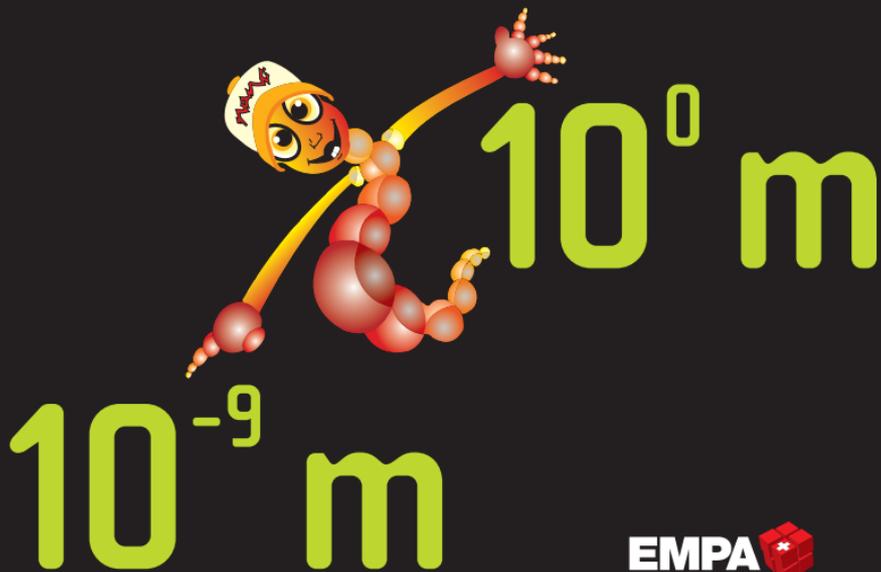


REISE IN DIE WELT DES NANOMETERS



Materials Science & Technology

«Nano» kommt aus dem Griechischen und bedeutet Zwerg, was wir in unserer Vorstellung mit winzig verbinden. Nano wird daher auch als Abkürzung für ein Milliardstel verwendet.

1 Nanometer = 0,000



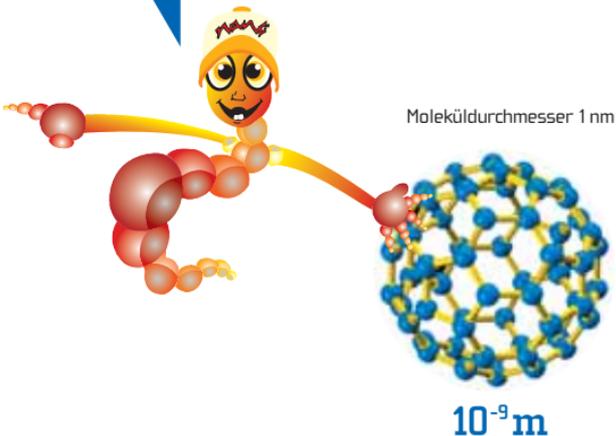
10^7 m



10^{-1} m

$$000001 \text{ m} = 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Das C_{60} -Molekül,
der kleinste molekulare «Fussball»,
steht im Grössenverhältnis zur Orange
wie diese zur Erde.



130 - 180 nm

Haar $50 \mu\text{m}$ ($50'000 \text{ nm}$)

Strukturen auf
einem Halbleiter-Chip
im Vergleich zu einem
menschlichen Haar



Komm mit – wir reisen mit dem Schall durch die Dimensionen bis zum Nanometer.





Die Ohrmuschel leitet die Schallwellen in den Gehörgang ans Trommelfell.

GRÖSSE:

0,01000000000 m

1 cm
ZENTIMETER

10^{-2} m

Optisches Mikroskop: Wichtigstes Instrument in der Biologie und Medizin

Mit dem optischen Mikroskop können Objekte und Strukturen bis zu einigen Mikrometern untersucht werden.





Die winzigen Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) übertragen die Schallwellen vom Trommelfell ans Innenohr.

GRÖSSE:

0,00100000000 m

1 mm

MILLIMETER

10^{-3} m

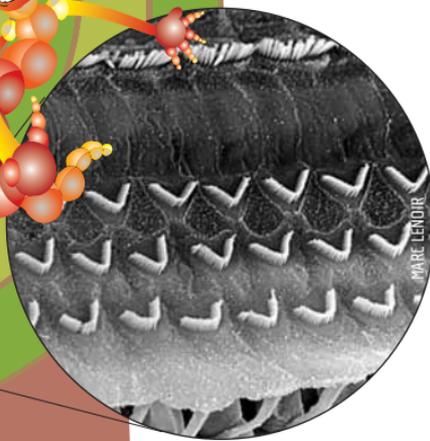
Rasterelektronenmikroskop: Arbeitspferd für Forschung und Technik



Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) lassen sich Objekte und Strukturen in der Grösse von Millimetern bis zu einigen Nanometern abbilden. Es liefert plastische Bilder, die durch ihre grosse Tiefenschärfe bestechen.



Das Innenohr, die Hörschnecke oder Cochlea, ist mit feinsten Haarzellen bedeckt. Diese wandeln die Schallwellen in elektrische Signale um und leiten sie an den Hörnerv. Bei den meisten tauben Menschen sind die Haarzellen schlecht ausgebildet oder zerstört.



Hörschnecke

GRÖSSE:

0,00000100000 m

1 μ m
MIKROMETER

10^{-6} m



Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS

am Paul Scherrer Institut

SLS ist gleichzeitig

- ein gigantischer Röntgenapparat
- ein riesiges Mikroskop



Proteine bilden die Grundlagen der Zellstrukturen und wirken als Biokatalysatoren (Enzyme) in Stoffwechselreaktionen. Sie bauen Moleküle auf und ab, kopieren DNAs und stellen wiederum andere Proteine her. Proteine sind aus Tausenden von Atomen aufgebaut. Um ihre Struktur zu bestimmen, braucht es riesige Röntgengeräte wie jenes vom PSI.

Strukturmodell eines Proteins, welches an der Biosynthese von Cholesterin beteiligt ist (Messung am PSI von Ulrich Baumann et al., Universität Bern).



GRÖSSE:

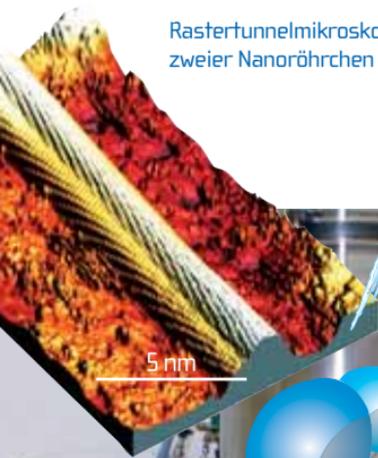
0,00000001000 m

10 nm
NANOMETER

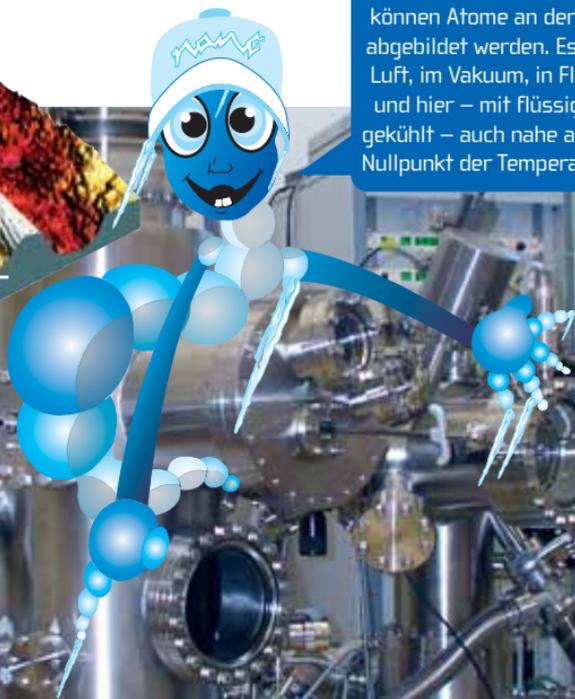
10^{-8} m

Rastertunnelmikroskop: Zoom aufs Atom

Rastertunnelmikroskopbild
zweier Nanoröhrchen



Mit dem Rastertunnelmikroskop können Atome an der Oberfläche abgebildet werden. Es arbeitet an Luft, im Vakuum, in Flüssigkeiten und hier – mit flüssigem Helium gekühlt – auch nahe am absoluten Nullpunkt der Temperatur (-273°C).



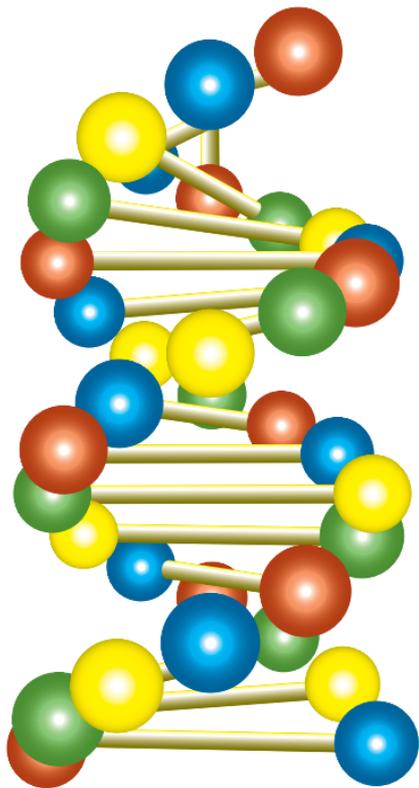
Code des Lebens: DNA

Die **DNA** oder auch **DNS** ist der chemische Stoff, der die **menschliche Erbinformation** enthält und sich in jeder Zelle des menschlichen Körpers befindet. Lange Zeit wurde vermutet, dass die genetische Information in Proteinen gespeichert wird.

Doch heute ist erforscht, dass dazu die DNA, aufgebaut aus **vier molekularen Grundbausteinen**, den Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin, ausreicht. Diese sind in definierter Weise **komplementär miteinander verbunden** und bilden einen **Doppelstrang**.

Die beiden Stränge verlaufen **um sich selbst gewunden**, wie eine verdrehte Strickleiter. Die Drehrichtung, **Chiralität** oder Händigkeit ist für **alle DNAs dieselbe**.

Fehler in der DNA können zu **Missbildungen** führen. So bilden sich z.B. die Haarzellen im Innenohr nicht richtig aus, was **Taubheit** zur Folge hat.



GRÖSSE:

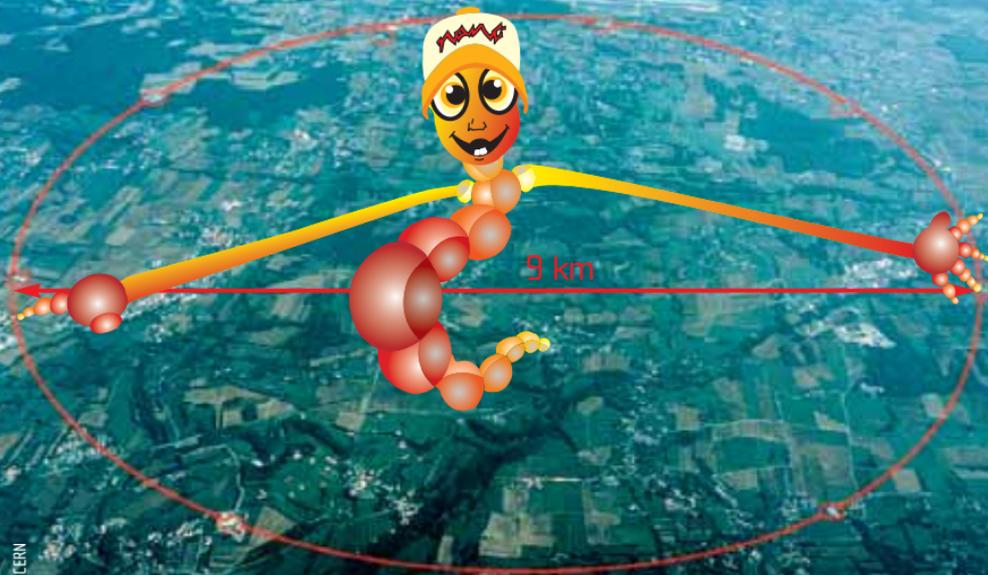
0,00000000100 m

1 nm
NANOMETER

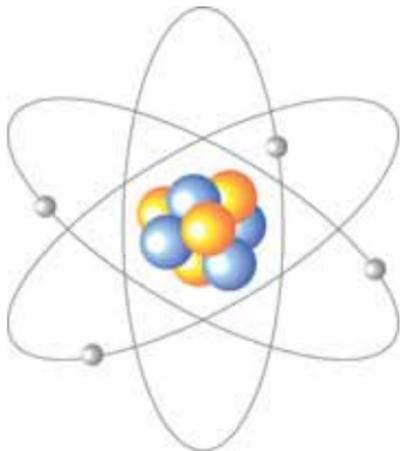
10^{-9} m

CERN

Europäische Organisation für Kernforschung und
weltgrösstes Zentrum für Elementarteilchenphysik



Die Bausteine der Moleküle sind Atome. Diese wiederum bestehen aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Der Durchmesser eines Protons ist 100'000mal kleiner als jener des Atoms. Um etwas über den Aufbau dieser Teilchen zu erfahren, braucht es riesige Forschungsanlagen..., so wie sie am CERN vorhanden sind!



Detektor am CERN

In km-langen, runden Beschleunigern werden Protonen oder Elektronen zunächst fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht und dann zur Kollision geführt. Hallenfüllende Detektoren dienen dann dazu, die Kollisionsfragmente oder so genannte Elementarteilchen (Quarks) nachzuweisen.

GRÖSSE:

0,00000000010 m

$< 10^{-10}$ m

Was ist Nanotechnologie?

Alle **technischen Revolutionen** der letzten 200 Jahre, von der Dampfmaschine über die Elektrizität bis zur Mikroelektronik, sind eng geknüpft an die Fähigkeiten, **Dinge immer kleiner** und präziser herzustellen.

Heute können z.B. mechanische Getriebe mit **Zahnradern** von **Zehntelmillimetern** Durchmesser mit einer Präzision von einigen **10 Nanometern** produziert werden. In der **Mikroelektronik** lassen sich bereits **Strukturen von 90nm** mit Toleranzen von nur noch wenigen Nanometern erreichen.

Die **Nanotechnologie** geht nun noch einen Schritt weiter: **Strukturen** sollen erzeugt werden, die selbst nur noch **einige Nanometer** gross sind und deren **Toleranzen** im Bereich von wenigen **Atomen** liegen.

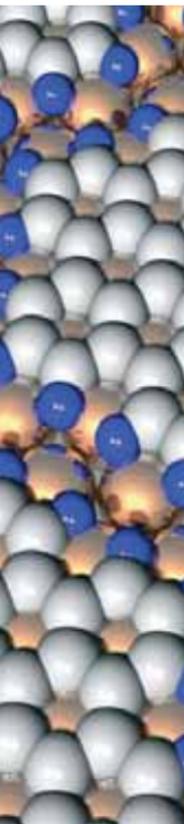
Der Vorstoss in den Nanokosmos ist aber weit mehr als nur eine fortgesetzte Miniaturisierung gängiger Mikrotechniken. Mit dem Vordringen öffnet sich der Nanotechnologie auch der Zugang zu den Molekülen, den **Bausteinen der Chemie und Biologie**, und damit zu den Bauplänen der Natur. Damit bietet sich der Nanotechnologie die Möglichkeit, durch Nutzung **atomar und molekular definiert** ablaufender Prozesse die Baupläne der **Natur zu imitieren**, um damit neuartige Werkstoffe oder ganze Systeme zu erzeugen oder – wie es die Natur macht – **wachsen zu lassen**.

Die Nanotechnologie stösst damit an die Grenzen des physikalisch Machbaren vor!



Carbon Nanotube
STM Tip

So lassen sich Atome abbilden oder: Wie Blinde «sehen» können



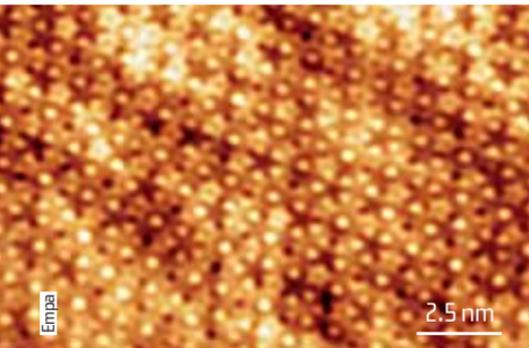
Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt 0.2 mm. Das bedeutet, dass der Mensch Punkte im Abstand von geringer als 0.2 mm nicht mehr getrennt voneinander erkennt. Für kleinere Objekte als 0.2 mm benötigt er also optische Hilfen wie Lupen oder Mikroskope.

Die Auflösung optischer Geräte hängt im Wesentlichen von der Krümmung der Linsen und der Wellenlänge der verwendeten Strahlung ab. Je kürzer die Wellenlänge, desto besser die Auflösung. Diese liegt für optische Mikroskope bei 0.2 Mikrometer ($0.2 \mu\text{m} = 2 \cdot 10^{-7} \text{m}$) und für Rasterelektronenmikroskope bei 2 Nanometer ($2 \text{nm} = 2 \cdot 10^{-9} \text{m}$). Atome mit einem Durchmesser von ca. 0.1 nm befinden sich somit für optische Mikroskope im Verborgenen, im Dunkeln.

Was macht der Mensch, wenn er in der Dunkelheit nichts mehr sieht und sich orientieren muss? Er ertastet die Umgebung! Blinde Menschen «sehen», indem sie tasten und dadurch fühlen und sich somit ein Bild zusammensetzen können.

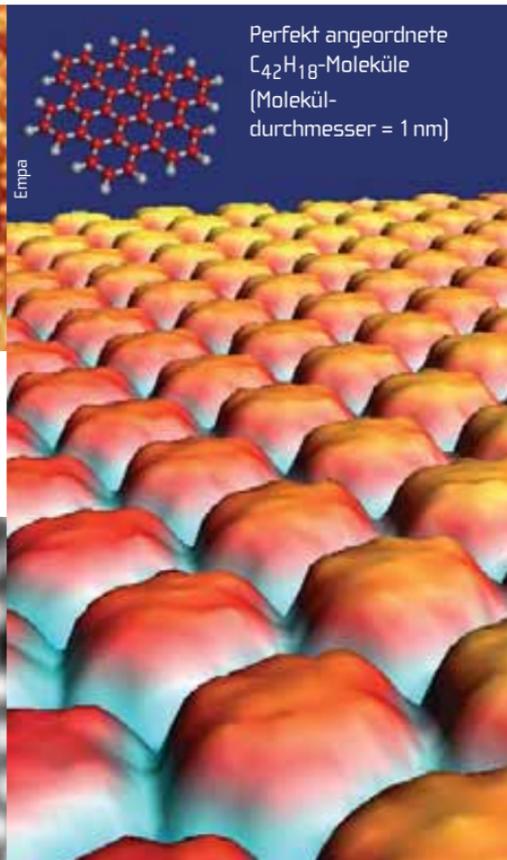
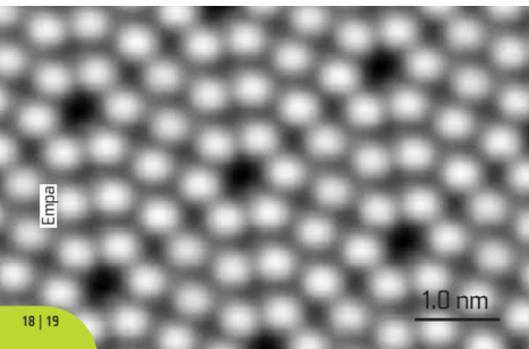
Dieses Prinzip wird genutzt, um Oberflächen mit atomarer Auflösung abzubilden. Verwendet wird eine ultrafeine Spitze, an deren Ende sich ein einzelnes Atom befindet.

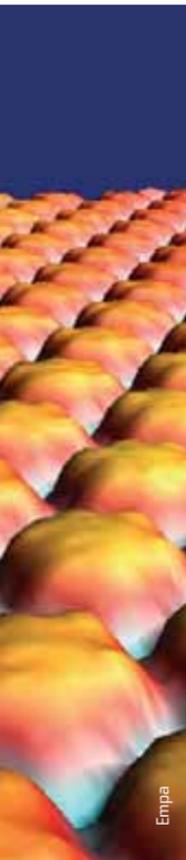
Aufnahmen mit dem Rastertunnelmikroskop



Quasikristalloberfläche (5-zählige Punktsymmetrie) mit atomarer Auflösung

Siliziumoberfläche mit atomarer Auflösung



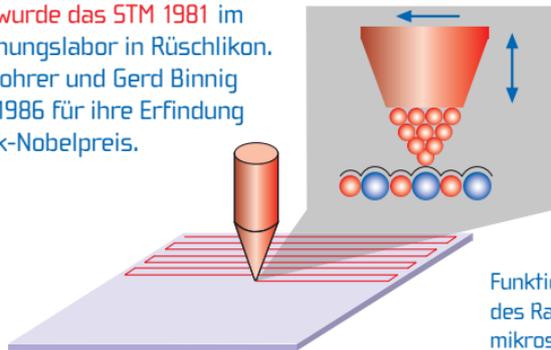


Empa

Ähnlich wie der Blinde den Blindenstock einsetzt, tastet auch diese Spitze die Oberfläche ab und «fühlt» dabei die Atome. Die Spitze wird soweit an die Oberfläche angenähert, bis der so genannte Tunnelstrom einsetzt, was bei einem Abstand von ca. 1 Atomdurchmesser passiert. Bei konstant geregelttem Strom schiebt nun ein System von Piezomotoren die Spitze Linie für Linie über die Oberfläche, die dadurch abgerastert wird. Die Höhenbewegung, welche die Spitze dabei durchführt, wird registriert und von einem Computer zu einem Bild zusammengesetzt.

Das auf diese Weise arbeitende Gerät ist ein Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunneling Microscope STM). Es hat eine Auflösung senkrecht zur Oberfläche von einem Pikometer ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$) oder 1/100 Atomdurchmesser und bildet Oberflächen mit atomarer Auflösung ab.

Erfunden wurde das STM 1981 im IBM-Forschungslabor in Rüschlikon. Heinrich Rohrer und Gerd Binnig erhielten 1986 für ihre Erfindung den Physik-Nobelpreis.



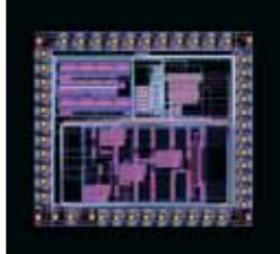
Funktionsprinzip
des Rastertunnel-
mikroskops

Moore's Law

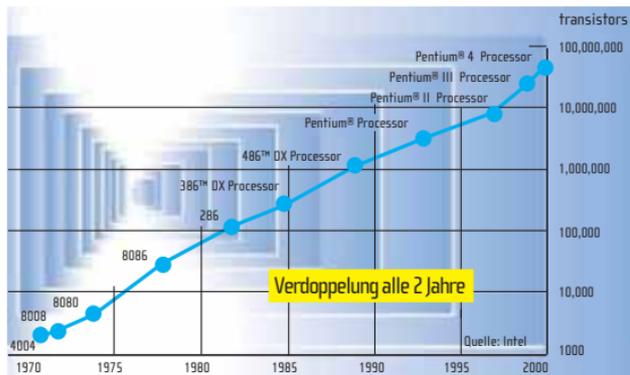
Gordon Moore, Mitbegründer des Chipherstellers Intel, stellte bereits 1965 fest, dass sich die **Integrationsdichte von Transistoren auf den Siliziumchips alle 2 Jahre nahezu verdoppelt**.

Noch heute wird «Moore's Law» angewandt, um die Leistungssteigerung von Computern und die damit verbundenen technologischen Anforderungen vorherzusagen.

Schreitet die Entwicklung in der Halbleitertechnologie weiter so rasant fort, wird um das Jahr **2025** der physikalisch **kleinstmögliche Transistor** realisiert, gebaut aus **einigen hundert Atomen** oder Molekülen.



Moore's Law - Entwicklung von Mikroprozessoren



Zunahme der Integrationsdichte von Transistoren auf Mikroprozessoren über die letzten 30 Jahre

Immer kleiner, immer vielseitiger



.... das mobile, tragbare Telefon – heute meist Handy genannt: von **Reisekoffergrösse** zur **Wrigley's-Packung**.



Ab ca. 1920: Riesen-Mobiltelefone mit einem zig-Kilogramm als Funksysteme in Polizeiwagen. **Ab 1958:** Einbau von Mobiltelefonen in Privatwagen reicher Personen, erstes Mobilfunknetz, telefonieren mit Handvermittlung. Die Geräte waren zwar «mobil», aber keinesfalls tragbar. **1978:**

Einsatz des Nationalen Autotelefon-Netzes, NATEL. Die Geräte passen in einen Handkoffer. **Ab 1993:** Einsatz des digitalen GSM-Netzes. Mit diesem Datum beginnt der enorme Erfolg der Handys, die erst mit der Miniaturisierung zum Massenprodukt wurden. **1994:** «der Knochen» (Handy von Motorola), der nur 520g wiegt, kommt auf den Markt. **Ende 1994:** das leichteste und kleinste Handy von Ericsson: 193g und 15 x 5 x 3 cm.

Heute liegt das Gewicht von Handys unter 60g und sie sind so klein, dass sie kaum mit den Fingern zu bedienen sind. Ermöglicht hat dies neben den miniaturisierten Bauteilen die **Erhöhung der Transistorendichte** auf den elektronischen Chips.



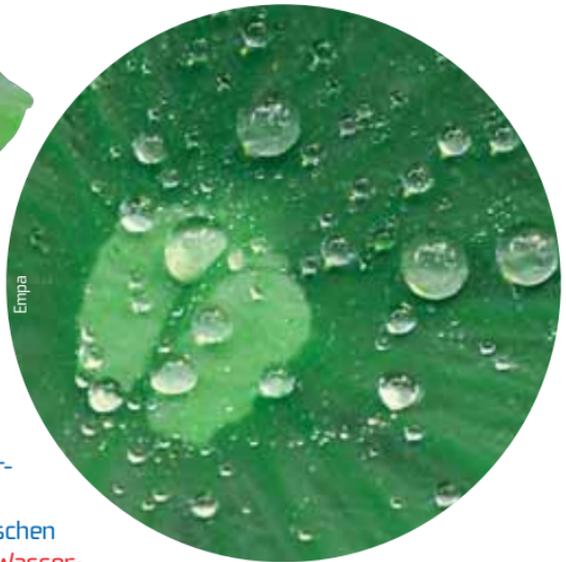
Die Handys am Handgelenk

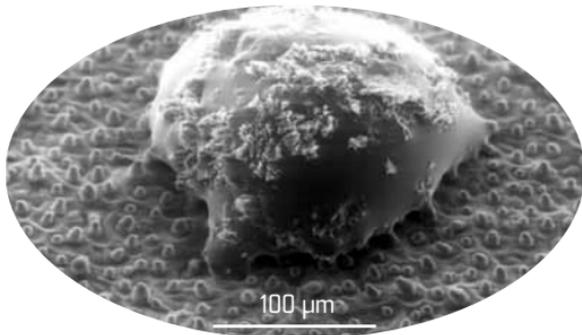
Die Miniaturisierung erlaubt schon jetzt den Bau von kleinen, leichten **Alleskönnern**. Und der Blick in die **Zukunft** zeigt: Alle Funktionen des Handys werden in der **Armbanduhr** von morgen integriert sein. Somit könnten wir dann unsere **Kommunikationsmittel** stets **griffbereit** haben.

Lotus – Symbol für Reinheit



Die stark herabgesetzte Benetzbarkeit der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*) ist ein gut erforschtes Phänomen: Die wachsartige Oberflächenstruktur der Blätter (Mikrostruktur mit einer übergeordneten Nanostruktur) führt zur Minimierung der Kontaktflächen zwischen Wassertropfen und Oberfläche. Die Wassertropfen kugeln sich daher nahezu rückstandsfrei herunter, wobei sie beim Abrollen mögliche Schmutzpartikel von der Oberfläche aufnehmen. Die Pflanze reinigt sich somit selber. Dies lässt die Tatsache verstehen, dass Lotus im asiatischen Kulturraum als Symbol der Reinheit angesehen wird.





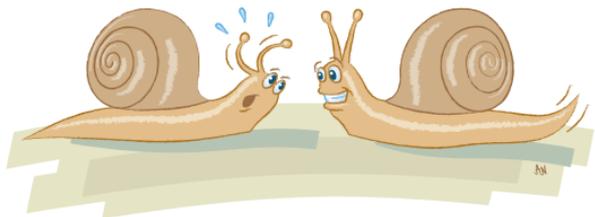
Aufnahme mit dem
Rasterelektronenmikroskop:
Mit Staubpartikeln beladenes
Wassertröpfchen auf
einer Lotusblattoberfläche.

Das Prinzip der Selbstreinigung wurde in Forscherkreisen erkannt: Es beruht auf einer **strukturellen und einer chemischen Komponente**. In **käuflichen Nanotechnologieprodukten** steht es dem Menschen zur Verfügung, z.B. als **Lotus-Spray**.

Dieser enthält zum einen die **Strukturkomponente** wie nanoskalige Pigmente oder **nanostrukturierte Partikel**, die mit nasschemischen oder plasmatechnischen Verfahren hergestellt werden. Die **chemische Komponente** stellt die Matrix aus **wasserabweisenden Chemikalien** dar, in die die Partikel gebunden werden. Die Formulierung lässt sich als **mikro- und nanostrukturierte Kompositschichten** auftragen, die problemlos zu entfernen, aber auch leicht wieder herzustellen sind.

Besprayschte Oberflächen von Fenstern, Häuserfassaden, Textilien, Kacheln, usw. müssen im Idealfall **nicht mehr vom Menschen gereinigt** werden, da anhaftender Schmutz vom **Regenwasser einfach abgespült** wird.

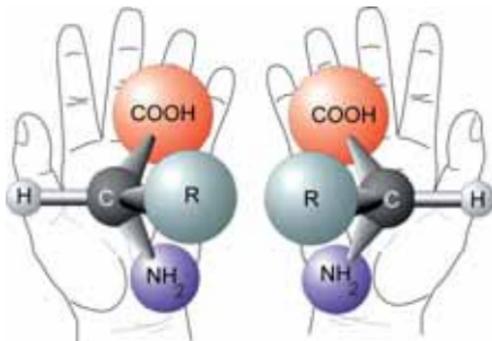
Spiegelwelt



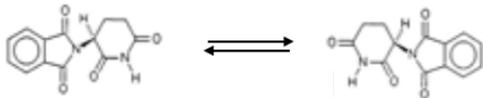
Zwei Dinge können genau gleich aussehen und doch verschieden sein, nämlich wenn sie trotz Drehen und Wenden nicht zur Deckung gebracht werden können. Diese Eigenschaft, **Chiralität** (griech. Händigkeit) genannt, kommt in der Natur sehr häufig vor, zum Beispiel bei **Schneckenhäusern**, Mineralien und auch bei Molekülen. Chiral sind insbesondere viele **Moleküle des Lebens** – wie DNA, Proteine und deren Bausteine, die **Aminosäuren** und Zuckermoleküle –, sie kommen fast ausschliesslich in ihrer **Linksform** vor. Warum dem so ist, ist eines der grossen Naturrätsel. Diese Asymmetrie der Natur **hat zur Folge**, dass die beiden Spiegelbildformen (**Enantiomere**) eines Moleküls trotz identischer chemischer Eigenschaften **biologisch ganz unterschiedlich** wirken, manchmal sogar in dramatischer Weise.



Links- und Rechtsquarz



Aminosäuren kommen fast ausschliesslich nur in ihrer Linksform auf der Erde vor.



Das Schlafmittel Thalidomid wird vom menschlichen Körper in ein Gemisch aus linken und rechten Molekülen umgewandelt, von dem eine Form zu Missbildungen am Ungeborenen führt.

Anfang der 60er-Jahre gab es das Schlafmittel Contergan mit dem Wirkstoff **Thalidomid**. Während das **rechtsdrehende** Enantiomer den ersehnten **Schlaf** brachte, führte das **linksdrehende** bei Schwangeren zu schwersten **Missbildungen** des Babys. Der Unterschied in der biologischen Wirkung zweier Enantiomere muss allerdings nicht immer so dramatisch sein. So riecht beispielsweise der Duftstoff **Carvon** – abhängig von seiner Händigkeit – **entweder nach Minze oder nach Kümmel**. Da Enantiomere sich chemisch und physikalisch [bis auf die optische Aktivität] nicht unterscheiden, ist ihre **Trennung sehr schwierig** und aufwendig. Sie sind jedoch für die **Pharmakologie** von grösstem Interesse, weshalb weltweit intensiv an neuen und effizienteren **Trennungsvorgängen** geforscht wird.

Dem Falter abgeschaut...

Die Flügel vieler Schmetterlingsarten enthalten Farbpigmente. Nicht so jedoch die Flügel des blauen *Morpho cypris*. Sie sind mit unzähligen durchsichtigen Chitinschüppchen bedeckt. Es ist die Oberflächenstruktur dieser Schüppchen, die die schönen Farbeffekte erschafft, denn sie lässt das Umgebungslicht reflektieren, beugen und streuen.

Im REM ist die Schüppchenstruktur sehr schön zu erkennen: Sie liegt in der Grössenordnung der Wellenlänge des Umgebungslichts, also im Nanometerbereich.



Blauer *Morpho cypris* mit unterlegter REM-Aufnahme der Submikrometer-Reliefstruktur der Flügel.
(www.cardag.ch)

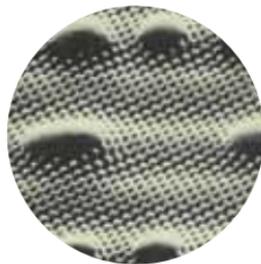


... in die Industrie übertragen

Dass der Mensch vom Entstehen der Farbeffekte des *Morpho cypris* gelernt hat, ist am Beispiel der **australischen Zehn-Dollar-Note** festzustellen. Diese werden **fälschungssicher** gemacht, indem die Oberfläche mit einem **speziellen Lack** versiegelt wird, dem **Nanopartikel** beigemischt sind. Diese Art Lacke sollen in Zukunft auch für fälschungssichere Kreditkarten eingesetzt werden.

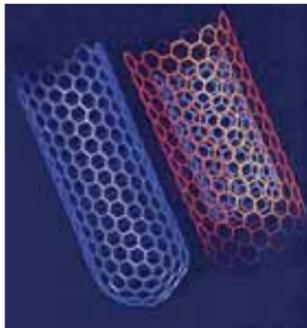
Mit Lacken wird auch im Bereich der **Nano-Optik** gearbeitet, um optische Gläser zu fertigen, die kleinste Strukturelemente aufweisen. Die Struktur erlaubt es, den Weg des **einfallenden Lichtstrahls im Glas präzise zu kontrollieren**. So können **Displays mit unterschiedlichen Projektionen** je nach Betrachtungswinkel entstehen.

Dem Mottenaugenachempfundene Antireflexstruktur einer optischen CD zur Verbesserung des Lesevorgangs.
Periodizität = 250 Nanometer.
(Plasmon Data System)



Kohlenstoff-Nanoröhrchen für millimeterdünne Flachbildschirme mit hoher Brillanz

Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind **röhrenförmige Makromoleküle** aus reinem Kohlenstoff. Es gibt sie als **einwandige** oder **mehrwandige** Version. Entdeckt wurden sie 1991 bei NEC in Japan. Sie sind echte Tausendsassa: Zehnmal leichter als Stahl, aber hundertmal stabiler als dieser, sind sie zehntausendmal dünner als ein Menschenhaar und zudem – je nach Aufbau – **hervorragende elektrische Leiter oder Halbleiter**.

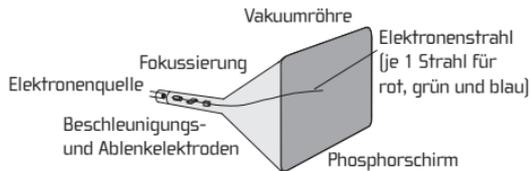


Skizze eines einwandigen und eines mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchens

Im Gegensatz zu konventionellen Fernsehrohren wird in Feldemissionsflachbildschirmen **jeder Bildpunkt** auf dem Phosphorschirm mit einem **eigenen Elektronenstrahl** versorgt. Diese Anordnung erlaubt es, einen nur wenige Millimeter «dicken» Bildschirm zu realisieren.

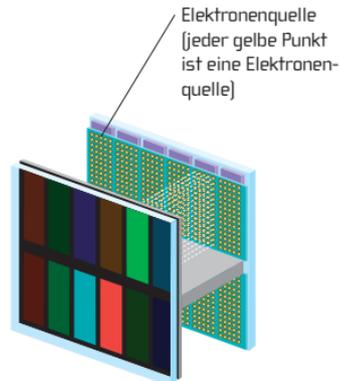
Die hierfür notwendigen miniaturisierten Elektronenquellen arbeiten auf dem **Prinzip der Feldemission**. Dabei werden die freien Elektronen nicht wie in den bekannten Fernsehrohren durch Erhitzen ($T > 1500^{\circ}\text{C}$) eines Drahtes, sondern durch **Anlegen eines sehr hohen elektrischen Feldes** erzeugt.

Dieser mit der klassischen Physik nicht erklärbar **quantenmechanische Prozess** wird **Tunneleffekt** genannt.



Die **Stärke** des für diesen Prozess notwendigen **elektrischen Feldes** liegt bei **25'000'000 V/cm**. Diese enormen Feldstärken lassen sich nur an **Spitzen** erzielen, an welchen das angelegte elektrische Feld um den Faktor des Verhältnisses **Länge/Radius** der Spitze verstärkt wird. Mit einigen **Mikrometern ($10^{-6}m$) Länge** und nur wenigen **Nanometern ($10^{-9}m$) Durchmesser** sind die **Kohlenstoff-Nanoröhrchen** das Material der Wahl für feldverstärkende Strukturen in **Feldemissionsflachbildschirmen**. **Weltkonzerne** wie Samsung, NEC und SONY arbeiten intensiv an der Entwicklung dieser Bildschirme, die **Empa** an ihren Grundlagen.

Herkömmlicher Röhrenbildschirm



Die **grossen Vorteile** des **Feldemissionsflachbildschirms** gegenüber anderen Flachbildschirmen liegen in der **geringen Leistungsaufnahme** und der hohen **Brillanz**. Dies macht **Feldemissionsflachbildschirme** **besonders interessant** für Anwendungen bei **Aussenlicht**, z.B. als **Monitore in Fahr- und Flugzeugen**, als **Leuchtreklamen** oder für **Handys**.

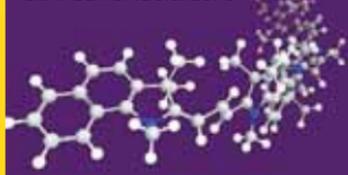
Schematischer Aufbau eines Feldemissionsflachbildschirms

Solarzellen aus Plastik

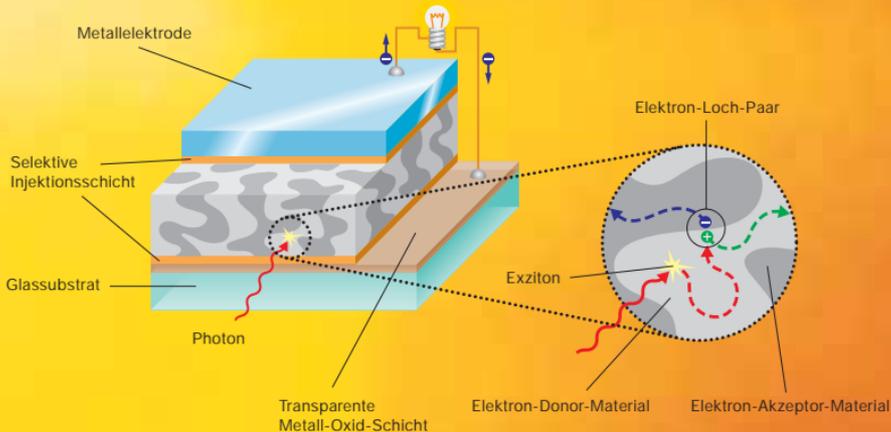
Die Basis fast aller kommerziellen Solarzellen ist heute das Silizium. Sie zeichnen sich aus durch hohe Wirkungsgrade bis zu 20 % – das ist das Verhältnis zwischen gewonnener elektrischer Energie und einfallender Sonnenenergie – und einer langen Lebensdauer. Dies führte, auch dank grosser Subventionsmassnahmen, in den letzten zehn Jahren zu einem sehr starken Anstieg der photovoltaischen Nutzung der Sonnenenergie. Für den endgültigen Durchbruch müssen aber kostengünstigere Konzepte und neue Materialien erforscht und entwickelt werden. Interessant sind dabei organische Halbleiter, insbesondere Polymere. Im Vergleich zu Silizium und anderen Halbleitern können sie einfach hergestellt und verarbeitet werden, was bedeutend billigere Produktionskosten ermöglicht.

Anders als beim Silizium bilden absorbierte Lichtteilchen (Photonen) in einem organischen Halbleiter zunächst einen angeregten Zustand, ein Elektron-Loch-Paar, Exziton genannt. Um nun elektrischen Strom erzeugen zu können, muss dieses Exziton in eine positive (Loch) und eine negative Ladung (Elektron) getrennt werden. Dieser Prozess spielt sich an der Grenzfläche zweier unterschiedlicher organischer Halbleiter (Donor, Akzeptor) ab. Da die Strecke, die ein Exziton bis zu seinem Zerfall zurücklegen kann, sich gerade mal auf zehn Nanometer beläuft, trägt nur dieser kleine Bereich zur Strombildung bei.

Synthetisches Polymer
für organische
Dünnschichtsolarzellen



Eine Solarzelle aus zwei zehn Nanometer dünnen Donor- und Akzeptorschichten würde nur sehr wenig einfallendes Sonnenlicht einfangen. Doch es gibt eine Lösung für **höhere Absorption**: der **nanostrukturierte Aufbau**. Hierfür muss ein organischer Festkörper entwickelt werden, dessen Donor- und Akzeptorphasen bei zehn Nanometer liegen. Auf diese Weise können relativ dicke Schichten eingesetzt und **alle Photonen in Ladungsträger umgewandelt** werden. Die besten organischen Solarzellen erreichen heute einen Wirkungsgrad von 5%. Mit einem **optimal nanostrukturierten Design** liegt die Steigerung der **Effizienz auf 10%** in Reichweite.



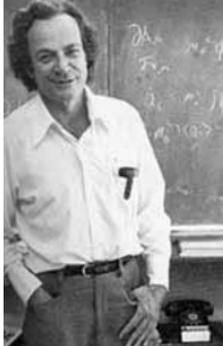
Schematischer Aufbau einer organischen Solarzelle

Mit Atomen spielen

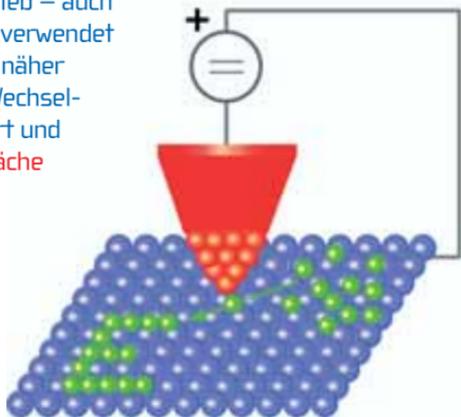
«The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of manoeuvring things atom by atom!»

Diese Aussage machte der Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman am 29. Dezember 1959 in seinem legendären Vortrag «There's Plenty of Room at the Bottom» anlässlich der Jahrestagung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft und löste damit bei dem anwesenden, erlesenen Fachpublikum nur Kopfschütteln aus. Was Feynman vor nahezu 50 Jahren visionär erkannte und was für die anderen so jenseits von allem Vorstellbaren lag, ist heute in den Forschungslaboratorien Routine.

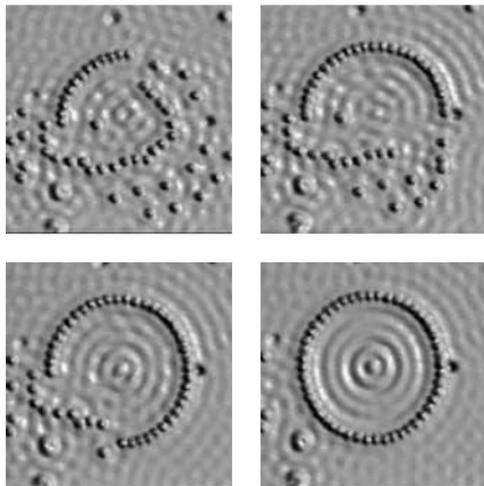
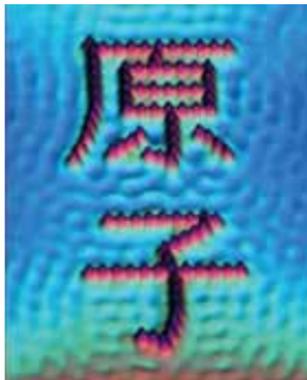
Möglich gemacht hat dies das Rastertunnelmikroskop. Das zur Abbildung von Atomen an Oberflächen entwickelte Gerät kann – bei geeignetem Betrieb – auch zur kontrollierten Positionierung von Atomen verwendet werden. Hierfür wird die Spitze einfach etwas näher an die Oberfläche gerückt, wodurch sich die Wechselwirkung zwischen Spitze und Atom vergrößert und somit das Atom an der Spitze über die Oberfläche bewegt werden kann.



Richard Feynman
(1918 – 1988),
Physik-Nobel-
preisträger 1965



Zur **Virtuosität** gebracht hat diese **Technik** Donald Eigler vom IBM Forschungslabor in Almaden, Kalifornien (USA). Er baute z.B. aus **Eisenatomen**, die zuvor auf eine Kupferoberfläche aufgedampft wurden, **einen Ring zusammen**. Die in den Bildern sichtbaren **Wellenmuster** entstehen durch **Streuung der freien Elektronen** des Kupfers an den Eisenatomen. Im geschlossenen Ring der Eisenatome bilden die Elektronenwellen **konzentrische Kreise**, **ähnlich** wie bei einer **schwingenden Kreismembrane**. In der Quantenphysik können sich Teilchen wie Elektronen manchmal auch wie **Wellen** verhalten.



Vier Rastertunnelmikroskop-Aufnahmen zeigen, wie auf Kupfer aufgedampfte Eisenatome zu einem Ring zusammengebaut werden

www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html

Rastertunnelmikroskop-Aufnahme des Kanji-Zeichens für «Atom», zusammengesetzt aus einzelnen Eisenatomen

www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html

Vordenker und Visionen

Wie stellen sich wohl die **Vordenker** unsere Zukunft mit Nanotechnologie vor?

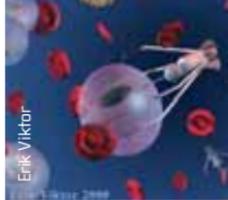
Geht es nach ihnen, werden nach der «**Nano-Revolution**» unsere heutigen Technologien so **veraltet** wirken wie **Buschtrommeln neben Handys**.

Sie haben mikroskopisch kleine «**U-Boote**» vor Augen, die durch den menschlichen Blutstrom kreisen und Medikamente transportieren oder Operationen durchführen.

Sie denken auch an die Möglichkeit, dass Hunderttausende von **Mikro- und Nanorobotern** durch gezieltes Zusammensetzen von Molekülen und Atomen makroskopische Objekte mit atomarer Präzision herstellen.

Sie sehen aber auch, wie sich Moleküle spontan, ohne äusseren Einfluss, zu **molekularen Getriebenen, Ventilen oder elektronischen Schaltungen** zusammenschliessen. Das Schlagwort hierfür heisst «**Molekulare Selbstorganisation**».

Formuliert wurden diese Visionen erstmals 1981 von **Eric Drexler**. Er hat, 22 Jahre nach dem denkwürdigen Vortrag **Richard Feynmans**, dessen nanowissenschaftliche Vision aufgenommen und zu einer Vision Nanotechnologie weiterentwickelt.



Enik Viktor



Mike Gallagher

Heute gelten Eric Drexler, gemeinsam mit Heinrich Rohrer und Gerd Binnig, die im selben Jahr das Rastertunnelmikroskop erfanden, als die Väter der Nanotechnologie.

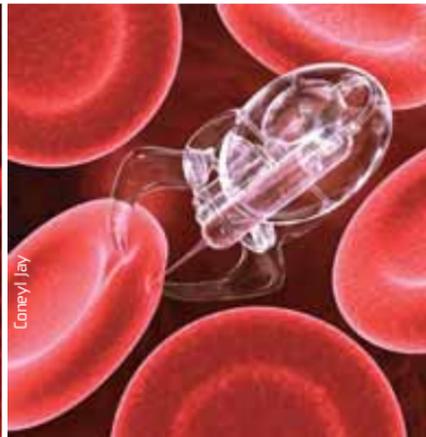
Trotz dieser zum Teil phantastisch anmutenden Visionen ist Nanotechnologie keine Fiktion. Bereits gibt es auf Nanotechnologie basierende Massenprodukte zu kaufen.

So produziert die Firma Ilford in Marly (FR) z.B. höchstempfindliche Photofilme und für Tintenstrahldrucker Photoqualitätspapier, deren herausragende Eigenschaften auf der Nanotechnologie beruhen.

Und Degussa (D) erzeugt täglich tonnenweise Nanopulver, das in Antihafthacken oder in Antihaftschichten (Lotus-Effekt) verwendet wird.



Robert A. Freitas Jr.



Coney Jay

Nanotechnologie – ist das gefährlich?

Technologische **Neuerungen**, wie sie auch die Nanotechnologie verspricht, bieten unserer Gesellschaft stets **Chancen**, bergen aber oft auch neue, unbekannte **Risiken**. Deshalb müssen eventuelle Gefahren **für Mensch und Umwelt** möglichst frühzeitig erkannt werden. Genau dies ist eine der Aufgaben der **Technologiefolgenabschätzung**. Diese Begleitforschung hat also möglichst genau die Risiken abzuschätzen, die von einer **neuen Technologie** ausgehen könnten.



Bei der Nanotechnologie wäre dies beispielsweise die unbeabsichtigte **Freisetzung von Nanopartikeln**; daher muss geklärt werden, wann und wo dies passieren könnte. Ausserdem müssen Forscher und Forscherinnen bestimmen, **welche Gefahren** von den Partikeln ausgehen, also **wie «giftig»** sie für Mensch und Umwelt sind. Die Begleitforschung der noch jungen Nanotechnologie befindet sich derzeit allerdings noch in den Kinderschuhen; **viele dieser Fragen** sind daher noch **offen**.

Erst wenn **verlässliche Antworten** vorliegen, kann beurteilt werden, **wie (un)sicher** die neue Technologie wirklich ist.

Dabei geht es letztlich um ein **Abwägen des Nutzens**, den die neue Technologie bietet, **gegenüber den Risiken**, die wir als Gesellschaft bereit sind, dafür in Kauf zu nehmen. Denn eine **«Null-Risiko-Technologie»** gibt es in der heutigen Gesellschaft nicht (mehr).

Nanotechnologie und ihr Potenzial

Selten zuvor hat eine Entwicklung in Wissenschaft und Technik in so kurzer Zeit ein so **überwältigendes Interesse** gefunden wie die Nanotechnologie.

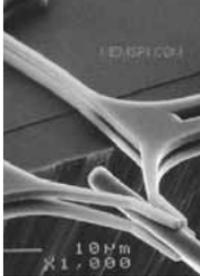
In weiten Teilen der Forschung und Wirtschaft gilt die Nanotechnologie, gemeinsam mit der Biotechnologie, als die **Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts**. Der Umsatz von nanotechnologischen Produkten betrug nach Schätzungen 2004 bereits **100 Milliarden US-Dollar**. Für diesen **Arbeitsmarkt ausgebildete NaturwissenschaftlerInnen** werden **Hochkonjunktur** haben.

Prognosen können übertroffen werden

Inwieweit die Nanotechnologie künftig unseren Alltag durchdringen und **verändern** wird, ist dennoch sehr schwierig abzuschätzen. Denn ein Blick zurück zeigt, dass **langfristige Technologieprognosen** nie sehr **zuverlässig** waren.

So glaubten Experten kurz nach der **Erfindung des Transistors 1948**, dass es eines Tages nicht unmöglich sei, Computer mit einer Rechenleistung von **5000 Operationen pro Sekunde**, einem Gewicht von **nur 1500 kg** und einer Leistungsaufnahme von **nur 10 Kilowatt** zu bauen. Heute wissen wir, dass **PCs 100'000mal** leistungsfähiger sind!

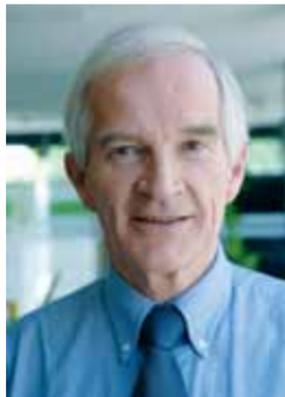
Ähnlich falsch wurde Ende des 19. Jahrhunderts auch die **Bedeutung der Elektrizität** eingeschätzt. Nur sehr wenige Leute wie **Jules Verne** erkannten ihren Wert. Dies lässt sich sehr schön in seinen Romanen «Paris im 20. Jahrhundert» von 1863 und «Die Propellerinsel» von 1895 nachlesen.



Nanoskalige Phänomene verstehen und nutzen

Neue Technologien bieten Chancen und bergen Risiken in sich. Das verhält sich bei der Nanotechnologie nicht anders als bei allen anderen Technologien. Die geeignete Strategie darauf lautet immer: «Verstehen lernen, Wissen generieren, verantwortungsbewusst handeln!»

Selbstverständlich ist auch die Empa als Materialforschungsinstitution des ETH-Bereichs in der Nanotechnologie tätig und erzeugt neues Wissen, neue Materialien, neue Anwendungen und transferiert dieses Know-how zu potenziellen Anwendern.



Unser Engagement betrifft

- keramische Nanopartikel, das Upscalen ihrer Herstellungsprozesse und ihren Einsatz in elektrisch leitender Keramik, in Oxid-Brennstoffzellen oder für Zahnreparaturen,
- das Funktionalisieren dünner Beschichtungen, auch auf Fasern, durch die Integration spezifischer Nanopartikel,
- kontrolliertes Wachstum von Kohlenstoff-Nanoröhrchen und deren Anwendung als Elektronenquelle, z.B. für Röntgenröhren oder Flachbildschirme,
- sich selbst organisierende Nanostrukturen, die als Schaltelemente oder für futuristische Anwendungen eingesetzt werden können, beispielsweise in der IT und Sensorik,
- moderne Einrichtungen zur Synthese und Analytik auf der Nanometerskala, beispielsweise mit der FIB (Focused Ion Beam)-Technik,
- Modellierung des Lebenszyklus von Nanomaterialien – also Herstellung, Nutzung, Freisetzung, Entsorgung/Wiederverwertung – unter Risiko- und Sicherheitsaspekten,
- Untersuchungen zum Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt und
- Zellexperimente zur Untersuchung der Verträglichkeit von nanoskaligen Partikeln.

Wenn Sie mehr wissen wollen, besuchen Sie uns unter www.empa.ch/nano

Louis Schlapbach

CEO Empa, Professor für Experimentalphysik

NanoWelten – die DVD über Nanotechnologie



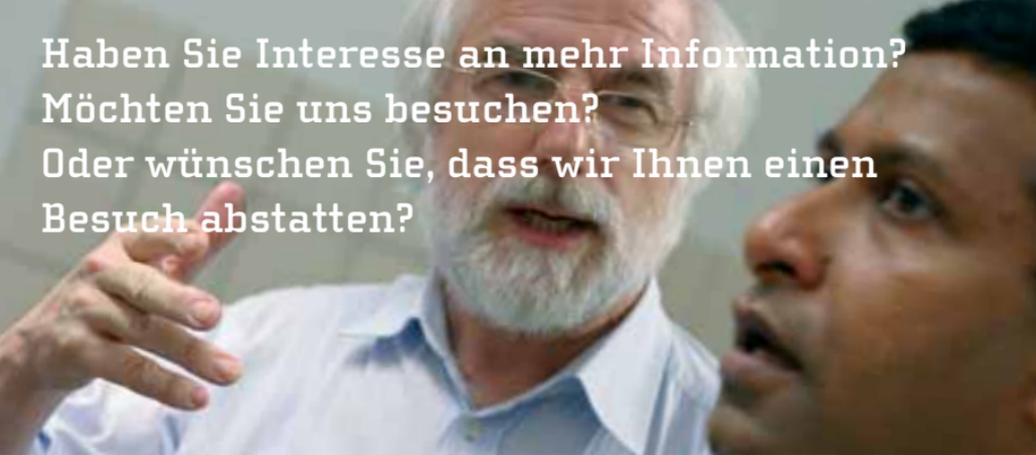
In Würdigung Albert Einsteins und seiner revolutionären Arbeiten aus dem Jahre 1905 hatte die UNESCO das Jahr 2005 zum «World Year of Physics» erklärt. Zu diesem Anlass produzierte die Empa gemeinsam mit der Universität Basel eine DVD über Nanotechnologie.

Der Film «NanoWelten» lädt ein zu einer immer wieder überraschenden Entdeckung der Nanowissenschaften. Er handelt von den Grundbausteinen unserer Welt, von Atomen und Molekülen. Er bietet Einblick in die Erforschung erstaunlicher Phänomene und in die Suche nach anwendbaren Erkenntnissen.

Innovative Produkte auf der Grundlage von Nanotechnologie sind bereits auf dem Markt. Wir stehen aber erst am Anfang einer durch die Nanoskala inspirierten Zukunft.

«NanoWelten» richtet sich vornehmlich an Jugendliche, die Anregungen für ihre berufliche Zukunft suchen.

Die DVD kann zum Selbstkostenpreis unter dem Link empa-akademie@empa.ch bezogen werden.



Haben Sie Interesse an mehr Information?
Möchten Sie uns besuchen?
Oder wünschen Sie, dass wir Ihnen einen
Besuch abstatten?

Anlaufstelle für Schulen
sowie für Informationen und
Bezug der Broschüre:

empa-akademie@empa.ch
Telefon: +41 44 823 45 62
www.empa-akademie.ch

Anlaufstelle für Unternehmen im
Bereich Materialforschung
und Technologieentwicklung:


portal@empa.ch
Telefon: +41 44 823 44 44
www.empa.ch/portal

Linkliste

TOP Nano 21: Das vom ETH-Rat geschaffene und finanzierte Technologie-Orientierte Programm «Der Nanometer in Wissenschaft und Technologie des 21. Jahrhunderts» war von 2000 bis 2003 das wichtigste Schweizer Forschungsprogramm in Nanotechnologie. Die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) war für die operative Umsetzung zuständig.

http://www.temas.ch/nano/nano_homepage.nsf

NCCR Nano Science: Die Universität Basel beherbergt das vom Schweizerischen Nationalfonds geförderte Nationale Kompetenzzentrum für Nanowissenschaften. Unter der Leitung von Prof. Hans Joachim Güntherodt wird von Basel aus ein umfassendes Netzwerk gesteuert, in dem WissenschaftlerInnen verschiedenster Disziplinen eng zusammenarbeiten.

<http://www.nccr-nano.org/nccr>

<http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>

<http://www.nano.gov/>

http://wwwex.physik.uni-ulm.de/Vortraege/StudiumGenerale/Nanot_0.htm

<http://www.scienceparkbasel.ch/>

http://www.nano-world.org/articles/drs3-input/de/index_html?more=ok

<http://www.foresight.org/NanoRev/index.html>

<http://people.cryst.bbk.ac.uk/~ubcge18/nano.html>

<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>

<http://www.zyvex.com/nano/>

<http://www.nanoscience.at>

<http://www.nanoscience.de>

<http://www.ipt.arc.nasa.gov>

<http://www.royal.soc.ac.uk/landing.asp?id=1210>

<ftp://ftp.empa.ch/pub/empa/outgoing/fasel/nanotech.mov>

ftp://ftp.empa.ch/pub/empa/outgoing/fasel/386_486_6804_pentium.mov

<ftp://ftp.empa.ch/pub/empa/outgoing/fasel/cpu.mov>

Noch mehr Ähnliches gibts unter

<http://www.mrsec.wisc.edu/edetc/index.html>

Impressum

Herausgeber

Empa
Materials Science & Technology

CH-8600 Dübendorf
CH-9014 St. Gallen
CH-3602 Thun
www.empa.ch

Redaktion

Redaktionsteam

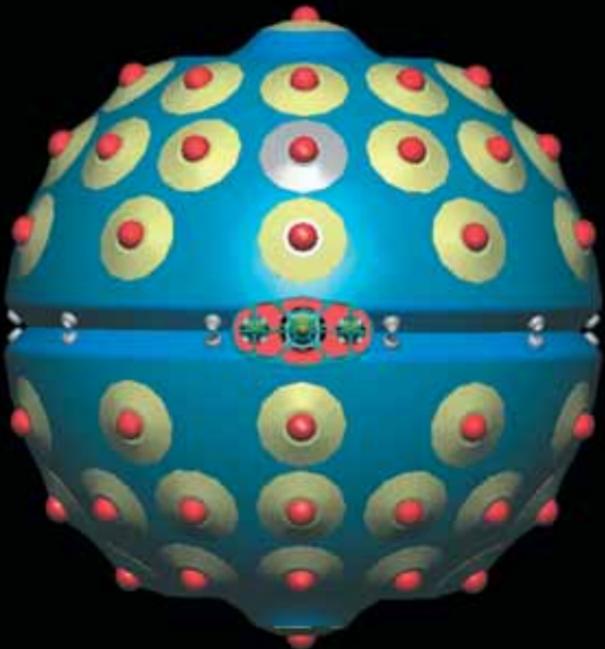
Konzept/Gestaltung

Grafikgruppe Empa

Druck

Adcom Trade AG, Zug

© Empa 2006



www.empa.ch/nano



Materials Science & Technology