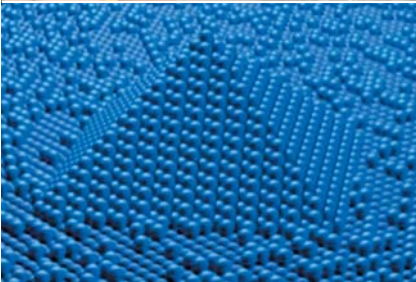
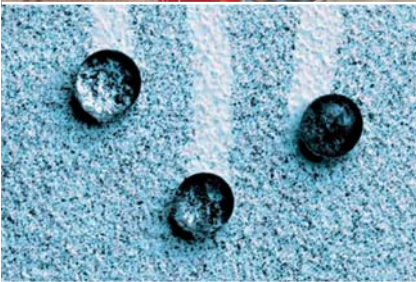


FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE

ANTIBAKTERIELL  
KATALYTISCH SELBSTREINIGEND  
BRUCHFEST  
LEITEND  
ENTSPIEGELT  
KRATZFEST  
WASSER ABWEISEND  
SCHMUTZ ABWEISEND

$10^{-9}$



Informationsserie

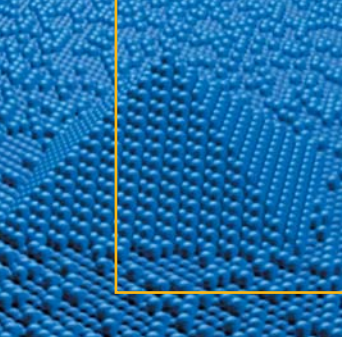
WUNDERWELT DER NANOMATERIALIEN

# IMPRESSUM

## ■ Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie  
im Verband der Chemischen Industrie e. V.,  
Karlstraße 21, 60329 Frankfurt am Main  
E-Mail: [fonds@vci.de](mailto:fonds@vci.de)  
Internet: [www.fonds.vci.de](http://www.fonds.vci.de)

Erstauflage: September 2005; 20.000 Exemplare  
Alle Rechte vorbehalten



Das vorliegende Textheft „Wunderwelt der Nanomaterialien“ ist zusammen mit dem Experimentierkit „NanoBoX“ und einer interaktiven CD-ROM erschienen. Auf dieser CD-ROM sind alle abgebildeten Charts als ppt- und pdf-Dateien gespeichert. Weiterhin enthält die CD-ROM Versuchsbeschreibungen und diese Broschüre mit einem Glossar. Die gesamte Informationsserie ist außerdem über das Internet abrufbar ([www.fonds.vci.de](http://www.fonds.vci.de)).

## ■ Konzeption, Text und Gestaltung

Flad & Flad Communication GmbH  
Thomas-Flad-Weg 1, 90562 Heroldsberg  
Internet: [www.flad.de](http://www.flad.de)  
Autor: Dr. Andreas Jungbluth

## ■ Redaktion

Fonds der Chemischen Industrie im Verband  
der Chemischen Industrie e. V., Frankfurt

## ■ Druck

Novadruck, Nürnberg

Wir danken dem wissenschaftlichen Team des Deutschen Museums, München, für die fachliche Prüfung der Texte und den Unternehmen Merck KGaA, Rudolf GmbH & Co. KG, Schüler & Co. KG, für die kostenlose Bereitstellung der Experimentiermaterialien sowie der SusTech GmbH & Co. KG Darmstadt für die Unterstützung durch eine Versuchsanleitung.

## ■ Fotonachweis

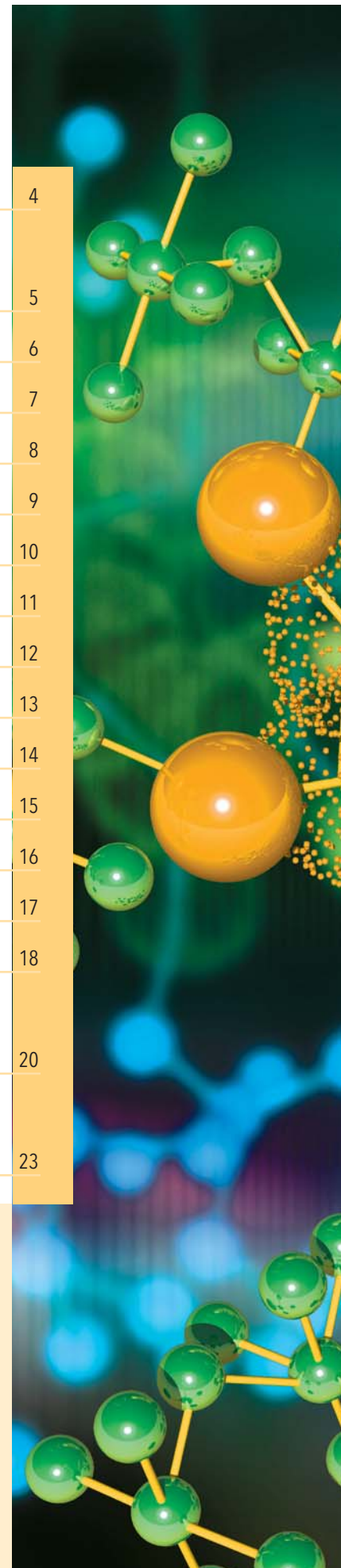
*Titel: Degussa Advanced Nanomaterials; Technische Universität Berlin, NanOp Kompetenzzentrum; teleDesign, München; Prof. Dr. W. Heckl, Deutsches Museum und LMU München; Flad & Flad*  
*Impressum: Technische Universität Berlin, NanOp Kompetenzzentrum*  
*S. 3, 4, 7, 11, 17, 18, 19, 20, 21, 23: Flad & Flad*  
*S. 6: Kompetenzzentrum HanseNanoTec, Universität Hamburg*  
*S. 8: Henning Christoph/DAS FOTOARCHIV.*  
*S. 9: Degussa Advanced Nanomaterials*  
*S. 10: Merck KGaA*  
*S. 12: Degussa Advanced Nanomaterials*  
*S. 14: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC*  
*S. 15: Degussa Advanced Nanomaterials*  
*S. 16: BASF Aktiengesellschaft*  
*Chart E 04: Henning Christoph/DAS FOTOARCHIV.*  
*Chart E 05: Degussa Advanced Nanomaterials*  
*Chart E 07: SusTech GmbH & Co. KG Darmstadt*  
*Chart E 08: Degussa Advanced Nanomaterials*  
*Chart E 10: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC*  
*Chart E 11: Degussa Advanced Nanomaterials; Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Universität Bonn*  
*Chart E 12: BASF Aktiengesellschaft*  
*Chart E 14 (1): Süd-Chemie AG*  
*Chart E 14 (2): DaimlerChrysler AG*

# INHALT

VORWORT				4
E 01 Grundlagen – Vorstoß in WINZIGE Welten	C	P	B	5
E 02 Grundlagen – AUGEN und FINGER im Unsichtbaren	C	P	B	6
E 03 Disziplinen – TEAMWORK für technischen Fortschritt	C	P	B	7
E 04 Verfahren – Von der IDEE zum PRODUKT (1)	C	P	B	8
E 05 Verfahren – Von der IDEE zum PRODUKT (2)	C	P	B	9
E 06 Anwendungen (Übersicht) – MATERIALIEN und mehr	C	P	B	10
E 07 Anwendungen (Partikel) – Nano für GESUNDHEIT und WOHLBEFINDEN	C		B	11
E 08 Anwendungen (Partikel) – Teilchen für die TECHNIK	C	P		12
E 09 Anwendungen (Schichten) – Nano bringt FARBE ins Spiel	C	P		13
E 10 Anwendungen (Schichten) – Nano steigert POWER	C	P		14
E 11 Anwendungen (Schichten/3D-Strukturen) – Nano hält SAUBER	C	P	B	15
E 12 Anwendungen (3D-Strukturen) – Nano in WÜRFELN: mehr als sechs Seiten	C	P		16
E 13 Wirtschaft – WIRTSCHAFTLICHE Winzlinge	C	P	B	17
E 14 Gesellschaft – NUTZEN durch Nano	C	P	B	18
FACHBEGRIFFE zum Nachschlagen				20
Weiter im WEB				23

geeignet für den Unterricht in:

**C** CHEMIE   **P** PHYSIK   **B** BIOLOGIE



## VORWORT

### Wunderwelt der Nanomaterialien

#### – Faszination und Aktualität im naturwissenschaftlichen Unterricht

Die Nanotechnik gewinnt für alle Industriezweige zunehmend an Bedeutung. In einer Größenordnung von weniger als 100 Milliardstel Metern erschließt sie einzigartige chemische und physikalische Stoffeigenschaften von Teilchen und Strukturen, die bei makroskopischen Objekten derselben Zusammensetzung nicht zu beobachten sind.

Dies ermöglicht die Herstellung und Anwendung einer Vielzahl von Materialien, die beispielsweise in der katalytischen Chemie zu effizienteren und umweltfreundlichen Produktionsverfahren führen oder als Grundstoffe für herkömmliche und neuartige Produkte dienen. Zu ihnen zählen zum Beispiel Metalle, Keramiken, Gläser oder Kunststoffe mit beeindruckenden neuen Kombinationen von Materialeigenschaften.

Eine Besonderheit der Nanotechnik ist ihr Querschnittscharakter: Sie erhält Impulse aus nahezu allen naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen und bereichert diese gleichzeitig durch neue Verfahren und Einsatzmöglichkeiten. Damit eröffnet sie insbesondere für die Chemiebranche neue, wichtige Betätigungsfelder auf internationaler Ebene. Für zahlreiche Industrieberufe, zum Beispiel in den Bereichen Lacke und Farben, Kunststoffe, Kosmetik oder Pharmazie, ist diese zukunfts-trächtige Technologie bereits jetzt unverzichtbar. Dementsprechend wächst die Bedeutung der Nanotechnik auch für die heutige Nachwuchsgeneration – die zukünftigen Erforscher, Entwickler, Anwender und Nutzer nanotechnischer Innovationen. Nanotechnik ist daher für den naturwissenschaftlichen Unterricht an weiterführenden Schulen ein wichtiges Thema.

Um Schülerinnen und Schülern die Faszination, Vielfalt und Bedeutung der Nanomaterialien vermitteln zu können, gibt Ihnen der Fonds der Chemischen Industrie das vorliegende Unterrichtsmaterial an die Hand. Es richtet sich im Wesentlichen an die Fächer Chemie, Physik und Biologie der gymnasialen Oberstufe sowie an berufsbildende Schulen. Die Informationsserie eröffnet Ihnen die Möglichkeit, die Wunderwelt der Nanomaterialien für zwei Unterrichtsstunden oder einen Projekttag zum Gegenstand spannender und lebendiger Unterrichtsgestaltung in Theorie und Praxis zu machen. Die Unterrichtsmaterialien helfen Ihnen bei der Vorbereitung,

Vertiefung und Nachbereitung des Unterrichtsstoffs. Darin enthalten sind Power-Point-Präsentationen, diese Broschüre mit Erläuterungskapiteln zu den jeweiligen Themenfolien inklusive Vorschläge für Arbeitsaufträge, ein umfangreiches Glossar sowie weiterführende Internetlinks als Grundlage für Referate oder Facharbeiten. All dies finden Sie in kopier-, druck- und versandfähiger Form auf der beigefügten CD-ROM. Die Kennzeichnungen „C“, „P“ und „B“ für die Disziplinen Chemie, Physik und Biologie auf den Folien und Erläuterungsblättern erleichtern Ihnen die Auswahl und Zusammenstellung fachrelevanter Beispiele zu Grundlagen, Verfahren, Anwendungen und Produkten der Nanotechnik.

Um diese nicht nur zu verstehen, sondern auch zu erleben, steht Ihnen ergänzend die „NanoBoX“ des FCI zur Verfügung. Sie enthält verschiedene Nanomaterialien und Anleitungen (auf CD-ROM) zur Durchführung einfacher, aber grundlegender und eindrucksvoller Schulerperimente. Die DVD mit dem Film „Expedition Nanoworld – Chemie der winzigen Welten“ rundet das Lehrangebot mit interessanten Beispielen zu Innovationen aus der Forschung und erstaunlichen Nanoprodukten ab.

Wir wünschen Ihnen und Ihren Schülern Spannung und Spaß beim Lehren und Lernen!

Der Herausgeber



# Vorstoß in WINZIGE Welten

## E 01 Grundlagen

### ■ Willkommen im Nanokosmos!

Heute erforschen und nutzen wir Dimensionen, die dem menschlichen Auge bis zur Erfindung des ersten Elektronenmikroskops (siehe E 02, Seite 6) 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 Milliardenste Teil eines Meters (0,000.000.001 m) bzw. der Millionste Teil eines Millimeters (0,000.001 mm).

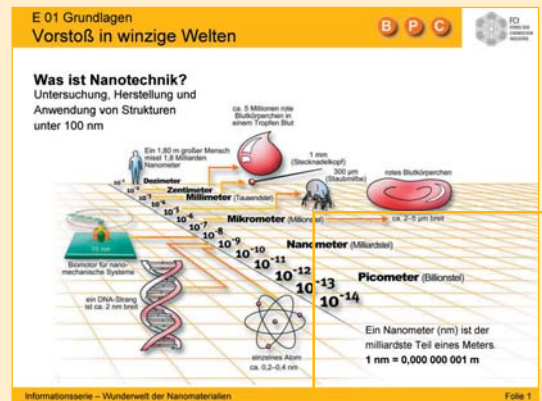
Vergleiche helfen, diese winzigen Größen zu verstehen. Ein Nanometer

- verhält sich zu einem Meter wie der Durchmesser einer Haselnuss zu dem unseres Erdballs.
- ist mehr als tausendmal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haars (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 bzw. 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.

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



C P B

ein Selbstorganisationsvorgang. Wegen der Form und Interaktion einzelner Eiweißstoffe (Proteine) – durch Wasserstoffbrücken, ionische Wechselwirkungen (siehe Ion) 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.

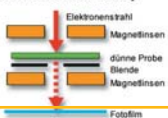
### ■ Überraschungen auf der Nanometerskala

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 völlig 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.

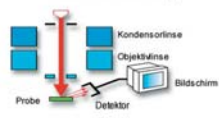
### Arbeitsaufgaben

- Wie funktioniert das Prinzip der Selbstorganisation und welche Formen können auf dreidimensionaler Ebene gebildet werden?
- Wie viel Prozent der Atome befinden sich auf der Oberfläche bei (a) einem Würfel mit 1 cm Kantenlänge? (b) einem Würfel mit 10 nm Kantenlänge?
- Worin können sich Nanostrukturen im Vergleich zu makroskopischen Strukturen unterscheiden?

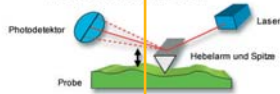
### Transmissions-Elektronenmikroskop



### Raster-Elektronenmikroskop



### Rastersondenmikroskop



Informationsserie – Wundenwelt der Nanomaterialie

Folie 2

C P B

## AUGEN und FINGER im Unsichtbaren

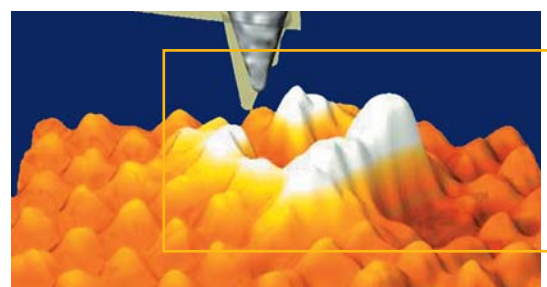
E 02 Grundlagen

### ■ „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 auf einem Bildschirm umgewandelt.

### ■ „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) bis auf zirka einen Nanometer Abstand an die Probenoberfläche herangeführt und rasterförmig darüber hinweg bewegt. Dabei „fühlt“ der Sensor eine abstandsabhängige physikalische Wechselwirkung, die als Messsignal dient. Beispielsweise wird bei einem Rasterkraftmikroskop der Arm (Cantilever), an dem sich die Spitze befindet, bei Kontakt mit einem Oberflächenatom verbogen. Richtet man einen Laserstrahl auf die Oberfläche des Cantilevers, ändert sich dabei messbar der Reflexionswinkel des Laserstrahls. Dieses Signal wird als dreidimensionale Bildinformation von einem Computer aufgezeichnet und dargestellt. So erzeugte Bilder ähneln der Oberfläche eines Eierkartons mit Mulden und Ausbuchtungen. Jeder „Berg“ entspricht bei entsprechender hoher Auflösung einem Atom.



### ■ Neue Erkenntnisse – neue Analyseverfahren

1924 erkannte der Belgier Louis de Broglie, dass Elektronen gleichzeitig Teilchen- und Wellencharakter besitzen und deshalb als Elektronenstrahlen vergleichbare Eigenschaften haben wie das Licht. Diese Erkenntnis bereite 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 austauschbaren Okulare oder Objektive für unterschiedliche Vergrößerungsstufen.

### ■ Strukturen „durchleuchten“: das Transmissions-Elektronenmikroskop

Bei einem Transmissionselektronenmikroskop (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.

### Arbeitsaufgaben

- Welche Erkenntnis bereite den Weg zum Bau eines Mikroskops für den Vorstoß in die Nanowelt?
- Worin bestehen die beiden grundlegenden Unterschiede zwischen einem Lichtmikroskop und einem Elektronenmikroskop?
- Nennen und charakterisieren Sie kurz drei Analyseverfahren, mit denen man Nanostrukturen sichtbar machen kann.

# TEAMWORK für technischen Fortschritt

## E 03 Disziplinen

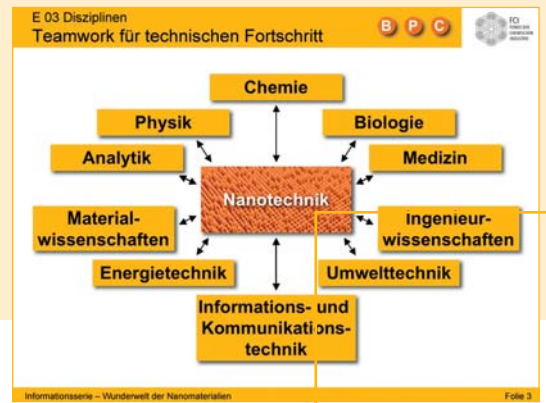
### ■ Hier ist Teamgeist gefragt

Nanomaterialien haben für nahezu alle technischen Anwendungsgebiete große Bedeutung: Ihre Einsatzbreite reicht von der Herstellung von Lacken und Farben über die Produktion von Werkstoffen für den Automobilsektor, die Luft- und Raumfahrt, die Elektronik- und Bauindustrie bis hin zur Entwicklung neuer Medikamente und Medizintechnik-Systeme.

In all diesen Bereichen arbeiten deshalb Chemiker, Physiker, Biologen, Mediziner, Mathematiker, Informatiker, Werkstoffwissenschaftler und Ingenieure in fachübergreifenden Teams auf nationaler und internationaler Ebene zusammen. Dies betrifft sowohl Forscher und Entwickler in Unternehmen als auch Wissenschaftler an Universitäten und Forschungseinrichtungen.

Ein Beispiel: Chemiker haben sich das Ziel gesetzt, im Labor aus anorganischen oder organischen Stoffen neue Materialien herzustellen, deren Komponenten nur wenige Nanometer groß sind. Sie testen die neuen Stoffeigenschaften zunächst im kleinen Maßstab und verbessern eventuell das Herstellungsverfahren. Gemeinsam mit Physikern und Materialwissenschaftlern werden die Substanzen, die zum Beispiel als Bestandteile von Metallen, Kunststoffen oder Keramiken dienen sollen, dann auf ihre Anwendungstauglichkeit getestet. Oft unterstützen Informatiker diese Arbeiten durch Rechenmodelle und Computersimulationen, um die Eigenschaften der Werkstoffe vorherzusagen und die Rechenergebnisse mit den Resultaten aus den Materialprüfungen zu vergleichen. In Pilotversuchen wird anschließend gemeinsam mit Ingenieuren eine größere Menge des Materials produziert, um Rückschlüsse auf die Erfordernisse für die Herstellung im großindustriellen Maßstab ziehen zu können.

Bereits seit Beginn des Entwicklungsprozesses sind weitere, nicht naturwissenschaftliche Berufsgruppen beteiligt: Ist der Nutzen des neuen Materials für die Abnehmer bestätigt, prüfen Betriebswirte, ob sie wirtschaftlicher sind als herkömmlich erzeugte Materialien. Trifft dies zu, beginnt die Produktion und Vermarktung.



C P B

Über alle Stufen, von der Idee bis zur Anwendung von Nanomaterialien, spielen auch Sicherheitsexperten eine wichtige Rolle. Sie diskutieren und prüfen, ob mit der Herstellung des Nanomaterials Gefährdungen für Mensch und Umwelt entstehen können. Auf dieser Grundlage geben sie Empfehlungen für einen sicheren Umgang in Forschung, Produktion und Anwendung. Auch bei den Sicherheitsexperten findet zwischen Wirtschaft und Wissenschaft ein reger Erfahrungsaustausch statt. So gibt es zurzeit zahlreiche nationale und internationale Projekte zur Sicherheitsforschung von Nanomaterialien, mit dem Ziel, eine fundierte Datenbasis zur Beurteilung möglicher Risiken zu erarbeiten.

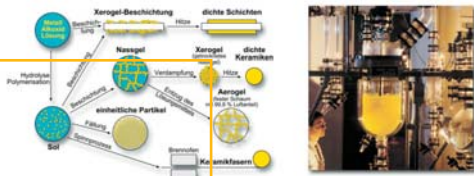


### Arbeitsaufgaben

- Wie weit reicht die Einsatzbreite von Nanomaterialien?
- Nennen Sie Berufsgruppen, die bei der Erforschung und Entwicklung von Nanomaterialien zusammenarbeiten.
- Welche Schritte sind notwendig, um ein neues Material aus Nanokomponenten auf den Markt zu bringen?

Erzeugung von Nanopartikeln durch Fällungsreaktionen im Sol-Gel-Verfahren

Sol-Gel-Reaktor



C P B

■ 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.

■ Top-down: Labors in Fingernagelgröße

Top-down-Verfahren findet man zum Beispiel in der Elektronik bei der Herstellung extrem kleiner Transistoren und Leiterbahnen auf Computerchips ebenso wie bei modernen medizinischen und biologischen Analyseverfahren, den so genannten „BioChips“. 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.

■ Bottom-up: Aus Sol mach Gel

Eine Methode für den gezielten Aufbau von Nanostrukturen nach dem „bottom-up“-Prinzip ist das so genannte 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 beginnen wieder zu zerfallen. Durch chemische Veränderung der

Von der IDEE zum PRODUKT (1)

E 04 Verfahren

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.

Ein Beispiel: In einer wässrigen Tetrachlorgoldsäure ( $\text{HAuCl}_4$ )-Lösung bilden sich unter Rühren bei 100 °C Goldkolloide (siehe E 07, Seite 11). Die Reaktion lässt sich zum Beispiel durch schnelle Zugabe von Trinatriumcitrat (Natriumsalz der Zitronensäure) als Reduktionsmittel abstoppen. 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.

Arbeitsaufgaben

- Erklären Sie den Unterschied zwischen „bottom up“ und „top-down“ und geben Sie je ein Beispiel für beide Verfahren.
- Was ist ein Sol und wie kann ein Sol zum Gel werden?
- Warum erscheinen Nanogoldteilchen rot statt golden?
- In welchen Bereichen würden Sie farbige Nanoteilchen einsetzen?



# Von der IDEE zum PRODUKT (2)

## E 05 Verfahren

### ■ Bottom-up: Teilchentreffen in der Gasphase

Das zweite wichtige Herstellungsverfahren für Nanomaterialien ist die Gasphasen-Synthese. 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 aufeinander folgenden 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 Heißwandreaktor und der Plasma-reaktor. 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.

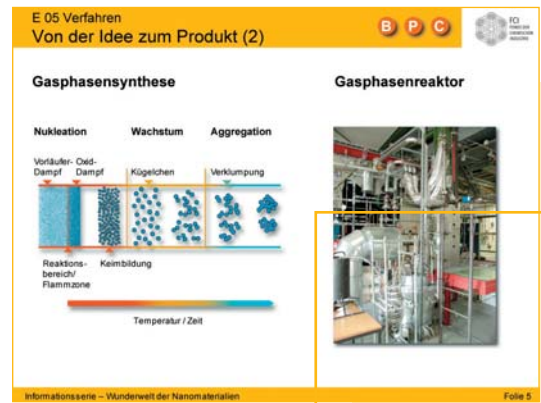
Heißwandreaktoren sind im Vergleich zu anderen Gasphasensystemen sehr

einfach aufgebaut. Die für die Reaktion benötigte Wärme – ca. 1.700 °C – wird in einem elektrischen Rohr-ofensystem 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 Prozess-temperatur: 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.

### ■ Partikel für Produkte

Mit der Gasphasensynthese werden viele Produkte im industriellen Maßstab hergestellt, zum Beispiel Titan-dioxid-Nanoteilchen (siehe Erläuterung 8, Seite 12), die unter Ausnutzung der Lichtenergie chemische Reaktionen katalysieren. Ein weiteres Beispiel ist nanoskaliges Siliciumdioxid, das beispielsweise Silikonkautschuk und anderen Kunststoffen als Verdickungsmittel und Verstärkerfüllstoff zugesetzt wird, um deren Festigkeit und Elastizität zu steigern.



C P B

### Arbeitsaufgaben

- Beschreiben Sie das Prinzip der Gasphasensynthese.
- Welche Gasphasenreaktoren kennen Sie und wie funktionieren diese?
- Nennen Sie zwei Beispiele für Produkte, die mit der Gasphasensynthese hergestellt werden.



Anwendungsgebiet	Anwendungsbeispiele
Biowissenschaften	Quantenpunkte als Markierungsstoff
Medizin	Nanoteilchen für Wirkstofftransport oder als Kontrastmittel
Kosmetik	Nanoteilchen als UV-Schutz in Sonnencreme
Lacke/Farben	Nanoteilchen für Kratzbeständigkeit Nanoteilchen als Pigmente Nanoschichten für blickwinkelabhängige Farben
Optik	Linien, Verglasungen und Spiegel Ultraglatte Politur mit Nanopulvern Antireflexschichten
Elektronik	Kohlenstoff-Nanoröhren für Transistoren, OLEDs für Displays

C P B

### ■ Vorteile im Verborgenen

Nanostrukturen werden mittlerweile in fast allen Bereichen unseres Lebens nutzbringend angewendet.

In biologischen Forschungslabors verwendet man anstelle von organischen Farbstoffen immer häufiger so genannte Quantenpunkte, die bei Anregung mit ultraviolettem Licht in klaren und hellen Farben leuchten. Mit ihnen markiert man zum Beispiel Eiweißstoffe wie mit einer „molekularen Laterne“ und kann so deren Aufenthaltsort oder Transportweg in lebenden Zellen buchstäblich „live“ beobachten. Weil Quantenpunkte anders als organische Farbstoffe von der energiereichen UV-Strahlung kaum ausgebleicht werden, sind mikroskopische Untersuchungen über lange Zeiträume möglich.

In der Medizin besitzen Nanoteilchen oder hohle Nanokugeln das Potenzial, durch biologische Beschichtungen ihren Weg direkt zum erkrankten Gewebe zu finden um beispielsweise Krebszellen zu bekämpfen. Haben die Partikel auch noch Eigenschaften eines Kontrastmittels, lassen sich sogar Diagnose und Therapie miteinander verbinden, denn die Teilchen sind dann auch im Computertomographen sichtbar. Dadurch kann der Arzt die Behandlung überwachen und ihr Ergebnis, zum Beispiel die Größenabnahme eines Tumors, besser überprüfen. Bei Implantaten können Nanoteilchen und Nanoschichten dazu beitragen, dass das körperfremde Material besser vertragen wird und trotz kontinuierlicher mechanischer Beanspruchung weniger schnell verschleißt.

Ebenso vielfältig sind die Anwendungen in technischen Industriezweigen. Hier nur einige Beispiele: Farben können durch Nanomaterial leichter angemischt werden; Nanoteilchen machen Lacke beständiger gegen Verkratzen oder sie reflektieren wie kleine Spiegel das Sonnenlicht und verhindern so ein Ausbleichen der darunter liegenden Farbschicht.

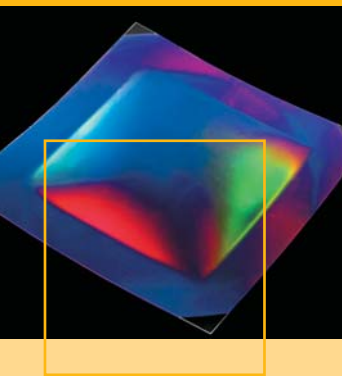
## MATERIALIEN und mehr

### E 06 Anwendungen (Übersicht)

Schichten aus Metalloxiden oder Metallen von wenigen Nanometern Dicke werden genutzt, um die Reflexion, Brechung und Interferenz von Licht zu beeinflussen. Dadurch können vom Blickwinkel abhängige Farbeffekte entstehen oder Glasscheiben entspiegelt werden. Entspiegelte Abdeckgläser von Sonnenkollektoren ermöglichen beispielsweise, dass mehr Licht in Energie umgewandelt werden kann. Linsen und Spiegel, die in Kameras ebenso wie in Hochleistungsteleskopen vorkommen, können durch Nanoschichten besonders präzise optische Eigenschaften erhalten. Durch Nanopoliturverfahren werden die Schichten besonders glatt. Würde man sie auf die Fläche der Bundesrepublik Deutschland vergrößern, hätten die größten Unebenheiten die Höhe von Maulwurfshügeln.

Deutsche Chemieunternehmen arbeiten daran, Nanostrukturen zukünftig auch als Katalysatoren und Speicherelemente in besonders kleinen, leistungsfähigen und langlebigen Batterien und Akkus einzusetzen. Es ist das Ziel vieler Branchen, mechanische Bauteile nicht nur haltbarer, sondern auch leichter zu machen und mit weiteren Eigenschaften wie elektrischer Leitfähigkeit oder Transparenz auszustatten. Hier sind neue Kunststoffe und Keramiken mit Nanomaterialien von besonderem Interesse. Manchmal kommen dabei sehr verblüffende Ergebnisse zu Tage. Stellen Sie sich vor, eine Porzellantasse wäre durchsichtig und ließe sich verbiegen als wäre sie aus Gummi – solche Arten von Keramik wurden in Forschungslabors bereits hergestellt. Ebenso wie ein schaumartiger Hitzedämmstoff zwischen zwei Glasscheiben, von denen man eine anfassen kann ohne sich zu verbrennen, während auf der anderen Seite jemand einen Bunsenbrenner an das Glas hält. Weiterhin können Nanostrukturen technische Oberflächen oder auch Textilien so Wasser abweisend machen, dass Tropfen darauf abperlen wie auf einer heißen Herdplatte und Schmutz wie von selbst entfernt wird (siehe E 11, Seite 15).

Nicht nur für weiterverarbeitende Unternehmen und Verbraucher, auch für den Schutz der Umwelt bieten Nanomaterialien Vorteile in vielen Bereichen. Beispielsweise bei Lackiervorgängen oder in der Herstellung von bestimmten Kunststoffen senken sie den Verbrauch an Lösungsmitteln, das Aufkommen von Abfallstoffen und den Energieverbrauch (siehe E 14, Seite 18).



### Arbeitsaufgaben

- Nennen Sie drei Anwendungsbeispiele für Nanostrukturen.
- Welche Zukunftsvisionen gibt es für Nanostrukturen?
- Wie kann man das optische Verhalten von Quantenpunkten verändern?

# Nano für GESUNDHEIT und WOHLBEFINDEN

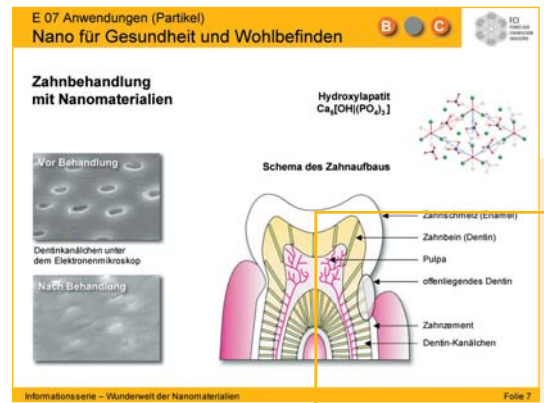
## E 07 Anwendungen (Partikel)

### ■ Große Chancen für kleine Strukturen

Auch in der Medizin werden derzeit Nanomaterialien für zukünftige klinische Anwendungen perfektioniert (siehe E 06, Seite 10). Dies beginnt bei der Diagnose von Stoffwechseleränderungen oder Krankheiten und erstreckt sich bis zu neuen Therapieverfahren. Im zweiten Fall könnten Nanoteilchen oder „Nano-Container“ beispielsweise Medikamente direkt zum erkrankten Gewebe oder Organ transportieren oder sogar Krebszellen 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 verschleiben. Andere Arten von Beschichtungen wehren beispielsweise bei Blasenkathetern den Bewuchs mit krankheitserregenden Bakterien ab.

### ■ Nanoteilchen für Diagnose und Therapie

Goldpartikel mit einem Durchmesser von weniger als 50 nm (siehe E 04, Seite 8) werden bereits in Standard-Diagnoseverfahren angewendet, zum Beispiel bei Schwangerschaftstests. In dieser Teilchengröße eignet sich das Gold in doppelter Hinsicht: Erstens ist es chemisch inert, also reaktionsträge, so dass Reaktionen mit anderen Stoffen, zum Beispiel anderen Metallionen, die das Testergebnis möglicherweise verfälschen könnten, nicht stattfinden. Zweitens lässt sich das Gold gleichmäßig mit bestimmten Eiweißstoffen, den Antikörpern, beschichten, die eine gewünschte Substanz in der Probe durch die so genannte Antigen-Antikörper-Reaktion erkennen und binden. Der Schwangerschaftstest beruht auf dem Nachweis des humanen Choriongonadotropins (hCG), eines Hormons, das bei einer gesunden Frau ausschließlich in der Schwangerschaft gebildet wird. Man kann es schon in sehr geringen Mengen im Blut oder Urin nachweisen. Gibt man hCG-haltigen Urin über einen Teststreifen mit Antikörper beschichtetem Nanogold, tritt eine Verklumpung der Teilchen ein. In dieser Form können Sie einen Filter im Testsystem nicht mehr passieren und bleiben auf ihm als roter Niederschlag zurück. Ist hingegen kein hCG in der Urinprobe vorhanden, können die Nanogoldteilchen den Filter passieren.



C B

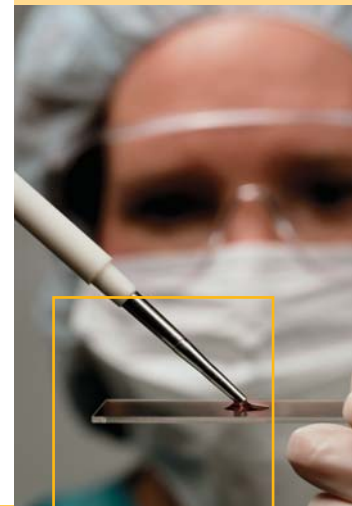
Magnetische Nanopartikel aus Eisenoxid in einer Trägerflüssigkeit, so genannte Ferrofluide (siehe E 08, Seite 12) werden bereits als Kontrastmittel in der medizinischen Bildgebung eingesetzt. Durch Magnetfelder können sie an einer gewünschten Stelle im Körper positioniert werden. Wegen dieser Eigenschaften eignen sich Ferrofluide auch für die Behandlung bestimmter Tumorerkrankungen, denn die Nanoteilchen werden von Krebszellen aufgenommen. Wird dann an das Gewebe ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld angelegt, wandeln die Teilchen die aufgenommene Energie in Wärme um und zerstören die Tumorzellen durch Überhitzung (Hyperthermie). Mit dieser Behandlungsmethode wurden in Studien mit Krebspatienten bereits erste Erfolge erzielt. Ein weiterer Behandlungsansatz beruht darauf, dass die Nanoteilchen mit Wirkstoffen beladen und im Gewebe mit einem Magnet konzentriert werden. So werden die Wirkstoffe gezielt in die Krebszellen eingebracht.

### ■ Zahnschmerz ade!

Nanomaterialien als Wirkstoffe bieten auch Chancen für die Zahnheilkunde. Zähne sind zum größten Teil aus Zahnbein (Dentin) aufgebaut. Im Bereich der Wurzel wird das Dentin vom Zahnzement bedeckt. Liegen die Zahnhälse offen, bildet sich der Zahnzement zurück. Dies verursacht Schmerzen, weil durch feine Kanälchen (Tubuli) im Dentin unerwünschte Heiß-Kalt- oder Süß-Sauer-Reize an die Nerven im Zahninneren weitergeleitet werden. Bei bisherigen Methoden zur Schmerzbehandlung durch Verschluss der Tubuli wurden überwiegend zahnfremde Materialien verwendet, die sich nicht langfristig mit dem natürlichen Dentin verbinden. Anders ein neuer Wirkstoff, der auf Basis von Nanomaterialien entwickelt wurde. Er besteht aus den gleichen Bestandteilen wie natürliches Zahnmaterial. Die Teilchen dieses Wirkstoffs reagieren mit Calcium- und Phosphatbausteinen aus dem Speichel, lagern sich daraufhin gemeinsam mit diesen auf der Zahnoberfläche ab und verbinden sich mit ihr. Wissenschaftliche Studien haben bewiesen, dass das neuartige Material zusammen mit Speichel etwa zehnmal schneller wirkt als herkömmliches Calciumphosphat. Nach 20 Behandlungen sind 99 Prozent aller Dentin-Kanälchen verschlossen.

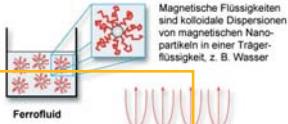
### Arbeitsaufgaben

- Auf welchem Prinzip beruht der Schwangerschaftstest mit Goldpartikeln?
- Wie kann ein Nanoteilchen beschaffen sein, um in der Krebstherapie eingesetzt werden zu können?



Der „Rosensweig-Effekt“

„Igelstruktur“  
eines Ferrofluids



■ Klein aber oho

Nanoteilchen als Bestandteil von herkömmlichen Werkstoffen führen oft zu völlig neuen Materialeigenschaften. Man kann sie als Schichten auf Oberflächen aufbringen oder mit dem Material vollständig vermischen. Dann schützen sie beispielsweise mechanische Bauteile vor Verschleiß und Korrosion, bewirken Entspiegelung oder Anti-Beschlageigenschaften von Gläsern und Kunststoffen, machen Baustoffe und Farben selbstreinigend oder vermitteln katalytische Wirkungen.

■ Chemie bei Licht betrachtet

Titandioxid (TiO<sub>2</sub>)-Nanopartikel wirken photokatalytisch, das heißt bei Bestrahlung mit UV-Licht zersetzen sie Wasser zu OH-Radikalen und bilden daraus zusammen mit Luftsauerstoff Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Weil Wasserstoffperoxid für die meisten Mikroorganismen toxisch ist, können TiO<sub>2</sub>-Teilchen Metallflächen in Operationssälen leichter steril halten oder Dachziegelbewuchs mit Algen abwehren.

■ Im Kratztest kratzfest

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.

## Teilchen für die TECHNIK

### E 08 Anwendungen (Partikel)

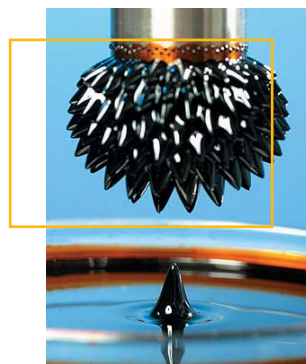
■ „Magische“ Magnete

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<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). 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 Abstoßung ihrer Beschichtung verteilen sich die Partikel gleichmäßig in der Lösung und sedimentieren nicht. Die gesamte Flüssigkeit – das so genannte Ferrofluid – kann mit einem Magneten bewegt werden. Diesen Effekt nutzt man für Schmier- und Dichtstoffe die durch Beimischung von Ferrofluiden mit Magnetfeldern exakt zu der gewünschten Position dirigiert werden können. 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“).

Arbeitsaufgaben

- Wie können Titandioxid-Nanopartikel nützlich sein?
- Wie finden Nanoteilchen in der Automobilindustrie Anwendung?
- Was sind Ferrofluide und wie können sie nützlich eingesetzt werden?
- Wird sich ein Wassertropfen auf einer Antibeschlag-Nanoschicht abkugeln oder ausbreiten?

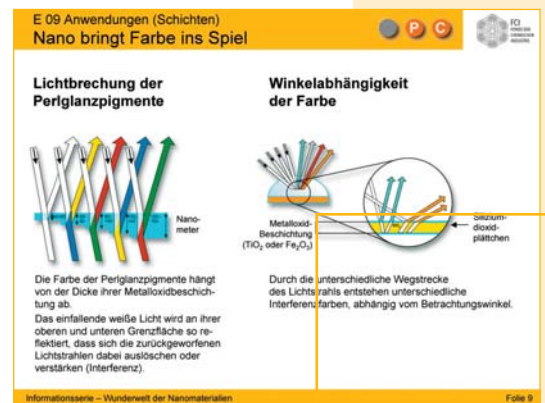


# Nano bringt FARBE ins Spiel

## E 09 Anwendungen (Schichten)

### ■ 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 Metalloxid-schichten 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 Salzschnmelze 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



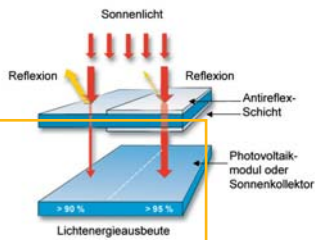
( $Fe_2O_3$ ) aufgetragen werden. Durch das Zusammenspiel von Reflexion, Brechung und Interferenz sieht der Betrachter je nach Blickwinkel eine andere Farbe. Mischt man den Plättchen herkömmliche Pigmente bei, kann man das Farbspektrum darüber hinaus auf nahezu jede gewünschte Weise gezielt einstellen. Dies ist möglich, weil die Siliziumdioxidplättchen sehr lichtdurchlässig sind. Die beigemischte Farbe „scheint“ sozusagen hindurch.

### ■ Nanokugeln in Augenschein genommen

Die Iris des menschlichen Auges verändert je nach Lichteinfall ihre Farbe. Dass man dieses „irisierende Schillern“ auch mit Dispersionen organischer Siliziumdioxidkugeln von wenigen Nanometern Durchmesser erzielen kann, 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 so genannten 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.

### Arbeitsaufgaben

- Welche optischen Phänomene erzeugen die Blickwinkel abhängige Farbigkeit von Nanoschichten?
- Wie kann man die Farbe einer Pigmentfolie aus Nanoplättchen beeinflussen, ohne die Dicke der Metalloxid-Nanoschicht zu verändern?



## Nano steigert POWER

### E 10 Anwendungen (Schichten)

#### Entspiegelung mit Nanokugeln

Forscher eines Chemieunternehmens stellen für diesen Zweck spezielle Antireflexschichten aus Nanomaterial her. Die Schicht wird mit dem Sol-Gel-Verfahren (siehe E 04, Seite 8) auf das Glas aufgebracht. Das Sol besteht aus Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )-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 eingebraunt 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.

#### Glasklar? Nicht ganz.

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.

#### Weniger Reflexion, größere Energieausbeute

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.

#### Arbeitsaufgaben

- Warum muss herkömmliches Glas für Abdeckungen von Solaranlagen besonders behandelt werden?
- Aus welchem Material und mit welchem Verfahren wird die beschriebene Antireflexschicht hergestellt?
- Worin liegt der Vorteil der neuen Beschichtung und mit welchen Zahlen lässt er sich belegen?



# Nano hält SAUBER

## E 11 Anwendungen (Schichten/3D-Strukturen)

### ■ Reinlich wie die Lotusblume

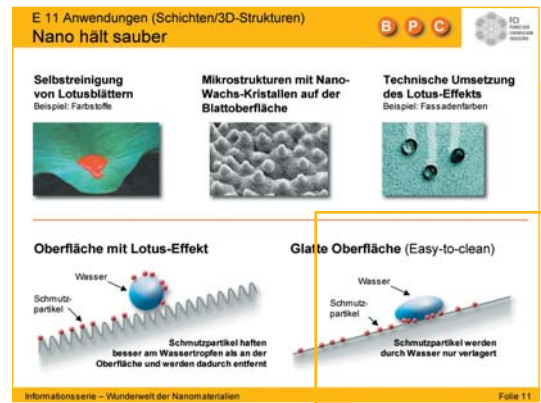
In asiatischen Ländern gilt die Lotus-Blume als Symbol der Reinheit und als heilig: Ihre Blätter entfalten sich aus schlammigem Gewässer und sind trotzdem trocken und sauber. Schmutz kann durch einfaches Abbrausen entfernt werden. Selbst klebrige Substanzen wie Honig laufen bei geringem Neigungswinkel der Blätter vollständig ab. Dieses Phänomen wurde in den 70er 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 Raster-Sondenmikroskopen (siehe E 02, Seite 6) gelüftet. Auf der Oberfläche der äußeren Blattzellen befinden sich hügelige Mikrostrukturen, die mit Wasser abweisenden Wachskristallen von wenigen Nanometern Größe besetzt sind.

Vom „Lotus-Effekt“ zu unterscheiden ist der so genannte „easy-to-clean Effekt“. Dieser beruht auf den Wasser und Fett abweisenden Eigenschaften von glatten chemischen Schichten.

### ■ 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



C P B

### Arbeitsaufgaben

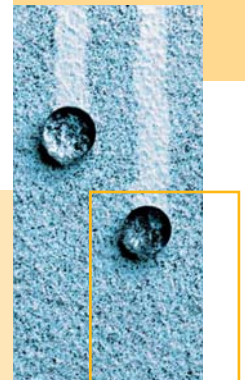
- Welchen Zweck hat der „Lotus-Effekt“ in der Natur?
- Inwieweit hat die Grenzflächen-spannung Einfluss auf den Effekt?
- Inwieweit hat die Rauigkeit Einfluss auf den Effekt?
- Ist der „Lotus-Effekt“ auf einem Dachziegel ewig haltbar?
- Wie unterscheiden sich „Lotus-Effekt“ und „easy-to-clean Effekt“?

aus. Sein Kontaktwinkel ist dann  $0^\circ$ . Tatsächlich nutzt man diesen Effekt bei Nanomaterialien für Antibeschriftungsbeschichtungen, zum Beispiel bei Brillengläsern. Bei einer extrem Wasser abweisenden (superhydrophoben) Oberfläche kugelt sich der Wassertropfen vollständig ab und berührt den Untergrund nur in einem Punkt, so als befände er sich auf einer heißen Herdplatte. Sein Kontaktwinkel beträgt dann  $180^\circ$ .

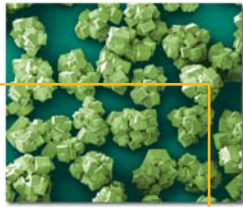
Auch die Rauigkeit hat Einfluss auf die Benetzung: Eine hydrophile Oberfläche wird umso benetzbarer, je rauer sie ist. Dies kann man bei Küchenpapier beobachten. Eine hydrophobe Oberfläche hingegen wird durch Aufrauung superhydrophob. Genau dies ist beim Lotus-Effekt der Fall: Die Luft wird zwischen 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 Schmutz abweisende Fassadenfarben und Dachziegel.



Nanowürfel unter dem Raster-Elektronenmikroskop



## Nano in WÜRFELN: mehr als sechs Seiten

E 12 Anwendungen (3D-Strukturen)

### ■ Fußballfeld im Fingerhut

Die große Speicherkapazität des schwammähnlichen Nanomaterials beruht auf den zahlreichen Poren mit wenigen Nanometern Größe, die im Würfelinneren dreidimensional miteinander verbunden sind und so die extrem große Oberfläche erzeugen. Mit Standardverfahren können problemlos Masse/Volumenverhältnisse von 3400 m<sup>2</sup>/g erreicht werden. Damit verfügt die Füllung eines Fingerhutes mit Nanowürfeln (ca. 2,5 Gramm) in ihrem Inneren über die Fläche eines Fußballfeldes.

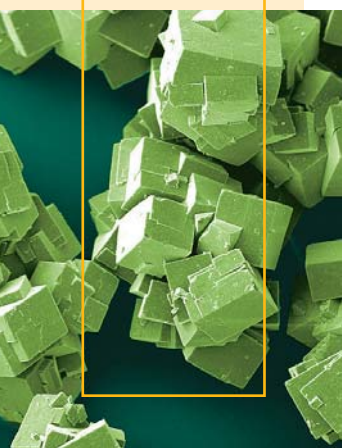
### ■ Vielseitige Superschwämme

Die kubischen „Nanoschwämme“ könnten ein ideales Speicher- und Transportmedium für Wasserstoff bilden, der als zukünftiger mobiler Energieträger in Brennstoffzellen für den Betrieb verschiedenster Geräte wie Laptops, Mobiltelefone, Handhelds etc. im Gespräch ist. Weiterhin wird ihre Anwendung in leichtgewichtigen Gasspeichern für zum Beispiel mobile Verbrennungsmotoren mit Drücken von 40–50 bar (statt bislang 200–350 bar) für Kraftfahrzeuge, Boote, Maschinen, Arbeits- und Sportgeräte etc. diskutiert.

Gibt man die Würfel bei Raumtemperatur in einen Gasbehälter, besitzen sie ca. 15 Prozent mehr Transportkapazität für Wasserstoff und ca. 95 Prozent mehr für Methan als der Behälter allein. Nicht zuletzt kommen sie auch als länger haltbarere und/oder deutlich kleinere Filterpatronen zur Entfernung von Schad- und Geruchsstoffen aus Gasströmen in Frage.

### ■ Massig Platz durch Nanoporen

Dreidimensionale Strukturen mit extrem feinen Poren besitzen im Vergleich zu ihrer Masse eine extrem hohe Oberfläche und eignen sich dadurch beispielsweise als Katalysatoren oder Transport- und Speichermedium für Gase. Bislang galt die Aktivkohle in der chemischen Industrie als Rekordhalter in Bezug auf diese Eigenschaften. Durch die Forschungsarbeiten eines deutschen Chemieunternehmens ist sie jedoch von einem Nanomaterial um Längen geschlagen worden: von „Nanowürfeln“. Sie stellen zwar ein neues Material dar, lassen sich jedoch mit etablierten chemischen Verfahren schnell, kostengünstig und in Mengen mehrerer Kilogramm routiniert erzeugen. Die Nanowürfel werden zu gleichen Teilen aus anorganischen Verbindungen (zum Beispiel Zinkoxid, ZnO) und organischen Dicarbonsäuren (zum Beispiel Terephthalsäure) gebildet, die miteinander durch Komplexbildung zu einer kubischen Gitterstruktur reagieren. Dazu müssen lediglich Lösungen eines Zinksalzes oder Zinkoxid gemeinsam mit einer Terephthalsäurelösung unter Rühren einige Stunden zusammengebracht werden. Dabei kristallisieren die Nanowürfel aus, können abfiltriert und anschließend getrocknet werden. Das verwendete Lösungsmittel wird für den nächsten Herstellungsprozess wiederverwertet. Die Wahl der Bausteine und die Veränderung der Reaktionsbedingungen erlauben es, die Größe der Würfel sowie ihre Porosität gezielt zu steuern. Auf diese Weise wurden bereits über 150 verschiedene Arten von Nanowürfeln erzeugt.



### Arbeitsaufgaben

- Mit welchen Verfahren kann man poröse Nanomaterialien erzeugen?
- Wodurch entsteht die extrem große Oberfläche dieser Materialien?
- Für welche Anwendungen sind Nanowürfel optimal geeignet?

# WIRTSCHAFTLICHE Winzlinge

## E 13 Wirtschaft

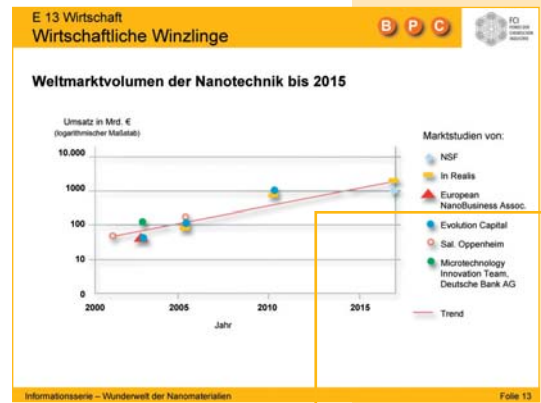
### ■ Märkte für neue Materialien

Weil die Erforschung, Herstellung und Anwendung von Nanostrukturen zahlreiche Wissenschafts- und Technikdisziplinen in sich vereint, lässt sie für viele Branchen sowohl Verbesserungen bestehender Verfahren und Produkte als auch echte Produktneuerungen erwarten: Forschung und Entwicklung kann durch atomgenaue Analysemethoden und schnellere Messinstrumente erleichtert werden. Die Ergebnisse lassen sich zügiger in Produkte umsetzen. Herstellungsprozesse können wegen geringeren Rohstoffverbrauchs umweltfreundlicher, mit geringerem Materialverbrauch und in Massenfertigung mit höherer Präzision ablaufen. Produkte können 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 Industrie-Nationen erkannt. Dementsprechend fließen große Summen in die Förderung der Nanoforschung und -produktion. In den USA wurden beispielsweise 3,7 Milliarden US\$ für den Zeitraum 2005–2008 bereitgestellt. Einen vergleichbar hohen Stellenwert hat die Nanoforschung in Deutschland und der Europäischen Union.

Nicht nur die Höhe öffentlicher Fördermittel, sondern auch die Zahl der Patentanmeldungen auf Erfindungen gibt Aufschluss über die wirtschaftliche Bedeutung von Nanostrukturen. Im internationalen Vergleich liegen die USA auf Platz 1 und Deutschland auf Platz 2, gefolgt von Japan.

Welche Umsätze werden durch die Erforschung und Anwendung von Nanostrukturen erwartet? Für das gesamte Feld der Produkte und Dienstleistungen der Nanotechnik geht man derzeit von einer Steigerung des Weltmarktvolumens auf rund 1.000 Milliarden Euro bis zum Jahr 2020 aus. Schon heute können die Branchenfelder, in denen Nanomaterialien in Zukunft stärker zum Einsatz kommen werden, beeindruckende Umsatzzahlen vorweisen.



C P B

Einige Beispiele:

**Filter und Membranen:** Bei der Entsalzung von Meerwasser und der Gewinnung hoch reinen Wassers für Laborverfahren spielen Membranen und Filter eine ebenso große Rolle wie in der Lebensmitteltechnologie oder in Brennstoffzellen, die aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff Energie produzieren. Das Marktvolumen für Trennmembranen von Brennstoffzellen lag schon im Jahr 2003 bei 1,3 Milliarden US\$.  
**Biotechnologie und Medizin:** „Nano“ spielt in den Biowissenschaften und der Medizin bereits heute eine wichtige Rolle und wird in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen: sei es beim Einsatz von Rastersondenmikroskopen (siehe E 02, Seite 6), bei der Erforschung biologischer Strukturen (zum Beispiel bei der Entzifferung des menschlichen Erbguts) oder in der Diagnose von Krankheiten mit BioChips (siehe E 04, Seite 8) und dem Einsatz neuer Medikamente (siehe E 07, Seite 11). Amerikanische Marktforscher schätzten den Weltmarktwert für Rastersondenmikroskope für das Jahr 2005 auf 6 Milliarden US\$.

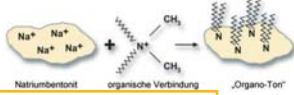


### Arbeitsaufgaben

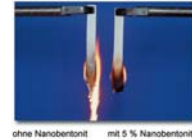
- Welche Verbesserungen erwartet man durch die Anwendung von Nanostrukturen?
- Beschreiben Sie zwei Branchenfelder, in denen Umsatzsteigerungen durch Nanomaterialien erzielt werden können.

**Nanobentonit: Vielseitige Werkstoffe**

(1) Organische Modifikation der Oberfläche durch Ionenaustausch



(2) Flammenschutz durch Nanobentonit



(2) „Entblätterung“ (Exfollierung) der Stapel aus Organobentonitplättchen und gleichmäßige Verteilung im Kunststoff



**NUTZEN durch Nano**  
E 14 Gesellschaft



**Arbeitsaufgaben**

- Welche Vorteile ergeben sich für Patienten durch die medizinische Anwendung von Nanomaterialien?
- Welche Beiträge zum Umweltschutz leisten Nanomaterialien im Lackierprozess?
- Nennen Sie weitere Vorteile beim Einsatz von Nanomaterialien.

Es wird erwartet, dass Produkte aus der Nanotechnik in Zukunft verstärkt Einzug in unser Alltagsleben halten werden. Daher sollen in diesem Kapitel überwiegend die Erwartungen beschrieben werden, die man an einen Nutzen der Nanotechnik für die Gesellschaft knüpft.

**Bessere Gesundheitsversorgung**

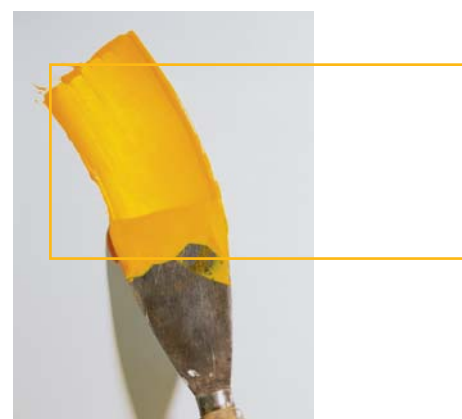
Mit Hilfe von Diagnostika auf Basis von Nanomaterialien wird es zukünftig möglich sein, Krankheiten oder Ursachen für noch nicht ausgeprägte Erkrankungen früher als bisher zu erkennen. Damit wird einerseits die Gesundheitsvorsorge verbessert, andererseits steigen für den Patienten die Chancen für eine wirksame 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. Materialien, die wie winzig kleine Schwämme oder Pumpen Arzneimittel besser dosieren oder auch Implantate, die besser mit dem Körper verwachsen und länger halten, können die Lebensqualität von Patienten steigern und gleichzeitig Kosteneinsparungen im Gesundheitswesen herbeiführen.

**Schutz der Umwelt**

Nanomaterialien können auch dazu beitragen, Herstellungsverfahren durch Einsparung von Rohstoffen und Energie sowie durch Senkung des Abfallaufkommens umweltverträglicher zu machen. Ein Beispiel hierfür ist die Lackiertechnologie. 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Damit der Lack auf Aluminium überhaupt haftet, war es bisher notwendig, die Oberfläche mit ätzender Chromsäure (H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) zu behandeln. Sie verringert die Dicke der Aluminiumoxidschicht und führt zur Bildung einer neuen Aluminium-Chromoxidschicht. Bei diesem Vorgang fallen Chrom(VI)-haltige Abfallstoffe an, die aufwändig 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 E 04, Seite 8). 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 bei seiner Verarbeitung 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.





### Arbeitsaufgaben

- Nennen Sie drei Anwendungen von Nano-Bentonit.
- Mit welchen Vorteilen wird Nanotechnik heute angewendet? Geben Sie ein Beispiel, entweder aus der Kosmetikindustrie oder aus der Automobilindustrie.
- Nennen Sie mögliche Anwendungen der Nanotechnik im Haushalt.

### ■ Vielseitige Werkstoffe

Kunststoffe können herkömmliche Werkstoffe ersetzen, wenn sie bessere Eigenschaften besitzen. In vielen Bereichen hat man eine Verbesserung der elastischen Eigenschaften durch Herstellung von so genannten 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-Minerals 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 nicht erreicht. Unter anderem dient er als Hilfsstoff mit mineralischen Flammenschutzmitteln dem besseren Flammenschutz von Kunststoffen, zum Beispiel in Kabelverkleidungen. Anders als die überwiegend verwendeten halogenhaltigen Flammenschutzmittel, 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 Nano-Tonteilchen 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.

### ■ Mehr Qualität und Komfort

Wo es um das Wohlbefinden des Menschen geht, bieten sich zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für Nanoprodukte. Schon heute gibt es Sonnencremes zu kaufen, die durch Nanoteilchen wirkungsvoll vor Sonnenbrand und Hautalterung schützen. Der Vorteil der Nanoteilchen 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 Nanopartikel dort liegen, wo man sie aufgetragen hat. Dadurch wird die Haut gleichmäßiger und besser geschützt.

In Kosmetik-Cremes geben Nanokugeln pflegende Substanzen an die Haut ab und sorgen für ein angenehmeres Hautgefühl.

Nanokugeln 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 Lacke, die durch Nanoteilchen kratzfester werden (siehe E 08, Seite 12) oder Antireflexbeschichtungen für Glas- oder Kunststoffabdeckungen von Armaturen. Forscher und Entwickler haben sich zum Ziel gesetzt, auch Lacke herzustellen, die nach dem Prinzip der Selbstorganisation (siehe E 01, Seite 5) von selbst „heilen“, sobald sie verkratzt werden. Karosserien, deren Lackierung Nanoteilchen oder Nanoschichten enthält, können weiterhin Blickwinkel abhängig 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 Karosserieteile – 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.

## FACHBEGRIFFE zum Nachschlagen

### ■ Adhäsion

Die Adhäsion, auch Anhangskraft genannt, bezeichnet die Anziehungskraft zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe, bzw. das Haften zweier Stoffe oder Körper aneinander.

### ■ Aggregation

Anhäufung

### ■ Aggregatzustände

Die drei Zustände fest, flüssig und gasförmig bezeichnet man als die drei Aggregatzustände der Stoffe. Der Aggregatzustand einer Substanz hängt von den herrschenden äußeren Bedingungen, wie zum Beispiel Druck und Temperatur ab.

### ■ Aminosäure

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

### ■ Antigen

Bei einem Antigen (kurz für Antisomatogen) handelt es sich um ein Molekül, das vom Organismus als körperfremd erkannt wird und deshalb die Produktion von Antikörpern hervorruft. Antigene können körpereigen sein (zum Beispiel bei Autoimmunkrankheiten) oder von außen in den Körper gelangen (zum Beispiel Gifte, Bakterien).

### ■ Antigen-Antikörper-Reaktion

Einer der wichtigsten Abwehrmechanismen des Organismus; Bestandteil der Immunantwort.

### ■ Antikörper

Körpereigene Proteine (Immunglobuline), die im Verlauf einer Immunantwort von den B-Lymphozyten gebildet werden; sie erkennen in den Körper eingedrungene Fremdstoffe (zum Beispiel Bakterien) und helfen im Rahmen einer umfassenden Immunantwort, diese zu bekämpfen.

### ■ Atom

Kleinste Einheit eines chemischen Elements; das leichteste Atom ist das Wasserstoffatom.

### ■ Base

Bestandteil von Nukleinsäuren; es gibt vier verschiedene Basen: Adenin, Guanin (Purinabkömmlinge), Cytosin und Thymin bzw. Uracil (Pyrimidinabkömmlinge). In der RNA ersetzt die Base Uracil das in der DNA vorhandene Thymin.

### ■ 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.

### ■ Brechungsindex

Der Brechungsindex ist ein Begriff der Optik und kennzeichnet die Brechung des Lichts beim Übergang in ein transparentes (durchsichtiges) Material.

### ■ DNA

Abkürzung für Desoxyribonukleinsäure (englisch: deoxyribonucleic acid); fadenförmiges, chemisches Molekül, das die genetische Information trägt; in den Chromosomen liegt die DNA als hoch kondensiertes fadenförmiges Molekül vor.

### ■ Doppelhelix

Zwei schraubenförmig umeinander gewundene DNA-Stränge, wobei die Einzelstränge über Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Basen miteinander verbunden sind. Man kann sich die Doppelhelix als eine verdrehte Stickleiter vorstellen.

### ■ Elektron

Negativ geladenes Elementarteilchen; Elektronen bilden die Hülle der Atome. Der Name kommt vom griechischen Wort Elektron und bedeutet Bernstein (an dem Elektrizität erstmals beobachtet wurde).

### ■ 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.

### ■ Hydrophil

„Wasser liebend“; hydrophile Substanzen sind wasserlösliche Stoffe. Hydrophile Oberflächen werden von Wasser besonders gut benetzt.

### ■ Hydrophob

Stoffe, die als hydrophob („wasserfeindlich“) bezeichnet werden, lösen sich schlecht oder gar nicht in Wasser auf. Hydrophobe Oberflächen sind Wasser abweisend.

### ■ Inert

Als inert bezeichnet man chemische Elemente oder Verbindungen, die reaktionsträge sind. Dies bedeutet, dass sie mit anderen Stoffen fast nicht reagieren. Inerte Stoffe sind zum Beispiel Edelgase, Porzellan und Glas.

### ■ Interferenz

Eine Interferenz ist eine Überlagerungserscheinung die auftritt, wenn zwei oder mehr Wellen denselben Raum durchlaufen.

### ■ Ionen

Ionen sind elektrisch geladene Atome oder Moleküle, die durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen negativ (Anionen) beziehungsweise positiv (Kationen) geladen sein können.

### ■ 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.

### ■ Magnetische Feldlinien

Magnetische Feldlinien geben die Richtung der Kraft an, die ein magnetischer Nordpol erfahren würde, wenn man ihn an diesen Punkt bringen würde. Sie gehen vom Nordpol aus und laufen zum Südpol.

### ■ Molekül

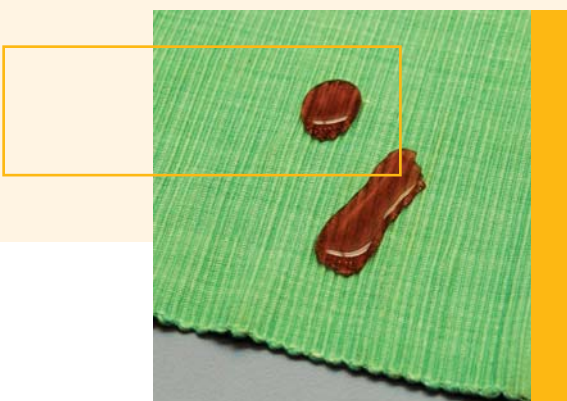
Ein Molekül ist ein Teilchen, das aus mindestens zwei kovalent gebundenen Atomen besteht.

### ■ Nanomaterialien

Werkstoffe mit einer Abmessung oder Strukturierung unter 100 Nanometer.

### ■ Nanoskalig

Im Größenbereich von 1 bis 100 Nanometer.



### ■ Ordnungszahl

Die Ordnungszahl gibt die Anzahl der Protonen in einem Atomkern an. Ihr Formelzeichen ist Z. Uran hat mit  $Z = 92$  die höchste in der Natur vorkommende Protonenzahl. Künstlich erzeugte Elemente sind derzeit bis hin zur Ordnungszahl  $Z = 116$  beobachtet worden.

### ■ 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.

### ■ Quantenpunkt

Ein Quantenpunkt ist eine Nanostruktur mit durchschnittlich 10.000 Atomen. Form, Größe oder Anzahl der Elektronen in Quantenpunkten können beeinflusst werden, so dass sich elektronische und optische Eigenschaften maßschneidern lassen.

### ■ Radikale

Radikale sind äußerst reaktionsfähige, kurzlebige chemische Spaltprodukte, die sofort mit anderen Molekülen weiterreagieren. Sie entstehen dadurch, dass die Elektronenpaarbindungen in einem Molekül so aufgetrennt werden, dass jedes Bruchstück ein Elektron enthält.

### ■ Reduktionsmittel

Ein Reduktionsmittel ist ein Stoff, der einen anderen Stoff reduzieren kann, das heißt Elektronen an diesen abgibt und dabei selber oxidiert wird.

### ■ Ribosom

Protein-Nukleinsäurekomplex, an dem die Proteinbiosynthese unter Verwendung von mRNA als Vorlage stattfindet.

### ■ Selbstorganisation

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

### ■ Suspension

Eine Suspension ist ein heterogenes Stoffgemisch aus einer Flüssigkeit und einem darin fein verteilten Feststoff.

### ■ Van-der-Waals-Kraft

Die Van-der-Waals-Kraft ist eine geringe Kraft, die im Allgemeinen zwischen Molekülen auftritt und zu einer schwachen Kopplung dieser Moleküle führt.

### ■ Wasserstoffbrückenbindung

Wasserstoffbrückenbindungen gehören mit den Van-der-Waals-Bindungen und den elektrostatischen Bindungen zu den intermolekularen Wechselwirkungen, deren Bindungsenergien deutlich unter denen der Atombindung (kovalente Bindung) und der ionischen Bindungen liegen.

## Weiter im WEB

### ■ Organisationen und Initiativen

Fonds der Chemischen Industrie  
[www.fonds.vci.de](http://www.fonds.vci.de)

Verband der Chemischen Industrie (VCI)  
[www.vci.de](http://www.vci.de)

Initiative „nanoTruck“ des Bundesministeriums für  
Bildung und Forschung (BMBF)  
[www.nanoTruck.de](http://www.nanoTruck.de)

### ■ Informationsportale

TechPortal – Zukunft im Blickpunkt  
[www.techportal.de](http://www.techportal.de)

Nanomap – Die Landkarte der deutschen  
Nanotechnologie der VDI Technologiezentrum GmbH  
[www.nano-map.de](http://www.nano-map.de)

Informationssekretariat Chemische Nanotechnologie  
(ISN) der DECHEMA e. V.  
[www.infonano.de](http://www.infonano.de)

nanoforum.org – European Nanotechnology Gateway  
(engl.)  
[www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org)

nanotechweb (engl.)  
[www.nanotechweb.org](http://www.nanotechweb.org)

### ■ Nano und Schule

Nanotechnologie und Schule e. V.  
[www.nano-ev.de](http://www.nano-ev.de)

### ■ Virtuelle und reale Ausstellungen

„Nanoreisen – Abenteuer hinterm Komma“  
[www.nanoreisen.de](http://www.nanoreisen.de)

Ausstellung „Mannometer: Nanometer!“  
[www.mannometer-nanometer.de](http://www.mannometer-nanometer.de)

Ausstellung „Nanotechnologie –  
Aufbruch in neue Welten“  
[www.hansenanotec.de/nanoausstellung](http://www.hansenanotec.de/nanoausstellung)

Ausstellung „Micro- und Nanowelten“  
[www.nanowelten.de](http://www.nanowelten.de)

### ■ Nano in den Medien

Nanotechnologie-Beiträge der Sendung „Quarks & Co.“,  
WDR Fernsehen  
[www.quarks.de/dyn/3970.phtml](http://www.quarks.de/dyn/3970.phtml)

Zukunft D – Expedition ins Nanoland  
[www.zukunft-d.tv](http://www.zukunft-d.tv)

### ■ Sicherheit in der Nanotechnik

EU-Projekt „nanoSAFE – Safe Production of  
Nanomaterials“ (engl.)  
[www.nanosafe.org](http://www.nanosafe.org)

EU-Projekt „NANODERM – Quality of Skin as a Barrier to  
ultra-fine Particles“ (engl.)  
[www.uni-leipzig.de/~nanoderm](http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm)

NanoTox – informal information on toxicity of  
engineered nanomaterials (engl.)  
[www.nanotox.info](http://www.nanotox.info)



