



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



Themengebiet: Schule, Ausbildung, Bildung

Unterrichtsmaterial
Nanotechnologie

Impressum

Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie
im Verband der Chemischen Industrie e. V.,
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main
E-Mail: fonds@vci.de
Internet: www.vci.de/fonds

März 2017; 5. Auflage: 3.000 Exemplare
Alle Rechte vorbehalten



Das vorliegende Unterrichtsmaterial „Nanotechnologie“ ist erstmalig im September 2005 zusammen mit dem Experimentierkit „NanoBox“ erschienen.

Das gesamte Unterrichtsmaterial der neuesten Auflage ist über das Internet abrufbar www.vci.de/fonds.

Die Anleitungen zu den Experimenten und die Arbeitsblätter finden Sie online unter dem Bereich Schulpartnerschaft: www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien.

www.vci.de/fonds

Konzeption, Text und Gestaltung

FLAD & FLAD Communication GmbH
Thomas-Flad-Weg 1, 90562 Heroldsberg
Internet: www.flad.de
Autoren: Dr. Andreas Jungbluth, Dr. Markus Döring
Gestaltung: Regine Radina

Redaktion

Fonds der Chemischen Industrie im Verband
der Chemischen Industrie e. V., Frankfurt
Birgit Kullmann, Dr. Annette Vielfort

Druck

Hofmann infocom, Nürnberg – Dieses Produkt wurde nach den Vorgaben der FSC, was gleichbedeutend für eine verantwortliche Waldwirtschaft ist, sowie CO₂-neutral hergestellt.

Fotonachweis

Titel: „Land der Nanopfannkuchen“, Rasterelektronenmikroskop-Bild von Nadine Geyer, Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Dieses Bild ist Teil des „nano+art“-Wettbewerbs, einer Initiative des Karrierenetzwerkes www.nano-4-women.de

S. 4, 5, 7, 26, 35: FLAD & FLAD

S. 6: Technische Universität Berlin, NanOp Kompetenzzentrum

S. 7: Bayer AG

S. 8: CARL ZEISS SMT AG

S. 10: Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC

S. 10: Dr. Stefan Thalhammer, GSF Institut für Strahlenschutz

S. 11: Henning Christoph/Das Fotoarchiv

S. 13, 21: Evonik Advanced Nanomaterials

S. 17: Merck KGaA

S. 18: Süd-Chemie AG

S. 24: MagForce Nanotechnologies AG

S. 25: Cochlear Limited

S. 27: CentroSolar GmbH

S. 32: Fotolia, Fontanis

Abbildung 1-2: FLAD & FLAD, Bayer AG, Cabot Nanogel GmbH

Abbildung 3-2: Henning Christoph/Das Fotoarchiv

Abbildung 3-3: Degussa Advanced Nanomaterials

Abbildung 4-1: Fotolia, Alexandr Mitiuc

Abbildung 4-2: Süd-Chemie AG

Abbildung 4-4: Degussa Advanced Nanomaterials; Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Universität Bonn

Abbildung 5-2: MagForce Nanotechnologies AG

Abbildung 5-3: Evonik Advanced Nanomaterials

Abbildung 5-5: Cochlear Deutschland GmbH & Co. KG

Abbildung 6-1: Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC

Abbildung 6-2; 6-5: FLAD & FLAD

Abbildung 6-4: Capot Corporation o. r.

Abbildung 7-1: FLAD & FLAD

Abbildung 8-1: S. Diabaté und H. F. Krug, Institut für Toxikologie und Genetik am Forschungszentrum Karlsruhe (H. F. Krug jetzt EMPA, St. Gallen)

Abbildung 10-1: www.werkstofftechnologien.de/kompetenzkarten/

Wir danken dem wissenschaftlichen Team des Deutschen Museums München für die fachliche Unterstützung und dem Unternehmen Schmitz-Werke GmbH + Co. KG für die kostenlose Bereitstellung der Experimentiermaterialien.

	Seite	
Inhalt	3	
Vorwort	4	Nanotechnologie – hochaktuell
1. Einführung	6	Winzige Welten, wertvolle Wirkungen
2. Forschung	8	Augen und Finger im Unsichtbaren
3. Produktion	12	Werkstatt für Winzlinge
4. Praxis und Perspektiven	16	Mehr Nutzen im Alltag
	16	4.1 Partikel mit Potenzial: Nanoteilchen
	18	4.2 Hilfreiche Hohlräume: Röhrchen und Fasern
	19	4.3 Die zweite Dimension: Nanoplättchen
	21	4.4 Glatt oder nicht: Nanoschichten und -oberflächen
5. Bessere Gesundheitsversorgung	23	Kleine Strukturen für große Fortschritte
6. Umwelt und Energie	27	Schutz der Umwelt
7. Informations- und Kommunikationstechnologie	32	Von der Mikro- zur Nanoelektronik
8. Sicherheit	33	Vorausschauend und verantwortungsvoll handeln
9. Zukunft	36	Winzlinge auf Wachstumskurs
10. Ausbildung und Karriere	37	Qualifikation in der Nanotechnologie
Glossar	38	Fachbegriffe zum Nachschlagen
Websites und Literatur	39	

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im gesamten Textheft die männliche Sprachform gewählt.

Im Glossar können die mit * markierten Begriffe nachgeschlagen werden.

Nanotechnologie – hochaktuell

Nanotechnologie als eine wichtige Zukunftstechnologie des 21. Jahrhunderts ist heute in vielen Lebensbereichen fest etabliert. Sie gibt Forschern und Unternehmen die Werkzeuge an die Hand, um in Größenordnungen von weniger als 100 Milliardstel Meter vorzudringen. Dort, im Nanometerbereich, gewinnt man Einblicke in einzigartige chemische, physikalische und biologische Stoffeigenschaften von Teilchen und Strukturen, die bei makroskopischen Objekten derselben Zusammensetzung nicht zu beobachten sind. Mit diesem Wissen wiederum können Werkstoffe wie zum Beispiel Metalle, Glas, Keramik oder Polymere* mit neuen Eigenschaften ausgestattet werden.

In der Nanotechnologie arbeiten naturwissenschaftliche und technische Disziplinen wie Chemie, Materialwissenschaften, Physik, Biologie oder Medizin eng zusammen – oft fachübergreifend.

Viele Industriebranchen profitieren von dieser Zusammenarbeit, wenn bestehende Verfahren und Produkte verbessert oder gänzlich neu etabliert werden können. Insbesondere für die chemische Industrie ergeben sich dadurch weltweit neue und wichtige Betätigungsfelder. Ob Arzneimittel, Lacke und Farben, Kunststoffe oder Katalysatoren* – fast

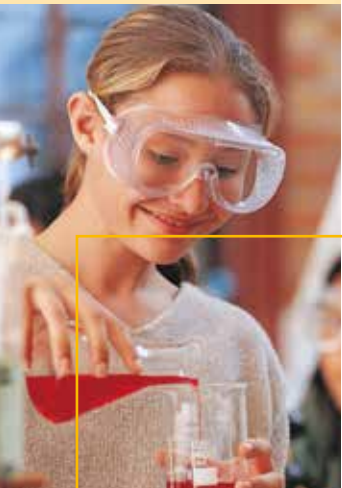
jede Sparte profitiert bereits heute vom Einsatz winzigster Objekte und Strukturen. Sie sind der Schlüssel zu leichteren und stabileren Bauteilen, lösen das Schweißen durch schnell härtende Klebstoffe ab, helfen dank neuer Dämmstoffe Energie zu sparen oder machen Akkus leistungsfähiger und langlebiger.

Für Schülerinnen und Schüler ist Nanotechnologie ein wichtiges und spannendes Thema mit Zukunft:

An Universitäten und Fachhochschulen gibt es zahlreiche Spezialstudiengänge und eine wachsende Zahl an Unternehmen setzt auf die Zusatzqualifikation ihrer Mitarbeiter in Sachen „Nano“.

Seit der Erstauflage 2005 sind rund 42.000 NanoBoXen bestellt worden. Auch die Anfang 2015 völlig überarbeitete 4. Auflage war innerhalb eines Jahres wieder vergriffen.

Anknüpfend an diesen Erfolg des Unterrichtsmaterials „NanoBoX – Wunderwelt der Nanomaterialien“ aus dem Jahr 2005 und dessen Neuauflage von 2017 gibt Ihnen der Fonds der Chemischen Industrie dieses grundlegend aktualisierte Unterrichtsmaterial an die Hand. Basierend auf zahlreichen Rückmeldungen und Anregungen von Lehrkräften aus dem ganzen Bundesgebiet wurde ihr Inhalt auf den neuesten Stand von Wissenschaft und Technik gebracht und um aktu-



elle Beispiele ergänzt. Die neue „NanoBoX“ richtet sich mit interessanten Anwendungsbeispielen und Versuchsanleitungen im Wesentlichen an die Fächer Chemie, Physik und Biologie ab der Mittelstufe sowie an berufsbildende Schulen. Die „NanoBoX“ soll Ihnen dabei helfen, die Nanotechnologie für zwei Unterrichtsstunden oder einen Projekttag in Ihr Klassenzimmer zu holen und auf lebendige Art zu behandeln und zu vertiefen.

Ergänzend zu dieser Broschüre finden Sie Arbeitsblätter und Anleitungen zu den Experimenten als Grundlage für Referate oder Facharbeiten im Internet unter dem Bereich Schulpartnerschaft:

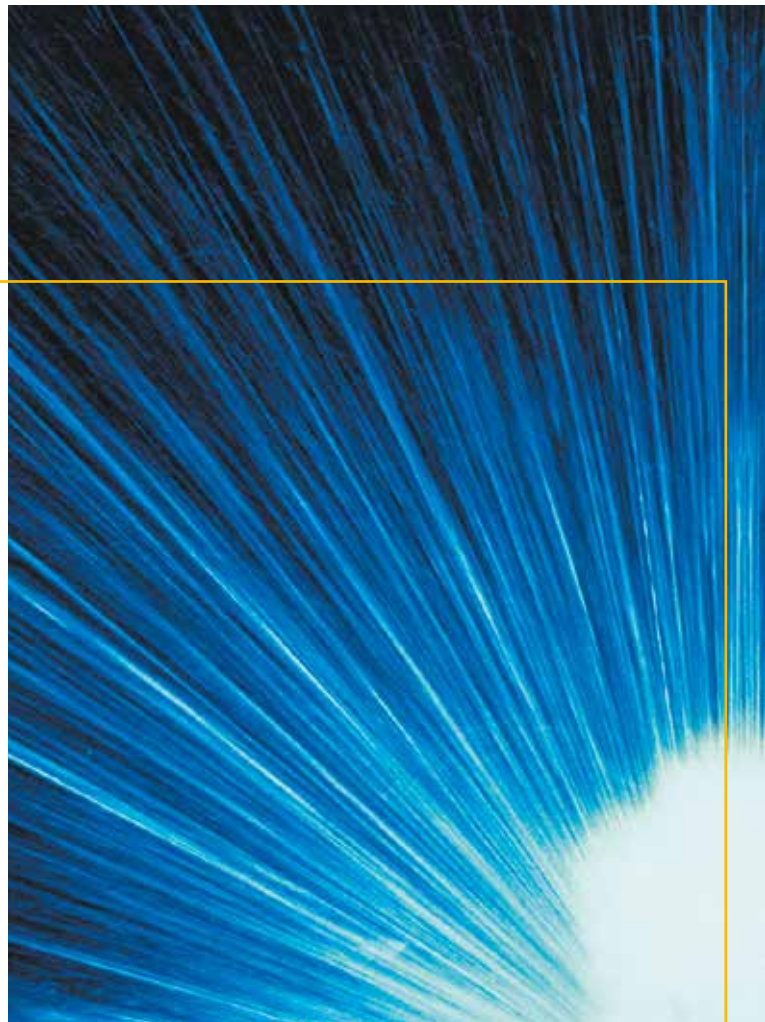
www.vci.de/fonds

Am Ende jedes Kapitels in diesem Heft leiten Sie Lehrer-Infos zu den jeweils korrespondierenden Arbeitsblättern und Anleitungen zu den Experimenten, inkl. einer Empfehlung für den Einsatz des Materials in der Sekundarstufe I oder II.

Mit den im Internet unter www.vci.de/fonds abrufbaren Anleitungen zu den Experimenten und Nanomaterialproben der NanoBoX, jede Nachfüllpackung enthält Material für 15 Schüler, können Sie den Unterricht um einfache und gleichzeitig eindrucksvolle Schulexperimente bereichern. Wie Nanomaterialien erforscht und produziert werden, zeigt Ihnen die Lehrfilm-DVD „Expedition Nanoworld – Chemie der winzigen Welten“ anhand aktueller Beispiele.

Wir wünschen Ihnen und Ihren Schülern eine spannende und lehrreiche Reise in die Welt der Nanotechnologie!

Der Herausgeber



Winzige Welten, wertvolle Wirkungen

Willkommen im Nanokosmos!

Heute erforschen und nutzen wir Dimensionen, die dem menschlichen Auge bis zur Erfindung des ersten Elektronenmikroskops → (siehe Kapitel 2) im Jahr 1931 verborgen waren: den Nanokosmos. Die Vorsilbe „Nano“ entstammt dem griechischen Wort „nanos“ für Zwerg.

Das Einheitsmaß dieser winzigen Welten ist der Nanometer (nm) – der milliardste Teil eines Meters (0,000.000.001 m) beziehungsweise der Millionste Teil eines Millimeters (0,000.001 mm).

Vergleiche helfen, diese winzigen Größen zu verstehen.

Ein Nanometer

- verhält sich zu einem Meter wie der Durchmesser einer Haselnuss zu dem unseres Erdballs.
- ist mehr als tausendmal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares (ca. 0,1–0,8 mm).
- entspricht dem Durchmesser eines einfachen Moleküls aus zehn Atomen.

Ordnung im Allerkleinsten

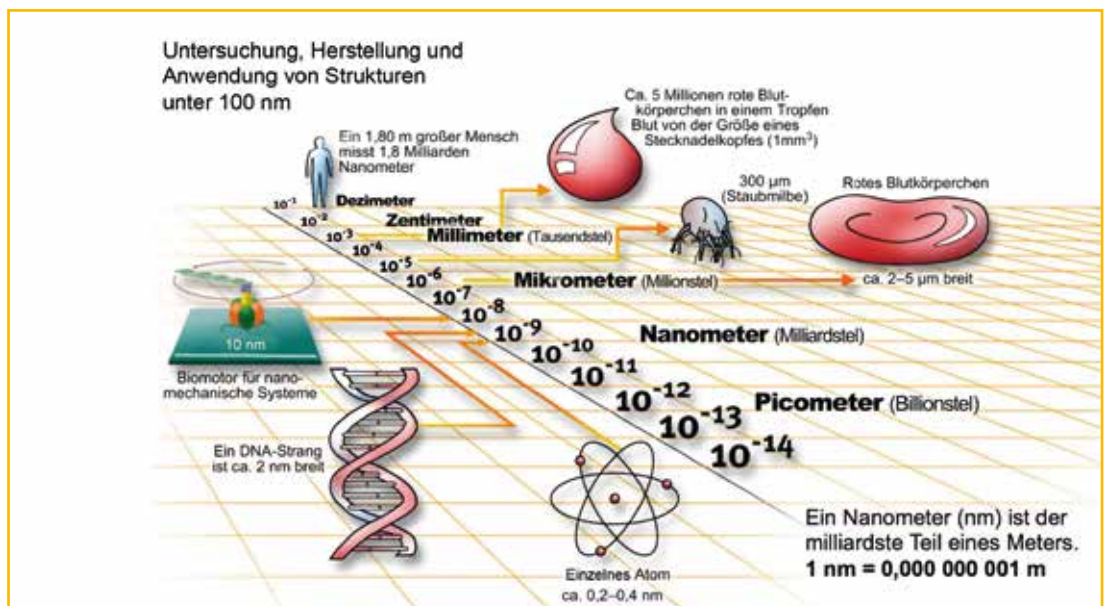
Auf der Nanometerskala liegen einzelne Atome und Moleküle beziehungsweise größere Gruppen von Atomen und Molekülen oft in hoch geordneten Strukturen vor. Die Kenntnis der verschiedenen geometrischen Formen dieser Strukturen ist eine wichtige Grundlage für das Verständnis der Nanomaterialien und ihrer besonderen Eigenschaften.

So bilden Atome und Moleküle aufgrund chemischer und physikalischer Wechselwirkungen sowie ihrer Geometrie nach dem Prinzip der Selbstorganisation* beispielsweise Teilchen (Partikel) in Form von Kugeln, Plättchen oder Kristallen. In zwei Dimensionen ordnen sie sich zu Schichten, also Grenzflächen zwischen Systemen gleicher oder verschiedener Aggregatzustände*.

In drei Dimensionen können sie geordnete Gitter (vergleichbar einem Baugerüst), poröse Gebilde (vergleichbar einem Schwamm) oder regelmäßige Packungen von Partikeln (vergleichbar der Anordnung dicht gepackter Tischtennisbälle) formen.

ABBILDUNG 1-1

Was ist Nanotechnik



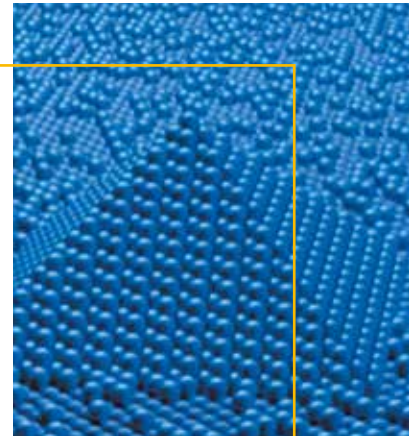
Die Selbstorganisation* ist ein bestimmendes Prinzip der lebendigen Natur. Ein Beispiel hierfür ist das Erbmolekül Desoxyribonukleinsäure (DNS), dessen zwei Einzelstränge hauptsächlich durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Basen Adenin und Thymin, beziehungsweise Guanin und Cytosin, eine Doppelhelix ausbilden. Auch die Bildung natürlicher „Nanomaschinen“ ist ein Selbstorganisationsvorgang.

Wegen der Form und Interaktion einzelner Eiweißstoffe (Proteine) – durch Wasserstoffbrücken, ionische Wechselwirkungen und Van-der-Waals-Kräfte* zwischen den Aminosäuren* auf ihrer Oberfläche – können Proteinkomplexe wie etwa die Ribosomen entstehen, die neue Proteine aus einzelnen Aminosäuren* herstellen.

Überraschungen auf der Nanometerskala

Je winziger Strukturen werden, desto mehr Atome liegen auf ihrer Oberfläche und können mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten. Ein Rechenbeispiel: Bei einem Eisenwürfel mit 1 cm Kantenlänge befinden sich nur etwa 0,00001 Prozent aller Eisenatome auf der Würfeloberfläche. Bei einer Kantenlänge von 5 nm liegen an der Oberfläche dagegen bereits rund 20 Prozent aller Atome.

Obwohl beide Würfel aus demselben Element bestehen, können sie verschiedene chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Grund hierfür sind veränderte Zustände der Elektronen, für die im Nanokosmos die Gesetze der Quantenphysik* zum Tragen kommen. Abhängig von Größe, Form und Beschaffenheit der Nanostrukturen ergeben sich deshalb im Vergleich zu makroskopischen Körpern Veränderungen der Leitfähigkeit, des magnetischen Verhaltens, des Schmelz- und Siedepunktes, der Zähigkeit, Bruchfestigkeit, Farbe etc.



Beispiel für die Ordnung auf der Nanometerskala: eine Nanostruktur aus Halbleitermaterialien

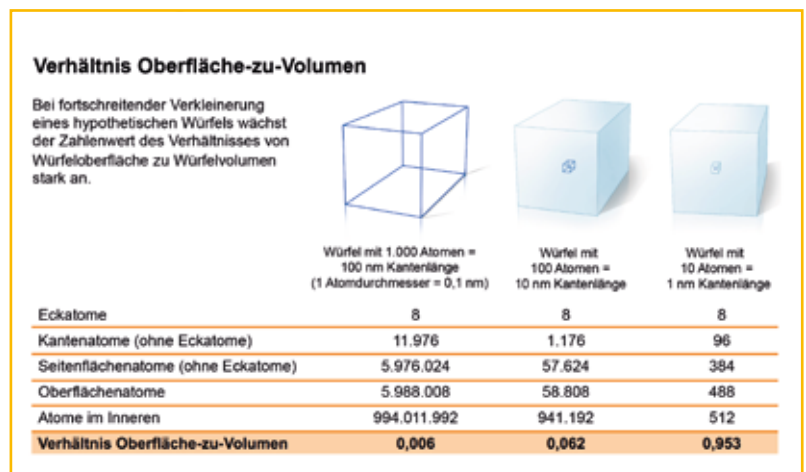
ABBILDUNG 1-2

Nanotechnik im Allerkleinsten



ABBILDUNG 1-3

Überraschungen auf der Nanometerskala



LEHRER-INFO

Siehe

– Arbeitsblatt Nr. 1 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)

Augen und Finger im Unsichtbaren

Neue Erkenntnisse – neue Analyseverfahren

1924 erkannte der Wissenschaftler Louis de Broglie, dass Elektronen gleichzeitig Teilchen- und Wellencharakter besitzen und deshalb als Elektronenstrahlen vergleichbare Eigenschaften haben wie das Licht. Diese Erkenntnis bereitet den Weg zum Bau eines Mikroskops für den Vorstoß in die Nanowelt: Da schnelle Elektronen eine sehr viel kleinere Wellenlänge als sichtbares Licht haben und die Auflösung eines Mikroskops durch die Wellenlänge begrenzt ist, kann mit einem Elektronenmikroskop eine deutlich höhere Auflösung (derzeit etwa 0,1 nm) erreicht werden als mit einem Lichtmikroskop (etwa 200 nm). Verglichen mit dem Lichtmikroskop besitzt das Elektronenmikroskop einige Besonderheiten: Die durch einen glühenden Wolframdraht erzeugten Elektronen werden in einem elektrischen Feld beschleunigt. Im Elektronenmikroskop muss ein Vakuum herrschen, da der Strahl sonst durch Gasteilchen gestreut würde. Als Linsensysteme dienen Elektromagnete, die den Elektronenstrahl bündeln und ablenken. Da ihr Magnetfeld regelbar ist, benötigt man beim Elektronenmikroskop keine auswechselbaren Okulare oder Objektive für unterschiedliche Vergrößerungsstufen.

Strukturen „durchleuchten“: das Transmissions-Elektronenmikroskop

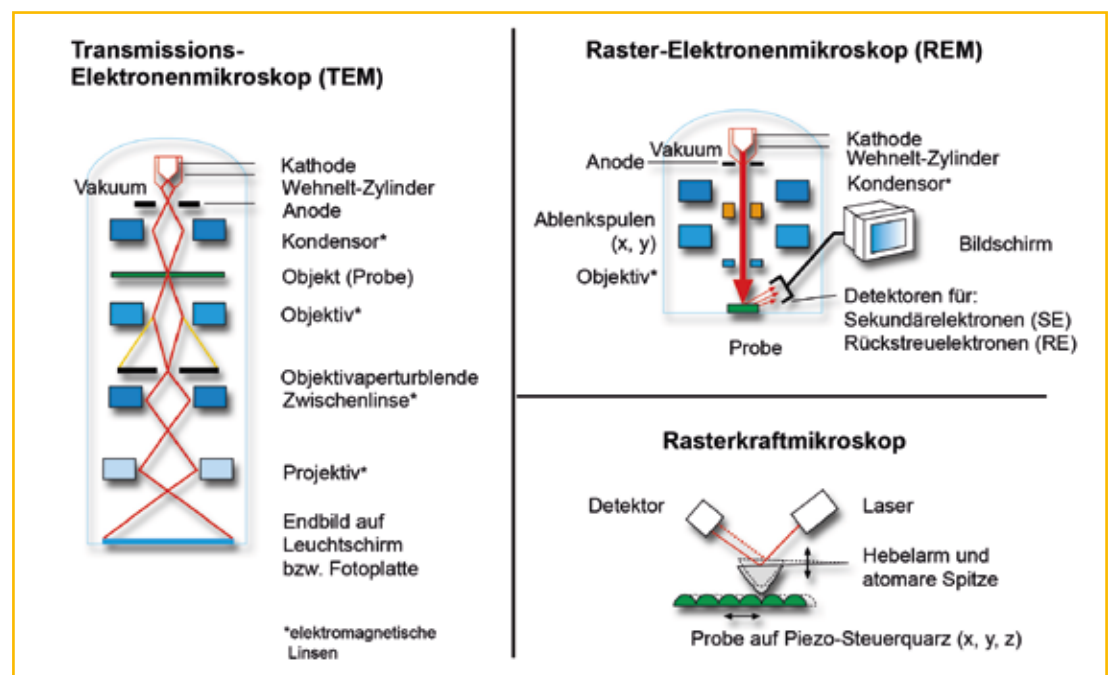
Bei einem Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM) durchstrahlen Elektronen das Probenmaterial und treffen auf einen Leuchtschirm, der das Bild der durchstrahlten Probe zeigt. Je nach Ordnungszahl der Atome, aus denen die Probe besteht, der Höhe der Beschleunigungsspannung* und der gewünschten Auflösung kann die sinnvolle Probendicke von wenigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern reichen. Je höher die Ordnungszahl und je niedriger die Beschleunigungsspannung sind, desto dünner muss die Probe sein.



Ein modernes Raster-Elektronenmikroskop

ABBILDUNG 2-1

Neue Erkenntnisse – neue Analyseverfahren



„Elektronen-Spiegelbild“ der Oberfläche: das Raster-Elektronenmikroskop

Beim Raster-Elektronenmikroskop (REM) wird der Elektronenstrahl zu einem möglichst kleinen Fleck gebündelt und zeilenweise über den zu untersuchenden Probenbereich geführt. Bei einem häufig verwendeten Messverfahren mit diesem System, der Sekundärelektronenmikroskopie (SEM), werden aber nicht die Elektronen, mit denen das Objekt bestrahlt wird, sondern die durch die Bestrahlung aus der Probe herausgeschlagenen Elektronen gemessen: Vergleichbar mit Lichtstrahlen, die von einer Fensterscheibe reflektiert werden, verlassen sie die Probe auf der Seite, wo der Elektronenstrahl eingetreten ist. Die Verteilung dieser Elektronen wird über einen Detektor und einen Verstärker in optische Signale umgewandelt und auf einem Bildschirm angezeigt.

„Finger“ statt Strahlen: Rastersondenmikroskope

Bei der Rastersondenmikroskopie wird in der Regel eine spitze Nadel von wenigen 100 Mikrometern Länge (und optimalerweise mit einem Ende aus nur einem Atom) an die Probenoberfläche herangeführt und rasterförmig darüber hinweg bewegt. Dabei „fühlt“ der Sensor eine abstandsabhängige physikalische Wechselwirkung, die als Messsignal dient. Das

Signal wird im Computer in ein dreidimensionales Bild umgewandelt.

So erzeugte Bilder ähneln oft der Oberfläche eines Eierkartons mit Mulden und Ausbuchtungen. Jeder „Berg“ entspricht bei entsprechend hoher Auflösung einem Atom. Rastersondenmikroskope können optische, magnetische oder elektrische Wechselwirkungen messen. Sie eignen sich nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für die atomgenaue Qualitätskontrolle in der Nanotechnologie.

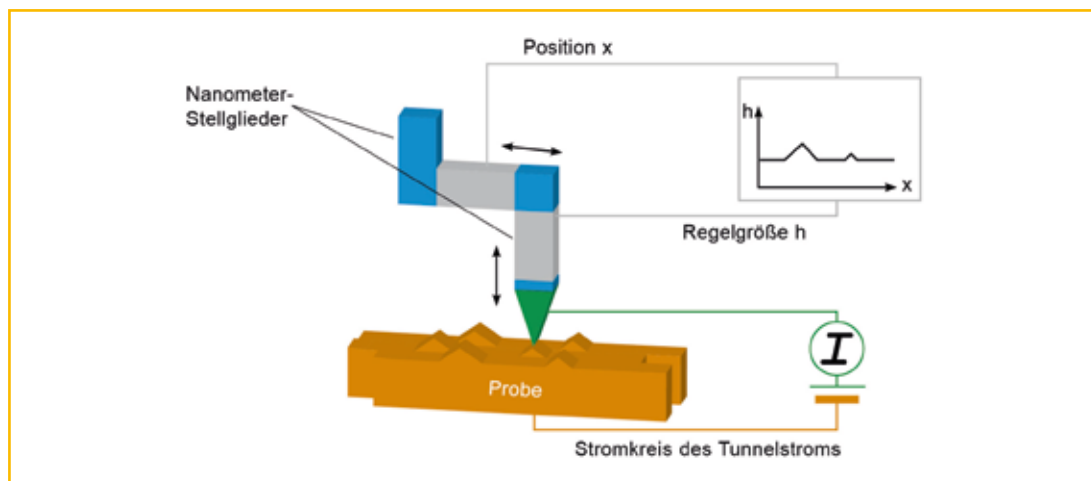
Am häufigsten wird das Rastertunnelmikroskop (engl.: Scanning Tunneling Microscope, STM) mit der Nanotechnologie in Verbindung gebracht.

Dieses beeindruckend leistungsfähige Forschungsinstrument kann einzelne Atome sichtbar machen. Für seine Entwicklung erhielten die Forscher Gerd Binnig, Heinrich Rohrer und Ernst Ruska 1986 den Nobelpreis für Physik.

Beim STM wird eine spitze Nadel bis auf eine Entfernung von einem Nanometer an die zu untersuchende Oberfläche herangeführt. Linienweise fährt die Spitze dann über die Oberfläche hinweg, ohne sie zu berühren. Bei Anlegen einer Spannung fließen elektrisch geladene Teilchen zwischen der Nadelspitze und der Probenoberfläche („Tunnelstrom“).

ABBILDUNG 2-2

Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops (STM)



Dieser Strom wird nun konstant gehalten, so dass die Nadel immer den gleichen Abstand zur Probe hat. Ein Computer zeichnet die Hebe- und Senkbewegungen der Nadel auf. So erhält man ein dreidimensionales Abbild aller Atome der Oberfläche. Aufbauend auf diesem Gerät wurden weitere Rastersondenmikroskope für unterschiedlichste Anwendungen entwickelt.

Zum Beispiel das Rasterkraftmikroskop (engl.: Atomic Force Microscope, AFM). Hier befindet sich die Spitze auf einem beweglichen Arm, einem Plättchen aus dem Halbleitermaterial Silizium oder Siliziumnitrid (Cantilever). Die Spitze fährt wie die Nadel bei einem Plattenspieler dicht über die Probenoberfläche hinweg. Beim Kontakt mit einem Oberflächenatom wirkt eine Abstoßungskraft und der Cantilever-Arm wird verbogen.

Diese Bewegung kann technisch gemessen werden, indem man einen Laser auf die Oberfläche des Cantilevers richtet. Bewegt sich der Arm, ändert sich der Reflexionswinkel des Laserstrahls. Dieses Signal wird als dreidimensionale Bildinformation von einem Computer aufgezeichnet und dargestellt.

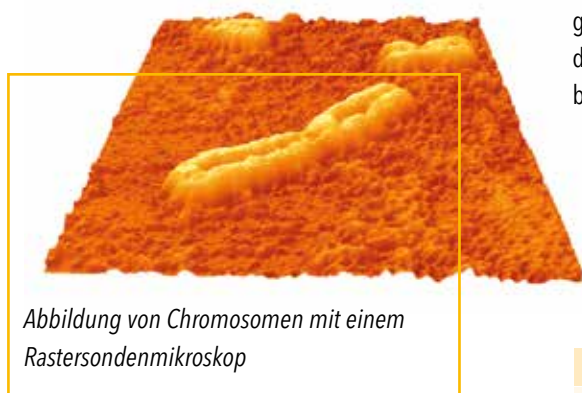


Abbildung von Chromosomen mit einem Rastersondenmikroskop

Atomgenau forschen und prüfen

Mit nanoanalytischen Instrumenten stoßen Wissenschaftler tief in den Nanokosmos vor. Durch ihre Anwendung lernen wir bedeutend mehr über die Ordnung elementarer Bausteine in bekannten und neuen Materialien, zum Beispiel in Metallen oder Keramik. Physikalische und chemische Effekte neuer Werkstoffe lassen sich dadurch wesentlich präziser erklären oder vorhersagen. Moderne Mikroskope öffnen sogar den Blick darauf, wie sich Moleküle zu hoch geordneten Strukturen zusammenfinden oder wie elektrische Ladungen und magnetische Effekte in ihnen verteilt sind.

Wo immer die Werkstoffwissenschaften und die Präzisionsfertigung in den Nanokosmos vorstoßen, ist es erfolgsentscheidend, ob Präzision im Bereich weniger Atome erreicht wurde oder nicht. Ist eine Nanoschicht wirklich so glatt, wie man es angestrebt hat? Haben feinste Leiterbahnen auf dem Computerchip – heute schon um die 22 nm dünn – die gewünschte Fertigungsgenauigkeit? Diese Fragen können wir nur mit nanoskopischen Verfahren beantworten. „Kleiner, schneller, leistungsfähiger“ lautet das Motto in vielen Technologiefeldern. Wer im Bereich weniger Nanometer herstellen kann, ist mittlerweile auch in der Lage, die Qualität winzigster Produkte zu kontrollieren.

Analytische Verfahren mit Nanopräzision haben nicht zuletzt auch für die Sicherheit in der Nanotechnologie große Bedeutung. Sie helfen dabei, Nanoteilchen aus der Raumluft im Arbeitsbereich nachzuweisen und zu bestimmen →(siehe Kapitel 8).

LEHRER-INFO

Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 2 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)

Werkstatt für Winzlinge

Zwei Wege führen zu Nanostrukturen

Grundsätzlich führen zwei Wege in die Nanowelt: „top-down“ oder „bottom-up“. Bottom-up (engl.: „von unten nach oben“) bedeutet, dass durch gezielte Handhabung von Atomen oder Molekülen komplexe Strukturen aufgebaut werden. Top-down (engl.: „von oben nach unten“) hingegen beschreibt die fortschreitende Verkleinerung von Strukturen.

Beispiel: Top-down – Verkleinerung extrem

Die Top-down-Herstellung findet beispielsweise mittels besonderer Kugelmöhlen statt, die körnige Substanzen bis zur Größe von Nanoteilchen zerkleinern: In einer schnell rotierenden Trommel dienen 0,1 Millimeter kleine, sehr harte Keramikkügelchen als „Mini-Mühlsteine“. Je schneller die Trommel sich dreht, desto stärker werden die Keramikkügelchen gegen die Trommelwand gepresst und desto winziger werden die Zwischenräume, in denen das Mahlgut Platz findet. Diese Methode eignet sich etwa, um Nano-Farbpartikel für hochauflösende Tintenstrahldrucker herzustellen.

Immer noch „von oben nach unten“, jedoch mit einem anderen Verfahren, geht man bei der Herstellung extrem kleiner Transistoren und Leiterbahnen auf Computerchips oder den sogenannten „BioChips“ vor. Spezielle Typen dieser Miniaturlabors sind nur noch so groß wie ein Fingernagel. Sie enthalten feinste Kanälchen und Reaktionskammern, in denen tausende verschiedener Substanzen gleichzeitig untersucht werden können. Derart kleine Strukturen kann man nur durch Elektronenstrahlen, extrem energiereiche UV-Strahlung und chemisch/physikalische Präzisionsverfahren erzeugen.

Beispiel: Bottom-up – Aus Sol mach Gel

Eine Methode für den gezielten Aufbau von Nanostrukturen nach dem „bottom-up“-Prinzip ist das sogenannte Sol-Gel-Verfahren. Durch eine Kombination verschiedener organischer und anorganischer Bausteine lassen sich auf diesem Weg gezielt neue Werkstoffe herstellen. Anders als bei herkömmlichen Verfahren werden die Ausgangsstoffe jedoch nicht erst bei hohen Temperaturen verflüssigt und in der Schmelze vermischt, sondern von vornherein in eine

gelöste Form gebracht. Dabei handelt es sich meistens um eine chemische Lösung der Ausgangsmaterialien, die in eine kolloidale Lösung* – ein Sol – übergeht. Im Sol ist ein Stoff mit Teilchengrößen zwischen 1 nm und 1.000 nm in einem anderen Stoff gleichmäßig verteilt, so dass seine Partikel in dem anderen schweben. Diese Verteilung ist stabil, es erfolgt keine Entmischung. Unter Erhitzen oder nach Zufügen eines Katalysators* wachsen die Partikel bis zu einer kritischen Größe, bei der sie wieder beginnen zu zerfallen. Durch chemische Veränderung der Partikeloberfläche kann das Teilchenwachstum in bestimmten Phasen gestoppt werden. So erhält man Partikel definierter Größe, deren Oberfläche anschließend beispielsweise zum Schutz vor Verklumpen oder zum Einstellen bestimmter Löslichkeitseigenschaften weiter verändert werden kann.



Sol-Gel-Reaktor

ABBILDUNG 3-1

Zwei Wege führen zu Nanostrukturen



Bottom-up: „von unten nach oben“

Aufbau von komplexen Strukturen aus einzelnen Atomen oder Molekülen

Verfahren

- Sol-Gel-Prozess
- Gasphasensynthese
- Chemische Gasphasenabscheidung (chemical vapor deposition, CVD)
- Physikalische Gasphasenabscheidung (physical vapor deposition, PVD)



Top-down: „von oben nach unten“

Erzeugung nanoskaliger Strukturen durch Verkleinerung bzw. durch ultrapräzise Materialbearbeitung

Verfahren

- Zerkleinerung von Pulvern mit Kugelmöhlen
- Strukturierung mit Stempeltechniken
- Strukturierung mit Elektronenstrahlen, Ionenstrahlen oder kurzwelliger UV-Strahlung

Ein Beispiel: In einer wässrigen Tetrachlorgoldsäure (HAuCl_4)-Lösung bilden sich zum Beispiel in Gegenwart von Trinatrium-Citrat (Natriumsalz der Zitronensäure) unter Rühren bei $100\text{ }^\circ\text{C}$ Goldkolloide \rightarrow (siehe Kapitel 5). Die so erzeugten Goldteilchen haben einen Durchmesser von durchschnittlich 15 nm und erscheinen weinrot. Bereits im Mittelalter erzeugten Glasmacher unbewusst solche Partikel. Sie schmolzen bei der Herstellung von Kirchenfenstern kleine Goldmengen ein und erzeugten so das berühmte „Rubinglas“. Der Grund: Wegen der geringen Partikelgröße nehmen die Elektronen der Goldatome andere Energiezustände an. Dies hat Einfluss auf die Reflexion, Interferenz und Brechung des Lichts.

Aus einem Sol kann zum Beispiel durch Polymerisation und Entzug des Lösungsmittels ein Gel gebildet werden. In ihm ist jedes Nanoteilchen in ein Netzwerk eingebaut und alle Teilchen sind miteinander verbunden. Das Gel zeigt oft neue Materialeigenschaften: Gele aus Graphit leiten zum Beispiel im Gegensatz zu den meisten Graphit-Solen elektrischen Strom.

Beispiel: Bottom-up – Teilchentreffen in der Gasphase

Das zweite wichtige Herstellungsverfahren für Nanomaterialien ist die Gasphasen-Synthese.

Mit der Gasphasensynthese werden viele Produkte im industriellen Maßstab hergestellt, darunter Titandioxid-Nanoteilchen \rightarrow (siehe Kapitel 5), die unter Ausnutzung der Lichtenergie chemische Reaktionen katalysieren. Ein weiteres Beispiel ist nanoskaliges* Siliziumdioxid, das beispielsweise Silikonkautschuk und anderen Kunststoffen als Verdickungsmittel und Verstärkerfüllstoff zugesetzt wird, um deren Festigkeit und Elastizität zu steigern.

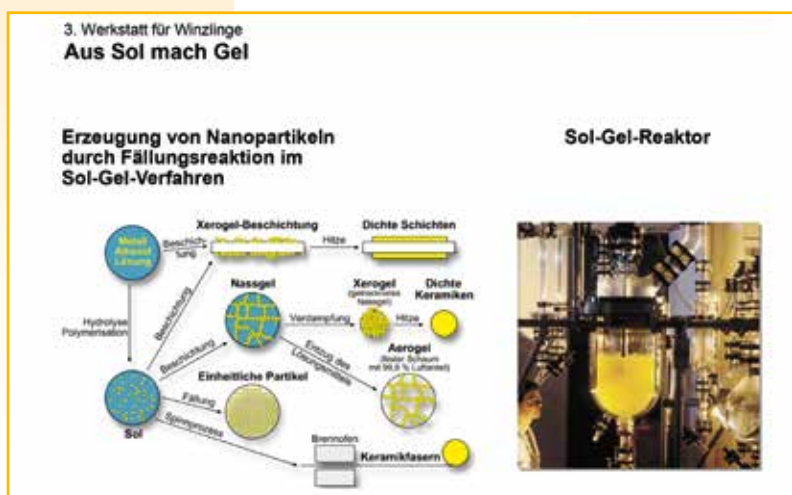
Als Ausgangsstoffe dienen Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe, die im Gasphasenreaktor* in einen Gasstrom eingebracht werden und eine sehr heiße Zone durchlaufen. Flüssige und feste Stoffe werden dazu vorher durch Verdampfen oder Zerstäuben in Gase, fein verteilte Tröpfchen oder Partikel umgewandelt. Bei unterschiedlichen Ausgangsstoffen ist auch eine Kombination dieser Prozesse möglich. Die Synthese läuft in mehreren aufeinanderfolgenden Reaktionsschritten ab: Zuerst bildet sich in der Nukleationsphase ein kleiner Komplex (Primärteilchen), dessen Oberfläche sich während der Wachstumsphase durch Anlagerung von weiteren Atomen oder Molekülen schnell vergrößert. Die so entstandenen Vorläuferteilchen stoßen aneinander und verwachsen im nächsten Schritt, der Aggregationsphase, zu den gewünschten Nanomaterialien. Mehrere Aggregate können lose, durch Van-der-Waals-Kräfte gebundene Agglomerate bilden.

Je nach Zielsetzung kann die Gasphasensynthese gegenüber dem Sol-Gel-Prozess Vorteile haben: So entstehen kaum flüssige Nebenprodukte und die Reinheit der Teilchenoberfläche ist höher. Größe und Gestalt der Partikel lassen sich durch geeignete Reaktionsbedingungen wie Druck, Temperatur, Verweilzeit in der heißen Zone etc. genau einstellen. Außerdem kann man die Größe der Teilchen im Gasstrom während der Reaktion mit physikalischen Methoden messen und Partikel gewünschter Größe aussortieren.

Jetzt wird es heiß: In deutschen Chemieunternehmen werden verschiedene Arten von Gasphasenreaktoren eingesetzt, darunter der Flammenreaktor, der Heiß-

ABBILDUNG 3-2

Bottom-up: Aus Sol mach Gel



wandreaktor und der Plasmareaktor. Sie unterscheiden sich in der Art der Energiezufuhr.

Flammenreaktoren dienen schon seit längerem der Herstellung von Metalloxid-Nanopulvern in großer Menge und Reinheit. Bei 1.000 °C bis 2.400 °C durchlaufen die Ausgangsstoffe die Flammenzone in gerade einmal 10 bis 100 Millisekunden. Dabei bilden sich Primärteilchen von wenigen Nanometern Größe. Durch Aggregation* der Primärteilchen entstehen die gewünschten Pulver. Ein Gramm solcher Nanopulver besitzt eine spezifische Oberfläche von bis zu 400 Quadratmetern.

Heißwandreaktoren sind im Vergleich zu anderen Gasphasensystemen sehr einfach aufgebaut. Die für die Reaktion benötigte Wärme – ca. 1.700 °C – wird in einem elektrischen Rohrofensystem erzeugt und über die heißen Wände des Rohres in den Reaktor transportiert. Dadurch kann man die Reaktionstemperatur sehr genau einstellen. Weil keine Flammenerzeugung mit Gasen im Reaktor nötig ist, können reduzierende, oxidierende oder inerte Bedingungen für das Reaktionsgasgemisch frei gewählt werden.

Eine weitere Besonderheit des Verfahrens ist die Möglichkeit, die entstehenden Partikel gleichzeitig zu beschichten und so Kompositmaterialien* zu erzeugen. Plasmareaktoren sind die Spitzenreiter in Sachen Prozesstemperatur: Sie bringen es auf bis zu 10.000 °C. Als Trägergas werden zum Beispiel Argon, Stickstoff

oder Luft verwendet, die sich durch Laser, Mikrowellen oder elektrische Entladungen in ein Plasma umwandeln lassen.

Als Plasma bezeichnet man in der Physik ein (teilweise) ionisiertes Gas: Es enthält einen nennenswerten Anteil freier Ladungsträger wie Ionen und Elektronen. Die Kondensation unter Bildung von Primärteilchen startet in den kälteren Zonen des Plasmas.

Beispiel: Bottom-up – chemische und physikalische Gasphasenabscheidung

Will man besonders exakte und dünne Schichten mit weniger als 1 nm Präzision herstellen, sind die Verfahren der chemischen Gasphasenabscheidung oder der physikalischen Gasphasenabscheidung (engl.: Physical Vapor Deposition, PVD) der beste Weg. Mit ihnen produziert man in der Industrie zum Beispiel Antireflex- und Wärmeschutzverglasung sowie Röntgenspiegel.

CVD

(engl.: Chemical Vapor Deposition, CVD)

Bei der chemischen Gasphasenabscheidung werden mindestens zwei flüchtige Verbindungen mit einem Gasstrom („Prozessgas“) in eine Reaktionskammer eingeleitet, in der sich das zu beschichtende Werkstück befindet.

Bei Zufuhr von Reaktionsenergie findet auf der Oberfläche des Werkstücks eine chemische Reaktion statt. Damit die Abscheidung einer Schicht an der Oberfläche gegenüber der Bildung von festen Partikeln in der Gasphase bevorzugt wird, muss die CVD bei sehr niedrigen Drücken (0,01 bis 10 Hektopascal) oder sogar im Vakuum stattfinden.

Diese Methode kann im Gegensatz zu physikalischen Beschichtungsverfahren auf Oberflächen mit dreidimensionalen Oberflächenstrukturen angewendet werden. So entstehen beispielsweise die metallischen Schichten auf winzigen Gräben in der Feinstruktur von Computerchips.



Flammenreaktor

PVD

(engl.: Physical Vapor Deposition, PVD)

Bei der physikalischen Gasphasenabscheidung wird ein festes Beschichtungsmaterial durch Beschuss mit Laserstrahlen, Ionen, Elektronen oder durch Lichtbogenentladung in einer Beschichtungskammer verdampft. Der Dampf bewegt sich frei durch die Kammer oder wird durch elektrische Felder zu dem Werkstück geleitet, das beschichtet werden soll. Damit sich die Dampfteilchen als Schicht darauf ablagern können und nicht schon vorher an Gasteilchen in der Kammer gestreut werden, arbeitet man bei einem Unterdruck von bis zu 10 Pascal.

Der Dampf breitet sich ausgehend von seiner Quelle in einer Richtung aus. Um die gesamte Oberfläche eines Objekts beschichten zu können und keine Bereiche im „Schatten“ auszulassen, muss man das Werkstück daher während der Beschichtung drehen. Bei Kontakt mit dem Werkstück scheiden sich die Dampfteilchen auf dessen Oberfläche durch Kondensation ab – genau wie Wasserdampf auf dem Badezimmerspiegel. Dann breiten sich die Teilchen durch Diffusion gleichmäßig entlang der Oberfläche aus, bis sie einen energetisch günstigen Platz gefunden haben.

PVD wird unter anderem auf Blechen, Drähten, Gläsern oder auf Kunststoffoberflächen angewendet.

Weitere Bottom-up-Verfahren:

Mit den oben genannten Verfahren ist die Vielfalt der Methoden für die Produktion von Nanomaterialien natürlich nur ausschnittsweise dargestellt. Viele weitere sind im Grenzbereich zwischen der Chemie und der Physik angesiedelt. Hierzu zählt beispielsweise die elektrochemische Abscheidung von Metallen auf Oberflächen, das Galvanisieren: In einem elektrischen Feld werden dabei Metallionen aus einer Lösung an einer zu beschichtenden Oberfläche reduziert und lagern sich darauf als elementare Schicht ab.

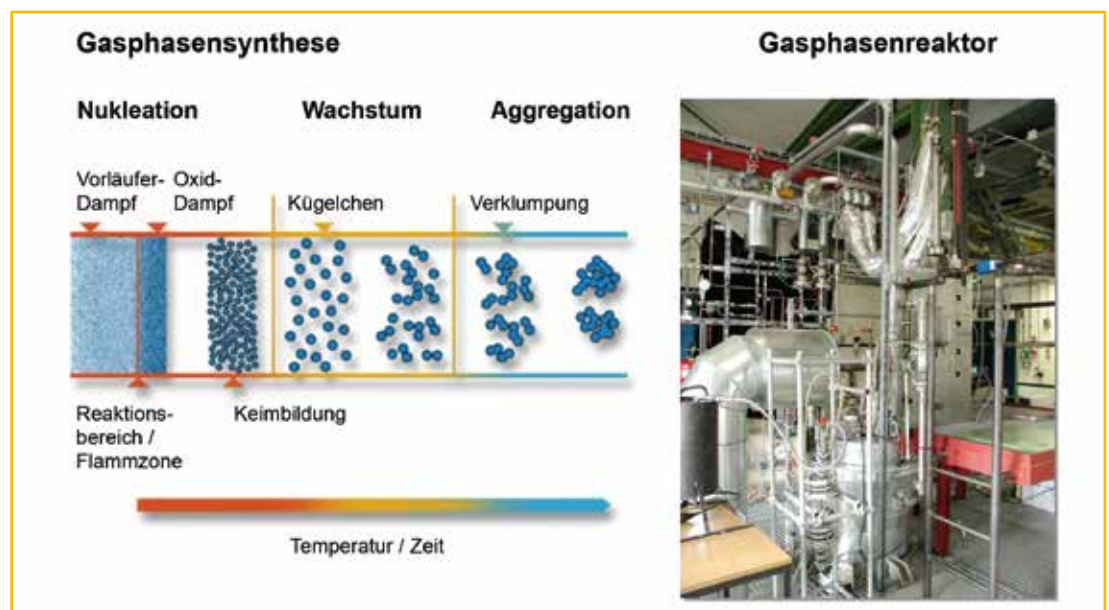
LEHRER-INFO

Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 3 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)
- Versuch 5 (Sekundarstufe II)
- Versuch 6 (Sekundarstufe II)

ABBILDUNG 3-3

Bottom-up: Teilchentreffen in der Gasphase



Mehr Nutzen im Alltag

Mehr Qualität und Komfort: Wo es um das Wohlbefinden des Menschen geht, bieten sich zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für Nanoprodukte. Die folgenden Beispiele zeigen, in welchen Produkten oder Verfahren Teilchen, Schichten und strukturierte Oberflächen bereits eine wichtige Rolle spielen.

4.1 Partikel mit Potenzial: Nanoteilchen

Extrem kleine Teilchen zählen zu den Tausendsassas der Nanotechnologie. Sie sind in allen drei Dimensionen, also Länge, Breite und Höhe, kleiner als 100 Nanometer. Ihre Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten lassen sich je nach chemischer Zusammensetzung, Beschichtung und Form sehr genau steuern. In manchen Fällen werden die Partikel in einer flüssigen oder zähflüssigen Umgebung verwendet. Dies geschieht unter anderem in Poliermitteln, Kosmetika, speziellen Therapieanwendungen der Krebsmedizin, Kontrastmitteln für die medizinische Bildgebung oder Fließmitteln für Beton.

In anderen Anwendungen finden sich die Partikel fest eingebettet in Keramik oder Kunststoff. Hier beeinflussen sie beispielsweise die Verarbeitungseigenschaften des Materials oder die Härte der Endprodukte. Chemisch reaktive Teilchen aus Titandioxid spalten als Katalysatoren auf Oberflächen nahezu jede Verunreinigung unter Anregung mit dem ultravioletten Anteil des Sonnenlichts.

Photokatalyse – Chemie bei Licht betrachtet

Titandioxid (TiO_2)-Nanopartikel wirken photokatalytisch, das heißt bei Bestrahlung mit UV-Licht zersetzen sie Wasser zu OH-Radikalen und bilden daraus zusammen mit Luftsauerstoff Wasserstoffperoxid (H_2O_2). Weil Wasserstoffperoxid für die meisten Mikroorganismen toxisch ist, können TiO_2 -Teilchen Metallflächen in Operationssälen leichter steril halten. Titandioxid-Nanoteilchen helfen auch dabei, die Luft sauber zu halten, denn bei Tageslicht können sie mittels der Photokatalyse Moleküle durch Oxidation vollständig zersetzen. Ein neuartiger Fassadenputz und Wandfarben beispielsweise beseitigen durch Beimischung der Partikel Schadstoffe und unangenehme Gerüche aus der Raum- oder Außenluft. Je heller es in einem Raum oder auf der Außenseite des Gebäudes ist, desto besser

werden Luftschadstoffe und Gerüche abgebaut. Auf diese Weise könnte zukünftig in Großstädten die Belastung der Luft mit Stickoxiden aus Autoabgasen reduziert werden. Chemische Reaktionen unter Lichteinfluss finden auch auf dem Dach statt. Hier können Nanoteilchen auf Dachziegeln Wasser und Luftsauerstoff in Wasserstoffperoxid umwandeln. Schon winzige Mengen dieses Stoffes reichen aus, um ein unschönes Bewachsen der Dachschildeln mit Algen zu unterdrücken.

Halbleiterteilchen – Leiterbahnen wie gedruckt

Basis des heutigen Computerchips ist das chemische Element Silizium, das beispielsweise im normalen Quarzsand vorkommt. Für die Herstellung eines Chips benötigt man rund 600 Arbeitsschritte und bis zu vier Wochen Zeit. Nanotechnologie erlaubt es nun, elektronische Bauteile buchstäblich aus dem Drucker zu erhalten. Die Hauptrolle spielen dabei Nanoteilchen aus Halbleitermaterialien. Genau wie Tinte können sie mit gängigen Drucktechniken in der Form von Leiterbahnen auf verschiedenen Oberflächen aufgebracht werden. Auch komplexe Elektroniksysteme lassen sich so in Massenfertigung auf großen Flächen aus Papier oder Folie erzeugen. Diese Grundmaterialien sind wesentlich leichter wieder zu verwerten als gängige Halbleiterbauteile.

Durch die Reduzierung der Arbeitsschritte und die Verwendung geringerer Materialmengen spart man zudem Rohstoffe und Energie. Dies kommt der Umwelt zugute. Computertastaturen aus Papier und elektronische Etiketten für den Produktschutz gibt es schon zu kaufen. Damit sind die Möglichkeiten der gedruckten Elektronik aber noch lange nicht ausgeschöpft. Viele technische Anwendungen, bei denen der Einsatz herkömmlicher Elektronik derzeit noch zu kostspielig ist, könnten in Zukunft unseren Alltag bestimmen. Von der Armbanduhr bis zur Eintrittskarte würden dann zum Beispiel „intelligente Gegenstände“ über Funksignale mit Computern in ihrer Umgebung kommunizieren, um uns das Leben angenehmer zu machen.

„Magische“ Magnete – von Poliermittel bis Lautsprecher

Magnetische Nanopartikel kommen nicht nur in der medizinischen Diagnostik und Krebstherapiestudien zum Einsatz. Man nutzt sie auch für Schmier- und Dichtstoffe. Diese können durch Beimischung von Ferrofluiden* mit Magnetfeldern exakt zu der gewünschten Position dirigiert werden. Durch denselben Effekt eignet sich das Ferrofluid* sehr gut als schaltbares Dämpfungsmittel.

Deshalb werden Ferrofluide heute unter anderem als Schwingungsdämpfer in Lautsprecherboxen eingesetzt. In sehr starken Magnetfeldern bildet das Ferrofluid an seiner Oberfläche Stacheln aus, die sich entlang der magnetischen Feldlinien ausrichten („Rosensweig-Effekt“).

Reflektoren und Mini-Behälter – Schutz- und Pflegezusätze in Kosmetika

Schon seit längerem gibt es Sonnencremes zu kaufen, die durch Nanoteilchen wirkungsvoll vor Sonnenbrand und Hautalterung schützen. Der Vorteil der Partikel besteht darin, dass sie von Allergikern besser vertragen werden und zudem einen besseren UV-Schutz bieten als herkömmliche organische UV-Filter. Während diese mit der Creme in Hautfalten ablaufen, bleiben die Nanoteilchen dort liegen, wo man sie aufgetragen hat. Dadurch wird die Haut gleichmäßiger und besser geschützt. Ebenso wirkungsvoll sind Nanokugeln,

die man in verschiedenen Alltagsprodukten findet. In Kosmetik-Cremes zum Beispiel geben sie pflegende Substanzen an die Haut ab und sorgen für ein angenehmeres Hautgefühl.

Große Bandbreite – „Nano“ im Automobil

Nanokugeln mit winzigen Hohlräumen kommen aber auch in der Automobilindustrie zur Anwendung. Hier werden sie in das Leder von Autositzen eingebracht, um den typischen Ledergeruch zu überdecken oder angenehme Duftstoffe abzugeben, sobald man sich im Sitz zurücklehnt.

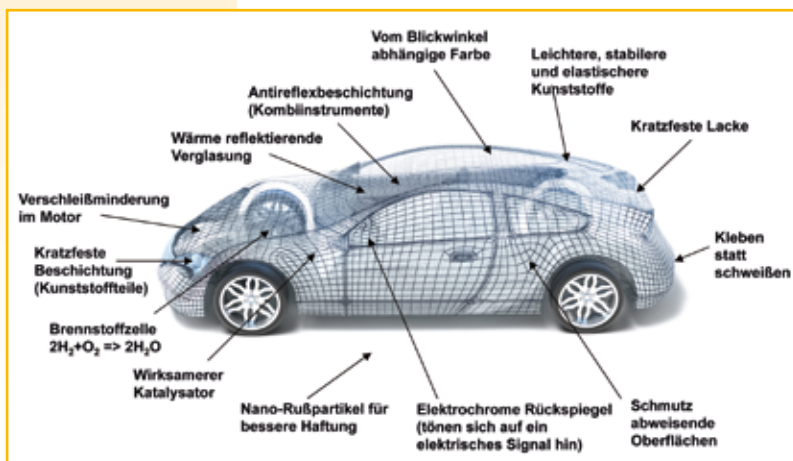
Daneben kommen Nanomaterialien im Auto bei vielen anderen Bauteilen schon heute zum Einsatz: Dazu gehören beispielsweise Antireflexbeschichtungen für Glas- oder Kunststoffabdeckungen von Armaturen.

Karosserien, deren Lackierung Nanoteilchen oder Nanoschichten enthält, können weiterhin blickwinkelabhängig in unterschiedlichen Farben erscheinen. Neue Kunststoffe werden in Zukunft dazu beitragen, das Auto leichter zu machen und so den Kraftstoffverbrauch zu senken.

Ob Verglasung oder Karosserieteil – mit flexiblen und gleichzeitig hoch stabilen Nanomaterialien wird man zukünftig auch die Sicherheit der Fahrgäste bei Unfällen erhöhen. Bei anderen Autoteilen, wie zum Beispiel Ventilen, wird die Lebensdauer dadurch verbessert, dass Nanoschichten zum Schutz gegen Rost und Verschleiß beitragen.

ABBILDUNG 4-1

Große Bandbreite: „Nano“ im Automobil



Seit Ende 2003 wird in der Automobilindustrie ein neuer Klarlack auf Basis eines Nanomaterials in der Serienproduktion eingesetzt. Während herkömmliche Lacke im Prinzip aus Bindemittel und Vernetzern bestehen, ist der neue Lack aus organischem Bindemittel mit hoher Elastizität und Keramik-Nanopartikeln mit großer Härte zusammengesetzt. Er bildet beim Trocknungsvorgang eine sehr dichte Netzstruktur, in der die Nanoteilchen gleichmäßig eingebettet sind. Bei Beanspruchungen, die zum Beispiel durch Bürsten in Autowaschanlagen auftreten, erhöhen die Teilchen die Kratzbeständigkeit der Lackierung um das Dreifache und sorgen für einen sichtbar besseren Glanz der Karosserie.

Forscher und Entwickler haben sich zum Ziel gesetzt, auch Lacke herzustellen, die nach dem Prinzip der Selbstorganisation → (siehe Kapitel 1) von selbst „heilen“, sobald sie verkratzt werden.

Farbe und Licht – Nanokugeln in Augenschein genommen

Die Iris des menschlichen Auges verändert je nach Lichteinfall ihre Farbe. Dieses „irisierende Schillern“ kann man auch mit Dispersionen kompakter Siliziumdioxidkugeln von wenigen Nanometern Durchmesser erreichen. Das fanden Forscher eines deutschen Unternehmens heraus und setzten es technisch um. Dazu werden heute verdünnte Dispersionen der Nanokugeln auf eine Oberfläche gesprüht. Beim Verdunsten des Lösungsmittels ordnen sich die Kugeln in der energetisch günstigsten Weise an und bilden einen sogenannten Photonischen Kristall. Dieser kann je nach seiner Beschaffenheit Licht reflektieren oder weiterleiten. Werden die Nanokugeln gleichmäßig in eine Kunststoffolie eingebracht, lassen sich Materialien herstellen, die nicht nur abhängig vom Blickwinkel unterschiedlich farbig erscheinen, sondern ihre Farbe auch bei Dehnung verändern. Wird die Folie gedehnt, ändert sich der Abstand der Kugeln im Material. Daraus resultieren andere optische Eigenschaften. Für Photonische Kristalle ergeben sich die verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten. Denkbar sind beispielsweise Sensoren, die auf einen Blick erkennen lassen, ob ein Material mechanisch beansprucht wird. Auch in der Elektronik können Photonische Kristalle eingesetzt werden, um Licht als Informationsträger zu nutzen und gezielt zu leiten.

4.2 Hilfreiche Hohlräume: Röhrchen und Fasern

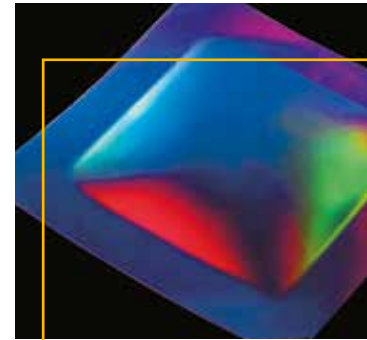
Ebenso interessante und faszinierende Nanomaterialien beruhen auf Röhren und Fasern, die einen Durchmesser von weniger als 100 Nanometer besitzen, dafür aber wesentlich länger sind. Sie dienen unter anderem als „Gussformen“ für die Herstellung von Nanodrähten oder verleihen als starke Fasermaterialien Metallen und Kunststoffen besonders hohe Stabilität. In anderen Anwendungen nehmen sie gewünschte Substanzen in sich auf und geben diese fein dosiert wieder ab.

Kohlenstoff-Nanoröhren – stromleitend und stabil

Betrachtet man das Material einer Bleistiftmine (Graphit) im Rasterkraft- oder Rastertunnelmikroskop, erkennt man einen „molekularen Maschendrahtzaun“: Graphit besteht aus einer besonderen Form des Kohlenstoffs, dessen Atome in flächig und regelmäßig angeordneten Sechsecken vorliegen. Formt man im Gedankenexperiment diese Graphitlage nun zu einer Rolle und verknüpft zwei gegenüberliegende Kanten miteinander, erhält man ein einwandiges Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Für diese winzigen Röhren ist in der Fachsprache die Abkürzung SW-CNT (engl.: single-wall carbon nanotubes) geläufig. Kohlenstoff-Nanoröhren können jedoch auch aus mehreren Lagen bestehen. Je nachdem, wie „schief“ das Röhrchen gewickelt ist, erhält es elektrisch leitende oder halbleitende Eigenschaften. Dadurch lassen sich Kunststoff-Formteile erzeugen, die statisch aufladbar sind. In der Automobilindustrie arbeitet man nach diesem Prinzip an Kunststoff-Karosserien, die Pulverlacke binden, ohne dass ein organisches Bindemittel eingesetzt werden muss. Flugzeug-Konstrukteure planen eine Außenhaut für Jets, die ohne Drähte elektrische Signale überträgt und beispielsweise dabei hilft, feinste Risse im Rumpf an das Cockpit zu melden. Eine weitere, verblüffende Eigenschaft der CNTs ist ihre extreme Zugfestigkeit. Weil sie zehnfach höhere Zugbelastungen als Stahl problemlos aushalten, eröffnen sie Möglichkeiten zur Produktion leichter und sehr stabiler Werkstoffe.

Nanofasern – feinste Filter

Filter spielen im Umweltschutz eine sehr wichtige Rolle und sind deshalb in vielen industriellen Anwendungen verbreitet. In einem Automobil beispielsweise befinden sich 16 verschiedene Filter. Sie halten nicht nur Partikel aus Flüssigkeiten und Gasen zurück, sondern verhindern auch, dass mechanische Komponenten durch die Ablagerung von Schmutzteilchen verschleifen. Filter bestehen aus einem Gewirr übereinander liegender Fasern, an deren Oberfläche sich Teilchen ablagern können. Die Eigenschaften der Fasern entscheiden darüber, wie wirksam ein Filter ist. Je dünner man eine Faser aus einer definierten Materialmenge herstellt, umso länger wird sie. Je mehr Faserlänge verarbeitet wird, desto größer die Filteroberfläche



Farbveränderliche
Effektpigmente
in einer Folie

und damit die Filterleistung. Heute sind die Fasern handelsüblicher Filter bereits dünner als ein tausendstel Millimeter. Noch feiner geht es dank Nanotechnologie: Wissenschaftler aus Marburg haben gemeinsam mit einem führenden deutschen Filterhersteller ein Material zur Marktreife gebracht, das aus Nanofasern besteht. Die ultradünnen Fasern werden mit dem Verfahren des „Elektrospinnens“ hergestellt. Dabei wird eine heiße Kunststofflösung oder -schmelze in einem elektrischen Feld zu einem feinen Strahl beschleunigt und, während das Lösemittel verdunstet, immer dünner ausgezogen. Die so erzeugten Nanofasern lassen sich auf vielfältige Weise verarbeiten. Als hauchdünne Schicht auf klassische Filtermedien aufgetragen, verbessern sie die Filterleistung deutlich. Weil herkömmliche Filter durch diese Behandlung nicht dicker werden, kann man mit den Nanofasern bereits vorhandene Filteranlagen ohne großen Aufwand optimieren.

4.3 Die zweite Dimension: Nanoplättchen

Die folgenden Beispiele erläutern Einsatzmöglichkeiten von Nano-Objekten, die unter 100 Nanometer dick, aber wesentlich länger und breiter sind.

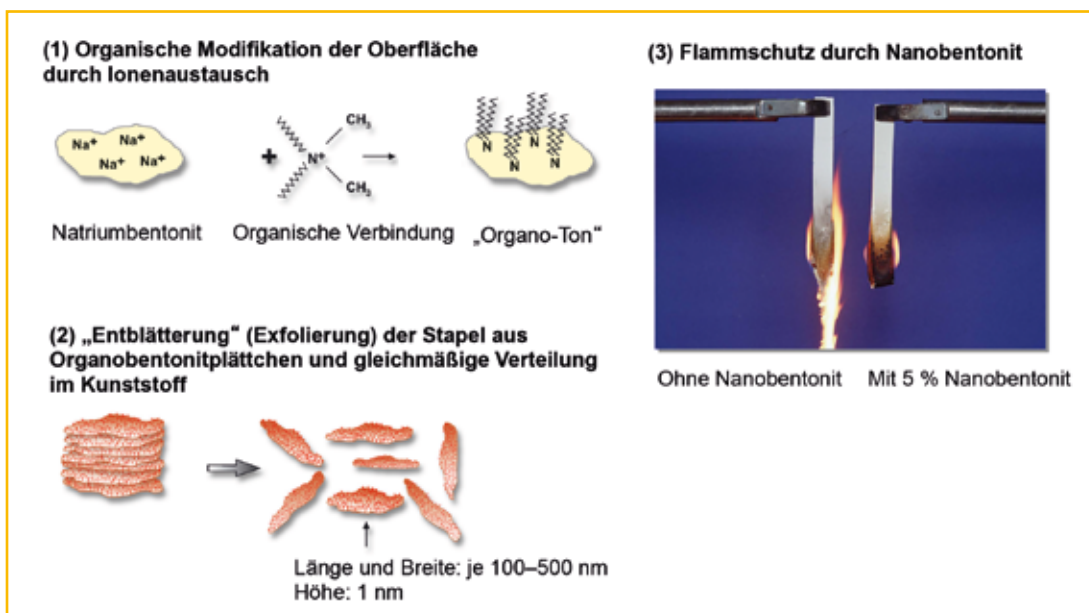
Plättchen mit Power – Flammenschutz durch Nano-Ton

Kunststoffe können herkömmliche Werkstoffe ersetzen, wenn sie bessere Eigenschaften besitzen. In vielen Bereichen hat man eine Verbesserung der elastischen Eigenschaften durch Herstellung von sogenannten Kompositen erreicht, also Gemischen aus organischen und anorganischen Stoffen. Heute mischt man viele Kunststoffe beispielsweise mit Talkum oder Glasfasern zu einem Gewichtsanteil von 20 bis 60 Prozent. Dadurch werden die Kunststoffe jedoch schwerer. Dieses Problem wurde Ende der 80er Jahre durch ein faszinierendes Nanomaterial gelöst: Nano-Bentonit. Dieser Stoff besteht überwiegend aus dem natürlich vorkommenden Tonmineral Montmorillonit.

Eine seiner Besonderheiten ist die hervorragende Quellbarkeit in Wasser. Die Wassermoleküle dringen sehr leicht zwischen die Schichten des Kieselsäure-Mineral ein und bewirken dessen Verteilung in Form von Plättchen, die nur einen Nanometer dick sind. Damit sich die Plättchen auch in organischen Polymeren verteilen, muss man ihre Oberfläche entsprechend mit organischen Molekülen beschichten. Dann eröffnet der Nano-Ton Möglichkeiten, die man mit anderen Füllstoffen

ABBILDUNG 4-2

Plättchen mit Power-Flammenschutz durch Nano-Ton



Nano bringt Farbe ins Spiel

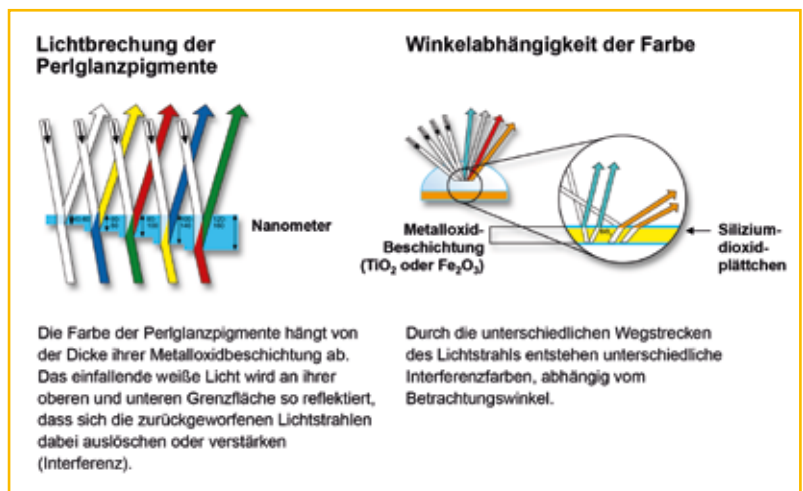
nicht erreicht. Unter anderem dient er als Hilfsstoff zusammen mit mineralischen Flammschutzmitteln dem besseren Flammschutz von Kunststoffen, zum Beispiel in Kabelverkleidungen. Anders als die überwiegend verwendeten halogenhaltigen Flammschutzmittel, setzen die Nanokomposite beim Brand keine giftigen Verbindungen frei und entwickeln zum Teil auch wesentlich weniger Rauchgas. Bereits geringe Mengen der Nanoteilchen bilden im Kunststoff ein dreidimensionales Netzwerk. Dieses unterstützt im Brandfall die Bildung einer formstabilen Kruste, die das Abtropfen schmelzenden Materials verhindert und somit die Brandgefahr in der Umgebung eindämmt. Die Vielseitigkeit der Nanoteilchen zeigt sich auch in anderen Anwendungen.

Sie machen zum Beispiel Verpackungsfolien gas- und wasserdichter oder erlauben die Kombination von Kunststoffen, die man früher nicht miteinander mischen konnte.

**Platte Pigmente:
Lichtblicke durch Nanoschichten**

Farbwirkungen wie bei der Oberfläche einer Seifenblase, einer Perle, dem Halbedelstein Opal oder den schillernden Flügeln bestimmter Schmetterlinge lassen sich dank Nanomaterialien auch künstlich erreichen. Durch sie erhalten beispielsweise Autolacke eine edle Erscheinung und Farbtiefe. Forscher aus der Industrie setzen hierbei auf optische Effekte, die nicht durch gelöste Partikel, sondern durch nanometerdünne Metalloxidschichten auf einer Trägersubstanz entstehen.

Anfänglich hatten die Wissenschaftler fein gemahlene Plättchen des Minerals Glimmer ($KAl_2[(OH,F)_2AlSi_3O_{10}]$) als Trägermaterial verwendet und mit einer oder mehreren Schichten eines Metalloxids überzogen. Die unregelmäßige Dicke der Plättchen beeinträchtigte jedoch die Reinheit der Farben und den Glanz. Dies änderte sich, als durch Kristallwachstum in einer Salzschmelze dünne und sehr gleichmäßige Aluminiumoxid-Plättchen als Alternative zum Glimmer erzeugt werden konnten. Je nach Dicke der Metalloxidbeschichtung wird das einfallende weiße Licht an ihrer oberen und unteren Grenzfläche so reflektiert, dass sich die zurückgeworfenen Lichtstrahlen nach dem Prinzip der Interferenz dabei auslöschen oder verstärken. Bei 60–80 nm Schichtdicke erscheint das Pigment zum Beispiel gelb, bei 80–100 nm



hingegen rot. Noch verblüffender wird es, wenn auf fein gemahlene, extrem gleichmäßige Siliziumdioxidplättchen (SiO_2) als Trägermaterial Nanoschichten aus Titandioxid (TiO_2) oder Eisen(III)oxid (Fe_2O_3) aufgetragen werden. Durch das Zusammenspiel von Reflexion, Brechung und Interferenz sieht der Betrachter je nach Blickwinkel eine andere Farbe. Mischt man den Plättchen herkömmliche Pigmente bei, kann man das Farbspektrum darüber hinaus auf nahezu jede gewünschte Weise gezielt einstellen. Dies ist möglich, weil die Siliziumdioxidplättchen sehr lichtdurchlässig sind. Die beigemischte Farbe „scheint“ sozusagen hindurch.

Mineralien mit Nanoporen für bessere Kraftstoffe

Zeolithe sind natürlich vorkommende Mineralien, genauer gesagt Alumosilicate. Mittlerweile gibt es auch zahlreiche synthetische Varianten dieses Minerals. Ob künstlich hergestellt oder natürlichen Ursprungs, alle Zeolithen haben eine sehr poröse Struktur mit zahlreichen Mikro- und Nanoporen. Durch diese Struktur haben Zeolithminerale eine sehr große, innere Oberfläche, die teilweise mehr als 1.000 Quadratmeter pro Gramm betragen kann. Diese Eigenschaft macht sie ideal für viele Anwendungen, bei denen sich andere Substanzen an diese Oberfläche anlagern. Zum Beispiel als chemischer Katalysator* oder in Waschmitteln, wo sie für die Wasserenthärtung verantwortlich sind.

Doch auch für viele industrielle Anwendungen sind sie interessant. In München arbeiten Wissenschaftler daran, die Vorgänge bei der Anlagerung verschiedener Kohlen-

stoffwasserstoffmoleküle in Zeolithen im Detail zu verstehen und durch eine passgenaue Veränderung der Zeolithoberfläche nutzbar zu machen. Diese Forschungen könnten zu neuen Trennverfahren in Raffinerien führen, so dass sich mit geringerem Energieaufwand besonders hochwertige Kraftstoffe erzeugen ließen.

4.4 Glatt oder nicht: Nanoschichten und -oberflächen

Eine weitere tragende Rolle bei den breit gefächerten Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie spielen Schichten und Oberflächen. Sie verleihen Brillengläsern ihre Kratzfestigkeit ebenso wie den Linsen in Handykameras ihre optischen Präzisionseigenschaften. Auch in der Küche finden wir die Nanotechnologie, beispielsweise auf Metalloberflächen am Kühlschrank. Wenn Fingerabdrücke kaum noch zu sehen sind und sich das Hautfett besser von der Fläche wischen lässt, ist dies Nanoschichten zu verdanken. Weiter geht es in Bad und WC. Wasser perlt vom Spülstein besser ab, es nimmt Verschmutzungen leichter mit und wir verbrauchen geringere Mengen an Reinigungsmitteln.

Ultraglatte Flächen halten sauber

Der Name sagt es schon – viele leicht zu reinigende Oberflächen beruhen auf dem sogenannten „easy-to-clean Effekt“. Er wird durch die Wasser- und Fett abweisende Wirkung von glatten chemischen Schichten erzeugt. Auf

Badezimmerkacheln und Duschkabinenverglasungen findet man diese Schichten schon in vielen Haushalten. Auf der Oberfläche geschieht folgendes: Ein Wassertropfen rollt über Schmutzteilchen hinweg und schleppt sie eine Strecke weit mit. Die Haftung des Schmutzes am Wassertropfen ist aber nicht stark genug, um sie vollständig von der Oberfläche zu spülen.

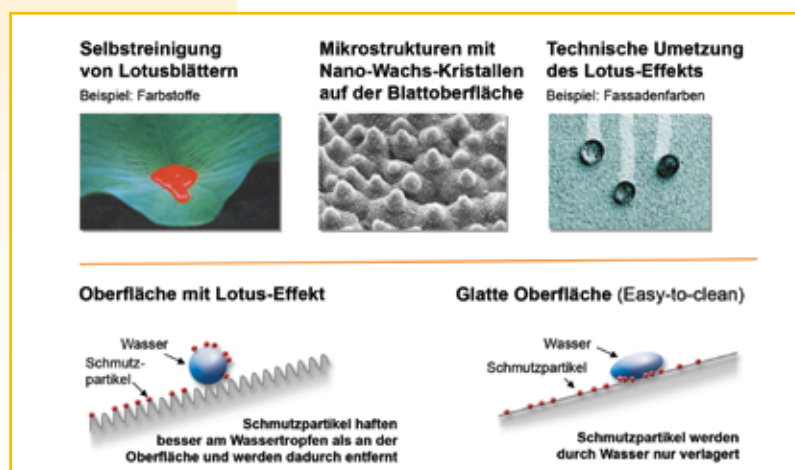
„Glatt“ bedeutet nicht immer „sauber“ – Beispiel Lotuspflanze

In asiatischen Ländern gilt die Lotuspflanze als Symbol der Reinheit und als heilig: Ihre Blätter entfalten sich aus schlammigem Gewässer und sind trotzdem trocken und sauber. Schmutz kann durch einfaches Abbrausen entfernt werden. Selbst klebrige Substanzen wie Honig laufen bei geringem Neigungswinkel der Blätter vollständig ab. Dieses Phänomen wurde in den 1970er Jahren von dem Bonner Wissenschaftler Prof. Dr. Barthlott und seinen Mitarbeitern erforscht und 1992 mit dem Begriff „Lotus-Effekt“ beschrieben. Der Effekt kommt bei rund 20.000 weiteren Pflanzenarten vor, darunter Kohl, Kapuzinerkresse, Schilf und Tulpen.

Pflanzen treten zum Beispiel bei Wasseraufnahme und Gasaustausch mit der Umwelt über ihre Oberfläche in Wechselwirkung. Hier sind sie nicht nur dem allgegenwärtigen Schmutz, sondern auch Feinden wie Bakterien, Viren und Pilzen ausgesetzt. Der Lotus-Effekt schützt die Pflanze wirkungsvoll vor Infektionen, denn Krankheitserreger können an der Blattoberfläche nicht anhaften und folglich nicht in die Zellen eindringen. Das Geheimnis dieser verblüffenden Selbstreinigung wurde unter dem Raster-Elektronenmikroskop und Rastersondenmikroskopen (siehe Kapitel 2) gelüftet. Auf der Oberfläche der äußeren Blattzellen befinden sich hügelige Mikrostrukturen, die mit wasserabweisenden Wachskristallen von wenigen Nanometern Größe besetzt sind.

ABBILDUNG 4-4

Nano hält sauber

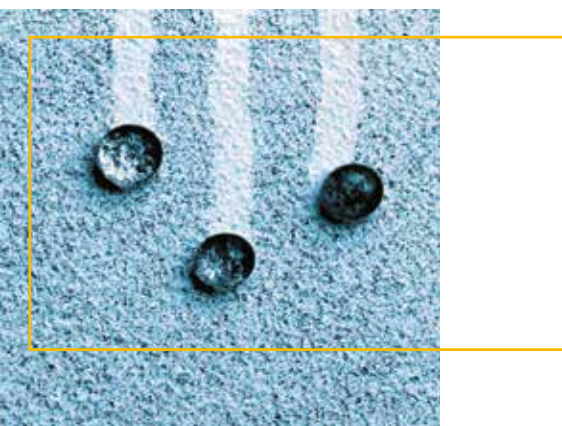


Oberflächlich betrachtet

Die Benetzung eines Stoffes mit Wasser und Luft als umgebendem Medium hängt vom Verhältnis der Grenzflächenspannungen Wasser/Luft, Festkörper/Wasser und Festkörper/Luft ab. Stoffe mit einer hohen Grenzflächenspannung (zum Beispiel Glasplatte) werden besser benetzt als solche mit niedriger Grenzflächenspannung (zum Beispiel Wachspapier).

Auf einer Glasplatte mit sehr hydrophiler Beschichtung dehnt sich der Wassertropfen zu einem Film aus einzelnen Wassermolekülen aus. Sein Kontaktwinkel* ist dann 0° . Tatsächlich nutzt man diesen Effekt bei Nanomaterialien für Antibeschlagbeschichtungen, zum Beispiel bei Brillengläsern. Bei einer extrem Wasser abweisenden (superhydrophoben) Oberfläche kugelt sich der Wassertropfen idealerweise vollständig ab und berührt den Untergrund nur in einem Punkt, als befände er sich auf einer heißen Herdplatte. Sein Kontaktwinkel beträgt dann 180° .

Auch die Rauigkeit hat Einfluss auf die Benetzung: Eine hydrophile Oberfläche wird umso benetzbarer, je rauer sie ist. Dies kann man bei Küchenpapier beobachten. Eine hydrophobe Oberfläche hingegen wird durch Aufrauung superhydrophob. Genau dies ist beim Lotus-Effekt der Fall: Die Luft wird zwischen den hydrophoben – weil mit Nano-Wachskristallen besetzten – Mikrostrukturen und dem Wassertropfen eingeschlossen. Auf der rauen Oberfläche wird die Kontaktfläche zwischen Blatt und Wassertropfen extrem klein – der Tropfen rollt scheinbar reibungslos ab. Hydrophobe Schmutzteilchen auf der superhydrophoben Blattoberfläche werden vom Wassertropfen mitgenommen, weil sie nur auf den äußersten Spitzen der Wachskristalle aufliegen. Ihre Adhäsion ist deshalb gegenüber dem Wassertropfen größer als gegenüber der Blattoberfläche.



Lotus-Effekt im Alltag

Die extrem geringe Benetzbarkeit mikro- und nanostrukturierter Oberflächen lässt sich auch mit anderen organischen Polymeren erreichen. Aus der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie sind inzwischen marktfähige Produkte hervorgegangen, zum Beispiel schmutzabweisende Fassadenfarben.

Korrosionsschutz mit Nanocontainern

Die Korrosion von Stahl und anderen Materialien verursacht jährlich beträchtliche Schäden. Jeder, der schon einmal ein älteres Auto hatte, das irgendwann dem Rost zum Opfer fiel, kennt das. Doch auch in der Industrie gibt es viele Bereiche, in denen Korrosionsschäden zu Betriebsausfällen und damit zu erheblichen Kosten führen können. Besonders starken Belastungen sind beispielsweise Reaktoren in der Chemieindustrie ausgesetzt, deren Oberflächen den Angriffen aggressiver Substanzen wie Säuren oder Alkalien standhalten müssen. Bis vor Kurzem setzte man für Antikorrosionsbeschichtungen Materialien auf der Basis von Chrom (VI) ein – dessen Verwendung ist allerdings aufgrund seiner umwelt- und gesundheitsschädlichen Eigenschaften seit 2007 in Europa weitestgehend verboten.

Hier kann die Nanotechnologie helfen, bessere Alternativen zu finden. Potsdamer Wissenschaftler arbeiten an einem Verfahren, das insbesondere in den Bereichen Bauwesen und Transport zum Einsatz kommen soll. Die Antikorrosionsbeschichtung beinhaltet Mikro- und Nanocontainer mit Substanzen, die der Korrosionsreaktion entgegenwirken. Bei mechanischem oder chemischem Angriff werden diese Stoffe freigesetzt, und zwar punktgenau nur an der betroffenen Stelle. So entsteht eine selbstheilende Oberflächenbeschichtung.

LEHRER-INFO

Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 4 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)
- Versuch 1 (Sekundarstufe I)
- Versuch 2 (Sekundarstufe I)
- Versuch 3 (Sekundarstufe II)

Kleine Strukturen für große Fortschritte

Auch in der Medizin werden derzeit Nanomaterialien für zukünftige klinische Anwendungen perfektioniert. Dies beginnt bei der Diagnose von Stoffwechseleränderungen oder Krankheiten und erstreckt sich bis zu neuen Therapieverfahren. Mit Hilfe von Diagnostika auf Basis von Nanomaterialien wird es zukünftig möglich sein, Krankheiten oder Ursachen für noch nicht ausgeprägte Erkrankungen früher als bisher zu erkennen. Damit wird einerseits die Gesundheitsvorsorge verbessert, andererseits steigen für den Patienten die Chancen einer wirksamen Behandlung. Der Gesundheitszustand chronisch kranker Menschen, zum Beispiel Diabetiker, könnte mit Nanosensoren permanent überwacht werden, ohne dass die Überwachung die Lebensqualität der Patienten einschränkt. Gleichzeitig würden sie mehr Sicherheit und Handlungsfreiheit gewinnen.

Nanomaterialien stellen neue Medikamente für eine zielgerichtete Behandlung bislang nicht heilbarer Krankheiten wie Krebs oder Alzheimer in Aussicht. Nanoteilchen oder „Nano-Container“ eignen sich dazu, beispielsweise medizinische Wirkstoffe direkt zum erkrankten Gewebe oder Organ zu transportieren oder sogar Krebszellen zu zerstören, ohne das umliegende gesunde Gewebe zu schädigen.

In der Medizintechnik können Beschichtungen mit Nanomaterialien dabei helfen, Implantate wie zum Beispiel künstliche Hüftgelenke herzustellen, die für den Patienten verträglicher sind und weniger stark verschleifen. Andere Arten von Beschichtungen wehren beispielsweise bei Blasenkathetern den Bewuchs mit krankheitserregenden

Bakterien ab. Auch Materialien, die wie winzig kleine Schwämme oder Pumpen Arzneimittel abgeben und präzise dosieren, sind keine Zukunftsmusik mehr. Derartige medizinische Anwendungen steigern die Lebensqualität und helfen gleichzeitig, Kosten im Gesundheitswesen einzusparen.

Mit Nanotechnologie an den Wirkort

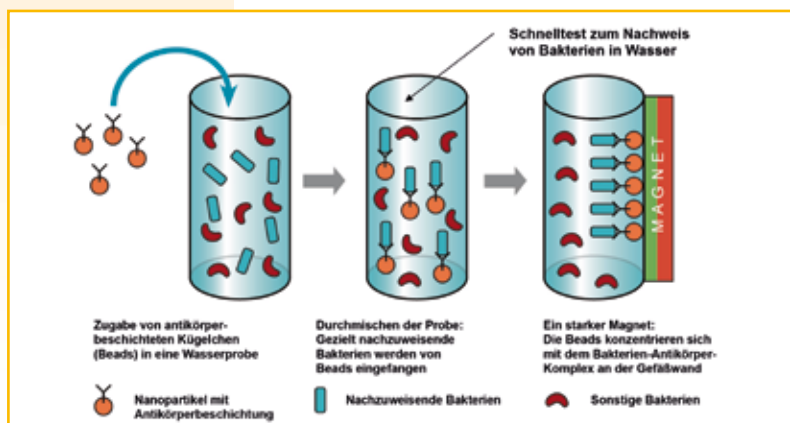
Ein Problem, das sich bei der Entwicklung neuer Arzneimittel immer wieder stellt: Wie schafft man es, den Wirkstoff an die Stelle im Körper zu bringen, wo er benötigt wird? Oft müssen dabei biologische Barrieren überwunden werden. So wie die Haut, aber auch Zellmembranen oder bestimmte Sekrete wie zum Beispiel auf Schleimhäuten. Zusätzlich wird die Anwendung oft durch physikalisch-chemische Eigenschaften der Wirkstoffe, wie eine niedrige Löslichkeit, erschwert.

Hier kann die Nanotechnologie weiterhelfen, denn wenn Medikamentenwirkstoffe in nanokleiner Verteilung vorliegen, lassen sie sich oft besser lösen oder können biologische Membranen leichter überwinden. Ein Beispiel hierfür ist die Substanz Tacrolimus, ein sogenannter Immunsuppressor. Tacrolimus wird bei Transplantationspatienten eingesetzt, um zu verhindern, dass ihr Immunsystem das eingepflanzte Organ abstößt. Da Tacrolimus extrem hydrophob, also wasserabweisend ist, wird es in Form einer Nanosuspension verabreicht, bei der Tacrolimus-Nanopartikel in Wasser verteilt sind. Noch im Versuchsstadium befindet sich hingegen ein Ansatz, der zukünftig die Verwendung von Spritzen bei Impfungen überflüssig machen könnte: Eine Strategie der Nanomedizin ist es, winzige Behälter zu nutzen, um Wirkstoffe an Ihren Zielort zu bringen und in die betroffenen Zellen einzuschleusen. Liegt ein Impfstoff in solchen „Nanocontainern“ vor, kann man ihn in Form einer Salbe auf die Haut auftragen. Nur weil der Nanocontainer eine besonders strukturierte Oberfläche hat, erfolgt seine Aufnahme in den Körper – und zwar mithilfe von Zellen des Immunsystems an den Haarwurzeln.

Weniger fortgeschritten, aber durchaus vielversprechend ist der Ansatz, Nanoteilchen mit Wirkstoffen zu beladen und über ihre Oberfläche nach dem „Schlüssel-Schloss-Prinzip“ spezifisch mit dem erkrankten Zelltyp reagieren zu lassen.

ABBILDUNG 5-1

Nanopartikel-Magnetbeads in immunologischen Schnelltests



Den Krebs bekämpfen mit Nanotechnologie

Ein beliebtes Experiment im Physik-Unterricht ist die Darstellung magnetischer Feldlinien mit Eisenfeilspänen und einem Hufeisenmagneten auf dem Overhead-Projektor. Magnete gibt es aber auch im Nanokosmos, nämlich Nanopartikel aus Magnetit (Fe_3O_4). Diese werden durch Reaktion von Eisen(II)-Chlorid und Eisen(III)-Chlorid mit Natronlauge hergestellt. Damit die Partikel nicht verklumpen und sich in unpolaren Lösungsmitteln aufnehmen lassen, wird ihre Oberfläche zusätzlich zum Beispiel mit Ölsäure beschichtet. Aufgrund ihrer geringen Größe und der hydrophoben Eigenschaften ihrer Beschichtung verteilen sich die Partikel gleichmäßig in der Lösung und sedimentieren nicht. Die gesamte Flüssigkeit – das sogenannte Ferrofluid – kann mit einem Magneten bewegt werden.

Ferrofluide → (siehe Kapitel 4) werden bereits als Kontrastmittel in der medizinischen Bildgebung eingesetzt. Durch Magnetfelder können sie an einer gewünschten Stelle im Körper positioniert werden. Wegen dieser Eigenschaften eignen sich Ferrofluide auch

für die Behandlung bestimmter Tumorerkrankungen. Obwohl in den vergangenen Jahrzehnten bei der Bekämpfung bestimmter Krebsarten große Fortschritte gemacht wurden, bleibt die Heilung sehr vieler Tumorerkrankungen immer noch eine große Herausforderung. Ein vielversprechender Ansatz wurde mittlerweile für die Behandlung einer bestimmten Form von Hirntumoren (Glioblastom) zugelassen, die sich mit anderen Methoden nur schlecht oder gar nicht bekämpfen lassen. Diese neue Methode macht sich die besonderen Eigenschaften magnetischer Nanopartikel zunutze: In Wasser gelöste Eisenoxidteilchen mit einem Durchmesser von ca. 15 Nanometern und einer speziellen Beschichtung.

Die Teilchen werden in den zu bekämpfenden Tumor injiziert und dann dank ihrer Oberflächenbeschichtung von den Tumorzellen aufgenommen. Anschließend wird der Patient einem Magnetfeld ausgesetzt, das etwa 100.000 Mal in der Sekunde die Richtung wechselt. Die Eisenoxidnanopartikel werden dadurch in Schwingung versetzt und erzeugen Wärme. Je nachdem, welche Temperaturen auf diese Weise im Tumor erreicht werden und wie lange die Behandlung andauert, werden die Tumorzellen entweder zerstört oder zumindest so

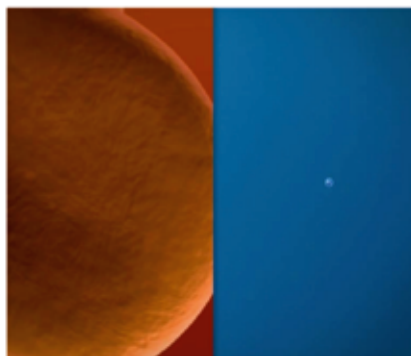
ABBILDUNG 5-2

Krebsbekämpfung mit magnetischen Nanopartikeln

Die Magnetfeld-Hyperthermie-Therapie



1. Links: Hirntumorzelle
Rechts: Therapeutischer Eisenoxid-Nanopartikel
2. Die therapeutischen Nanopartikel tragen eine biochemische Hülle.
3. Die Nanopartikel-Dispersion wird in den Hirntumor gespritzt.
4. Rechts: Die Partikel werden von den Krebszellen aufgenommen.
Links: Gesundes Gewebe
5. Das erkrankte Gewebe wird einem hochfrequenten magnetischen Wechselfeld ausgesetzt.
6. Die Nanopartikel haben sich im Tumor stark angereichert.
7. Die Nanoteilchen geraten in Schwingungen und erhitzen sich.



Copyright © 2007 MagForce Nanotechnologies AG

geschwächt, dass sie anschließend mit einer Chemotherapie oder einer Strahlenbehandlung wirksam bekämpft werden können. Dadurch dass der Tumor von innen bekämpft wird, wird umliegendes, gesundes Gewebe weitgehend geschont.

Nanoteilchen in der Diagnostik

Um sichere Diagnosen zu erstellen, benötigen Ärzte zahlreiche labordiagnostische Methoden. Diese müssen nicht nur empfindlich, zuverlässig und wiederholbar sein, sondern im Idealfall auch schnell und kostengünstig. Oft müssen dafür extrem geringe Mengen eines biologischen Moleküls wie zum Beispiel Hormone oder Eiweißstoffe in

menschlichem Blutplasma nachgewiesen werden. So weiß man seit einiger Zeit, dass bei bestimmten Formen von Prostatakrebs die Konzentration eines Eiweißstoffes, des sogenannten Prostataspezifischen Antigens (PSA), im Blut erhöht ist.

Niederländische Wissenschaftler haben einen Test entwickelt, mit dem sich PSA sehr schnell und empfindlich nachweisen lässt. Hierzu beschichteten sie magnetische Nanopartikel mit Antikörpern gegen das PSA und gaben diese direkt in ein sehr kleines Volumen Blutplasma. Mit Hilfe der veränderten magnetischen Eigenschaften der beladenen Nanopartikel in einem magnetischen Wechselfeld konnten sie nun innerhalb einer Viertelstunde die PSA-Konzentration sehr genau ermitteln.

ABBILDUNG 5-3

Magnetische Nanopartikel

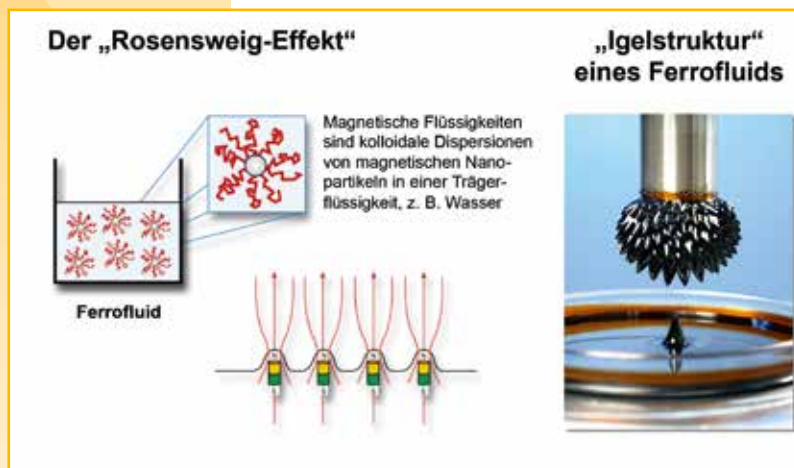


ABBILDUNG 5-4

Nanobiotechnologie im Gesundheitswesen – Pharmazie

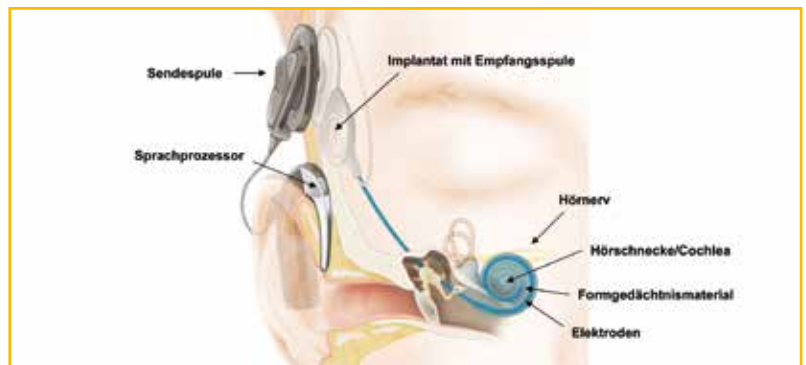


LEHRER-INFO

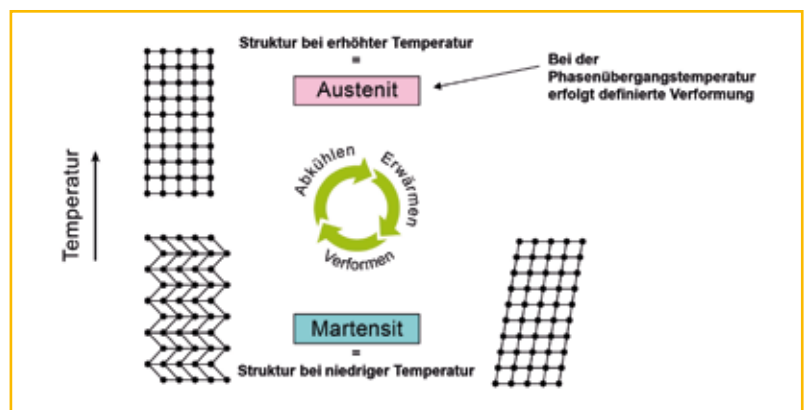
Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 5 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)
- Versuch 4 (Sekundarstufe II)

Cochlea-Implantat aus einer Formgedächtnislegierung



Formgedächtnismaterialien für Cochlea-Implantate



Nanooberflächen und Nanostrukturen in der Medizintechnik

Durch Nanotechnologie lässt sich die Verwendung von Blasenkathetern sicherer und verträglicher machen. Wird ein herkömmlicher Blasenkatheter in die Harnröhre eingeführt, so kommt es trotz hoher Hygienestandards manchmal zu einer bakteriellen Besiedlung der Katheteroberfläche, die zahlreiche Probleme nach sich ziehen kann. Eine etwa 50 Nanometer dünne Schicht aus ungeordnetem (amorphem) Kohlenstoff verhindert eine solche Besiedlung der Oberfläche.

Auch bei modernen Hörgeräten kommen Nanoschichten zum Einsatz, die ein Anhaften von Ohrenschmalz und auch das Bewachsen mit Bakterien verhindern. Bei bestimmten Formen der Gehörlosigkeit kann ein sogenanntes Cochlea-Implantat helfen. Auch bei diesen Implantaten spielt Nanotechnologie mittlerweile eine wichtige Rolle. Die Elektrode, die in die Hörschnecke eingesetzt wird und die vom äußeren Teil des Implantats aufgenommenen Signale an den Hörnerv des Patienten weiterleitet, muss sich der Form der Hörschnecke anpassen. Dafür fertigt man die Elektrode aus einer nanostrukturierten Formgedächtnislegierung. Die Elektrode ist bei Raumtemperatur gestreckt und gerade, nimmt dann aber beim Implantieren durch die Körperwärme die für den Patienten ideale Passform an.

Sonnenschutz und Pflege dank Nano

Sonnenlicht ist gut für die Gesundheit und eine gebräunte Haut wird von vielen als erstrebenswert empfunden. Ein Zuviel an Sonnenlicht und damit UV-Strahlung wiederum kann die Hautalterung beschleunigen und das Hautkrebsrisiko steigern. Ganz unmittelbar und schmerzhaft spüren wir diese Risiken bei einem Sonnenbrand. Sonnenschutzmittel beugen dieser Gefahr vor.

Seit einiger Zeit haben sich hierbei Produkte bewährt, die Nanopartikel aus Titandioxid oder Zinkoxid enthalten. Diese besitzen verschiedene Vorteile: Auch bei hohen Lichtschutzfaktoren hinterlassen sie keine weißen Cremespuren (die Teilchen sind durchsichtig) und sie schützen die Haut gleichmäßiger, denn die Nanoteilchen bleiben dort liegen, wo sie aufgetragen wurden, anstatt mit der Creme in Hautfalten abzulaufen. Auch werden sie von empfindlichen Personen besser vertragen als herkömmliche UV-Blocker. In verschiedenen Untersuchungen im Rahmen der Risikoforschung wurde außerdem festgestellt, dass diese Nanopartikel gesunde Haut nicht durchdringen können. Ebenso besonders wirkungsvoll sind Nanokugeln, die man

in verschiedenen Alltagsprodukten findet. In Kosmetik-Cremes zum Beispiel geben sie pflegende Substanzen an die Haut ab und sorgen für ein angenehmeres Hautgefühl.

Kennzeichnungspflicht für Nanopartikel in Kosmetika

Die winzigen Dimensionen und teilweise veränderten Eigenschaften von Nanopartikeln (im Vergleich zu größeren Partikeln aus der gleichen Substanz) führen dazu, dass manche Verbraucher bei ihrem Einsatz in Kosmetika Bedenken haben. Die begleitende Sicherheitsforschung, die sich mit möglichen Risiken für Mensch und Umwelt durch den Einsatz von Nanomaterialien befasst, hat bisher keine Hinweise darauf gefunden, dass Nanopartikel in Kosmetika bedenklich sein könnten. Um die Transparenz für den Verbraucher zu verbessern, hat das Europäische Parlament eine Neufassung der Europäischen Kosmetikrichtlinie erlassen. So müssen Kosmetikerhersteller seit Juli 2013 auf der Verpackung angeben, ob und wenn ja, welche Nanomaterialien verwendet wurden. Hinter der Bezeichnung des betreffenden Stoffes in der Zutatenliste steht dann in Klammern der Begriff „nano“.

Schutz der Umwelt

Nanomaterialien können auch dazu beitragen, Herstellungsverfahren durch Einsparung von Rohstoffen und Energie sowie durch Senkung des Abfallaufkommens umweltverträglicher zu machen. Kleinste Teilchen und Schichten spielen heute bereits eine wichtige Rolle in der Gewinnung und Speicherung von Energie. Dabei ergeben sich interessante Anwendungen vor allem im Bereich der erneuerbaren Energien wie Sonnenwärme, Solarstrom oder in der Brennstoffzellentechnologie.

Beispiel: Clever lackieren

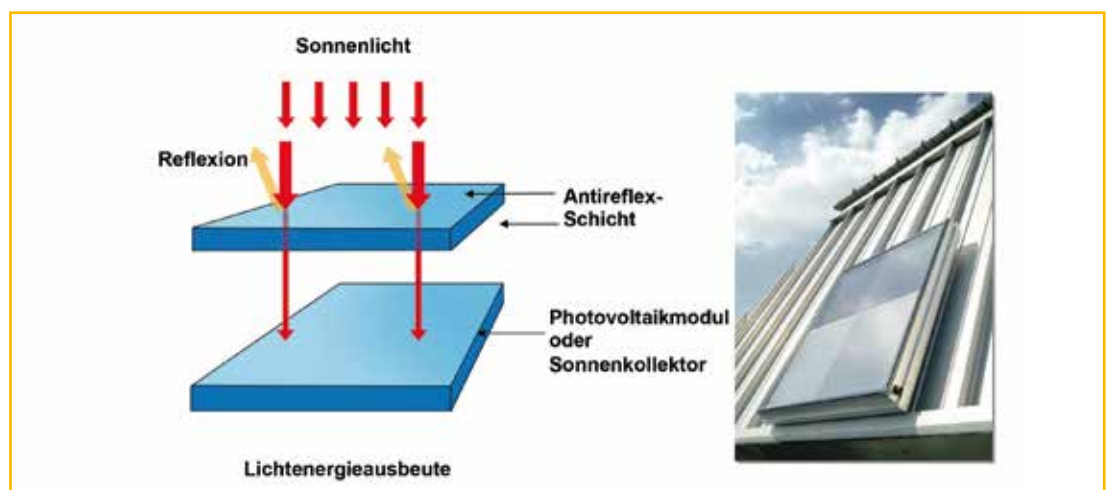
Unter dem Begriff „Lackieren“ versteht man die Beschichtung von Oberflächen mit aushärtenden oder aushärtbaren organischen Stoffen. Die organischen Stoffe werden in einer dünnen Schicht auf das Werkstück aufgebracht. Durch chemische Reaktionen und physikalische Vorgänge bildet sich dann ein haftender, fester Film. Bevor die Oberfläche lackiert werden kann, muss sie staub- und fettfrei gemacht werden. Weitere Vorbehandlungsschritte erhöhen die spätere Haftung des Lackes und schützen das Werkstück vor Korrosion. Oberflächen von Werkstücken aus Aluminium reagieren sehr schnell mit dem Luftsauerstoff zu Aluminiumoxid (Al_2O_3). Damit der Lack auf Aluminium überhaupt haftet, war es bisher notwendig, die Oberfläche mit ätzender Chromsäure (H_2CrO_4) zu behandeln. Sie verringert die Dicke der Aluminium-Oxid-Schicht und führt zur Bildung

einer neuen Aluminium-Chromoxid-Schicht. Bei diesem Vorgang fallen Chrom(VI)-haltige Abfallstoffe an, die aufwendig entsorgt werden müssen, da sie als giftig und krebserregend gelten.

Eine umweltverträgliche Alternative zur Chromatierung bietet der „Nano-Lack“ eines deutschen Start-up-Unternehmens. Wie andere Lacke auch, setzt er sich aus Bindemitteln, Lösungsmitteln, Füll- und Zusatzstoffen zusammen. Sein Bindemittel besteht jedoch nicht nur aus organischen Verbindungen, sondern aus einem organisch-anorganischen Mischpolymer. Die Besonderheit des neuen Lackes ist seine Herstellung nach dem Sol-Gel-Verfahren → (siehe Kapitel 3). Im Sol liegen Nanoteilchen von 40 bis 50 nm Durchmesser aus siliziumorganischen Verbindungen (Silanen) vor. Der Lack wird mit gängigen industriellen Verfahren aufgebracht und härtet aus, indem die Nanoteilchen durch Vernetzung ein festes, dreidimensionales Gel bilden. Gegenüber herkömmlichen Produkten besitzt er gleich mehrere Vorteile: Er haftet „von selbst“ an Metallen und Kunststoffen; so wird die Zahl der Vorbehandlungsschritte, zu denen vor allem Spülgänge gehören, von zehn auf zwei reduziert. Dadurch werden wiederum Wasser und Energie gespart und es entstehen weniger Abfälle. Weiterhin verdunsten bei der Verarbeitung des Nano-Lacks 65 Prozent weniger organische Stoffe, was zum Schutz der Atmosphäre beiträgt. Auch der Rohstoffeinsatz sinkt, weil der neue Lack dünnere aber ansonsten gleichwertige Schichten bildet.

ABBILDUNG 6-1

Nano steigert Power



Marmor von der Rolle

Wer Keramikfliesen selbst verlegt, kennt die Schwierigkeiten beim Zuschneiden, denn Keramik ist bekanntlich hart und spröde. Die Fugen zwischen den Fliesen mögen zudem noch so exakt gearbeitet sein – sie bieten trotzdem Angriffspunkte für Bewuchs mit Bakterien und Schimmelpilzen.

Ein deutsches Chemie-Unternehmen hat mittels Nanotechnologie „Marmor von der Rolle“ entwickelt. Dieses Produkt ist biegsam, zugleich widerstandsfähig und lässt sich für individuelle Ansprüche sogar maßschneidern. Die neuartige Wandverkleidung besteht aus maximal vier Schichten: Als Basis dient ein Polymervlies, das mit einer keramischen Metalloxidschicht bedeckt wird. Darauf kann nach Wunsch eine Bedruckung aufgebracht werden. Abschließend werden die unteren Lagen mit einer ebenfalls keramisierten Schutzschicht bedeckt. Das Material ist extrem leicht, kratz- und schlagfest, chemikalienbeständig und stabil gegenüber ultravioletter Sonnenstrahlung. Es widersteht Hitze und Flammen, ist wasserbeständig und gleichzeitig atmungsaktiv. Weil es fugenlos verlegt wird, bieten sich auch weniger Angriffspunkte für Schmutz und Schimmel. Ein weiterer Vorteil liegt in seiner energiesparenden Herstellung. Während ein bestimmter Schritt bei der Produktion herkömmlicher Keramik 1250 °C erfordert, reichen zur Keramisierung des „Marmors von der Rolle“ wegen eines speziellen Verfahrens bereits 250 °C aus.

Nano im Akku

Lithium-Ionen-Akkus spielen eine große Rolle zum Beispiel bei der Weiterentwicklung von Elektroautos. Außerdem können sie in großen Batterieanlagen überschüssigen Strom aus Solar- und Windkraftanlagen zwischenspeichern. Bisher bestand jedoch immer das Risiko, dass die Akkus bei Überladung überhitzen und in Brand geraten konnten.

Um diese Gefahr einzudämmen, hat ein deutsches Unternehmen ein neues Keramikmaterial für ein bestimmtes Bauteil des Lithium-Ionen-Akkus entwickelt: den Separator. Dieser trennt in der Batteriezelle den Minus- vom Pluspol und verhindert so einen Kurzschluss. Bei dem neuen Separator bewirken Nanomaterialien, dass das Verfestigen und Zusammenwachsen der



Nanomaterialschichten auf Verglasungen steigern die Energieausbeute in Solarzellen.

Keramikteilchen bereits bei niedrigeren Temperaturen abläuft. Darüber hinaus lässt sich die Keramik nun mit einer Kunststoffmembran (Polymervlies) fest verbinden. Als Folge dieser besonderen Eigenschaften ist der Separator nun bis zu einer Temperatur von 700 °C hitzebeständig und gerät nicht so schnell in Brand wie herkömmliche Bauteile.

Nanoschichten – sonnenklar.

Die Energiegewinnung aus Sonnenlicht kann zukünftig eine wertvolle Ergänzung zur Nutzung fossiler Brennstoffe werden und damit einen wichtigen Beitrag zum Umweltschutz leisten. In den letzten Jahren wurden mit Sonnenkollektoren zur Umwandlung von Sonnenenergie in Wärme und Photovoltaiksystemen für die Stromerzeugung bereits beachtliche Erfolge erzielt. Trotzdem müssen einige Bauteile von Solaranlagen noch weiter verbessert werden, um die Energieausbeute zu steigern. Dies gilt zum Beispiel für die Glasabdeckungen der Solarmodule. Das Problem: Selbst hochwertiges Glas lässt höchstens 90 Prozent des Sonnenlichts hindurch. Zwei Prozent der Strahlung werden vom Glas absorbiert und gestreut, acht Prozent werden an den Grenzflächen der Scheibe reflektiert. Ursache der Reflexion an einer Glasoberfläche ist der Unterschied im Brechungsindex zwischen Luft und Glas. Bringt man aber eine Antireflexschicht auf beiden Seiten des Glases auf, kann deutlich mehr Lichtenergie durch die Scheibe gelangen.

Forscher eines Chemieunternehmens stellen für diesen Zweck spezielle Antireflexschichten aus Nanomaterial her. Die Schicht wird mit dem Sol-Gel-Verfahren auf das Glas aufgebracht. Das Sol besteht aus Siliziumdioxid (SiO₂)-Kügelchen mit einem Durchmesser zwischen 20 und 50 nm, die in einem Lösungsmittelgemisch verteilt sind. Das zuvor gereinigte Abdeckglas für die Solarmodule wird von einem Roboter in eine Wanne mit dem Beschichtungs-Sol getaucht und wieder herausgezogen. Das Sol bleibt gleichmäßig verteilt auf dem Glas zurück. Über die Geschwindigkeit, mit der das Glas aus der Wanne gezogen wird, kann man die Beschichtungsdicke genau einstellen. Optimal ist eine Dicke von 150 nm. Beim Trocknen der Platten bildet sich durch Vernetzung der Teilchen aus dem Sol ein Gel, das anschließend bei 650 °C fest in das Glas eingebrannt und mit diesem gehärtet wird. Die so entstandene Schicht ist wegen der Zwischenräume zwischen den Siliziumdioxid-Kugeln porös, wobei die Poren nur wenige Nanometer groß sind. Durch diese Struktur bekommt die Schicht ihre besonderen optischen Eigenschaften – sie besitzt einen wesentlich geringeren Brechungsindex als das unbeschichtete Glas.

Mit der neuen Beschichtung kann fast das gesamte in der Energiegewinnung genutzte Wellenlängenspektrum des Sonnenlichts (400 nm bis 2.500 nm) die Abdeckscheiben der Solarmodule durchdringen. Die Reflexion wird von acht auf zwei Prozent gesenkt und dadurch die Energieausbeute entsprechend gesteigert. Dies trifft

auch in den Morgen- und Abendstunden zu, wenn das Licht flach auf die Erde fällt und bei herkömmlichem Glas winkelabhängig viel Licht reflektiert würde.

Ein Sonnenkollektor mit der neuen Glasabdeckung wandelt pro Jahr bis zu zehn Prozent mehr Sonnenenergie in Wärme um. Eine Photovoltaikanlage erzeugt je nach geografischer Lage und Klima bis zu vier Prozent mehr Strom.

Den Pflanzen abgeschaut – Organische Solarzellen

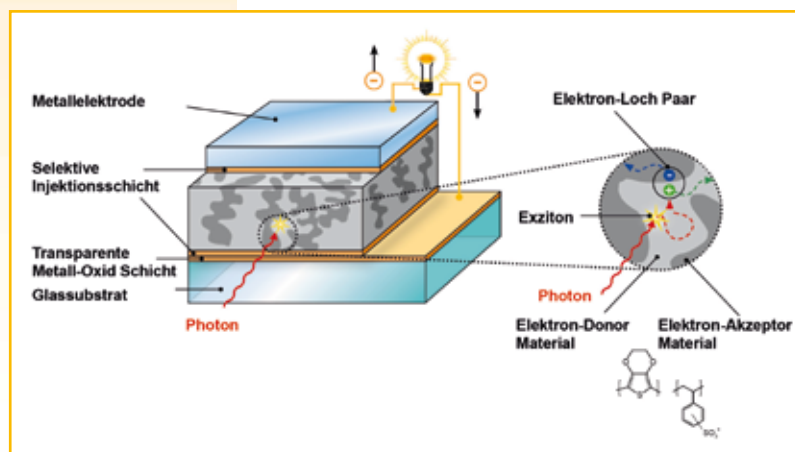
Photovoltaikmodule, die wir zum Beispiel als „Solarzellen“ von Hausdächern und Solarparks kennen, beruhen auf dem Material Silizium. Ihre Konstruktion ist vergleichsweise sperrig. Könnte man auch Solarzellen bauen, die als Folie auf das Fenster geklebt oder auf einer geschwungenen Autokarosserie aufgebracht werden können?

Um diese Frage zu beantworten, haben sich Forscher die Pflanzen zum Vorbild genommen. Grüne Pflanzen fangen mit ihren Blättern die Energie des Sonnenlichts ein und wandeln sie in chemische Energie um. Bei dieser Umwandlung, die in den Chloroplasten der Pflanzenzellen stattfindet, sind zahlreiche organische Verbindungen beteiligt; nach Anregung durch ein Lichtteilchen (Photon) fließen Elektronen über ein Energiegefälle. Das funktioniert in einer winzigen Alge im Tümpel genauso wie in den Blättern großer Bäume. Leider lässt sich die pflanzliche Photosynthese im Labor nicht eins zu eins nachbauen – dazu sind die Vorgänge viel zu kompliziert. Man kann aber mit geeigneten organischen Verbindungen etwas Ähnliches konstruieren. Der Schweizer Wissenschaftler Michael Grätzel war der erste, der dies Anfang der 1990er Jahre schaffte. Er konstruierte auf zwei Glasplättchen mit elektrisch leitenden Beschichtungen von wenigen Nanometern Dicke als Plus- und Minuspol die erste organische Solarzelle. Als „Lichtfänger“ diente ihm ein gereinigter Blütenfarbstoff (Anthocyan) auf dem Minuspol.

Moderne Entwicklungen setzen heute auf langkettige, organische Moleküle mit stark verschiedenen elektronischen Eigenschaften. Dabei benötigt man immer einen „Donor“, der bevorzugt Elektronen abgibt, und einen „Akzeptor“, der bevorzugt Elektronen aufnimmt. Mittlerweile nutzen die Forscher die Eigenschaft dieser Verbindungen, sich auf einer Oberfläche von selbst in Strukturen anzuordnen, die eine Ladungstrennung

ABBILDUNG 6-2

Nanoschichten und -materialien in organischen Photovoltaik-Elementen



ermöglichen. Das ist ein wichtiger Schritt zu Solarzellen, die mit biegsamen Folien auf großen Flächen hergestellt werden könnten.

Jetzt müssen die organischen Solarzellen nur noch genauso leistungsfähig werden wie ihre Verwandten aus Silizium. Die erzeugen nämlich derzeit noch fast doppelt so viel Strom pro einfallender Lichtmenge.

Nano-Heizung für Windkraftanlagen

Im Winter können sich auf den Rotorblättern von Windkraftanlagen Eisschichten ausbilden. Gefürchtet sind sie, wenn sie vom rotierenden Windrad als sogenannter Eisflug zum Beispiel auf nahe gelegene Straßen geschleudert werden. Diese Gefahr lässt sich am besten bannen, wenn erst gar kein Eis auf den Rotorblättern entsteht.

Ein deutsches Nanotechnologie-Unternehmen hat zu diesem Zweck eine Spezialfolie entwickelt, in der ein Gemisch aus Kohlenstoffnanomaterialien – zum Beispiel „Nanofußbälle“ (Fullerene) und Kohlenstoffnanoröhren – von elektrischem Strom durchflossen werden. Dabei erhitzen sich die Nanomaterialien in Abhängigkeit von der Stromstärke. In der Praxis wird die Folie als Rotorblattheizung auf den Flügelkörper aufgebracht und mit einer Lackschicht überdeckt. Bereits wenige Grad Erwärmung gegenüber der Umgebungstemperatur bewirken, dass sich auf dem Rotorblatt keine Eisschicht mehr bilden kann.

Nanoverbundmaterialien – superleicht und stabil

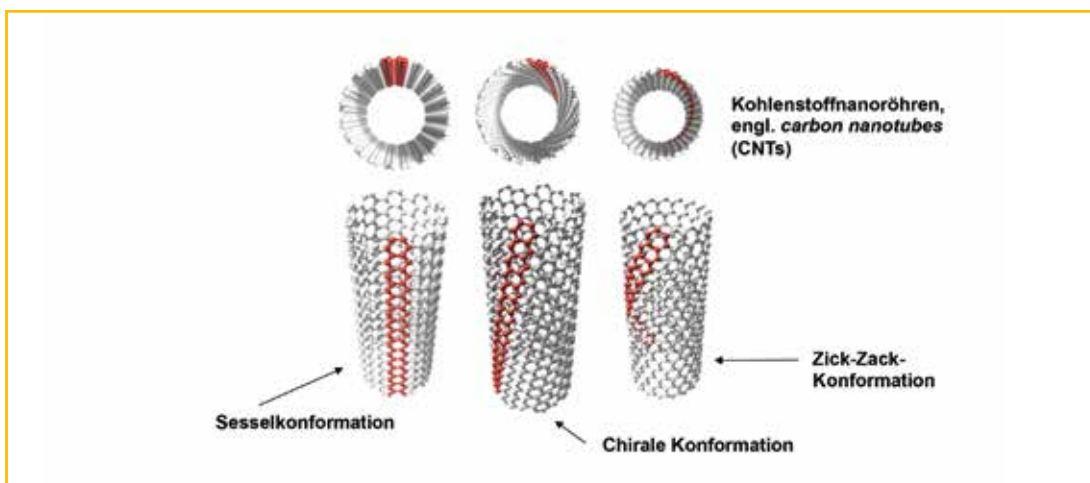
Neuartige Nanomaterialien auf Kohlenstoffbasis sind nicht nur ein spannendes Forschungsgebiet, sondern finden sich mittlerweile in immer mehr Produkten wieder. Ein vielseitiger Vertreter dieser Materialklasse sind die Kohlenstoffnanoröhren (meist nach der englischen Bezeichnung carbon nanotubes als CNTs abgekürzt). Sie bestehen aus einer oder mehreren Lagen wabenförmig angeordneter Kohlenstoffatome und besitzen sehr interessante Eigenschaften:

So können sie je nach „Wicklung“ entweder elektrisch leitfähig oder halbleitend sein. Die Dichte von CNTs beträgt nur etwa ein Sechstel derjenigen von Stahl. Gleichzeitig ist ihre Zugfestigkeit im Vergleich zu der des Stahls bis zu dreißigmal höher. CNTs eignen sich zur Verstärkung von Kunststoffen, Metallen und auch Textilien in unterschiedlichen Verbundmaterialien. So kann zum Beispiel die Bruchfestigkeit eines Epoxydharzes durch Beimengung von etwa einem Gewichtsprozent mehrwändiger CNTs um fast ein Viertel gesteigert werden, so dass man mit weniger Material die gleiche Stabilität erreicht. Im Flugzeugbau werden entsprechende Leichtbaumaterialien auf CNT-Basis bereits heute eingesetzt. Im Automobilbau macht man sich die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstoffnanoröhren zunutze, beispielsweise für antistatische Kraftstoffleitungen.



ABBILDUNG 6-3

Nanomaterialien (zum Beispiel CNT) in Verbundwerkstoffen



Nanoporen für exzellente Wärmedämmung

Die Antwort lautet: Aerogele. Sie verdanken ihre Eigenschaften einer schwammartigen Struktur mit Poren von nur wenigen Nanometern Durchmesser. Diese Poren machen üblicherweise 99,98 Prozent des Volumens eines Aerogels aus. Aufgrund ihrer winzigen Abmessungen kann sich das darin eingeschlossene Gas, meist Luft, kaum bewegen, so dass Wärme in diesem Material kaum weitergeleitet werden kann. Die restlichen 0,02 Prozent können aus unterschiedlichen Substanzen bestehen. Sehr verbreitet sind Aerogele auf Basis von Siliciumdioxid. Sie isolieren so gut, dass eine wenige Millimeter dicke Schicht die Hitze einer Bunsenbrennerflamme wirkungsvoll abschirmt. Seit 2014 ist in Deutschland ein Dämmputz erhältlich, der sich die extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit solcher Aerogele zunutze macht. Aufgrund der geringen benötigten Materialstärke ist er auch zur energetischen Sanierung denkmalgeschützter Altbauten geeignet.

Nanoteilchen helfen, im Bauwesen Energie zu sparen

Bei vielen Baustellen sind sie zu entdecken: Betonfertigerteile. Sie werden industriell hergestellt und baufertig angeliefert. Bei der Herstellung des Betons werden Zement, Kies, Sand und Wasser miteinander vermischt und in eine Form gegossen. Kommen die Zementkörner mit Wasser in Berührung, lösen sich Moleküle heraus und kondensieren als Calciumsilikathydrat-Keime (CSH) auf der Oberfläche. Diese wachsen – zunächst sehr langsam – durch Anlagerung weiterer Moleküle zu langen Nadeln heran, die sich ineinander verhaken und den Zement immer mehr verfestigen.

Ohne Hilfsmittel dauert die Aushärtung bis zu 12 Stunden. Schneller geht es durch Erhitzen auf 60 °C, das verbraucht aber Strom.

Um die Betonhärtung ohne Energieverbrauch beschleunigen zu können, haben die Forscher eines deutschen Chemieunternehmens einen Hilfsstoff in Form von CSH-Nanokristallen entwickelt, die bereits beim Anmischen zugeführt werden. Sie beschleunigen das Wachstum der CSH-Kristalle nicht nur auf der Oberfläche der Zementkörner, sondern auch in den Zwischenräumen. Die Aushärtungszeit wird dadurch halbiert und die fertige Betonstruktur sieht genauso aus wie ohne den Nano-Zusatz. Das Verfahren spart nicht nur Zeit und Geld, sondern schont auch die Umwelt: Durch weniger Kohlenstoffdioxid-Ausstoß und somit eine günstigere Klimabilanz.

LEHRER-INFO

Siehe
- Arbeitsblatt Nr. 6 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)

ABBILDUNG 6-4

Nanoporöse Dämmstoffe – Aerogele



Saubere Wände und saubere Luft dank Nano

Im asiatischen Raum gilt die Lotuspflanze als Symbol für Reinheit – aus gutem Grund: Obwohl diese Wasserpflanze oft in schlammigen Teichen wächst, hat sie stets saubere Blattoberflächen. Möglich wird dies durch Mikro- und Nanostrukturen auf der äußersten Blattschicht. Winzige Nadelchen aus Wachs sorgen dafür, dass Wasser die Oberfläche nicht benetzt und stattdessen einfach abperlt, wobei Schmutz und Staub auf der Blattoberfläche von den Tropfen mitgerissen werden. Diesen sogenannten Lotus-Effekt macht man sich mittlerweile in unterschiedlichen Produkten zunutze. So ist beispielsweise eine selbst-reinigende Fassadenfarbe im Handel, die eine ähnliche Oberflächenstruktur aufweist wie ein Lotusblatt.

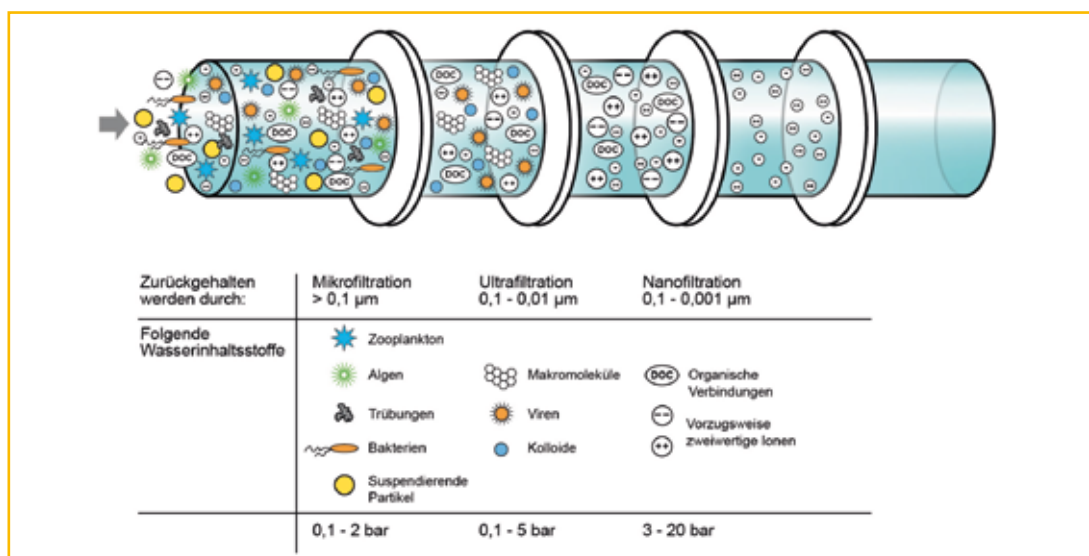
Einen ganz anderen Effekt macht man sich bei der UV-abhängigen Photokatalyse zunutze. Der Schlüssel hierzu sind Nanopartikel aus Titandioxid. Sie nutzen die Energie im ultravioletten Anteil des Tageslichts, um aus der Luftfeuchtigkeit geringe Mengen an Hydroxylradikalen zu bilden. Diese reagieren mit vielen Substanzen, insbesondere mit organischen Stoffen. Eine ganze Reihe von Produkten nutzt dieses Prinzip. Zum Beispiel gibt es Dachziegel, die dank solcher katalytisch wirksamer Nanopartikel vor Algenbewuchs geschützt sind. Photoaktive Teilchen können auch die Luft rein halten: In Chicago wurde 2013 die erste „smogfressende Straße“ eingeweiht. Ihr Belag baut Luftschadstoffe ab.

Sauberes Wasser dank Nanoporen

Sauberes Trinkwasser ist für uns in Deutschland eine Selbstverständlichkeit. Das ist längst nicht in allen Weltregionen der Fall. Schätzungen zufolge haben etwa zwei Milliarden Menschen keinen oder nur unzureichenden Zugang zu Wasser. Ein möglicher Ausweg sind Ultrafiltrationsanlagen, die helfen, aus Meerwasser trinkbares Süßwasser zu gewinnen. Herzstück dieser Anlagen sind spezielle Membranen, die ein deutsches Chemieunternehmen entwickelt hat. Diese Membranen, die auf den ersten Blick aussehen wie dünne weiße Röhrchen, enthalten im Inneren winzige Kapillaren. Die Wände dieser Kapillaren wiederum sind mit Poren durchsetzt, die einen Durchmesser von ca. 20 Nanometern haben. Alle größeren Partikel – Sand, Lehm, Algen und sogar Krankheitserreger – werden zurückgehalten, so dass nach der Filtration nur gereinigtes Wasser austritt. Die extreme Reinheit des Wassers ist wichtig, denn dieses wird dann in einem weiteren Schritt unter hohem Druck durch die sogenannte Umkehrosiose entsalzt. Bei diesem Verfahren würden selbst winzige Schmutzpartikel stören, weil durch sie unter anderem der Energieverbrauch für den eigentlichen Entsalzungsschritt stark steigen würde.

ABBILDUNG 6-5

Ultrafiltration von Prozessabwässern mit nanoporösen Filtern

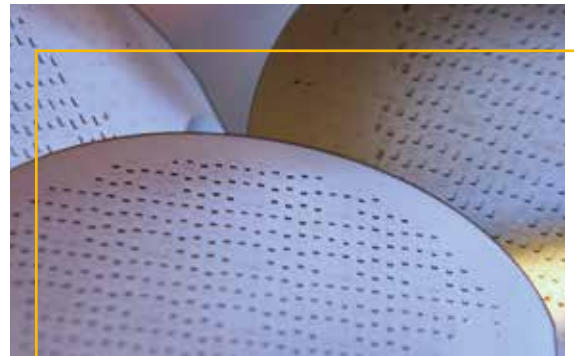


Von der Mikro- zur Nanoelektronik

Seit der Erfindung des Transistors 1948 hat die Informations- und Kommunikationstechnologie eine atemberaubende Entwicklung vollzogen. Waren die ersten Computer noch riesige Ungetüme, so steht uns heute in jedem Smartphone geballte Rechenleistung zur Verfügung. Möglich wurde dies durch eine immer weiter fortschreitende Miniaturisierung von Prozessor-, Speicher- und Anzeigekomponenten, die ohne die Nanotechnologie undenkbar wäre.

Nanopolitur für die Computerchipherstellung

Computerchips finden wir in unserem Alltag fast überall. Im Handy, im Laptop, sogar in der Kaffeemaschine. So ausgefeilt diese mikro- und nanoelektronischen Wunderwerke auch sind, sie fangen mit einem ganz einfachen Material an: einer runden Scheibe aus Silizium. Diese sogenannten Wafer entstehen durch Zersägen eines sehr reinen, zylindrischen Siliziumkristalls mit einer Bandsäge. Damit auf dem Wafer die winzigen und hoch präzisen Leiterbahnen der integrierten Schaltkreise aufgebracht werden können, ist ein sehr glattes „Fundament“ erforderlich. Deshalb wird der Wafer mit dem Verfahren der chemisch-mechanischen Glättung gleich mehrfach poliert. Das dabei verwendete Schleifmittel muss sehr fein sein und darf keine Kratzer erzeugen. Deswegen enthält es Nanopartikel aus Ceroxid.



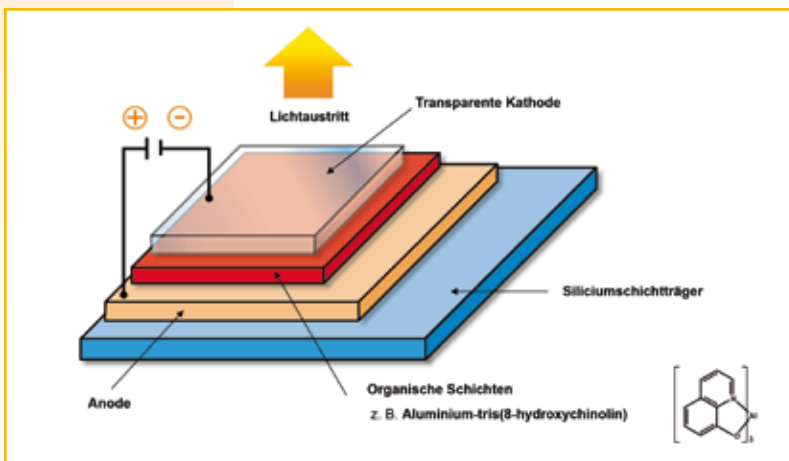
Mit Nanopolitur behandelte Vorlage für Hightech-Computerchips

Hell und energiesparend mit nanodünnen Schichten

Glühlampe war gestern, denn bei der Erzeugung von Licht durch Erhitzen eines Glühfadens wird ein Großteil der eingesetzten elektrischen Energie als Abwärme vergeudet. Moderne Leuchtmittel setzen auf andere, energieeffizientere Verfahren der Lichterzeugung. So haben sich Leuchtdioden, oder kurz LEDs (von engl. light emitting diode), mittlerweile in vielen Bereichen durchgesetzt. Ihr Herzstück sind Schichten aus halbleitenden Materialien, die oft nur wenige Nanometer dünn sind und Licht freisetzen, wenn sie von elektrischem Strom durchflossen werden. Klassischerweise werden in LEDs anorganische Halbleiter verwendet, beispielsweise Galliumarsenid. Im Gegensatz hierzu kommen in den sogenannten OLEDs organische Halbleiter zum Einsatz, also spezielle halbleitende Kunststoffe. OLEDs sind beispielsweise in Displays von Smartphones oder auch Tablet-Computern zu finden, wobei bei der neuen Display-Generation die Transistoren, die die einzelnen Pixel ansteuern, direkt im Display sitzen (sogenannte active matrix OLED oder AMOLED). Diese teilweise sehr komplexen Strukturen lassen sich nur durch die präzise Handhabung und Erzeugung unterschiedlicher nanodünner Schichten herstellen. Bei organischen Leuchtdioden lassen sich diese Schichten auch auf gekrümmten Oberflächen erzeugen, so dass zum Beispiel Lichter an Autos künftig zu einem Teil der Karosserie werden.

ABBILDUNG 7-1

Schichtaufbau einer Organischen Leuchtdiode – OLED



LEHRER-INFO

Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 7 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)

Vorausschauend und verantwortungsvoll handeln

Bereits seit mehreren Jahren befassen sich zahlreiche nationale und internationale Forschungsaktivitäten intensiv mit der Frage, wie sich Nanomaterialien in den Stufen Herstellung, Gebrauch und Entsorgung beziehungsweise Recycling verhalten. Dies schafft die beste Grundlage, um mögliche Risiken fundiert abzuschätzen. Jedes Material ist dabei hinsichtlich Zusammensetzung, Oberfläche, Größe und Form individuell zu untersuchen.

Fragestellungen in der Forschung

Die zentralen Fragestellungen dieser Forschungsprojekte betreffen zum einen das Thema Gesundheit: Hier verfügt man bereits über einen Fundus an Erfahrungen aus Industriezweigen, in denen nanofine Stäube seit jeher auftreten. Wichtige Fragestellungen der Forschung betreffen hier mögliche Expositionswege (Aufnahmewege) von Nanopartikeln in den Körper und ihr möglicher Einfluss auf Vorgänge im Körper.

Zum anderen steht die Frage nach den Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt im Zentrum der Risikoforschung: Momentan ist die Menge der künstlich produzierten Nanopartikel noch relativ überschaubar. Doch dies könnte sich in Zukunft ändern. Es ist also erforderlich, frühzeitig Maßnahmen zu erforschen, die helfen,

den Eintrag von Nanopartikeln in die Umwelt zu minimieren und mögliche negative Auswirkungen rechtzeitig einschätzen zu können.

Verantwortungsvoll handeln, offen diskutieren

Wie stark sich Nanopartikel in einem biologischen System verteilen, wird vor allem von ihrer Größe und ihren Oberflächeneigenschaften abhängen. Man muss erforschen, wo sie sich eventuell ansammeln, wie lange sie dort bleiben und ob sie sich in Zellen oder Geweben einlagern: Dabei sind viele veränderliche Größen, wie beispielsweise chemische Oberflächenreaktionen oder das Verklumpungsverhalten, in unterschiedlicher Umgebung genau zu untersuchen.

Schwerpunkte der Risikoforschung

Die Bundesregierung fördert die Risikoforschung mit zehn Prozent ihrer gesamten Ausgaben für die Nanotechnologie. Viele Projekte widmen sich der Frage nach möglichen Risiken für die menschliche Gesundheit: Zahlreiche Nanomaterialien werden bereits in industriellem Maßstab hergestellt. Dazu zählen Nanoruß (Carbon Black), pyrogene Kieselsäure* (SiO_2), Aluminiumoxid, Titandioxid und Partikel aus organischen Verbindungen. Aus der Erfahrung mit diesen Substanzen, vor allem aber

ABBILDUNG 8-1

Chancen und Risiken der Nanotechnologie

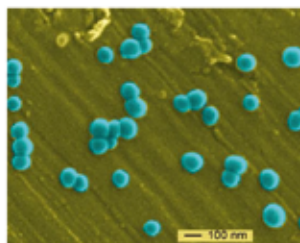
Fragestellungen der Forschung

Verhalten von Nanomaterialien in den Stufen

Herstellung -> Gebrauch -> Entsorgung / Recycling

Untersuchung möglicher Wirkungen auf den Menschen und die Umwelt:

- Aufnahmewege in Organismen
- Verteilung, Verweildauer und Ausscheidung
- Biologische/toxikologische Wirkungen (z. B. Entzündungsreaktionen, Allergien)



Vorausschauendes Handeln

- Entwicklung von Testsystemen für Nanomaterialien
- Standardisierung der Testsubstanzen
- Etablierung von Messverfahren am Arbeitsplatz
- Geeignete Maßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmer (z. B. Luftfilter)
- Kontinuierliche Weiterentwicklung von Handlungsempfehlungen für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien

durch die Erforschung von Berufskrankheiten, ausgelöst durch die Belastung mit sehr feinen Stäuben wie im Bergbau oder auch bei technischen Schweißvorgängen, ist ein grundlegender Zusammenhang bekannt: Die Gesundheitsgefährdung durch Partikel in der Atemluft nimmt zu, je kleiner die Teilchen sind. Durch die individuellen chemischen Effekte ihrer Oberfläche könnten Nanoteilchen nach dem Einatmen in der Lunge Entzündungsreaktionen auslösen. Weil sie extrem klein sind, könnten sie eventuell in Körperzellen eindringen und dort, je nach ihren Oberflächeneigenschaften, biologische Vorgänge beeinflussen. Arbeitsmediziner und Toxikologen (Toxikologie = Lehre von den Giftstoffen, Vergiftungen und der Behandlung von Vergiftungen) verfügen über jahrzehntelange Erfahrungen mit feinen Stäuben, die zum Beispiel in Bergwerken oder beim technischen Schweißen freigesetzt werden. Das Wissen über die Aufnahme solcher Partikel in den menschlichen Körper, ihre Wirkungen auf die Gesundheit und ihr Verhalten in der Umwelt hilft dabei, bestehende Schutzmaßnahmen zu überprüfen und an den Umgang mit Nanomaterialien anzupassen.

Der zweite wichtige Gegenstand der Risikoforschung sind die Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt: Je mehr Nanopartikel zukünftig produziert werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen je nach Herstellung, Verarbeitung und Gebrauch irgendwann ins Wasser und in die Luft gelangen. In den Böden und im Grundwasser könnten sie die dort lebenden Organismen und deren Ökosysteme beeinflussen. Ultrafeine Teilchen werden auch durch Vulkane oder Waldbrände freigesetzt. Verglichen mit diesen natürlich vorkommenden Emissionen ist der Anteil industriell hergestellter Nanopartikel in unserer Umwelt jedoch noch vernachlässigbar klein. Umso wichtiger ist es, bereits jetzt Risikoforschung zu betreiben, um mögliche Probleme frühzeitig zu erkennen.

So wird geforscht

In den laufenden Sicherheitsforschungsprojekten auf Bundes- und EU-Ebene befassen sich Herstellerunternehmen, Importeure und wissenschaftliche Einrichtungen gemeinsam mit den möglichen Wirkungen von Nanoteilchen, die aus der industriellen Produktion stammen. Unter anderem entwickeln oder verbessern die Projektpartner modernste Nachweisverfahren, mit denen Nanoteilchen, ihre Komplexe (Aggregate und Agglomerate) sowie fein verteilte Tröpfchen (Aerosole) charakterisiert und gemessen werden. Diese Methoden sollen so robust sein, dass man sie unmittelbar am Arbeitsplatz einsetzen kann.

Die Projekte, an denen deutsche Chemieunternehmen beteiligt waren bzw. sind, heißen zum Beispiel NanoCare, NanoNature, NanoSafe, NanoDerm oder NanoReg. Im Projekt CarboSafe (2008 – 2012) wurde zum Beispiel in Zusammenarbeit von Chemieunternehmen mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen die Risikoanalyse und Risikobeherrschung beim Umgang mit Kohlenstoffnanoröhren untersucht.

Aktueller Stand der wissenschaftlichen Bewertung

In ihren Ausführungen zur Sicherheit von Nanomaterialien kam die Europäische Kommission im Jahr 2012 zu folgendem Ergebnis: Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass Nanomaterialien „normalen Chemikalien“ ähneln. Bei den seit langer Zeit industriell hergestellten Nanomaterialien wurde keine langfristige Gefährdung festgestellt. Hier liegen zahlreiche Erfahrungen und Daten vor. Durch die fortschreitende technologische Entwicklung werden auch die Messeinrichtungen und Testsysteme immer genauer. Die chemische Industrie verfolgt hier einen international abgestimmten Ansatz. Das Wissen über Nanomaterialien wächst beständig – und wird mit der Öffentlichkeit geteilt. Eigens zu diesem Zweck wurde zum Beispiel das Projekt DaNa 2.0 ins Leben gerufen. Die Abkürzung steht für „Daten und Wissen zu Nanomaterialien – Aufbereitung gesellschaftlich relevanter naturwissenschaftlicher Fakten“. Das Projekt will Forschungsergebnisse zu Nanomaterialien und deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt für interessierte Laien auf einer Internetplattform (www.nanopartikel.info) und in Informationsmedien

verständlich aufbereiten. Ein interdisziplinäres Team von Humantoxikologen, Ökotoxikologen, Biologen, Physikern, Chemikern und Pharmazeuten sammelt und bewertet auch die originalen Fachveröffentlichungen, die dann eingesehen werden können.

Empfehlungen für Schutzmaßnahmen in chemischen Betrieben

In den vergangenen Jahren hat der Verband der Chemischen Industrie zahlreiche Empfehlungen und Leitfäden erarbeitet, zum Beispiel „Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz“ in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Weitere Veröffentlichungen befassen sich zum Beispiel mit der Gültigkeit der europäischen Chemikalienverordnung REACH, Informationsweitergabe, Risikobeurteilung, Sicherheitsforschung und sachgerechter Entsorgung von nanomaterialhaltigen Chemikalienabfällen. www.vci.de

Forschungsbegleitender Dialog

Über die reine Fachinformation hinaus besteht in Teilen der Bevölkerung auch der Wunsch, mit Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik über die Nanotechnologie zu diskutieren – und dabei auch gegensätzliche Meinungen und Ansichten auszutauschen. Viele Fragen befassen sich zum Beispiel mit Verbraucherschutz und Verbraucherinformation bei Anwendungen, die viele Menschen direkt betreffen, wie Kosmetika, Reinigungsmittel oder Ernährung.

Ein persönlicher Dialog ist aus der Sicht der deutschen Chemie extrem wichtig. In den vergangenen Jahren wurden deshalb unter Beteiligung deutscher Unternehmen zahlreiche Veranstaltungen durchgeführt. Dazu zählen zum Beispiel der „Bürgerdialog NanoCare“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) oder der NanoDialog des Bundesumweltministeriums, der 2013 bereits in seine vierte dreijährige Dialogphase ging. Hier tauschten und tauschen sich Wissenschaftler, Unternehmer, Politiker, Behördenvertreter, Mitglieder gesellschaftlicher Organisationen sowie Kirchenvertreter intensiv miteinander aus.



LEHRER-INFO

Siehe

- Arbeitsblatt Nr. 8 (Sekundarstufe I, Sekundarstufe II)

Winzlinge auf Wachstumskurs

Weil die Erforschung, Herstellung und Anwendung von Nanomaterialien zahlreiche Wissenschafts- und Technikdisziplinen in sich vereint, lassen sie für viele Branchen sowohl Verbesserungen bestehender Verfahren und Produkte als auch echte Neuerungen erwarten: Forschung und Entwicklung profitieren von atomgenauen Analysemethoden und schnelleren Messinstrumenten. Die Ergebnisse lassen sich zügiger in Produkte umsetzen. Herstellungsprozesse können mit geringerem Rohstoff- und Materialverbrauch umweltfreundlicher und in der Massenfertigung präziser ablaufen. Produkte können zudem mit Eigenschaften ausgestattet werden, die dem Bedarf der Verbraucher optimal entsprechen. Das bedeutet: Wachstum in bestehenden Märkten, eventuell Erschließung völlig neuer Märkte und Schaffung hoch qualifizierter Arbeitsplätze mit Zukunft.

Diese wirtschaftlichen Chancen wurden bereits in den 1990er Jahren von allen großen Industrienationen erkannt, die große Summen in die Förderung der Nanoforschung und -produktion investieren. In den USA wurden für die National Nanotechnology Initiative (NNI) beispielsweise 21 Milliarden US \$ für den Zeitraum 2001–2015 bereitgestellt. Einen vergleichsweise ebenfalls sehr hohen Stellenwert hat die Nanoforschung auch in Deutschland und der Europäischen Union. Laut Erhebungen des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) belegte Deutschland in der Nanoforschung im Jahr

2013 weltweit Platz zwei nach den USA. Aber nicht nur die Höhe der Investitionen in die Forschung, sondern auch die Zahl der Patentanmeldungen auf Erfindungen gibt Aufschluss über die wirtschaftliche Bedeutung von Nanomaterialien. Hierbei belegte Deutschland im internationalen Vergleich nach den USA und Japan den dritten Platz: Jedes neunte, weltweit veröffentlichte Patent stammt aus der Bundesrepublik.

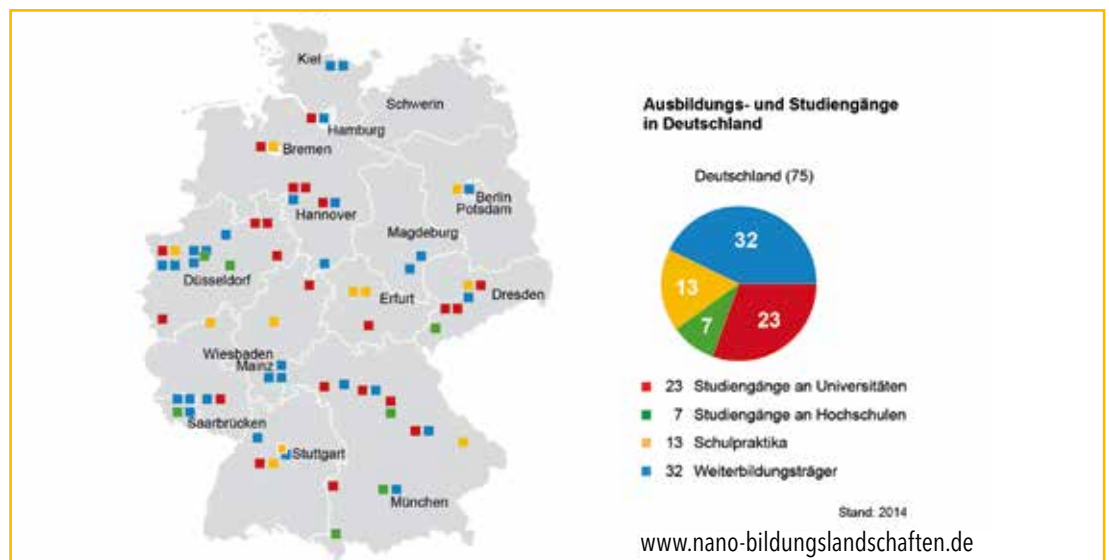
1.135 deutsche „Nano-Unternehmen“ wurden erfasst, von denen 75 Prozent kleine oder mittlere Betriebe waren. Alle zusammen erwirtschafteten einen Umsatz von 15 Milliarden Euro. 40 Prozent dieses Umsatzes entfallen auf Unternehmen, die in der Chemiebranche tätig sind. Schätzungsweise 70.000 Arbeitsplätze wurden in jenem Jahr bereits direkt oder indirekt der Nanotechnologie zugeordnet. Jeder dritte davon ist in einem Chemieunternehmen angesiedelt. Damit belegt die Chemie einen Spitzenplatz in der deutschen Nanotechnologieszene.

In allen wichtigen Leitbranchen sind die Winzlinge weiter auf Wachstumskurs: Ob in der Energie- und Umwelttechnik, der Automobil- und Bauindustrie, der Medizintechnik oder der Optik, bei Lacken und Farben, Kosmetika oder Arzneimitteln.

Für die Zukunft sagt der Verband der Chemischen Industrie voraus, dass 80 Prozent aller Nanotechnologie-Anwendungen im Bereich der Energieversorgung und -nutzung, beim Klimaschutz und in der Ressourcenschonung liegen werden.

ABBILDUNG 10-1

Nano-Bildungslandschaften



Qualifikation in der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie und stützt sich auf die Fächer Chemie, Physik, Biologie, Material- und Werkstoffwissenschaft, Elektrotechnik und viele weitere mehr. Dementsprechend spielt sie auch in Studiengängen dieser Fächer eine mehr oder minder stark ausgeprägte Rolle. Darüber hinaus gibt es mittlerweile an zahlreichen deutschen Hochschulen spezialisierte Nano-Studiengänge.

Exemplarischer Studiengang (Uni): Nanostrukturtechnik (Bachelor/Master) – Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Der Bachelorstudiengang ist auf sechs Semester angelegt und wird von der Fakultät für Physik und Astronomie betreut. Die Studierenden erwerben Kenntnisse der wichtigsten Teilgebiete der Nanostrukturtechnik und erlernen grundlegende ingenieurwissenschaftliche und physikalische Methoden und Arbeitsweisen. Analytisches Denken und das Verständnis grundlegender physikalischer und chemischer Zusammenhänge bilden hierfür die Basis. In der abschließenden Bachelorarbeit wird eine ingenieurwissenschaftliche Aufgabe aus dem Bereich der Nanostrukturtechnik weitgehend selbständig bearbeitet. Die Abschlussprüfung umfasst die fundamentalen Zusammenhänge der Physik und Chemie sowie die Kenntnis und Anwendung ingenieurwissenschaftlicher Methoden. Im ggf. sich anschließenden viersemestrigen Masterstudium werden die erworbenen Kenntnisse vertieft und ausgebaut. In der Masterarbeit wird eine wissenschaftliche oder technische Aufgabe selbständig bearbeitet.

Exemplarischer Studiengang (Uni): Material- und Nanochemie (Master) – Leibniz-Universität Hannover

Das viersemestrige, modulare Studium umfasst neben den Bereichen Organische, Anorganische und Analytische Chemie auch die Materialchemie sowie die Physikalische und Technische Chemie sowie Physik und Materialwissenschaften. Ihre Beherrschung legt die Basis für werkstoffkundliche und produktionstechnische Aspekte und die Erarbeitung von Konzepten zur Synthese von Materialien und Nanosystemen sowie deren Analyse und Charakterisierung – von Metallen und Halbleitern über Keramiken und Polymere zu modernen Verbundmaterialien.

Zwei exemplarische Berufsbilder in der chemischen Nanotechnologie

Chemikant

Chemikantinnen und Chemikanten stellen aus organischen und anorganischen Rohstoffen chemische Erzeugnisse her und arbeiten meist in Unternehmen der chemischen Industrie. Hierzu bedienen sie rechnergestützte Maschinen und Fertigungsstraßen, beispielsweise Flammreaktoren, die durch unvollständige Verbrennung von Öl nanoskaligen Ruß herstellen. Sie messen Rohstoffe und die Befüllung von Behältnissen und überwachen Fertigungsprozesse. Während solcher Herstellungsprozesse entnehmen sie Proben und/oder führen Messungen durch. Beim Beispiel Nanoruß wird unter anderem die Partikelgrößenverteilung gemessen, die auf die weitere Verwendung des Produkts abgestimmt sein muss. Auch Verpackung und Abfüllung sowie die Wartung von Produktionsanlagen fallen in das Aufgabengebiet von Chemikanten.

Wichtig sind Verantwortungsbewusstsein und Sorgfalt, da die Vorschriften und Rezepturen für Chemikalien genau eingehalten werden müssen. Außerdem benötigt man natürlich gute Kenntnisse in Chemie, Physik, aber auch in Mathematik, weil man ständig mit Massen und Volumenverhältnissen rechnet.

Ingenieur für Chemietechnik

Ingenieurinnen und Ingenieure für Chemietechnik arbeiten vor allem in der chemischen und pharmazeutischen, sowie in der Kunststoffindustrie oder chemischen Untersuchungslabors. Ihre Tätigkeit kann eine Vielzahl von Aufgaben umfassen, beispielsweise die Übertragung von Syntheseverfahren vom Labormaßstab auf den Technikums- und später auf den Produktionsmaßstab (zum Beispiel Kohlenstoffnanoröhren nicht mehr im Milligramm- oder Grammaßstab, sondern im Kilogramm oder Tonnenmaßstab herzustellen). Auch befassen sie sich mit der Erhöhung der Ausbeute und Qualität des Produktes. Dabei kann es sich um die Erhöhung der Ausbeute einer bestimmten Variante von CNTs (siehe S. 18) gegenüber anderen handeln. Wichtig ist auch die Überwachung von Produktionsanlagen und Produkten. Ingenieure für Chemietechnik sind auch in der Anwendungs- und Produktbetreuung tätig, zum Beispiel wenn ein Kunde die CNTs möglichst effizient mit einem Kunststoff zu einem besonders stabilen Verbundwerkstoff verarbeiten möchte. Weitere Tätigkeitsfelder sind die Forschung und Entwicklung, etwa mit der Fragestellung, eine neue, einfachere Analyseverfahren für die Qualität von CNTs zu finden.

Fachbegriffe zum Nachschlagen

Aggregation

Anhäufung

Aminosäure

Baustein der Eiweißstoffe (Proteine); in Proteinen kommen insgesamt 20 verschiedene Aminosäuren vor.

Beschleunigungsspannung

Mit der Beschleunigungsspannung werden elektrisch geladene Elementarteilchen, das heißt die kleinsten Bausteine der Materie, auf sehr hohe Geschwindigkeiten gebracht. Die Beschleunigungsspannung ist wichtig für die Erzeugung des Elektronenstrahls in Elektronenmikroskopen.

Ferrofluid

Ferrofluide Stoffe bestehen aus nanoskaligen, magnetischen Nanopartikeln in einer Trägerflüssigkeit.

Gasphasenreaktor

Ein Gasphasenreaktor ist eine Anlage, in der in einem Gasstrom verschiedene Ausgangsstoffe zur Reaktion gebracht werden.

Katalysator

Reaktionsbeschleuniger; Substanz, die einen Prozess ermöglicht, verbessert, intensiviert oder beschleunigt ablaufen lässt, ohne selbst in diesem Prozess verbraucht zu werden.

Kolloidale Lösung

In einer kolloidalen Lösung, auch Kolloid oder Sol (im festen Zustand Gel), ist ein Stoff in einem Lösungsmittel sehr fein verteilt. Das Kolloid wie auch das Lösungsmittel können ein Feststoff, eine Flüssigkeit oder ein Gas sein.

Kompositmaterial

Ein komplexes Material, in dem zwei oder mehr verschiedene und strukturell zueinander passende Stoffe (zum Beispiel Metalle, Keramik, Glas und Polymere) kombiniert werden, um strukturelle oder funktionelle Eigenschaften zu erzeugen, welche die Komponenten allein nicht besitzen.

Kontaktwinkel

Als Kontaktwinkel wird der Winkel bezeichnet, den ein Flüssigkeitstropfen auf der Oberfläche eines Feststoffs zu dieser Oberfläche bildet.

Nanomaterialien

Werkstoffe mit einer Abmessung oder Strukturierung unter 100 Nanometer.

Nanoskalig

Im Größenbereich von 1 bis 100 Nanometer.

Polymer

Ein Polymer ist eine chemische Verbindung, die aus einer Abfolge von einfachen Grundbausteinen (Monomeren) besteht.

Pyrogene Kieselsäure

Als Kieselsäuren werden die Sauerstoffsäuren des Siliziums ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) bezeichnet. Im Deutschen hat es sich eingebürgert, auch alle möglichen Formen von synthetischem Siliziumdioxid allgemein als Kieselsäure zu bezeichnen. Pyrogene Kieselsäuren werden durch Reaktion von Siliziumtetrachlorid mit Wasser, das in einer Wasserstoffflamme gebildet wird, hergestellt.

Reaktion: $\text{SiCl}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4 \text{HCl}$

Quantenphysik

Ein Feld der modernen Physik, das in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts begründet wurde; es beschreibt das Verhalten von Materie und Energie in kleinen Dimensionen.

Selbstorganisation

Selbstorganisation ist ein thermodynamischer Prozess, bei dem Ordnung scheinbar „von selbst“ entsteht.

Van-der-Waals-Kräfte

Mit Van-der-Waals-Kräften, benannt nach dem niederländischen Physiker Johannes Diderik van der Waals (1837-1923), bezeichnet man die relativ schwachen nicht-kovalenten Wechselwirkungen zwischen Atomen oder Molekülen, deren Wechselwirkungsenergie mit etwa der sechsten Potenz des Abstandes abfällt.

Organisationen und Initiativen

Fonds der Chemischen Industrie

www.vci.de/fonds

Ergänzend zu dieser Broschüre finden Sie Arbeitsblätter und Anleitungen zu den Experimenten als Grundlage für Referate oder Facharbeiten im Internet unter dem Bereich Schulpartnerschaft:

www.vci.de/fonds

Verband der Chemischen Industrie (VCI)

www.vci.de

Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh):

Zeitschrift „Angewandte Chemie“ 2014-26/46

Themenheft Nanotechnologie & Nanomaterialien,
Nanotoxikologie & Nanomedizin

WILEY-VCH, ISSN 044-8249

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ange.v126.46/issuetoc>

Aktionsplan Nanotechnologie 2020 – eine ressortübergreifende Strategie der Bundesregierung

www.bmbf.de/pub/Aktionsplan_Nanotechnologie.pdf

Informationsportale

Nano in Germany

www.nanoingermany.de

Nanokarte: Aus- und Weiterbildung

www.werkstofftechnologien.de/service/nanobildung/#/?se=u27uzmqc2yde

Nanokarte: Forschung und Innovation (nano-map)

www.werkstofftechnologien.de/kompetenzkarten/

Nano4women

The international network for women in nano

www.nano4women.com

„Nanoreisen – Abenteuer hinterm Komma“

www.nanoreisen.de

nanotechweb (engl.)

www.nanotechweb.org

Nano und Schule

Lehrer-online – Unterrichten mit digitalen Medien

Linkliste Nanotechnologie

<https://www.lehrer-online.de/unterrichtseinheit/seite/ue/nano-nutzen-und-visionen-einer-neuen-technologie/linkliste-nanotechnologie/>

Sicherheit in der Nanotechnologie

Projekt DaNa^{2.0} – Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung

www.nanopartikel.info

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Nanotechnologie.html

