintrag solcher Partikel in die Lunge derzeit die größte Aufmerksamkeit entgegen gebracht wird. Die Lunge hat eine innere Oberfläche von der Größe eines Tennisplatzes (ca. 140 Quadratmeter), und weil sie für einen schnellen Gasaustausch ausgelegt ist, sind in den Lungenbläschen die Barrieren zum Blutkreislauf außerordentlich dünn und kann damit auch für Nanopartikel durchgängig sein.

Tatsächlich hat die Aerosolforschung, wie sie in Deutschland vornehmlich vom GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft betrieben wird, nachweisen können, dass Nanopartikel in das Lungenepithel eindringen und bis in das Blut gelangen können. Mithin ist zu

Zweidimensionale Gaschromatographie: Zur Bestimmung ihrer chemischen Zusammensetzung werden Aerosolproben nach zwei verschiedenen Trennprinzipien sortiert: 1. Flüchtigkeit, (x-Achse), 2. Polarität (y-Achse). Jeder Peak des xy-Chromatogramms auf dem Bildschirm stellt eine im Aerosol vorkommende chemische Verbindung dar. Die Peakhöhe repräsentiert die relative Häufigkeit.



vermuten, dass Nanopartikel ein eigenständiges Gesundheitsrisiko darstellen können, was für die Beurteilung der Luftqualität Konsequenzen hätte. Dann müsste neben der Masse der Partikel in der Luft auch deren Anzahl gemessen werden, um ermitteln zu können, auf wieviele Portionen – eben auch Nanopartien – ein Schadstoff verteilt ist. Der Unterschied ist wichtig: Mit der Masse der Partikel in der Luft als Kriterium wird der Atemtrakt der Städter



Rußpartikel unter dem Elektronenmikroskop.

im Vergleich zu der auf dem Land lebenden Bevölkerung dreimal so stark belastet, nimmt man dagegen die Partikelzahl als Kriterium, so schneidet die Stadtbevölkerung mit dem 19-fachen der Belastung gegenüber dem Lande drastisch schlechter ab.

Als Quellen menschengemachter Staubpartikel < 10 μm hat die Aerosolforschung Industrieprozesse mit 45 %, Schüttgutumschlag mit 21 % und im Straßenverkehr ausgestoßene Staubpartikel mit 17 % der gesamten Staubemissionen ausgemacht. Rechnet man den Abrieb von Reifen, Straßenbelägen und Bremsen hinzu, kommt der Straßenverkehr auf 33 %. Ein guter Teil dieser Partikel sind Nanopartikel.

Wenn das Einatmen von Nanopartikeln gefährlich ist und Nanopartikel auch ohne Zutun des Menschen in der Natur häufig vorkommen, dann müsste die Evolution atmenden Organismen eigentlich die Fähigkeit verschafft haben, mit Nanopartikeln fertig zu werden. Das ist auch der Fall, allerdings ist der Schutz unvollkommen. Beim Menschen bildet die Nase eine erste Barriere. Der Krümmung der Atemwege kann die Luft mühelos folgen, Partikel größer als 2,5 μm aber verlassen durch die Trägheit ihrer Masse die Bahn und landen in der Nasenschleimhaut. Bei der Mundatmung freilich fällt dieser Filter



aus, von der Luft getragene Teilchen kommen nahezu ungehindert in Rachenraum und Bronchien. Partikel größer als $5\ \mu\text{m}$ und kleiner als $10\ \text{nm}$ kommen größtenteils hier zur Ruhe, der Rest strömt weiter. Ein Teil lagert sich an den kleinen Bronchien ab, ein anderer in den Lungenbläschen. Partikel mit etwa $500\ \text{nm}$ Durchmesser werden kurioserweise kaum abgelagert, sondern größtenteils wieder ausgeatmet. Mit weiter abnehmender Größe bis $20\ \text{nm}$ steigt der Anteil der in der Lungenperipherie abgelagerten Partikel stark an.

Ob und wie Teilchen in der Lunge abgelagert werden, hängt auch von der Art der Atmung ab. Langsame und tiefe Atemzüge befördern den meisten Staub in die Lunge.

Einmal deponierte Teilchen müssen natürlich nicht ewig im Körper bleiben, in gesunden Bronchien etwa sind die Epithelzellen unter dem Schleim mit Wimpern ausgestattet, die durch synchronisiertes Wedeln Fremdkörper in den Kehlkopf befördern, von wo aus sie in den Magen-Darm-Trakt gelangen und verdaut oder ausgeschieden werden.

Ein weiterer Schutzmechanismus des Körpers: Im Atemtrakt sind Makrophagen unterwegs, Fresszellen, die sich über als fremd erkannte Partikel, aber

Mit einer Gamma-Kamera kann man über mehrere Tage hinweg beobachten, wo sich nach der Inhalation markierte Teilchen in der Lunge festsetzen und wie lange sie dort verbleiben.

auch Bakterien und Viren her machen. Winzige Nanopartikel freilich werden häufig übersehen.

Wissenschaftler vom Institut für Inhalationsbiologie der GSF haben festgestellt, dass eingeatmete nanoskalige Partikel – in der Fachsprache der Aerosolforscher „ultrafeine Teilchen“ – in der Leber, im Herzen und sogar im Gehirn von Ratten landen können. Die Mechanismen, wie die Partikel in den Blutkreislauf und innere Organe gelangen, sind in der Wissenschaft derzeit noch heftig umstritten, auch inwiefern Ergebnisse aus Labor- und Tierversuchsmodellen auf den Menschen übertragbar sind. Als mögliche Transportwege diskutiert werden beispielsweise die Aufnahme über das neuronale Netz (z. B. über den Riechnerv ins Gehirn), über das Lymphsystem oder über die nur $0,5\ \mu\text{m}$ dünne Schranke zwischen Lungenbläschen und Kapillaren in den Blutkreislauf. Bereits vorgeschädigtes Lungengewebe gilt als anfälliger für eine Passage von Nanopartikeln in den Organismus. Die physikochemische

Beschaffenheit hat hierbei einen großen Einfluss auf das Verhalten der Partikel im Organismus. Ultrafeine Stäube verhalten sich anders als industriell hergestellte Nanomaterialien – die genauen Verhältnisse werden von künftiger Forschung geklärt werden müssen.

Gefährdung von Herz und Gefäßen

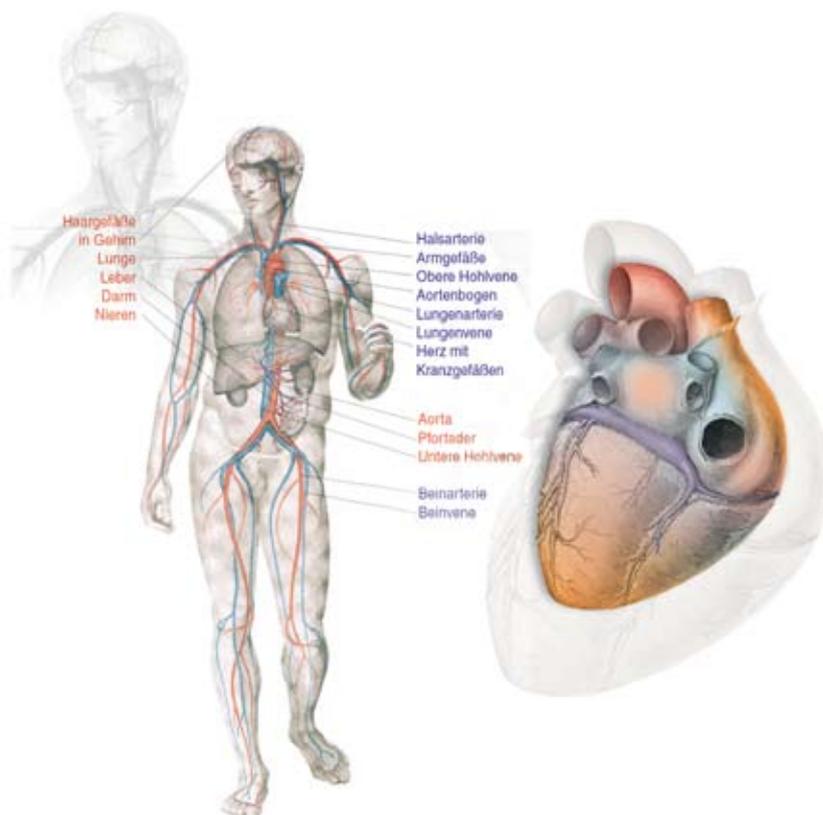
Aus der Feinstaubforschung ist bekannt: Wenn Nanopartikel in den Blutkreislauf gelangen, würden sie normalerweise von Makrophagen, Fresszellen, der Polizei des Immunsystems, aufgegriffen und unschädlich gemacht. Ihrer Winzigkeit wegen aber geschieht das häufig nicht. Dann können sie sogar auf das Herz einwirken. GSF-Wissenschaftler und Veterinärmediziner der Ludwig-Maximilians-Universität in München-Großhadern sind in diesem Zusammenhang teils eigenartigen Verbindungen nachgegangen. So haben epidemiologische Studien einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Herzinfarkten bzw. plötzlichem Herztod und un-

gewöhnlich hohen Partikelkonzentrationen in der Luft hergestellt, wie sie beispielsweise an Tagen mit hohem Verkehrsaufkommen und Inversionswetterlage anzutreffen sind. Eine plausible Wirkungskette für dieses Phänomen lässt sich wissenschaftlich nicht darstellen, wohl aber gibt es Vermutungen, dass feine und ultrafeine Stäube hierbei eine Rolle spielen könnten. Eine mögliche Erklärung: Wenn im Tierversuch bestimmte Nanopartikel in hohen Konzentrationen unmittelbar in den Blutkreislauf gespritzt wurden, reagierten die Blutplättchen so, dass das Blut schneller gerann, was das Thromboserisiko erhöht und Infarkte wahrscheinlicher macht. Wenn für die Feinstaubproblematik typische Nanopartikel direkt auf die Zellen der Herzmuskulatur und des Herzreizleitungssystems einwirkten, kam es zu einer Veränderung des Kalziumshaushaltes, sodass sich der Herzmuskel nicht mehr so stark zusammenziehen konnte. Da auch die bioelektrischen Aktivitäten, die das Herz schlagen lassen, von der Kalziumionen-Konzentration mitbestimmt werden, könnten Nanopartikel somit prinzipiell zu Herzrhythmus-Störungen beitragen. Inwieweit diese Experimente auf den Realfall übertragbar sind, ist allerdings derzeit noch völlig unklar. Die entsprechenden Studien sind in der wissenschaftlichen Fachszene umstritten.

Aber auch Nanopartikel, die die Lungenbläschen nicht verlassen, können Einfluss auf das Herz nehmen, indem sie auf Rezeptoren an der Oberfläche der Lungenbläschen einwirken, die das vegetative Nervensystem beeinflussen und damit auch den Herzrhythmus. Der kann dann weniger variabel werden, sodass das Herz nicht mehr angemessen auf wechselnde Leistungsanforderungen reagiert.

Als dritte Wirkungskette für hohe Nanopartikel-Konzentrationen, wie sie bei ungünstigen Verkehrsverhältnissen oder Waldbränden auftreten, haben die Wissenschaftler Entzündungsvorgänge identifiziert, die von den Partikeln im Lungengewebe ausgelöst werden und zur Abgabe von Botenstoffen führen. Die setzen die Blutgerinnungsfähigkeit herauf, der Körper mobilisiert seine Abwehrkräfte – Prozesse, die eine raschere Verkalkung der Adern fördern.

Unbestritten ist daher, dass bestimmte Staubpartikel, die über längere Zeiträume und in hohen Konzentrationen mit dem menschlichen Organismus in Kontakt treten, einen gesundheitsschädlichen Einfluss ausüben können. Dies gilt auch für bestimmte industriell hergestellte Nanopartikel, sodass eine Exposition von Arbeitnehmern, Verbrauchern und der Umwelt möglichst vermieden werden sollte (s. Risikomanagement S. 46 ff.)



Nanopartikel können im Gefäßsystem des Menschen entzündliche Reaktionen hervorrufen.

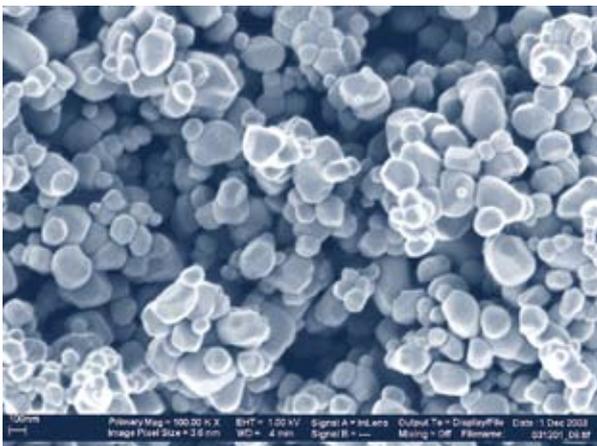
Wirkungen von Nanopartikeln auf die Haut

Nanopartikel tauchen in immer mehr Produkten auf, deren Verwendungszweck es ausdrücklich ist, in einen engen Kontakt mit dem menschlichen Körper zu geraten, wie Zahncreme oder Sonnenmilch. NANODERM ist ein von der EU finanziertes internationales Projekt unter Beteiligung von zwölf Instituten, das sich der Erforschung von in diesem Zusammenhang möglichen Risiken gewidmet hat.

Gesunde Haut ist eine zuverlässige Barriere gegen Nanopartikelpenetration. Was wir nicht recht wissen, ist, was passiert eigentlich bei einer von einem Sonnenbrand geschädigten Haut, also wenn bereits die Hautfetzen runter hängen, und Sie schmieren sich dann erst ein. Ich kann mir nicht vorstellen, dass man keinen Kontakt mit vitalem Gewebe hat, und ich würde also sehr stark davon abraten, so etwas zu tun.

Prof. Dr. Tilman Butz, Koordinator des EU-Projektes NANODERM

Titandioxidpartikel in der Sonnenmilch. Die Substanz filtert effektiv schädliches UV-Licht heraus, ohne sichtbar zu sein. In europäischen Kosmetikprodukten werden die anderenorts gewünschten photokatalytischen Eigenschaften des Titandioxids durch Beschichtung der Partikel, etwa mit Silizium, unterdrückt.



Interview mit Prof. Dr. Tilman Butz, Leiter des Instituts für Nukleare Festkörperphysik, Universität Leipzig, Koordinator des EU-Projektes NANODERM

Wie kann man Nanopartikel in der Haut nachweisen?

Eine sehr leistungsfähige Methode ist die hochauflösende Transmissions-Elektronenmikroskopie. Dazu brauchen Sie Hautquerschnitte, also man muss Hautproben nehmen, Biopsien, Hautstanzzyylinder, und das auf sehr dünne Hautschichten herunter schneiden. Sehr dünn heißt etwa ein Tausendstel eines Haardurchmessers. Mit der hochauflösenden Transmissions-Elektronenmikroskopie können Sie dann einzelne Nanopartikel sehen. Die Nanopartikel in Sonnencremes sind typischerweise etwa 20 nm groß, und man kann, wenn man dafür ausgerüstet ist, auch feststellen, woraus diese Partikel bestehen. Das ist sicher keine Routinemethode, man braucht schweres Gerät. Sehr aufwändig ist auch die Präparation der Proben, und es besteht die Gefahr, dann auch Präparationsartefakte zu sehen. Man sieht außerdem nur sehr kleine Ausschnitte, und hat keinen großen Überblick über die Hautquerschnitte, sondern eben einen tiefen und kleinen Ausschnitt.

Als nächste Methode würde ich die Ionenmikroskopie nennen, besser bekannt unter dem Namen Particle Induced X-Ray Emission, PIXE. Man schießt dabei mit Ionen, vorzugsweise Protonen, auf Hautquerschnitte, diesmal nicht mehr ganz so dünn, sondern im Bereich von einigen Mikrometern. Man hat hier nicht mehr die Möglichkeit, einzelne Partikel nachzuweisen, aber der Vorteil ist, Sie können große Areale absキャンen und dann in Gebiete hineinzoomen, die interessant erscheinen.

Die Protonen haben eine höhere Eindringtiefe?

So ist es, die Penetration von Protonen ist erheblich größer als von Elektronen, also kann man auch dickere Proben untersuchen. Die Kombination dieser beiden mikroskopischen Techniken ist aus meiner Sicht schon sehr gut. Es gibt dann als weitere Methode die sogenannte Laser Scanning Mikroskopie, die erfordert, dass Sie Partikel haben, die mit Fluoreszenzmarkern versehen sind, die die Partikel sichtbar machen. Das ist nicht unproblematisch, weil Sie die Fluoreszenzmarker jeweils stabil an die Partikel

binden müssen, sonst wird ihnen was Falsches angezeigt. Aber es ist ansonsten eine sehr, sehr effiziente Methode, die auch dreidimensionale Bilder mit einer gewissen Tiefenauflösung produzieren kann. Also diese drei Techniken halte ich für hochinteressant, eine weitere ist die Verwendung von radioaktiv markierten Partikeln und Autoradiographie. Natürlich geht das nur an Hautexplantaten. Das ist bislang wenig eingesetzt worden.

Was macht man, wenn so aufwändige Techniken nicht zur Verfügung stehen?

Sehr weit verbreitet ist das sogenannte Tape-Strippen: Sie nehmen einen Klebestreifen, so wie Tesafilm, und können die Hornhaut Schicht für Schicht abtragen und analysieren, was Sie abgetragen haben. Sehr einfach und preiswert, aber gibt letztlich wenig Tiefeninformation, weil Sie Hautfalten, Haarfollikel und dergleichen einfach mitmessen, und es wird Ihnen eigentlich eine tiefere Penetration vorgegaukelt als in der Regel vorliegt. Die letzte Technik: sogenannte Franz-Diffusionszellen. Sie nehmen ein Hautexplantat, spannen es in eine Zelle ein. Auf der einen Seite wird das Material zugegeben, das Sie auf die Haut auftragen wollen, auf der anderen Seite wird in einem Puffermedium gesammelt, was durch die Haut durchgewandert ist. Dieses Verfahren ist Standard aber auch fehleranfällig. Wenn Sie nicht wissen, über welche Pfade das Material penetriert, ist die Aussagekraft nicht sehr groß. Nehmen Sie an, Sie haben ein Haarfollikel angeschnitten, dann haben Sie einen kleinen Kanal gemacht, durch den das Material geht. Oder Sie haben beim Aufspannen die Haut verletzt, dann wandert es durch die Verletzung. Also das sind die wesentlichen Techniken. Andere erfordern, dass Sie Hautproben nehmen, Das ist nichts, was Sie in vivo unter Schonung der Haut durchführen können. Dafür gibt es bislang keine Technik.

Ist die gesunde Haut eine zuverlässige Barriere?

Ja, sie ist eine zuverlässige Barriere gegen Nanopartikelpenetration. Nach allem, was wir wissen, ist das Penetrieren in die Hornhaut ein mechanischer Vorgang. Man reibt mechanisch die Partikel ein. Die obere Schicht der Hornhaut ist ähnlich wie Blätterteig, lose Corneozytenschichten, und man reibt dazwischen. Der untere Teil der Hornhaut, das Compactum, ist eher vergleichbar mit Buchseiten, die noch nicht nass geworden sind. Und eine Emigration in das Compactum haben wir nicht festgestellt. Also gesunde Haut ist eine zuverlässige Barriere. Es gibt allerdings zwei oder drei Publikationen, die Anlass zur Sorge geben. Bei starker mechanischer Bean-

spruchung, wenn man die Haut ein paar 1000 Mal um 45° in die eine und 45° in die andere Richtung dehnt, hat man tiefere Penetration festgestellt.

Und wie verhält sich kranke Haut?

Dazu gibt es leider noch nicht viele Informationen. Bei der Schuppenflechte muss man sich vorstellen, dass hier die Proliferation, also die Hauterneuerung, exorbitant gesteigert ist. Das führt dazu, dass Sie statt 15 µm Hornhaut über 100 µm haben, also deutlich größer, und abgestorbene Zellen neben lebenden Zellen vorfinden. Und wenn Sie das mechanisch beanspruchen, ist das, als ob Sie auf ein aufgeschnittenes französisches Croissant, einen Blätterteig, kalte Butter aus dem Eisschrank drauf streichen: Sie machen alles kaputt. Also dann haben Sie Kontakt mit lebenden Zellen. Dann Läsionen, Mikroläsionen, eine offene Wunde, die Sie selbst nicht wahrnehmen, weil sie so klein ist, ist ganz klar ein Pfad, wo Sie Nanopartikel in Kontakt mit vitalem Gewebe und auch vitalen Zellen haben können. Also von einer Anwendung auf offenen Wunden ist sicherlich stark abzuraten. Was wir nicht recht wissen, ist, was passiert eigentlich bei einer von einem Sonnenbrand geschädigten Haut, also wenn bereits die Hautfetzen runter hängen, und Sie schmieren sich dann erst ein. Ich kann mir nicht vorstellen, dass man keinen Kontakt mit vitalem Gewebe hat, und ich würde also sehr stark davon abraten, so etwas zu tun.

Es gibt natürlich noch andere Pfade, die diskutiert werden, allen voran die Haarfollikel; wir haben Nanopartikel in Haarfollikeln gefunden, etwa einen halben Millimeter tief. Allerdings nicht in vitalem Gewebe um die Partikel. Es scheint so zu sein, dass auch die Auskleidung der Haarfollikel eine gute Barriere ist. Die letzte Möglichkeit wäre über Schweißdrüsen, oder Talgdrüsen. Wir haben gelegentlich Querschnitte von Schweiß- und Talgdrüsen gesehen, aber keine Partikel darin. Bei Schweißdrüsen ist es mit Sicherheit so, dass das Milieu falsch ist. Die Formulierungen von Sonnenschutz Cremes sind hydrophob, also mehr fettartig, es ist fast undenkbar, dass man dort in die Schweißdrüsen etwas hineinreibt, dass nicht sofort wieder ausgespült wird. Bei den Talgdrüsen wäre es eher denkbar, aber wir haben es nicht gesehen. Ich würde es in jedem Fall als wenig relevant bezeichnen.

Öffentliche Wahrnehmung und gesellschaftliche Debatte

Nanotechnologie wird gerne als die Kunst definiert, Strukturen zwischen einem und 100 Nanometern, die für eine gewünschte Funktion unverzichtbar sind, planvoll zu nutzen. Nach dieser Sichtweise haben Physiker und Chemiker Nanotechnologie schon lange betrieben, ohne sie so zu nennen.

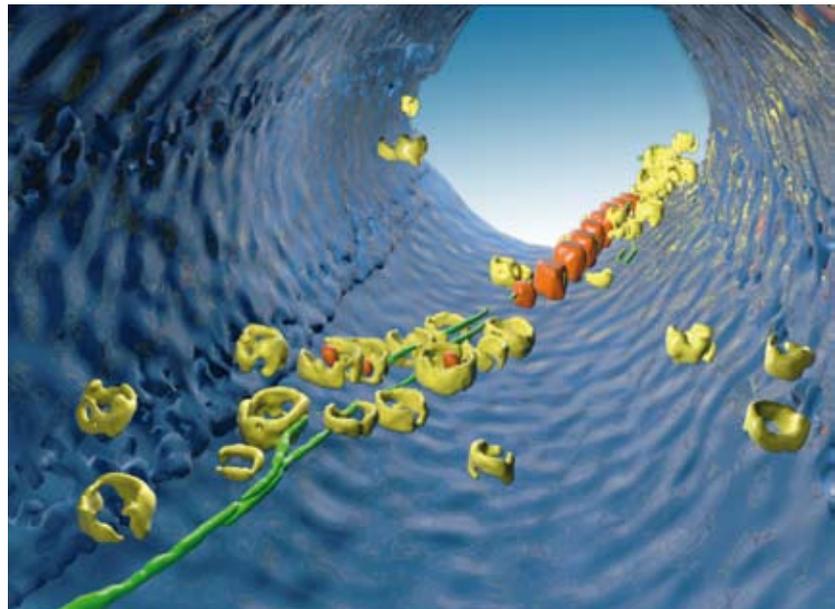
Doch unabhängig von exakten Definitionen, wie sie derzeit in internationalen Normungsgremien erarbeitet werden, wird für die weitere Entwicklung entscheidend sein, wie die Nanotechnologie in der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Der Begriff der Nanotechnologie entwickelte sich durch ein Zusammenspiel neuer Denkkonzepte und Visionen, die sich mit der Nutzung des Nanokosmos beschäftigen, begleitet von einer immer leistungsfähigeren Geräte- und Analysetechnik.

Nano – die Anfänge

Der erste, der im Nanokosmos wahre Schätze vermutete, war Richard Feynman, ein legendärer amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger. In seinem Vortrag von 1959 „There is Plenty of Room at the Bottom“ („Viel Platz am Grunde der Materie“), breitete er vor einem staunenden Publikum die Umrisse eines neuen Kosmos, des Nanokosmos, aus:

„Welche Eigenschaften würden Materialien haben, wenn wir die Atome wirklich nach unseren Vorstellungen anordnen könnten? Es wäre sehr interessant, das einmal theoretisch zu untersuchen. Ich kann mir nicht genau vorstellen, was geschehen würde. Aber ich habe keine Zweifel: Bei einer gewissen Kontrolle über die Anordnung sehr kleiner Dinge bekommen wir zweifelsohne eine weitaus größere Palette möglicher Eigenschaften der Stoffe, und damit auch viel mehr Möglichkeiten, was wir tun können.“

Etwa aus Materialien, die lange Zeit eher unerwünschte Beigaben waren, HighTech-Artikel wie



Kryo-Elektronentomografie des Inneren eines magnetotaktischen Bakteriums mit einer Kette aus Magnetosomen. Das sind Nanokristalle aus Magnetit in einer „Form“ aus Proteinen.

Laserdioden machen. Die Liste der Möglichkeiten ist sehr, sehr lang.

Den Sinn des breiten Publikums für Nanotechnologie aber prägte ein Film, die „Phantastische Reise“ von 1966, in dem sich ein Team mitsamt einem U-Boot millionenfach verkleinern ließ, um durch die Kanüle einer Spritze in den Körper eines Geheimnisträgers zu kommen, wo es ein Blutgerinnsel zu entfernen galt. Das war wissenschaftlich völlig unsinnig, aber seither gibt es Roboter in der Blutbahn.

Dann entwickelten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer das Rastertunnelmikroskop, wofür es 1986 den Nobelpreis für Physik gab. Das vordem so abstrakte Konzept vom Atom kam zum Greifen nah.

Im gleichen Jahr, 1986, veröffentlichte Eric Drexler, ein amerikanischer Ingenieur und Fantast, sein Buch „Engines of Creation“, in dem die Möglichkeit nanoskaliger Roboter, Nanobots, oder auch Assembler, vorgestellt wurde, die, wenn sie außer Rand und Band gerieten, die Welt womöglich in Grey Goo verwandeln würden, Grauen Schmer. Weil Drexler zugleich aber auch ein nanotechnologisches Pa-

radies in Aussicht stellte, wuchs ihm eine stattliche Gemeinde von Anhängern zu.

Nano-Hype

Drexlers Schriften waren es wohl, die im folgenden die Begeisterung überschäumen ließen, dabei hatte 1982 schon der polnische Technik-Philosoph Stanislaw Lem in seinem Buch „Lokaltermin“ Nanobots vorweg genommen, er nannte sie (in der Übersetzung) „Gripser“. In „Lokaltermin“ wenigstens wollten die Gripser nur Gutes, und sie steckten überall, auch in Oberhemden. Und wollte der Besitzer eines solchen – in Lems Vision – eine Schandtat begehen, etwa einen Mitmenschen erdolchen, versteifte sich das nanotechnologische Oberhemd Dank massenhaft miteinander verschränkter Gripser so kraftvoll, dass die dunkle Absicht scheitern musste. Die witzigste und intelligenteste Version der Nanotechnologie-Vorschau war zugleich die am wenigsten verbreitete. Lem hatte kein Paradies in Aussicht gestellt.

Ende der Nanobots

Drexlers Bewegung erhielt 2001 einen empfindlichen Dämpfer, als Richard Smalley, Chemienobelpreisträger des Jahres 1996, das griffige Gleichnis von den fetten und klebrigen Fingern publik machte, als die die atomaren Greifer im Nano-Kosmos nun mal erscheinen müssten. Wenn – im Nanomaßstab – die Greifer so plump waren wie das zu Greifende, konnte es mit den Nanobots nichts werden, so wenig wie sich mit Topfhandschuhen Krabben puhlen lassen. Heute (2007) findet Drexler das auch. Die Gefahr, dass sich die Menschheit in Grey Goo, Grauem Schmerz, auflöst, ist erst einmal gebannt.

Im Jahre 2002 regte der Bestsellerautor Michael Crichton die Fantasie der Menschen noch einmal mit seinem Buch „Prey“, zu deutsch „Beute“ an, in dem sich Schwärme von Nanobots folgenschwer über ihre Erzeuger her machten. Etwas Ähnliches hatte Stanislaw Lem schon 1964 in seinem Roman „Der Unbesiegbare“ beschrieben, Mikro/Nano mal böse. Das Publikum blieb gelassen.

Inzwischen – 2000 – war potente Kritik von unerwarteter Seite gekommen. Bill Joy, Chief Scientist von Sun Microsystems, hatte im Magazin „Wired“ einen tief pessimistischen Beitrag „Why the future doesn't need us“ (gekürzter deutschsprachiger

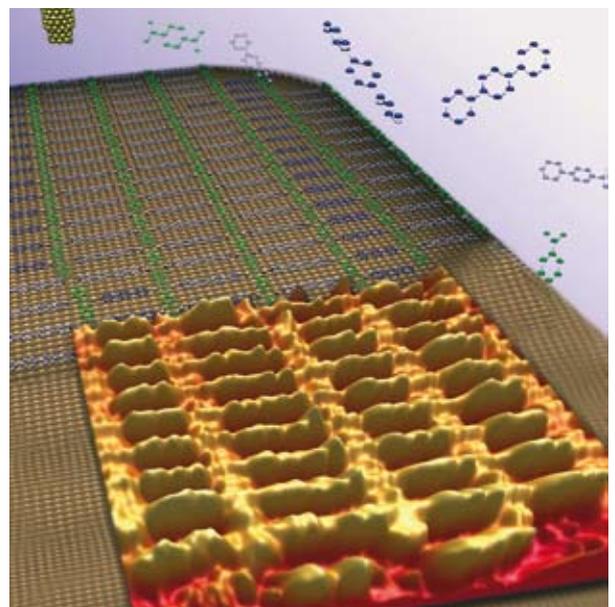
Nachdruck „Warum die Zukunft uns nicht braucht“) über die Folgen moderner Technologie, darunter Nanotechnologie, veröffentlicht:

„Der Preis des faustischen Handels, den uns die Nanotechnologie beschert, ist ein schreckliches Risiko, die Gefahr nämlich, dass wir die Biosphäre zerstören, von der alles eben abhängt.“

Die Nanotechnologie-Szene glaubte zu diesem Zeitpunkt noch an das Konzept der selbstvermehrungsfähigen Nanobots, und das war genau der Punkt, der Bill Joy beunruhigt hatte – was die Kritik relativiert. Ohnehin kann man ihr entgegensetzen, dass schon die aus dem 20. Jahrhundert übernommenen Technologien großenteils nicht zukunftsfähig sind und dringend modernisiert werden müssen, dem Stand der Entwicklung entsprechend auch durch Nanotechnologie. Wie Lem schon sagte: Gegen eine schlechte Technik hilft nur eine gute Technik.

Aber Bill Joys und anderer Kritik hatte ihr Gutes: Sie stieß eine ernsthafte, breite Debatte über Chancen und Risiken der Nanotechnologie an. Und wie die Erfahrung gezeigt hat, sind alle Technologien auf eine kritische Begleitung angewiesen. Die Nanotechnologie wird keine Ausnahme machen. Allerdings muss gerade bei der Nanotechnologie sehr darauf

Tunnelmikroskopisches Bild selbstorganisierter nanometergroßer Molekülkomplexe auf einer Kupferoberfläche (Hintergrund: Simulation). In Selbstorganisationsvorgänge wie diesen setzen die Nanotechnologen große Hoffnungen, von den „Assembler“-Visionen Drexlers ist diese Technik aber weit entfernt.



geachtet werden, auf welchen ihrer Zweige die Kritik sich bezieht. Von einer mit Nanoüberzügen kratzfest gemachten Brille wird kaum je eine Gefahr für die Menschheit ausgehen. Auch für die Folgen der Nanoelektronik ist nicht die Toxikologie sondern die Kulturkritik zuständig.

Ein Zweig der Nanotechnologie indessen verdient aus nahe liegenden Gründen besondere Beachtung: die Nanopartikeltechnologie. Diese war denn auch der Hauptgegenstand des 2004 erschienenen Reports „Nanotechnologie: Kleine Teile, große Zukunft?“ der schweizerischen Rückversicherungsgesellschaft Swiss Re, der große Beachtung fand:

“Die bloße Präsenz der Partikel, auch wenn sie überall auftreten sollten, stellt an sich keine Bedrohung für Mensch und Umwelt dar. Nur wenn sich gewisse Eigenschaften der Partikel als schädlich herausstellen sollten, müsste man von einer Gefahr sprechen. Da aber entsprechende Studien fehlen, lässt sich heute kaum sagen, ob und inwiefern Nanopartikel oder damit hergestellte Produkte eine konkrete Gefahr darstellen.“

Im Juni 2005 folgte eine ebenso gewichtige Studie der Allianz Versicherungs-AG. Das eigentliche Risiko der Nanotechnologie, konstatierte die Allianz, bestünde in der Lücke, die zwischen ihrer dynamischen Entwicklung und dem Wissen um mögliche Gefahren und den nötigen Sicherheitsstandards zur Vermeidung negativer Auswirkungen besteht.

Nano-Fakes

Unterdessen richteten sich an die Nanotechnologie nach wie vor überspannte Erwartungen, sodass zusammen mit der Risikodiskussion das öffentliche Interesse entstand, das Medienberichte weithin vernehmbar machen. So fand im März 2006 die Geschichte von Magic Nano – einem Glas- und Keramikpflegemittel, das nach dem Einatmen des Sprays gravierende Gesundheitsstörungen hervorrief – allein deshalb ein internationales Medienecho, weil es Magic Nano hieß. Dabei enthielt das Produkt gar keine Nanopartikel, was das Bundesinstitut für Risikobewertung nach der Anhörung von Experten und Zulieferern bestätigte. Der Hersteller hatte nach eigenen Angaben lediglich darauf hinweisen wollen, dass sich nach dem Versprühen seines Produktes ein hauchdünner Film auf Glas- und Keramikflächen bildete, Nano halt. Magic Marketing liegt als Deutung näher. Selbst der Film war nicht Nano sondern Mikro.

Der Fall nährte die Furcht, die selbst ausgewiesene Nanotechnologie-Befürworter vor einer unregulierten Verwendung von Nanopartikeln haben, denn: Was passiert, wenn ein leichtsinniger Produzent etwa von Kosmetika ohne jede Prüfung Nanopartikel in seine Rezepturen einrührt, nur um mit Nano werben zu können? Partikel, die sich hinterher als schädigend herausstellen? Die ganze Branche würde in Verruf geraten, die attraktive Wirkung des Etiketts Nano sich ins Gegenteil verkehren.

Aber auch die Kritiker müssen fürchten, auf Glatt eis zu geraten und Nano-Mythen aufzusitzen.

Nano-Mythen

Die Nanotechnologie ist so neu, die nanotechnologische Personaldecke – auch der Kritiker – so dünn, die Sicherheitsdebatte so frisch, dass ein fruchtbarer Boden für Mythen entstanden ist. Ein Beispiel: Im Oktober 2004 erschien in den Proceedings of the Ninth Asia Pacific Physics Conference (9th APPC), Hanoi, Vietnam, 25-31 eine Veröffentlichung, der gemäß etwa 1200 Reis-Saatkörner der Sorte *Thai purple* mit niederenergetischen Stickstoff-Ionen beschossen worden waren – eine Routine-Prozedur. Dann hatte man die Saatkörner auskeimen und die Setzlinge in der Erde bis zum Reifestadium auswachsen lassen. Zwei der Pflanzen hatten ihr Erbgut verändert: Während die Sorte normalerweise purpurfarben ist, waren Blätter und Halme der Mutanten grün.

Jetzt bekam die – nach allen Regeln der Logik gänzlich unschuldige – Nanotechnologie ihr Fett weg. Ein Autor der nanotechnologie-kritischen kanadischen Organisation ETC schrieb:

„Zum Forschungsprojekt gehört das Bohren eines Nanometer kleinen Lochs [...] durch Wand und Membran einer Reiszelle, um ein Stickstoff-Atom einschleusen zu können. Das Loch wird mit einem Strahl sich schnell bewegender Partikel gebohrt, dann wird das Stickstoffatom durchgeschossen, um die Erbsubstanz der Reiszelle zu verändern.“

Die Tat, die in keiner Weise schändlich, so aber auch nicht stattgefunden hatte, wurde von der Kritik als Indiz für die Verwegenheit der Nanotechnologie-Forschung gewertet und fand in dieser Deutung Eingang selbst in die Risikoanalysen großer, seriöser Organisationen.

Dabei ist die Bestrahlung von Saatgut zur Erzielung von Mutationen – die auch häufig von Natur

ausvorkommen, nur nicht so dicht hintereinander – Routine. Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft zitiert, 2006, „Bis heute wurden mit Hilfe der Mutationszüchtung über 1800 neue Sorten auf den Markt gebracht. In Italien bedecken Hartweizen-Mutanten (für Nudeln) etwa 70 % der Durum[Hartweizen]-Anbaufläche.“

Das kann man kritisieren, wenngleich Pflanzenzüchter immer schon Mutationen genutzt haben; der Nanotechnologie anlasten aber kann man das nicht.

Nano-Dispute

Umweltschutzorganisationen

Natürlich haben auch die Umweltschutzorganisationen das Thema aufgegriffen. Deutschlands größte, der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, BUND, fordert – wie andere – eingehende Studien zur Sicherheit von Nanopartikeln, sieht aber auch durchaus positive Möglichkeiten der Nanotechnologie und verweist im übrigen darauf, ...

„... dass (vordergründige) Rohstoff und Umwelt ent-



Der erste Hybrid Smart. In den USA wird von hybrid technologies auch eine rein elektrische Version mit Li-Ionen-Akku angeboten.

lastende Effekte durch neue Technologien oft lediglich dazu geführt haben, eigentlich nötige Verhaltensänderungen auszublenden. Als Beispiel sei auf die Einführung des Katalysators seit Mitte der 80-er Jahre verwiesen. Um eine vergleichsweise saubere Atemluft zu erreichen, hätte heute 80 % weniger Auto gefahren werden müssen. Die vordergründige Fokussierung auf technische Lösungen, die als die Zukunftstechnologien verkauft werden, verstellt also den Blick auf zukunfts-

hige Entwicklungen, deren Lösungen an den wirklichen Ursachen – wie den nicht zukunftsfähigen Lebensstilen der hoch entwickelten Industrienationen – ansetzen müssen.“

So wäre in der Tat nicht viel gewonnen, wenn durch Nanosiebe kalt sterilisierte Milch – jetzt über längere Strecken transportfähig – nicht mehr nur aus dem deutschen Alpenvorland nach Brandenburg gekarrt würde, das seine eigenen Kühe hat, sondern über die Alpen, wie das mit vermeintlich edlem Mineralwasser geschieht. Nordseekrabben nehmen aus Kostengründen zum Puhlen einen Umweg über Marokko, bevor sie in norddeutschen Supermarktregalen landen. Nanotechnologie wird an solchen Kapriolen nichts ändern, solange sich damit Geld verdienen lässt.

Verbrauchervotum

Eine im Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) durchgeführte Verbraucherkonferenz zur Anwendung der Nanotechnologie in den Bereichen Lebensmittel, Kosmetika und Textilien kommt in ihrem Schlussdokument, dem Verbrauchervotum, u. a. zu folgenden Aussagen:

„Es wird als bedenklich eingeschätzt, dass kaum Messverfahren existieren. Wir stellen fest, dass es Grenzwerte für die Risikobewertung von Nanopartikeln bislang nicht gibt. Um eine genaue Kontrolle der Nanopartikel durchführen zu können, fordern wir, dass neue Analyse-

Die Elemente in einer Aerosolprobe können mit der „protoneninduzierten Röntgenemission“ (PIXE) bestimmt werden.





und Messverfahren entwickelt und von unabhängigen Einrichtungen standardisiert werden. Damit können Standards für Arbeitsschutz und Endprodukte festgesetzt und letztendlich Risiken für den Verbraucher vermieden werden. Bei der Risikobewertung muss der gesamte Produktlebenszyklus (Herstellung, Verwendung und Entsorgung) betrachtet werden.“

Auch hier wird durchaus das positive Potenzial der Nanotechnologie gesehen.

Eine weitere Forderung der Verbraucher:

„Wir sind der Auffassung, dass zu wirklich wichtigen Themen in der Nanotechnologie im Lebensmittelbereich geforscht werden muss (z. B. verbesserte Trinkwasseraufbereitung, Qualitätsüberwachung und -sicherung, intelligente (smarte) Verpackungen und Haltbarkeit) und dementsprechende Produkte entwickelt werden sollten.“

Manche Forderungen hätten für die beteiligte Industrie erhebliche Mehrkosten zur Folge:

„Wir fordern eine Kennzeichnungspflicht „Nano“, damit der Verbraucher zum einen ein Wahlrecht hat

Die Atmosphäre der Erde hat sich als sehr verletzlich herausgestellt; allein deshalb scheint eine Modernisierung der Industriegesellschaft dringend geboten, auch durch Nanotechnologie.

und zum anderen eine Täuschung für den Verbraucher vermieden werden kann. Eine Kennzeichnungspflicht erachten wir im Bereich Lebensmittel für besonders wichtig, da hier die Stoffe dem Körper direkt zugeführt werden. ... Wir brauchen ein Zulassungsverfahren für nanoskalige Stoffe in Lebensmitteln sowie in ihren Verpackungen. In diesem Zusammenhang fordern wir, dass bereits zugelassene Stoffe (Siliziumdioxid, Titandioxid, Aluminiumsilikate ...), wenn sie im nanoskaligen Bereich Verwendung finden, erneut überprüft werden (ergänzende Prüfung).“

Verband der Chemischen Industrie, VCI

Der Verband der Chemischen Industrie führt in seinen „Positionen und Empfehlungen zum Umgang mit Nanopartikeln und nanoskaligen Stoffen unter rechtlichen Gesichtspunkten“ u. a. auf (s. a. Interview mit Markus Pridöhl, S. 22):

„Beim Übergang zu Größenordnungen im Nanometer-Bereich können sich die Eigenschaften von Stoffen – sowohl die physikalisch-chemischen Eigenschaften als

auch die biologischen Wirkungen – verändern. Dies ist durch das im Vergleich zum größeren Material zunehmende Oberflächen/Volumen-Verhältnis, die höhere Oberflächenenergie und die kleinere Partikelgröße zu erklären. Diese Veränderung der Stoffeigenschaften bei Nanomaterialien führt derzeit weltweit zu der Fragestellung, ob die geltenden gesetzlichen Vorschriften im Stoffrecht und anderen Rechtsbereichen auch für Stoffe mit Dimensionen im Nanometerbereich ausreichen oder ggf. ergänzende Vorschriften erforderlich sind. [...] Wir meinen, das bestehende Recht reicht zur Gewährleistung des Schutzes von Mensch und Umwelt aus; Änderungen oder Ergänzungen sind nicht erforderlich. [...] denn Ausgangspunkt des geltenden Rechts sind nicht die physikalischen Eigenschaften bestimmter Stoffe, sondern die gefährlichen Eigenschaften von Stoffen und die Exposition von Mensch und Umwelt. Das sich hieraus ergebende Risiko ist durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Diese im geltenden Recht enthaltenen Pflichten sind nicht so eng beschrieben, dass sie nur auf „herkömmliche“ Chemikalien anwendbar wären. Vielmehr erfassen sie auch die Besonderheiten, die bei Nanopartikeln und nanoskaligen Stoffen bestehen.“

Alles in allem sind die Reaktionen der Beteiligten also eher moderat. Lediglich die kanadische etc Group (The Action Group on Erosion, Technology and Concentration) forderte 2003 eine sofortige Einstellung der kommerziellen Produktion von neuen Nanomaterialien:

„Angesichts der Besorgnisse über eine mögliche Kontamination lebender Organismen mit Nanopartikeln schlägt die etc-Gruppe vor, dass die Regierungen ein sofortiges Moratorium über die kommerzielle Produktion neuer Nanomaterialien verhängen und einen transparenten globalen Evaluierungsprozess der Folgen dieser Technologie auf Sozioökonomie, Gesundheit und Umwelt einleiten.“

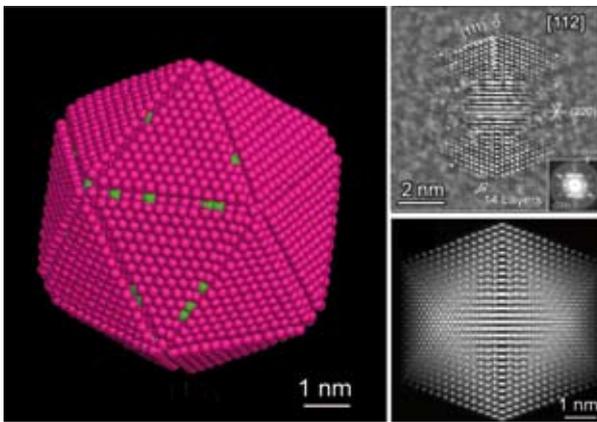
In der Praxis käme die Entwicklung der Nanopartikeltechnologie damit zu einem Ende, was nicht praktikabel wäre.

In der Nanotechnologie finden auf atomarer Ebene vordem getrennte Disziplinen zusammen, wie Mechanik, Elektronik und Biologie, was sehr viel elegantere technische Lösungen möglich macht.



Risikomanagement in der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie gründet auf verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen, was u. a. bedeutet, dass ihre Aussagen durch belastbare objektive Messungen belegt oder verworfen werden. Das dazu notwendige Instrumentarium wächst von Jahr zu Jahr.



Links: Computerrekonstruktion in siebenmillionenfacher Vergrößerung: ein Nanopartikel mit Platinhülle und Eisenkern (grün), ein katalytisch wirksamer Nanomagnet. Moderne Hochleistungselektronenmikroskope erlauben Untersuchungen weit unter ein Nanometer hinaus. Rechts: Die elektronenmikroskopischen Ursprungsbilder.

Nanoanalytik als Grundlage der Risikoanalyse

Viele Aspekte der Nanotechnologie waren schon bekannt, als 1981 Gerd Binnig und Heinrich Rohrer ihr Rastertunnelmikroskop der Öffentlichkeit vorstellten. Das Atommodell etwa, dessen Maßstab ein Zehntel Nanometer ist, war in Physik und Chemie schon lange etabliert, mit dem Rastertunnelmikroskop aber konnte man nun einzelne Atome abbilden und sogar herum schubsen. Das von Binnig in der Folge entwickelte Rasterkraftmikroskop kann mittlerweile subatomare Details auflösen und die gerichteten chemischen Bindungen abbilden, die etwa einen Siliziumkristall zusammenhalten. Diese Mikroskope und ihre zahlreichen Ableger stellten einen konzeptuellen Durchbruch dar, der eine Ideenlawine in Bewegung setzte, die mit dem Begriff „Nanotechnologie“ einen gemeinsamen Nenner hat

Heute sind auch die klassischen Elektronenmikroskope in der Lage, einzelne Atome abzubilden,

die vielfach größeren Nanopartikel ohnehin. Mikroskope, die mit potenziell ionisierenden Strahlen arbeiten, haben auch den großen Vorzug, das man mit ihnen nicht nur die Position von Atomen bestimmen kann, sondern auch, aus welchen Elementen sie bestehen. Denn wenn die Atome nach der Ionisierung wieder in einen elektrisch neutralen Zustand zurückfinden, senden sie charakteristische Strahlung oder Elektronen aus, deren Energie Identität und gegebenenfalls den Bindungszustand verrät.

Für die Nanoanalytik steht also eine große Zahl von Instrumenten bereit, ebenso groß ist aber auch der Raum für Verbesserungen. Denn Elektronenmikroskope und verwandte Instrumente sind groß und teuer, und wie die große Zahl der Rastersonden-Mikroskope untersuchen auch sie nur winzige Areale, was einerseits ja ihr Zweck ist, die Charakterisierung einer größeren Zahl von Partikeln aber sehr zeitaufwändig macht. Zeit freilich ist bei der industriellen Produktion knapp, Änderungen der Qualität der produzierten Nanopartikel etwa müssen sofort erkannt werden, und auch die Risikoforschung möchte an Ort und Stelle schnelle Ergebnisse.

So wird die Belastung mit Feinstäuben und Nanopartikeln am Arbeitsplatz mit so genannten SMPS-Geräten gemessen (Scanning Mobility Particle Sizer), die die Zahl und Größe der Partikel in einem bestimmten Luftvolumen zu bestimmen gestatten. Die elementare Zusammensetzung der Partikel und ihre Form wird dagegen mit Elektronenmikroskopen an herausgefilterten Proben ermittelt. Wünschenswert wäre natürlich ein handliches, bezahlbares Gerät, das alle Informationen zugleich liefert, und das auch noch schnell.

Bei manchen chemischen Prozessen, wie der heterogenen Katalyse, spielen sogar feinste Details der Oberflächen der verwendeten Nanopartikel eine Rolle, was auch für deren Toxizität wichtig ist. Die Nanoanalytik kann solche Fragen beantworten; ihre Verbesserung gilt als Schlüsselement der nanotechnologischen Entwicklung. Bei der Katalyse, um im Beispiel zu bleiben, können sich kleine Verbesserungen in Millionen eingesparter Euro niederschlagen, in großen Mengen vermiedener Schadstoffe oder auch in einem Chemie-Nobelpreis, wie dem für Gerhard Ertl, 2007.

Nanotechnologie-Aktivitäten der Bundesregierung

Die Hightech-Strategie der Bundesregierung weist die Nanotechnologie als eines der aussichtsreichsten Technologiefelder aus, auf dem spätestens ab 2015 die große Mehrheit aller bedeutenden Innovationen entsteht. Mit der 2006 initiierten „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ wurde erstmals ein einheitlicher und ressortübergreifender Aktionsrahmen gesetzt, der auch die verantwortungsvolle und sichere Nutzung von Nanomaterialien betont. Es wurde eine Reihe einschlägiger Initiativen und Programme gestartet, um das fraglos vorhandene toxische Potenzial von Nanomaterialien erfassbar und damit beherrschbar zu machen. Ein Kernstück der Initiative sind die in einem Cluster zusammengefassten Projekte NanoCare, INOS und TRACER, in denen Wissenschaft und Industrie unter Beteiligung der Öffentlichkeit zusammenarbeiten; Förderung bis 2009: ca. 8 Millionen €.

Das BMU hat in einer Kooperation mit weiteren Ministerien und Bundesbehörden einen Nanodialog initiiert, bei dem Industrie, Wissenschaftler und beteiligte gesellschaftliche Interessengruppierungen Chancen und Risiken im Umgang mit Nanomaterialien identifizieren und daraus Forschungs- und Handlungsbedarf für offene Fragestellungen ableiten. Das im Geschäftsbereich des BMELV angesiedelte Bundesinstitut für Risikobewertung hat durch Experten-Befragungen mögliche Risiken nanotech-

Der nanoTruck bringt Nano-Informationen unter die Menschen und erfreut sich dabei großen Zulaufs.



nologischer Anwendungen in den Alltagsbereichen Lebensmittel, Kosmetika und Bedarfsgegenstände sowie die Einstellung von Verbrauchern zum Umgang mit Nanoprodukten untersucht. Im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit werden die Risiken nanoskaliger Partikel in Arzneimitteln und Medizinprodukten bewertet, auch für klinische Prüfungen und Zulassungen.

Darüber hinaus entwickelt die Bundesregierung unter Koordinierung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin eine ressortübergreifende Forschungsstrategie, in deren Rahmen insbesondere die Gesundheits- und Umweltrisiken von unlöslichen Nanopartikeln angesprochen werden. Die Strategie umfasst unter anderem die Entwicklung standardisierter Messverfahren für Nanopartikel, die Erhebung von Informationen zu möglichen Expositionen mit ihren toxikologischen und ökotoxikologischen Wirkungen sowie die Ausarbeitung einer risikobezogenen Test- und Bewertungsstrategie.

Die Bundesregierung legt größten Wert auf den Dialog mit einer gut informierten Öffentlichkeit und unterstützt zu diesem Zweck Konferenzen, gibt Newsletter heraus, richtet Internetportale ein und veröffentlicht Analysen und Pressebeiträge, die über die neuesten Forschungsergebnisse und Risikodebatten informieren.

Ein schon fast populäres Informationsinstrument ist der nanoTruck, der unter dem Motto „nanoTruck: Reise in den Nanokosmos – die Welt kleinster Dimensionen“ bundesweit unterwegs ist und jährlich mehr als 100.000 Besucher erreicht. Mit an Bord: die BMBF-Broschüre „Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen“, fast schon eine Art Standardwerk, das von der Europäischen Union in alle Sprachen der Mitgliedstaaten, aber auch in Arabisch, Chinesisch und Russisch übersetzt wurde. Erfreulich, denn die internationale Abstimmung hat aufgrund der Komplexität und der weitreichenden Konsequenzen der Nanotechnologie einen besonders hohen Stellenwert. Die Bundesregierung beteiligt sich daher intensiv an internationalen Aktivitäten im Zusammenhang mit einem verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien, beispielsweise im Rahmen des Aktionsplanes der Europäischen Kommission, der „Working Party on Manufactured Nanomaterials“ der OECD oder des „International dialogue on responsible research and development of nanotechnology“. Ziel ist es, die weltweit mittlerweile sehr umfangreichen Aktivitäten in der Sicherheitsbewertung von Nanomaterialien zu koordinieren und international harmonisierte Verfahren und Standards zu etablieren.

Nanosicherheitsforschung des BMBF: NanoCare

Um die Verträglichkeit von Nanomaterialien sicherstellen zu können, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung zusammen mit der Industrie das Forschungsprogramm NanoCare aufgelegt. Das BMBF stellt für NanoCare in den nächsten drei Jahren rund 5 Millionen € zur Verfügung, die Industrie beteiligt sich selbst noch einmal mit 2,6 Millionen €. NanoCare wird neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die Auswirkungen von Nanopartikeln auf Umwelt und Gesundheit zu Tage fördern und diese einer breiten Öffentlichkeit vermitteln.

„Wenn wir über gesundheitliche Risiken sprechen, dann sehen eigentlich alle an den entsprechenden Forschungsprojekten Beteiligten die Probleme bei den Partikeln. Was den Forschungsbedarf angeht: Wir müssen für alle wichtigen Materialien Studien durchführen, die die möglichen Expositionen und deren biologische Wirkungen klären.“

Prof. Dr. Harald Krug, NanoCare-Koordinator.

Die Projektpartner aus Industrie und Wissenschaft wollen zu diesem Zweck neuartige, streng definierte Nanopartikel herstellen und in Modellsystemen auf ihre toxikologischen Wirkungen untersuchen. Beteiligt sind 15 Partner. Seitens der Industrie sind es die Evonik Industries AG, BASF AG, Bayer MaterialScience AG, Solvay, die ItN Nanovation AG und die SusTech GmbH & Co. KG. Von wissenschaftlicher Seite beteiligen sich die Universitäten Münster, Bielefeld und Saarbrücken sowie das Forschungszentrum Karlsruhe. Weitere Partner sind die IUTA e. V., das Institut für Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur biologischen Emissionsbewertung und das Institut für Gefahrstoff-Forschung der Bergbau-Berufsgenossenschaft an der Ruhr-Universität Bochum. Für die aktive Kommunikation der Projektergebnisse sind die VDI Technologiezentrum GmbH und die Dechema beteiligt. Die Koordination des Projekts liegt beim Forschungszentrum Karlsruhe.



Interview mit NanoCare-Koordinator Prof. Dr. Harald Krug vom Institut für Toxikologie und Genetik am Forschungszentrum Karlsruhe.

Was ist das Besondere am Forschungsprojekt NanoCare, welche Zielsetzung hat es?

Die Zielsetzungen von NanoCare sind insofern etwas Besonderes, als dass wir ein sehr großes, integriertes Forschungsprogramm haben, das im Wesentlichen aus drei Teilen besteht. Das Erste ist Wissenserzeugung, sprich: Wir etablieren relevante und evaluierte Testsysteme, um die heute schon verwendeten und gerade in der Entwicklung befindlichen Nanopartikel auf eine mögliche biologische Gefährdung zu testen. Wir standardisieren diese Tests schon innerhalb unseres Konsortiums, wir sind ja immerhin fast 10 Partner, die auf biologischem Sektor auch arbeiten, das heißt 10 verschiedene Labors über Deutschland verteilt, müssen die gleichen Methoden anwenden. Also wir haben einen großen Bereich Wissenserzeugung, wo wir völlig neue Daten zur möglichen Gefährdung und auch zu möglichen Expositionen generieren, auch zu Nanopartikeln am Arbeitsplatz. Die zweite Säule ist das Wissensmanagement, d. h., das erworbene Wissen wird gesammelt, aufgearbeitet, intern verarbeitet, in einer internen Datenbank abgelegt, und dann wird dieses aufgearbeitete Wissen in die dritte Säule übertragen. D. h., wir werden auf verschiedenen Veranstaltungen, auch mit Publikationen und unserer großen eigenen Datenbank die gewonnenen Informationen unter die Leute bringen, in entsprechend aufgearbeiteter Form.

Auf welchen Gebieten der Nanotechnologie – das ist ja ein weites Feld – sehen Sie Forschungsbedarf, was eventuelle Risiken angeht?

Wenn wir über gesundheitliche Risiken sprechen, dann sehen eigentlich alle an den entsprechenden Forschungsprojekten Beteiligten die Probleme bei den Partikeln. Was den Forschungsbedarf angeht: Wir müssen für alle wichtigen Materialien Studien durchführen, die die möglichen Expositionen und deren biologische Wirkungen klären. Da haben wir bei der Nanotechnologie und den Nanomaterialien die große Schwierigkeit, dass wir jedes Material für sich, unabhängig voneinander beurteilen müssen. Weil es bei den Materialien eben so viele verschie-

dene Variationen, Größen und auch Oberflächen gibt, die wirksam werden können. Und von daher kann man die erhaltenen Ergebnisse nicht verallgemeinern, was aber auch schon für viele Chemikalien gilt.

Was ist denn an planvoll künstlich erzeugten Nanopartikeln so anders als an natürlichen oder unbeabsichtigt freigesetzten Nanopartikeln?

Im Zusammenhang mit den synthetisch erzeugten Materialien sehe ich zwei wesentliche Aspekte von Gefährdungen. Zum einen betrifft das die ganz neuen Sachen, zum Beispiel Fullereene oder Nanoröhrchen, die so in der Natur in Massen nicht vorkommen. Wenn ich die in größeren Mengen produziere, dann habe ich praktisch eine ganz neue Qualität und eine neue Belastung. Und das darf ich natürlich nur tun, wenn ich sicher bin, dass das keine schwerwiegenden nachteiligen Folgen hat. Das ist also der eine Punkt: Neue Materialien, wo ich wirklich etwas ganz Neues habe. Der zweite Punkt: Es gibt ja auch natürliche Umgebungspartikel, die durchaus so klein sind, dass man sie als Nanopartikel bezeichnen kann. Und es gibt eine Menge Staub, der auf der Erdoberfläche aufgewirbelt wird, der teilweise aus genau den Materialien besteht, die wir – in hoch reiner Form natürlich – auch nutzen: Eisenoxide, Zinkoxid, Titandioxid, Siliziumdioxid, das sind ja alles Materialien, die wir nutzen, die aber auch in der Erdkruste vorkommen. In diesem Zusammenhang sollten also Probleme immer nur dann entstehen können, wenn wir große Mengen reiner Substanz herstellen und verbrauchen, denn damit erhöhe ich natürlich auch die Konzentration. Und das muss dann eben so getestet sein, dass daraus keine Nachteile entstehen können. Das sind für mich die beiden wichtigsten Punkte.

In welchen Produkten kommen eigens produzierte Nanopartikel heute schon vor?

Vielfach in Kosmetika, wie Sonnenschutzcremes, auch anderen Tagescremes, die einen Sonnenschutzfaktor haben. Da sind meistens kleine Zinkoxid- oder Titandioxidpartikel drin. Dann Titandioxid in photokatalytischer Kleinheit, also wirklich Nano, zur Reinhaltung von Oberflächen. Dann: In vielen Lasuren, Farben und Lacken, kommen Nanopartikel vor. Da gibt es auch Siliziumdioxid als Viskositätseinsteller, und auch in Klebern, zum Beispiel. Kohlenstoff, Kohlenstoff-Nanoröhrchen, sind als Strukturverbesserer in verschiedenen Kunststoffen heute schon drin. Schließlich stecken Nanopartikel in elektrischen Akkumulatoren; es gibt teilweise schon Nanokeramiken, die für bestimmte Anwendungen eingesetzt werden. Aber die meisten der Anwen-

dungen, die ich bis jetzt genannt habe, betreffen Kompositmaterialien. Dort werden die Nanopartikel einem Hauptmaterial zugemischt, eben eingeschmolzen beziehungsweise eingesintert. Die wenigsten Anwendungen verwenden Nanopartikel in freier Form oder in Suspensionen, wie zum Beispiel in Sonnenschutzcremes.

Und in gebundener Form ist die mögliche Gefährdung geringer?

Da ist die Gefährdung wesentlich niedriger. Da hängt eine mögliche Gefährdung eher davon ab, wie die Materialien am Ende ihres Lebens entsorgt werden, geschreddert, aufgearbeitet werden, verwittern, auf einer Deponie liegen oder verbrannt werden. Es hängt dann eher vom Versorgungsweg ab, was da eventuell noch daraus entstehen könnte.

Es ist doch sehr schwierig, allgemeine Sicherheitsregeln auf diesem Sektor zu finden. Sie müssten ja, weil so viele verschiedene Charakteristiken da sind, jeden Stoff einzeln prüfen?

Aufgrund der Tatsache, dass wir es mit so vielen verschiedenen Formen, Größen, Materialien zu tun haben, gibt es – von dem Gedanken muss man sich trennen – keine einheitlichen Richtlinien und Regeln. Bei Chemikalien ist das ähnlich, da gibt es auch keine einheitlichen Regeln. Man kann erst einmal Gruppen ausfindig machen: Das ist entflammbar, das ist explosiv, das ist wasserlöslich, das ist nicht wasserlöslich – also man kann solche Gruppen machen, und innerhalb solcher Gruppen muss man dann natürlich eine Einzelbewertung vornehmen und so wird das bei Nanopartikeln auch sein.

Kann die Umwelt bei der Freisetzung von Nanopartikeln Schaden nehmen?

Ja, also denkbar ist natürlich viel, ob das aber alles Sinn macht, ist eine andere Frage. Sie haben Nanopestizide genannt: Das sind ja eher in Nanokapseln verpackte Pestizide, die besser ihren Wirkungsort erreichen sollen. Das ist ja eigentlich das, was man im medizinischen Bereich beim Menschen auch haben möchte. Im biologischen Bereich müssen diese Kapseln abbaubar sein, ansonsten würde der Inhalt ja nicht freigesetzt. Und von daher gesehen, halte ich die Gefährdung rein durch die Nanostruktur für sehr gering. Es könnte unter Umständen eine neue Qualität von Toxizität geben – die Pestizide sind per se toxisch, man tut sie ja gerade da rein, weil sie giftig sind – wenn die sich jetzt durch die Nanokapseln in der Umwelt anders verteilen, an bestimmten Stellen stärker aufkonzentrieren würden, dann könnte es unter Umständen zu Problemen kommen.

Aktivitäten der Industrie

Zu den praxisnahen Empfehlungen und Handlungsanweisungen auf dem industriellen Nanopartikel-sektor zählt der „Leitfaden für die Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz“, der von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und dem Verband der Chemischen Industrie (VCI) gemeinsam erarbeitet wurde. Der Leitfaden stellt klar:

„Um Nanomaterialien als isoliert vorliegende Nanopartikel zu erzeugen, sind in der Regel besonders aufwändige chemische und physikalische Verfahren erforderlich. Bei den derzeit kommerziell in größerem Maßstab hergestellten Produkten liegen in den meisten Fällen Nanopartikel allerdings nicht als einzelne Teilchen, sondern aggregiert und agglomeriert [siehe Glossar] als Verbund mehrerer Teilchen vor.

Bei den Aggregaten und Agglomeraten handelt es sich nicht um Nanopartikel im Sinne der Definition (siehe oben), sondern um nanostrukturierte Materialien, in denen die Nanopartikel miteinander verbunden sind. Eine Freisetzung von Nanopartikeln aus diesen Aggregaten und Agglomeraten ist ohne größere Energiezufuhr oft nicht möglich.

Zum Teil werden Nanomaterialien schon beim Hersteller zu Granulaten, Formulierungen, Dispersionen oder Kompositen weiterverarbeitet. In vielen Fällen ist bei der nachfolgenden Verwendung eine Freisetzung von isolierten Nanopartikeln weitestgehend nicht mehr zu erwarten.“



Silber-Nanopartikel werden in einem integrierten Prozess direkt in flüssige Träger abgeschieden. Dieses Verfahren liefert stabile Suspensionen isolierter Partikel mit großer spezifischer Oberfläche, die sich durch hohe Reinheit auszeichnen. Mittlere Primärpartikelgröße 5 ... 50nm

Wo dennoch Gefährdungen nicht ausgeschlossen werden können, werden Empfehlungen ausgesprochen, die weitgehend identisch mit denen für andere als potenziell gefährlich eingestuften Stoffe sind, wie: Prüfung, ob gesundheitsgefährdende Stoffe oder technische Verfahren durch weniger gefährliche Stoffe oder weniger gefährliche Verfahren ersetzt werden können; Produktion in geschlossenen Systemen, mit der Erfassung, Begrenzung und Abführung gefährlicher Gase, Dämpfe und Stäube möglichst an der Entstehungsstelle; Bereitstellung geeigneter Waschgelegenheiten, geschützte Aufbewahrung der nicht beruflich eingesetzten Kleidung, zeitliche Gestaltung der Arbeitsabläufe, Ausbildung und Unterweisung, Zugangs- und Lagerregeln, etc.; die Verwendung persönlicher Schutzausrüstung zusätzlich zu den technischen und organisatorischen Maßnahmen wie Atemmasken, Schutzbrillen, Handschuhe, etc.

Die in Kunststoffgranulate eingebetteten Partikel gewährleisten eine langanhaltende Wirksamkeit gegen Bakterien und andere Mikroorganismen.



Gefährdungspotenziale verschiedener Nanopartikel (nach Gibbs, 2005)

Fragen	Wichtung	SWNT	MWNT	Nano-Clay	CdS	ZnO	TiO ₂	Dendrimere	Fullerene	Nano-Pharma	
Gibt es Hinweise auf Schadwirkungen?	35%	+	+	-	+	±	-	±	+	-	+ = ja
Sind Nanopartikel reaktiver als die Grobsubstanz?	15%	+	±	-	±	±	±	±	+	-	- = nein
Ist die Grobsubstanz toxisch?	5%	-	-	-	+	-	-	-	-	-	± = eventuell
Ist die Substanz biologisch abbaubar?	10%	-	-	+	-	-	-	-	±	+	
Neigen die Nanopartikel zur Agglomeration?	5%	+	+	+	+	+	+	±	+	+	
Sind kontaminierte Flächen einfach zu reinigen?	10%	+	+	-	±	±	±	-	-	±	Potenzielle Gefahren:
Können die Nanopartikel der Gesundheit schaden?	10%	+	±	-	+	±	-	+	+	-	■ hoch
Können die Nanopartikel der Umwelt schaden?	10%	±	±	-	±	±	-	+	+	-	■ mittel
											■ gering

SWNT: Single Wall Nanotubes; MWNT: Multiwall Nanotubes; Begriffserklärungen im Glossar

Potenzielle Risiken der Nanopartikeltechnologie werden nicht in Frage gestellt; sie sind nach Lage der Dinge auch zu erwarten. Teilchen, die nützliche chemische Reaktionen in Gang setzen können, können ihre Potenz ebensogut bei unerwünschten Reaktionen entfalten. Tatsächlich gibt es eine Reihe von Hinweisen, vornehmlich aus Untersuchungen „im Reagenzglas“, in vitro, deren Übertragbarkeit auf lebende Organismen allerdings strittig ist. So werden durch Nanopartikel aus Siliziumdioxid offenbar Funktionen des Zellkerns gestört; C₆₀-Moleküle und nanoskaliges Titandioxid wirken bei Wasserflöhen schon in vergleichsweise niedrigen Dosen lethal. Die englische Royal Society und die Royal Academy of Engineering sehen bei Zinkoxid für den Einsatz in Sonnenschutzmitteln Forschungsbedarf. Die Tabelle zählt eine Reihe jetzt schon oder bald in großen Mengen eingesetzter Nanopartikel auf und nimmt eine ungefähre Einschätzung vor.

Einer solideren Einstufung steht derzeit offenbar die mangelnde Vergleichbarkeit vieler Studien aufgrund unzureichend vereinheitlichter Methodologien entgegen. Diese und andere Mängel zu

Ungefähre Einschätzung des Gefährdungspotenzials verschiedener Nanopartikel.

beheben ist das Ziel einer gegenwärtig von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, dem Bundesinstitut für Risikobewertung und dem Umweltbundesamt ausgearbeiteten Forschungsstrategie.

Wie dicht mitunter alt und neu auch bei der Nanopartikeltechnologie zusammenliegen, zeigt das in der Tabelle aufgeführte Beispiel „Nanoclay“. Der Ausdruck bezieht sich auf das seit der Steinzeit verwendete Tonmineral Kaolinit, aus dem sich gute Gefäße brennen lassen. Unter dem Elektronenmikroskop zeigt es sich, dass das Mineral aus Stapeln flacher Nanokristalle besteht, ähnlich einer Geldrolle. Wenn man die Nanokristalle durch physikalisch-chemische Tricks vereinzelt, bekommt man Nanoclay, einen vielseitigen Füllstoff, der etwa PET-Flaschen gasdichter macht.

Kleine Teilchen, große Wirkungen – Chancen und Risiken der Nanopartikeltechnologie

Immer, wenn Otilia Saxl eine Konferenz über Nanotechnologie eröffnet – wozu sie als Vorsitzende des britischen Institute of Nanotechnology häufig Gelegenheit hat – kann sich das Publikum auf ein flammendes Plädoyer zur Erhaltung der Umwelt einstellen. Otilia Saxl ist nicht alleine, viele, die sich mit Nanotechnologie befassen und von daher eine naturwissenschaftlich-nüchterne Sicht der Dinge haben, werden von Zukunftssorgen geplagt.

Die Technologie des 20. Jahrhunderts stößt ganz offensichtlich an Grenzen. Die globale Veränderung des Klimas ist nur eine davon, wenn auch die wichtigste. Vielleicht äußern sich Nanotechnologen auch deshalb so freimütig, weil sie ihr Publikum nicht ungetröstet zurücklassen müssen: Nanotechnologie kann helfen, eine lebenswerte Zukunft zu sichern.

Etwa durch die Bereitstellung preiswerter Elektrizität aus Sonnenlicht. Anfang 2007 wurde in Cardiff, Wales, unter Beteiligung der deutschen BASF AG die erste Fabrik für Solarzellen eingerichtet, die mit nanoskaligen Titandioxid-Partikeln und einem speziellen Farbstoff arbeiten. Die Effizienz ist zwar nur ungefähr halb so groß wie die von monokristallinen Siliziumsolarzellen, dafür verspricht die Herstellung – das aktive Material wird in einem Endlosprozess, Rolle zu Rolle, auf Folien gedruckt – sehr viel billiger zu werden. Die Zeit, in der die für die Herstellung verbrauchte Energie wieder eingefahren ist, beträgt voraussichtlich ein Jahr, verglichen mit vier Jahren für Siliziumssolarzellen. Die nach ihrem Erfinder – Michael Graetzel, Professor am Eidgenössischen Polytechnikum Lausanne – Graetzel-Zelle genannten Einheiten sind für den Aufbau des afrikanischen und indischen Telekommunikationsnetzes gedacht. Aber auch für konventionelle Siliziumsolarzellen hält die Nanotechnologie neue Lösungen bereit: Dünne Zusatzschichten aus nanoskaligem Silizium haben sich als sehr effektiv bei der Steigerung des Wirkungsgrades erwiesen. Außerdem braucht die Siliziumsolarzellentechnologie Konkurrenz, denn

Konkurrenz belebt das Geschäft, und bei fast 40 % jährlichem Wachstum ist genug für alle da.

Der unlängst verstorbene Nobelpreisträger Richard Smalley wies der Nanotechnologie bei der Lösung der Energiefrage eine Schlüsselstellung zu.

Ein Beispiel ist hier die Entwicklung leistungsfähiger Energiespeicher. Passable Lithiumionenakkus mit ordentlichen Kapazitäten, die sicher sind und sich viele 1000 Mal in akzeptablen Zeitspannen wieder aufladen lassen, stehen vor der Markteinführung. In ihnen stecken Nanopartikel (siehe S. 18). Für den Betrieb eines damit ausgestatteten Elektrorollers würden ein paar Quadratmeter moderner Solarzellenpaneele auf dem Dach vollkommen ausreichen. Auch ein Lithium-Smart wäre damit für den Stadtverkehr gerüstet. Die Entwicklung ist unausweichlich, die Städte Asiens etwa verschwinden im Smog der Zweitakter, deren elektrische Ablösung vom Staat forciert werden wird, sobald eine bezahlbare technische Alternative da ist. Alte europäische Städte wie London haben sich mit einer City-Maut Luft verschafft, letztlich zur Zufriedenheit aller. Die Besitzer von Elektrofahrzeugen müssen keine Maut bezahlen. Für sie stehen an ausgewählten

Die Müllhalden der Natur, etwa die Lagerstätten von einst mit Kalkpanzern bewehrten, abgesunkenen Lebewesen, werden zu Ausflugszielen, wenn geologische Kräfte sie ans Licht heben – wie die Weißen Klippen von Dover.



Parkplätzen Steckdosen zum Nachladen bereit. So wird es schließlich überall kommen. An effizienten Elektromotoren führt kein Weg vorbei. Gut möglich, dass in ihnen wieder nanoskalige Magnetwerkstoffe stecken.

So weit Nanopartikel toxisch sind, werden sich Mittel und Wege finden, diese Partikel einzubinden oder anderweitig zu entschärfen. Auf die Verbindung kommt es an, was Chemiker immer schon wussten. So sind die Elemente Natrium und Chlor jedes für sich ausgesprochen unbedenklich, zusammen aber geben sie Natriumchlorid, Kochsalz, ohne das der Mensch nicht leben kann.

Mit Nanopartikeln werden sich auch neue Materialien für die Alltagswelt realisieren lassen, die am Ende ihres Produktlebens ungiftig zerfallen, wie das jedes Baumblatt kann, oder sich zumindest in Wasser giftlos zerlegen. Wie dringlich das ist, zeigen Berichte aus dem „pacific gyre“, einem pazifischen Wasserwirbel, der auf einer Fläche so groß wie Mitteleuropa Plastikmüll bewegt, geschätzte 3.000.000 t, Tendenz rasch steigend – Flaschen, Spielzeug, Sixpackringe dicht an dicht – eine tödliche Gefahr für viele Meeresbewohner. In den Meeren setzt derzeit ein Artensterben ein; vergleichbar dem an Land – eine Katastrophe von erdgeschichtlicher Dimension. Wissenschaftler fordern denn auch dringend die längst überfällige Modernisierung der Industriegesellschaften. Die Nanotechnologie kann dabei helfen. Warnungen dieser Art haben im Übrigen längst den Dunstkreis vermeintlicher Sektierer verlassen, sie finden sich auch auf den Webseiten der Luft-,

Raumfahrt- und Rüstungsindustrie, überall dort, wo Wissenschaftler tätig sind.

Wenn Sir Harold Kroto, der zusammen mit Richard Smalley und Robert Curl den Chemienobelpreis für die Entdeckung der Fullerene bekam, einen Vortrag vor größerem Publikum hält – etwa bei der Nobelpreisträgerversammlung in Lindau, Bodensee – zitiert er gerne J. R. R. Tolkien, den Verfasser des „Herr der Ringe“:

*„All that is gold does not glitter
not all those who wander are lost ...“*

Nanotechnologen können auch Romantiker sein. Die jungen Leute quittieren das mit heftigem Applaus. Die Sensibilität der Nanotechnologen in Sachen Natur hat ganz sicher auch damit zu tun, dass sie mehrere Gebiete der Naturwissenschaften überblicken – Biologie, Physik, Chemie – und so ein Gefühl für die unglaubliche technische Eleganz haben, die vielen natürlichen Prozessen innewohnt. Die Photosynthese etwa, die jedes Lindenblatt beherrscht, ist ihrer Kompliziertheit wegen immer noch nicht vollständig aufgeklärt, aber es ist Land in Sicht.

Mit der von einer vernünftigen Sicherheitsforschung begleiteten Nanotechnologie könnte es den Menschen gelingen, die Eleganz der natürlichen Prozesse auf technische Prozesse zu übertragen und die technische Welt so zukunftsfähig zu machen.

Ein Lindenblatt, in der Natur ein Wegwerfartikel, beherrscht den Prozess der Photosynthese: Wie macht man aus Licht, Wasser, Kohlendioxid und Spurenelementen energiereiche Chemikalien? Die Wissenschaft ist nicht mehr weit entfernt von der vollständigen Entschlüsselung, die der Nanotechnologie ein gigantisches Aufgabenfeld eröffnen würde – und zweifelsfrei Nobelpreise einbringt



Glossar

Aerosole: Gemische fester oder flüssiger Partikel mit Luft. Wegen potenzieller Schädigungen des Atemtraktes des Menschen sind Aerosole Gegenstand intensiver Forschungen. Luft kann Partikel im Größenbereich von Molekülen, aus denen Luft ja besteht, bis über 100 Mikrometer tragen. Für die menschliche Gesundheit sind vor allem Partikel $< 10 \mu\text{m}$ von Bedeutung.

Agglomerate, Aggregate: Die Begriffe werden in der Pulvertechnologie seit langem schon zur Beschreibung von Partikelzusammenballungen verwendet, allerdings nicht immer einheitlich, was gelegentlich zu Konfusionen führt. In der deutschen Industrie bezeichnet der Begriff „Aggregat“ bei Nanopartikeln eine durch starke chemische Bindungen aneinander haftende Gruppe weniger Partikel. „Agglomerate“ sind dagegen Ansammlungen von Aggregaten, die vornehmlich von der schwächeren Van-der-Waals-Bindung zusammengehalten werden. Zwischen Aggregaten und Agglomeraten gibt es fließende Übergänge.



Nanopartikel

Aggregat

Agglomerat

Bulk: Englisch für „Festkörper“, „Masse“, im Zusammenhang mit Nanopartikeln meist Bezeichnung für die grob strukturierte Muttersubstanz, aus der die Nanopartikel gewonnen werden.

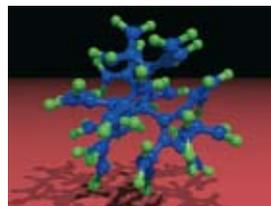
CdS: Cadmiumsulfid, meist synthetische Verbindung, die aber auch als natürliches Mineral vorkommt. Unter anderem als lichtbeständiges Pigment für Malfarben und Plastikteile eingesetzt, wegen des Cadmiumgehaltes mittlerweile in Verruf geraten.

CNT: Carbon Nano-Tubes – Kohlenstoff-Nanoröhrchen für eine große Zahl von Anwendungen. In Plastikmaterial eingebracht verbessern CNTs die mechanischen Eigenschaften etwa von Tennisschlägern, machen das Material elektrisch leitfähig,

verhindern so elektrische Aufladungen (wichtig für Tankanlagen) und erhöhen die thermische Leitfähigkeit. Siehe auch SWNT und MWNT.

Computertomographie: Die Umrechnung von Daten aus einem bestimmten Volumen (einem Brustkorb, einer Zelle) in plastische Bilder. Am bekanntesten sind medizinische Anwendungen wie die Röntgencomputertomographie, das bislang spektakulärste Verfahren ist die Kryo-Elektronentomographie, die auch die Darstellung molekularer Nano-Maschinen erlaubt.

Dendrimere: Neuartige Stoffklasse, nach Art eines Baums oder Busches „hyperververzweigte“ Polymere der Supramolekularen Chemie mit immer verblüffenderen Eigenschaften. An die zahlreichen Arme eines solchen Moleküls lassen sich ganz verschiedene Werkzeuge ankoppeln, zwischen den Zweigen finden Gastmoleküle Platz, etwa Wirkstoffe für die Krebstherapie.



Dendrimmer-Kalottenmodell. Zwischen den Zweigen des Moleküls lassen sich andere Substanzen unterbringen und an den Zweigen funktionelle Gruppen anheften.

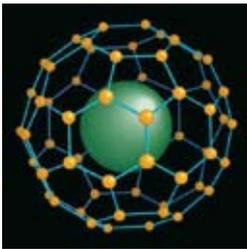
Epidemiologie: Erforschung von Ursachen, Folgen und Verbreitung krankmachender Faktoren für große Bevölkerungsgruppen, u. a. mit statistischen Methoden.

Feinstaub, Feinstaub: Staub ist allgegenwärtig und im Prinzip unvermeidbar, allerdings haben technische Aktivitäten, insbesondere Verbrennungsmotoren, die Belastung der Atemluft ganz erheblich heraufgesetzt. Je nach Größe der Partikel spricht man von Schwebstaub, Feinstaub und ultrafeinem Staub. Schwebstaub hat eine Größe von mehr als 10 Mikrometer (1 Mikrometer – μm – ist 1 Millionstel Meter). Von Feinstaub spricht man bei einer Partikelgröße zwischen $0,1 \mu\text{m}$ (100 Nanometer) und $10 \mu\text{m}$. Ultrafeinstaub hat eine Partikelgröße von weniger als 100 Nanometer.

- Feinstaub bis zu einer Größe von $10 \mu\text{m}$ gelangt bis in den oberen Bereich der Lunge;

- Feinstaub mit Partikeln $< 2,5 \mu\text{m}$ kommt bis in den Zentralbereich der Lunge.
- Ultrafeinstaub ist kleiner als 100 Nanometer und kann sogar in die Lungenbläschen eindringen und im Blutkreislauf weiter wandern.

Fullerene: Molekülgruppe, die ihren Namen der Ähnlichkeit mit Architekturelementen von Buckminster Fuller (1895 – 1983) verdankt. Zu den Fullerenen gehören das aus sechzig Kohlenstoffatomen aufgebaute „Fußballmolekül“ C_{60} , auch Buckyball genannt, oder Hohlröhren aus Kohlenstoffatomnetzen, Buckytubes. Fullerene stellen mittlerweile eine große Stoffgruppe dar; auch ist bekannt geworden, dass sich Kugeln, Netze und Röhren auch mit anderen Atomsorten als Kohlenstoff aufbauen lassen.



Fulleren-Hohlkugel, beladen mit einem Gast-Atom (Modell).

MWNT: Multiple Wall NanoTube – Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNTs) mit mehrlagiger Wand.



Dreiwandiges Kohlenstoffnanoröhrchen.

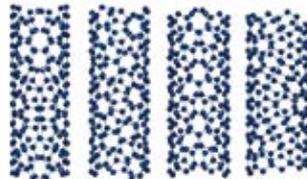
Nano-Clay: Füllstoff, der hauptsächlich aus nanoskaligen Plättchen des in Ton vorkommenden Minerals Montmorillonit besteht. Mit geringen Beigaben lassen sich die Eigenschaften von Kunststoffen z. B. für Kabel, PE-Schaum, Innen- und Außenteile von Automobilen, etc. deutlich verbessern. In PET-Flaschen eingesetzt erhöht sich deren Gasdichte, kohlenstoffhaltige Getränke bleiben länger prickelnd, der Schutz vor Luftsauerstoff erhöht sich um ein Mehrfaches. Wird auch in Folien für die Lebensmittelverpackung eingesetzt.

Plasmafackel: Heißes, hoch ionisiertes Raumgebiet in einem Gasentladungsreaktor, in dem durch Einströmen ausgesuchter Substanzen zahlreiche Arten von Nanopartikeln synthetisiert werden können.



Plasmafackel.

SWNT: Single Wall NanoTube – Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNTs) mit einlagiger Wand.



Einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen.

TiO₂: Titandioxid, u. a. weißes Füllmittel für Wandfarben und schweres Papier, hat als nanoskaliger Bestandteil von Solarzellen (Graetz-Zelle) womöglich eine steile Karriere vor sich. Nanopartikel aus TiO₂ setzen Bestandteile der Luft bei Lichteinfall in reaktive Stoffe um (Photokatalyse), die schmutzlösend und keimtötend wirken. Nanoskaliges TiO₂ ist Gegenstand der Nanosicherheitsforschung, wird in Japan aber schon massenhaft als Photokatalysator eingesetzt. Gewöhnliches TiO₂-Weißpigment ist völlig ungiftig, es steckt in der Zahnpasta und gibt weißer Salamihaut den erwünschten mehligem Touch, ohne verkeimen zu können.

ZnO : Zinkoxid, Verbindung von Zink und Sauerstoff, die traditionelle Bezeichnung „Zinkweiß“ weist auf die Verwendung in Malfarben hin. Wird wegen seiner antiseptischen Wirkung auch in Wundsalben verwendet. Nanopartikel aus ZnO dienen als UV-Schutz in Sonnencremes.

Weiterführende Informationen

Internet-Adressen

Nanotechnologieaktivitäten der Bundesbehörden

- www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php
- www.baua.de/nanotechnologie
- www.bmu.de/nanotechnologie
- www.bfr.bund.de/cd/3862?index=78&indexid=7585
- www.umweltbundesamt.de/gesundheitsstoffe/nanopartikel.htm
- http://www.bmelv.de/cln_044/nn_749972/DE/02-Verbraucherschutz/FAQNanotech.html

Nanotechnologie Risikoforschung und -kommunikation

- BMBF-Projekt NanoCare:
www.nanopartikel.info
- BMBF-Projekt INOS:
www.nanotox.de
- BMBF-Projekt Tracer:
www.nano-tracer.de
- Info-Portal zu Nano-Regulation:
www.nano-regulation.ch
- Nanotechnologie Standardisierung ISO TC 229:
www.iso.org
- Informationen und Datenbanken zur Risikoabschätzung von Nanomaterialien:
www.icon.rice.edu
- Infoportal Nanosicherheitsforschung:
www.safenano.org

Sonstige Internetportale

- Hightech-Strategie für Deutschland:
www.ideen-zuenden.de
- Nanotechnologieportal der VDI TZ GmbH:
www.nanonet.de
- Deutscher Nanotechnologie Kompetenzatlas:
www.nano-map.de
- Wissenschaftskommunikation Nanotechnologie:
www.nanotruck.de
- Virtuelle Reise in den Nanokosmos:
www.nanoreisen.de
- Bildungsangebote Nanotechnologie:
<http://nanobildung.tech-map.de>

- Europäisches Nanotechnologie-Portal:
www.nanoforum.org
- Nanotechnologieförderung der EU:
www.cordis.lu/nanotechnology

Broschüren

- Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, BMBF 2006
- Hochschulangebote im Bereich Nanotechnologie, VDI TZ GmbH 2006
- Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen, BMBF 2006, 3. aktualisierte Auflage
- Duale Ausbildung in innovativen Technologiefeldern, BMBF 2005
- Nanotechnologie erobert Märkte, BMBF 2004

Abkürzungsverzeichnis

BAuA: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

BfR: Bundesinstitut für Risikobewertung

BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung

BMELV: Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

BMU: Bundesumweltministerium

CNT: Carbon Nanotubes (Kohlenstoffnanoröhren)

DECHEMA: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie

DIN: Deutsches Institut für Normung

DNA: Deoxyribonucleic Acid (Desoxyribonukleinsäure)

ECETOC: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals

EKG: Elektrokardiogramm

GSF: Deutsches Zentrum für Gesundheit und Umwelt

ISO: Internationale Organisation für Normung

OECD: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

PM: Particulate Matter (Staub)

PE: Polyethylen

PET: Polyethylenterephthalat

RFID: Radio Frequency Identification

VCI: Verband der Chemischen Industrie

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

UV: Ultraviolett

Diese Veröffentlichung wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel.

Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Veröffentlichung der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

