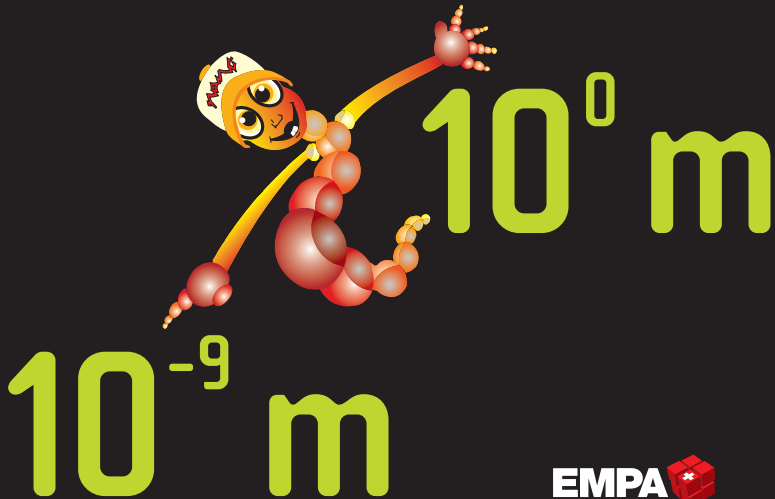


REISE IN DIE WELT DES NANOMETERS



«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



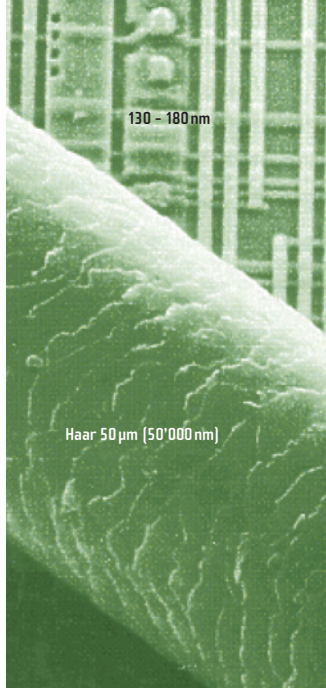
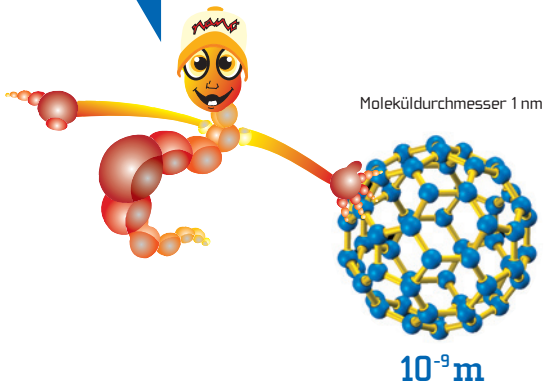
10^7 m



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.




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



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



A human ear is shown in profile. A blue speech bubble points to the ear canal. A cartoon character, a yellow worm-like creature with a white cap and large eyes, is positioned in the ear canal. The character has a long, yellow, segmented body that ends in a red, multi-fingered hand. The character is holding a red, multi-fingered hand that is holding a red, multi-fingered hand. The character is holding a red, multi-fingered hand that is holding a red, multi-fingered hand.

Die Ohrmuschel leitet die
Schallwellen in den
Gehörgang ans Trommelfell.

GRÖSSE:

0,01000000000 m

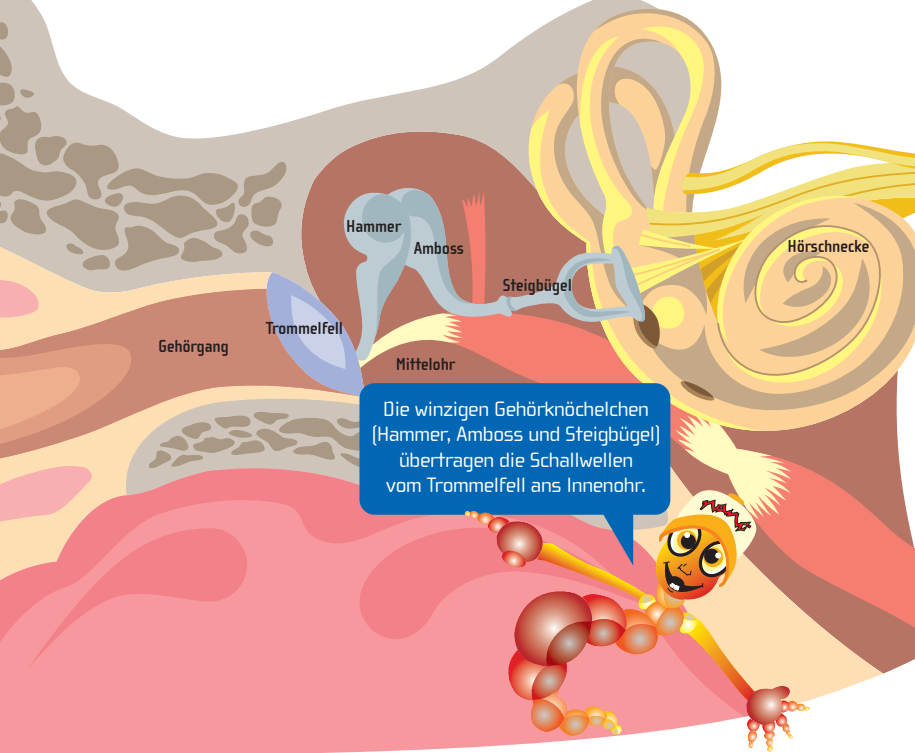
1 cm
ZENTIMETER

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

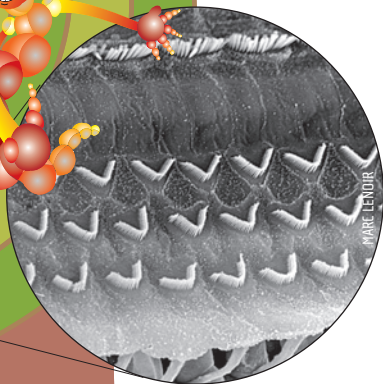
Rasterelektronenmikroskop: Arbeitspferd für Forschung und Technik



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

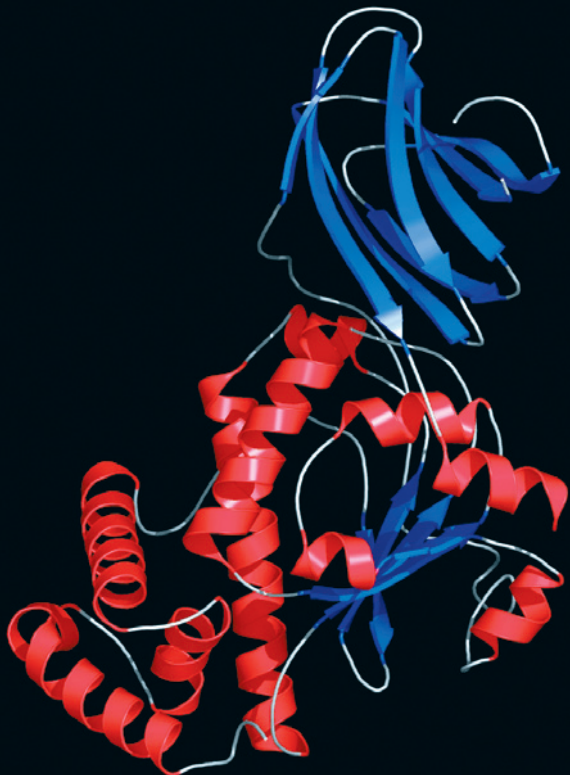
am Paul Scherrer Institut PSI

- 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 am PSI.

Strukturmodell eines Proteins, welches an der Biosynthese von Cholesterin beteiligt ist (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).

5 nm

Code des Lebens: DNA

Die DNA oder auch DNS ist der chemische Stoff, der die **Erbinformationen** 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 beispielsweise die Haarzellen im Innenohr nicht richtig aus, was **Taubheit** zur Folge hat.



GRÖSSE:

0,00000000100 m

1 nm
NANOMETER

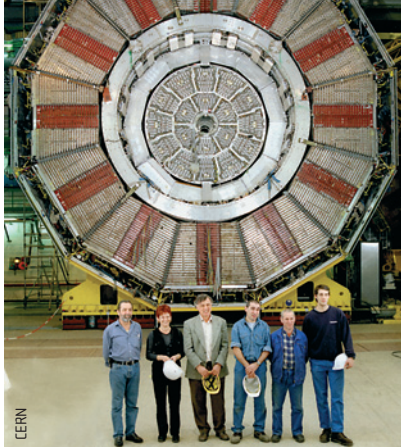
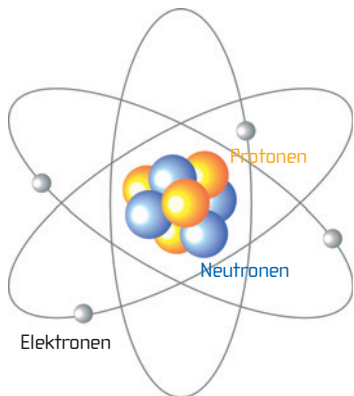
10^{-9} m

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 kilometerlangen, 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?

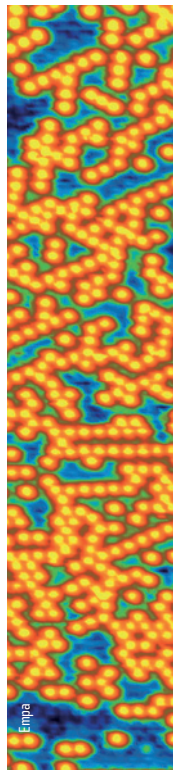
Alle **technischen Revolutionen** der letzten 200 Jahre, von der Dampfmaschine über die Elektrizität bis zur Mikroelektronik, sind eng geknüpft an die Fähigkeiten, Dinge **immer kleiner und präziser** herzustellen.

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

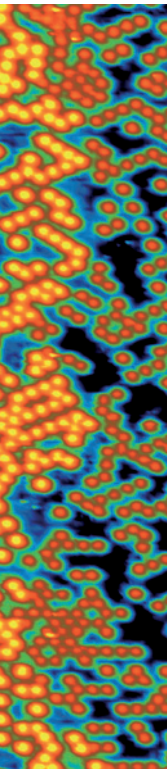
Die **Nanotechnologie** geht nun noch einen Schritt weiter: Strukturen sollen erzeugt werden, die selbst nur noch **einige Nanometer** gross sind und deren Toleranzen im Bereich von wenigen **Atomen** liegen.

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 vor zu den Grenzen des physikalisch Machbaren.



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



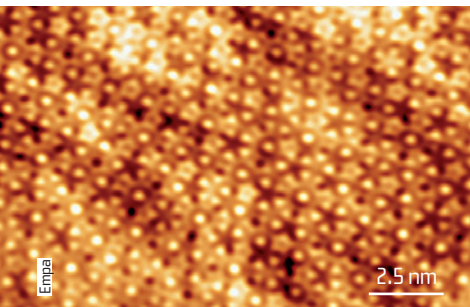
Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt **0.2 Millimeter**. Das bedeutet, dass der Mensch Punkte im Abstand von geringer als 0.2 Millimeter nicht mehr getrennt voneinander erkennt. Für kleinere Objekte als 0.2 Millimeter benötigt er also optische Hilfen wie Lupen oder Mikroskope.

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 Nanometer befinden sich somit für optische Mikroskope 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 so ein Bild zusammensetzen können.

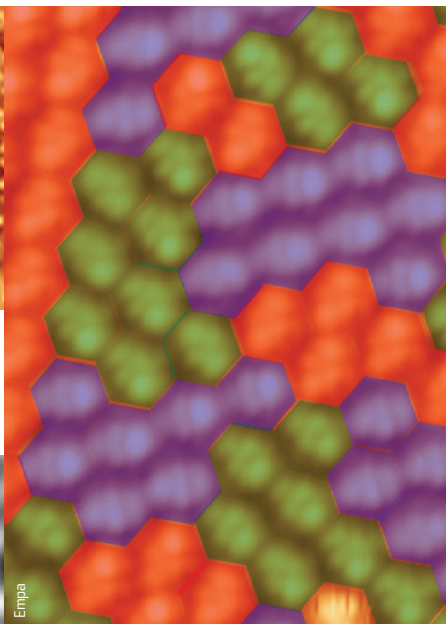
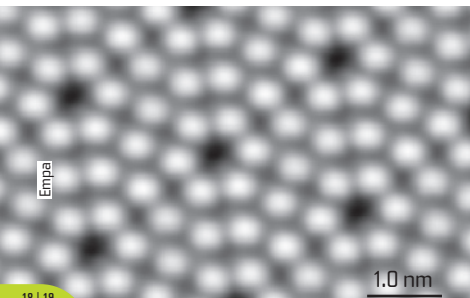
Dieses Prinzip wird genutzt, um Oberflächen mit atomarer Auflösung abzubilden. Und zwar mit Hilfe einer **ultrafeinen Spitze**, an deren Ende sich ein einzelnes Atom befindet.

Aufnahmen mit dem Rastertunnelmikroskop

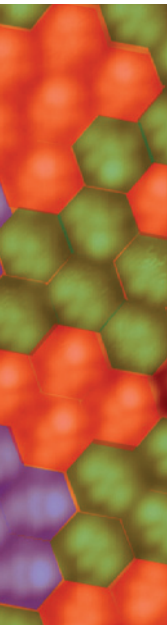


Quasikristalloberfläche

Siliziumoberfläche



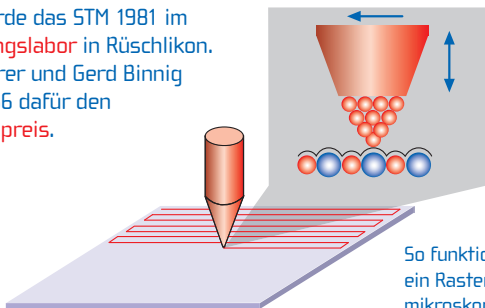
Metallofullerene



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 etwa einem Atombdurchmesser passiert. Bei konstant geregelterm 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 Atombdurchmesser und bildet Oberflächen mit **atomarer Auflösung** ab.

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



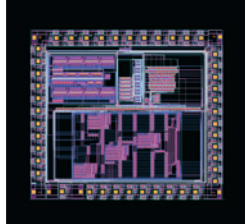
So funktioniert ein Rastertunnelmikroskop

Moore's Law

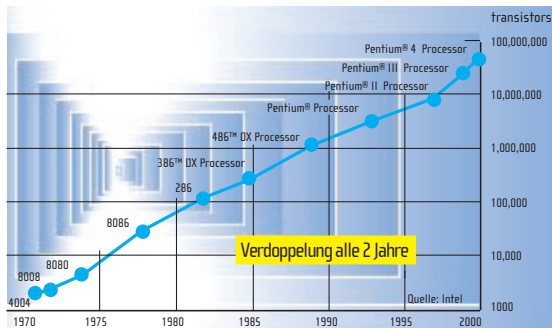
Gordon Moore, Mitbegründer des Chipherstellers Intel, stellte bereits 1965 fest, dass sich die **Integrationsdichte** von Transistoren auf den Siliziumchips alle 2 Jahre nahezu verdoppelt.

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.

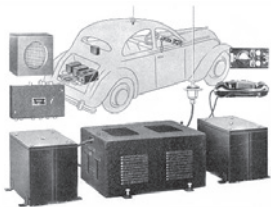


Moore's Law - Entwicklung von Mikroprozessoren



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

Immer kleiner, immer vielseitiger



.... das mobile, tragbare Telefon – heute meist Handy genannt: vom Reisekoffer zur Wrigley's-Packung.

Ab ca. 1920: Riesen-Mobiltelefone mit einem zig-Kilogramm als Funksysteme in Polizeiwagen. Ab 1958: Einbau von Mobiltelefonen in Privatwagen, **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 Siegeszug der Handys, die erst mit der Miniaturisierung zum Massenprodukt wurden. 1994: «Der Knochen» (Handy von Motorola), der nur 520 Gramm wiegt, kommt auf den Markt. Ende 1994: das leichteste und kleinste Handy von Ericsson: 193 Gramm und 15 x 5 x 3 Zentimeter.



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

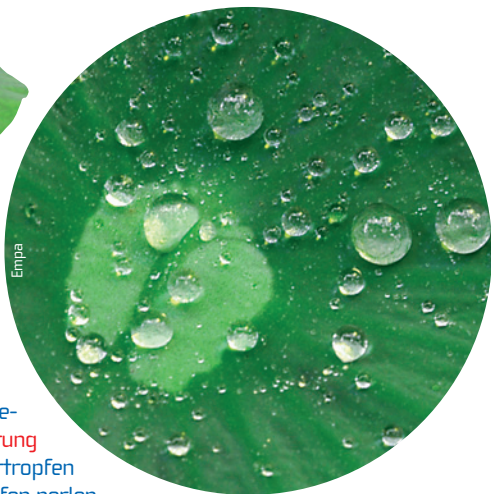


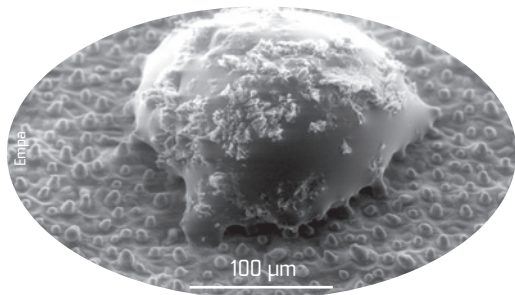
Die Miniaturisierung erlaubt schon jetzt den Bau von kleinen, leichten Alleskönnern. Und der Blick in die **Zukunft** zeigt: Alle Funktionen des Handys werden in der Armbanduhr von morgen integriert sein. Somit könnten wir dann unsere **Kommunikationsmittel am Handgelenk tragen**.

Lotus – Symbol für Reinheit



Die stark herabgesetzte Benetzbarkeit der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*) ist ein gut erforschtes Phänomen: Die wachsartige Oberflächen der Blätter [Mikrostruktur mit einer übergeordneten Nanostruktur] führt zur Minimierung der Kontaktflächen zwischen Wassertropfen und Blattoberfläche. Die Wassertropfen perlen daher nahezu rückstandsfrei herunter, wobei sie beim Abrollen mögliche Schmutzpartikel aufnehmen. Die Pflanze reinigt sich somit selber. Kein Wunder also, dass der Lotus im asiatischen Kulturraum als Symbol der Reinheit angesehen wird.





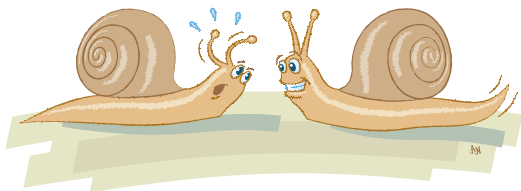
Aufnahme mit dem
Rasterelektronenmikroskop:
Mit Staubpartikeln beladenes
Wassertröpfchen auf
einer Lotusblattoberfläche

Das Prinzip der **Selbstreinigung** wurde in Forscherkreisen erkannt: Es beruht auf einer strukturellen und einer chemischen Komponente. In kommerziellen Nanotechnologieprodukten steht es dem Menschen zur Verfügung, etwa 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.

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

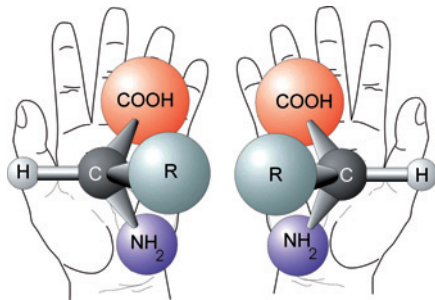
Spiegelwelt: Rechts- und Linkshändigkeit



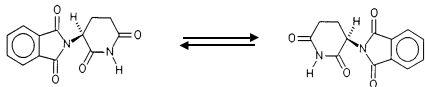
Zwei Dinge können genau gleich aussehen und doch verschieden sein, nämlich wenn sie trotz Drehen und Wenden nicht zur Deckung gebracht werden können. Diese Eigenschaft, **Chiralität** (griech. Händigkeit) genannt, kommt in der Natur sehr häufig vor, zum Beispiel bei **Schneckenhäusern**, Mineralien und auch bei Molekülen. Chiral sind insbesondere viele **Moleküle des Lebens** – wie DNA, Proteine und deren Bausteine, die Aminosäuren und Zuckermoleküle. Aminosäuren 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 1960er-Jahre war das Schlafmittel **Contergan** mit dem Wirkstoff Thalidomid im Handel. Während das rechtshändige 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 reflektiert, beugt und streut das Umgebungslicht.

Im **Rasterelektronenmikroskop (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)

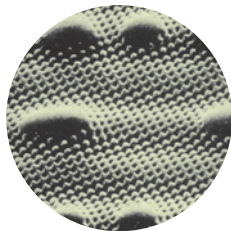


... in die Industrie übertragen

Dass der Mensch vom Entstehen der Farbeffekte des *Morpha 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.

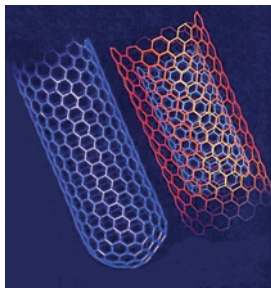
Mit Lacken wird auch im Bereich der **Nano-Optik** gearbeitet, um optische Gläser zu fertigen, die kleinste Strukturelemente aufweisen. Die Struktur erlaubt es, den Weg des einfallenden Lichtstrahls im Glas präzise zu kontrollieren. So können Displays mit unterschiedlichen Projektionen je nach Betrachtungswinkel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

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



Kohlenstoff-Nanoröhrchen für brillante millimeterdünne Flachbildschirme

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.

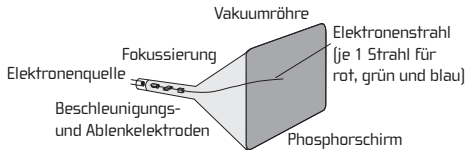


Skizze eines einwandigen und eines mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchens

Im Gegensatz zu konventionellen Fernschröhren 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 Fernschröhren durch Erhitzen ($T > 1500^{\circ}\text{C}$) eines Drahtes, sondern durch Anlegen eines sehr hohen elektrischen Feldes erzeugt.

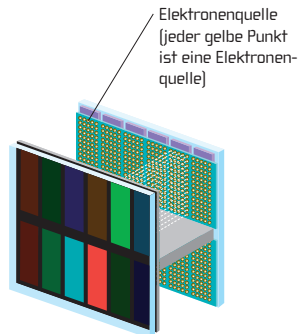
Diesen mit der klassischen Physik nicht erklärbaren quantenmechanischen Prozess nennt man **Tunneleffekt**.



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.

Die grossen Vorteile des Feldemissionsflachbildschirms gegenüber anderen Flachbildschirmen liegen in der **<und der hohen Brillanz**. Dies macht Feldemissions-flachbildschirme besonders interessant für Anwendungen bei Aussenlicht, etwa als **Monitore in Fahr- und Flugzeugen, als Leuchtreklamen oder für Handys**.

Herkömmlicher Röhrenbildschirm



Schematischer Aufbau eines Feldemissionsflachbildschirms

Solarzellen aus Plastik

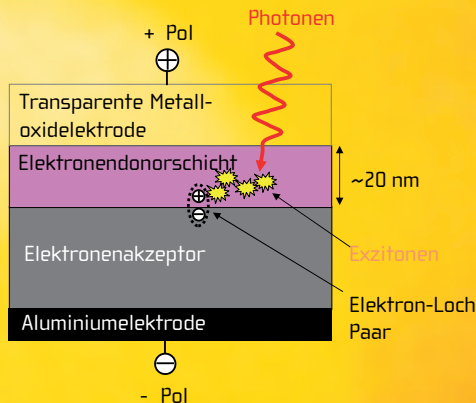
Die Basis fast aller kommerziellen Solarzellen ist heute **Silizium**. Sie zeichnen sich aus durch **hohe Wirkungsgrade** bis zu 20 Prozent – das ist das Verhältnis zwischen gewonnener elektrischer Energie und einfallender Sonnenenergie – und einer langen Lebensdauer. Dies führte, auch dank grosser Subventionsmassnahmen, in den letzten zehn Jahren zu einem 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 und günstig hergestellt und verarbeitet werden.

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.

Es gibt jedoch **Farbstoffmoleküle** aus der photographischen Industrie, die so stark absorbieren, dass eine Schicht von nur zwanzig Nanometer ausreicht, um das gesamte einfallende Licht im Absorptionsbereich des Farbstoffs einzufangen. In der Solarzelle wird dieses Licht an der Aluminiumelektrode gespiegelt und geht somit zweimal durch die absorbierende Schicht. Dadurch kommen Solarzellen, die mit

planaren Donor- und Akzeptorschichten hergestellt werden, auf einen Wirkungsgrad von etwa vier Prozent. Werden mehrere Farbstoffe kombiniert, die Licht unterschiedlicher Wellenlänge – Farbe – absorbieren, lässt sich der Wirkungsgrad verdoppeln.



Organische Dünnschichtsolarzelle, die aus transparenter Elektrode, Donorschicht aus Farbstoffmolekülen, Akzeptor und Aluminiumelektrode besteht. Das Licht wird in der hauchdünnen Farbschicht absorbiert; dort erzeugt es angeregte Zustände (Exzitonen), die durch den organischen Halbleiter wandern, bis sie an der Grenzschicht in positive und negative Ladungen gespalten werden.



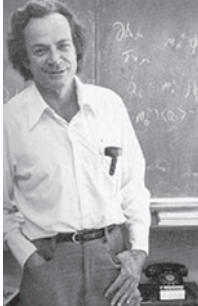
Solarzelle mit photographischen Farbstoffmolekülen als aktives organisches Halbleitermaterial. (Labormodell)

Mit Atomen spielen

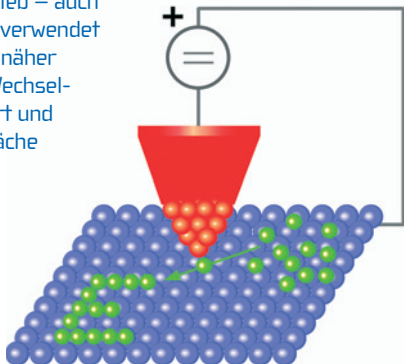
«The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of manoeuvring things atom by atom!»

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.

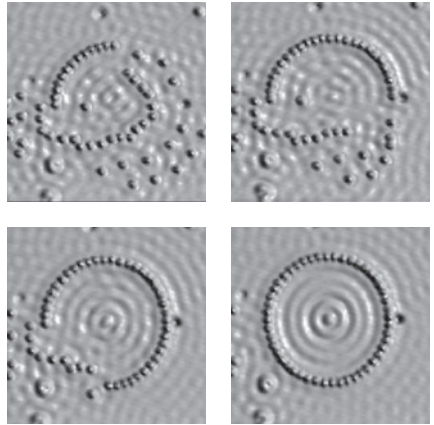
Möglich gemacht hat dies das **Rastertunnelmikroskop**. Das zur Abbildung von Atomen an Oberflächen entwickelte Gerät kann – bei geeignetem Betrieb – auch zur kontrollierten **Positionierung von Atomen** verwendet werden. Hierfür wird die Spitze einfach etwas näher an die Oberfläche gerückt, wodurch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



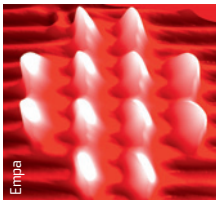
Richard Feynman
(1918 – 1988),
Physik-Nobelpreisträger 1965



Zur Virtuosität gebracht hat diese Technik **Donald Eigler** vom **IBM Forschungslabor in Almaden, Kalifornien (USA)**. Er baute 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 eines auf einer Kupfer-Oberfläche mit 12 Propen-Molekülen aufgebrachtem Schweizer-Kreuzes

Vordenker und Visionen

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

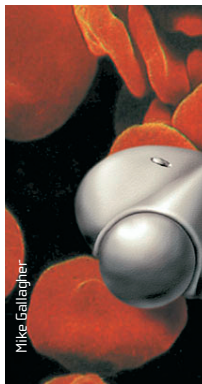
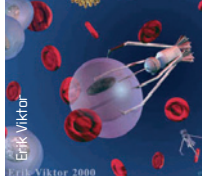
Geht es nach ihnen, werden nach der «Nano-Revolution» unsere heutigen Technologien so veraltet wirken wie Buschtrommeln neben Handys.

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 Getrieben, 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.

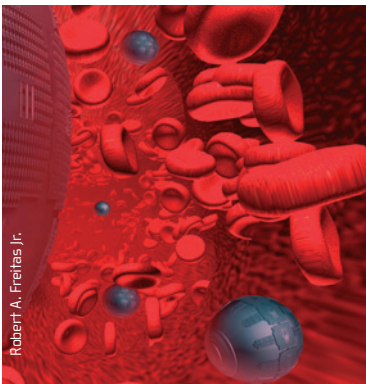


Heute gelten Eric Drexler, gemeinsam mit Heinrich Rohrer und Gerd Binnig, die im selben Jahr das Rastertunnelmikroskop erfanden, als die Väter der Nanotechnologie.

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 (CH) etwa höchstempfindliche Photofilme und für Tintenstrahldrucker Photoqualitätspapier, deren herausragende Eigenschaften auf der Nanotechnologie beruhen.

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



Robert A. Freitas Jr.



Conroy Jay

«Nano» – ist das gefährlich?



Nanomaterialien haben im Vergleich zum entsprechenden Ausgangsmaterial neue und einzigartige Eigenschaften; daher lassen sich aus ihnen viel versprechende technologische Neuerungen entwickeln. Doch einige Nanomaterialien sind unter Umständen auch eine Gefahr für Mensch und Umwelt. Dies gilt besonders für **Nanopartikel**, die in ungebundener Form vorliegen und somit ungehindert vom Organismus aufgenommen werden können. Als kritisch gelten vor allem «biopersistente» – auf gut deutsch: langlebige – und katalytisch aktive Materialien, da sich diese im Körper anhäufen und negative Auswirkungen auf den Organismus hervorrufen können.

Für eine sichere und nachhaltige Entwicklung der Nanotechnologie ist es deshalb wichtig, **die Gefahren frühzeitig zu erkennen**. Denn nur wenn neben dem Nutzen auch die Risiken bekannt sind, ist die Gesellschaft in der Lage, sich für oder gegen eine neue Technologie zu entscheiden.

In der noch jungen Nanotechnologie spielt die **Risikoforschung** bereits von Anfang an eine bedeutende Rolle. Dabei werden einerseits die unbeabsichtigte Freisetzung von Nanopartikeln untersucht, andererseits deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt.

Menschen nehmen Nanoteilchen hauptsächlich durch **Einatmen, Hautkontakt oder Verschlucken** auf. Es hat sich gezeigt, dass die intakte Haut und der Magen-Darm-Trakt gute biologische Barrieren gegen das Eindringen von Nanopartikel darstellen, während eingeatmete Nanopartikeln in der Lunge zu **Stressreaktionen und Entzündungen** führen können. Die Forschung konzentriert sich daher zurzeit stark auf die akuten und chronischen Effekte verschiedener Nanomaterialien auf dieses wichtige Organsystem.

Klar ist schon jetzt, dass keine allgemeine Aussage zur «Giftigkeit» – zur **Toxizität** – von Nanopartikeln gemacht werden kann. Zum einen, weil Form, Grösse und das Material selbst zu unterschiedlich sind. Das bedeutet: Jedes Nanomaterial muss separat untersucht werden. Zum anderen aber auch, da die vorliegenden Studien oft nicht vergleichbar, die verwendeten Testmethoden häufig nicht evaluiert und die Nanomaterialien mangelhaft charakterisiert sind. Hier soll die Entwicklung von **standardisierten Testmethoden** und Vorgehensweisen im Umgang mit Nanopartikeln helfen, ein besseres Verständnis über die Wirkung von Nanopartikeln im Körper und in der Umwelt zu erhalten.

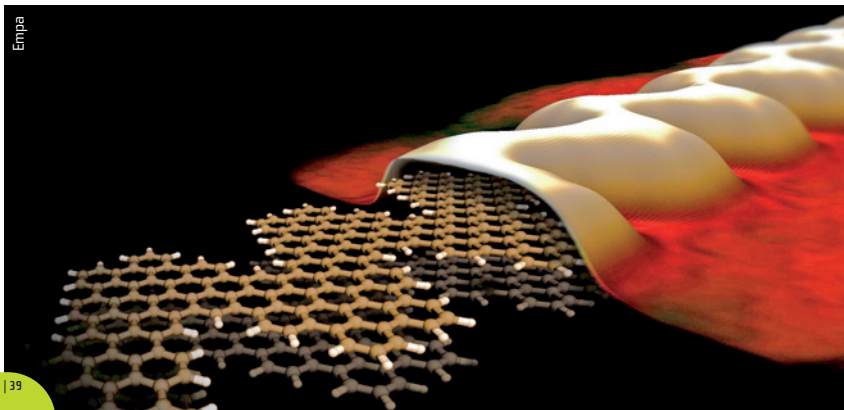


Die Empa: Nano-Phänomene verstehen und nutzen

Die beste Strategie zum Erkunden neuer Technologien, so auch der Nanotechnologie, lautet: «Verstehen lernen, Wissen generieren, verantwortungsbewusst handeln!»

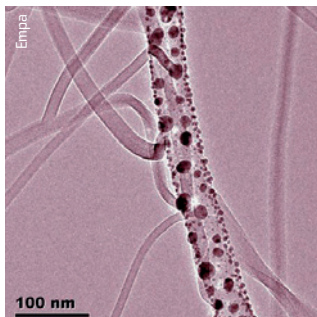
Die Empa hat der sich Materialforschung und Technologieentwicklung für eine **nachhaltige Zukunft** verschrieben. Dafür erforschen wir die Nanotechnologie und deren Einsatz und transferieren das erarbeitete Know-how an mögliche Anwender. Für diese Herausforderungen sind unsere High-Tech-Labors mit ihren vielfältigen Synthese- und

Sich selbst organisierende Graphen-Nanobänder für den «ultimativen Transistor»



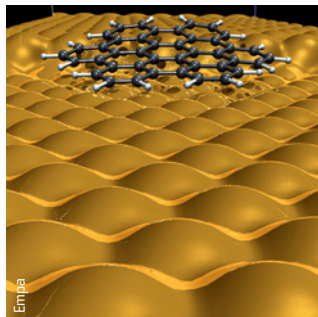
Analyse-Tools bestens gerüstet. Als Institut im ETH-Bereich können wir auch die speziellen Analyse-Infrastrukturen des PSI, der ETHs und des neuen IBM-Forschungslabors zur Hilfe nehmen.

Wir arbeiten mit nanostrukturierten Materialien und wollen die atomaren, molekularen und zellulären Funktionen unter 100 Nanometer verstehen. In diesen Dimensionen mit ihren veränderten Oberflächen- zu Volumen-Verhältnissen können neue Eigenschaften und Funktionen auftreten, die von uns erforscht und für neue Anwendungen **zum Nutzen der Industrie und Gesellschaft** weiter entwickelt werden.



Unter dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM): mehrere Kobalt-Phthalocyanin-Nanodrähte, die auf einem mit Silberpartikeln belegtem Eisen-Phthalocyanin-Nanodraht gewachsen sind

Selbst die glätteste Goldoberfläche ist nicht wirklich flach, sondern leicht gewellt. Der Grund dafür liegt an der Anordnung der Goldatome. Mit einer Computersimulation mit 1700 Atomen haben Empa-Forschende gezeigt, dass organische Moleküle sich auf einer gewellten Oberfläche nicht überall absetzen



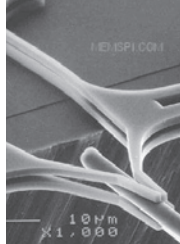
Hier einige unserer zahlreichen spannenden Projekte:

- Synthese und Einsatz von **keramischen Nanopartikeln**, um nicht nur Bakterien, sondern auch Viren aus Flüssigkeiten herauszufiltern
- Aus Vorläufermolekülen an Oberflächen synthetisierte, sich selbst organisierende **Graphen-Nanobänder** für den «ultimativen Transistor»
- Kontrolliertes **Wachstum von Nanoröhrchen** an Oberflächen für die Photovoltaik und die Sensorik oder als neue Elektronenquellen für effizientere Röntgenröhren
- Auf atomarem Niveau kontrollierte, mehrlagige **Oberflächenbeschichtungen** für dauerhafte Knochenimplantate und für gehärtete Beschichtungen in der Materialbearbeitung
- Nanokapillare Untersuchungen an der Grenzfläche von festen Nanooberflächen zu Flüssigkeiten, um das **Korrosionsverhalten** im mikroskopischen Massstab zu verstehen und neuartige Energiespeicher zu entwickeln
- Untersuchungen zum Verhalten von Nanopartikeln in der **Umwelt** und in **biologischen Systemen** einschliesslich Zelleexperimente

Mehr erfahren Sie auf www.empa.ch und www.empa.ch/nano

Gian-Luca Bona
Direktor Empa

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.

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 Kilogramm und einer Leistungsaufnahme von nur zehn 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.

Linkliste

<http://www.nanoscience.ch/nccr/>

Das Swiss Nanoscience Institute (SNI) geht aus dem 2001 gegründeten Nationalen Forschungsschwerpunkt (NFS) Nanowissenschaften hervor. Die Universität Basel fungiert als Leading House und koordiniert unter der Leitung von Prof. Christian Schönenberger das NFS-Netzwerk aus Hochschul- und Forschungsinstituten sowie Industriepartnern und das Argovia-Netzwerk. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Wissenschaftszweige und Institutionen zeichnet das SNI als innovatives, weithin anerkanntes Kompetenzzentrum in den Nanowissenschaften aus.

<http://www.nanoscience.at>

<http://www.nanoscience.de>

<http://pubs.acs.org/journal/nolefd>

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

<http://mems.sandia.gov/>

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

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

<http://www.foresight.org/>

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

<http://www.nanoscience.com>

<http://www.nsti.org/>

<http://mrsec.wisc.edu/Edetc/>

<http://www.techconnectworld.com/>

<http://www.nanowerk.com>

Anlaufstelle für Schulen,
für allgemeine Informationen und
für den Bezug der Broschüre:

empa-akademie@empa.ch

Telefon: +41 58 765 45 62

www.empa-akademie.ch

Anlaufstelle für Unternehmen im
Bereich Materialforschung
und Technologieentwicklung:



portal@empa.ch

Telefon: +41 58 765 44 44

www.empa.ch/portal

Impressum

Herausgeber

Empa, Swiss Federal Laboratories for
Materials Science and Technology

CH-8600 Dübendorf

CH-9014 St. Gallen

CH-3602 Thun

www.empa.ch

Redaktion

Redaktionsteam

Konzept/Gestaltung

Grafikgruppe Empa

Druck

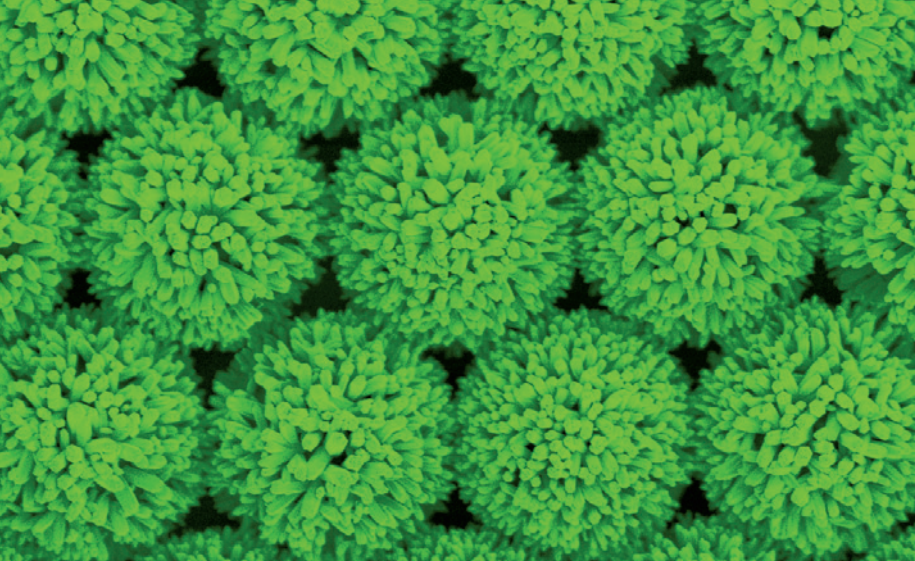
Mattenbach AG, Winterthur

© Empa 2011



No. 01-11-691535 – www.myclimate.org

© myclimate – The Climate Protection Partnership



www.empa.ch/nano



Materials Science & Technology