



EUROPESE  
COMMISSIE

Communautair onderzoek

# Nanotechnologie

## Innovatie voor de wereld van morgen



NANOTECHNOLOGIEËN EN NANOWETENSCHAPPEN,  
KENNISGEBASEERDE MULTIFUNCTIONELE MATERIALEN EN  
NIEUWE PRODUCTIEPROCÉDÉS EN -APPARATUUR

## **Belangstelling voor Europees onderzoek?**

**RDT info** is ons kwartaalblad dat u op de hoogte houdt van de belangrijkste ontwikkelingen (resultaten, programma's, evenementen, enz.). Het verschijnt in het Engels, Frans en Duits. Een gratis proefexemplaar of gratis abonnement kan worden aangevraagd bij:

Europese Commissie  
Directoraat-generaal Onderzoek  
Eenheid Informatie en communicatie  
B-1049 Brussel  
Fax (32-2) 29-58220  
E-mail: [research@cec.eu.int](mailto:research@cec.eu.int)  
Internet: [http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index_en.html)

## **Uitgever: EUROPESE COMMISSIE**

Directoraat-generaal Onderzoek  
Directoraat G — Industriële technologieën  
Eenheid G.4 — Nanowetenschappen en nanotechnologieën

*Contactpersonen:* Dr. Renzo Tomellini, Dr. Angela Hullmann

*E-mails:* [renzo.tomellini@cec.eu.int](mailto:renzo.tomellini@cec.eu.int), [angela.hullmann@cec.eu.int](mailto:angela.hullmann@cec.eu.int)

*Url:* [www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology)

# Nanotechnologie

## *Innovatie voor de wereld van morgen*

Deze brochure is de neerslag van een door het Duitse bondsministerie voor onderwijs en wetenschappen (BMBF) gefinancierd project van het technologiecentrum van de Duitse ingenieursvereniging (VDI-TZ). De Europese Commissie is het BMBF erkentelijk voor zijn instemming met de vertaling van deze publicatie en met de verspreiding ervan onder een Europees publiek. Bijzondere dank gaat uit naar Dr. Rosita Cottone (BMBF) en Dr. Wolfgang Luther (VDI-TZ) voor de hulp die zij hebben verleend bij de coördinatie.



Zie voor de oorspronkelijke, Duitse versie <http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>.

**Uitgegeven door:** Europese Commissie, DG Onderzoek

**Productie:** Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Berlijn

**Coördinatie:** Afdeling Zukunftige Technologien, VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

**Auteur:** Dr. Mathias Schulenburg, Keulen

**Lay-out:** Suzy Coppens, BergerhofStudios, Keulen

*Europe Direct is een dienst die u helpt antwoorden te vinden  
op al uw vragen over de Europese Unie*

Gratis nummer:  
**00800 6 7 8 9 10 11**

#### **JURIDISCHE KENNISGEVING**

De Europese Commissie en namens haar optredende personen zijn niet aansprakelijk voor het eventuele gebruik van de informatie in deze brochure.

De in deze publicatie naar voren gebrachte opvattingen komen geheel voor rekening van de auteur en komen niet noodzakelijk overeen met het standpunt van de Europese Commissie.

Nadere informatie over de Europese Unie is te vinden op de Europa-server op internet (<http://europa.eu.int>).

Catalogusgegevens zijn te vinden aan het einde van deze publicatie.

Luxemburg: Bureau voor officiële publicaties der Europese Gemeenschappen, 2004

ISBN 92-894-8889-1

© Europese Gemeenschappen, 2004  
Overneming met bronvermelding is toegestaan.

*Printed in ?????*

GEDRUKT OP WIT CHLOORVRIJ PAPIER

# Voorwoord

**N**anotechnologie is een nieuwe benadering voor het begrijpen en beheersen van de eigenschappen van materie op nanoschaal: één nanometer (een miljardste meter) is de grootte van een klein molecuul. Op dit niveau vertoont materie andere, soms verbazingwekkende eigenschappen en vervagen de scheidslijnen tussen de gevestigde wetenschappelijke en technische disciplines. Vandaar het duidelijk interdisciplinaire karakter van nanotechnologie.



Van nanotechnologie wordt vaak gezegd dat zij een «ontwrichtend» of «revolutionair» potentieel heeft in termen van de mogelijke gevolgen voor de industriële productieprocessen. Nanotechnologie kan oplossingen bieden voor een groot deel van de problemen van vandaag de dag, omdat zij materialen, onderdelen en systemen kleiner, lichter, sneller en krachtiger kan maken. Dit opent nieuwe mogelijkheden voor het scheppen van welvaart en werkgelegenheid. Verwacht wordt dat nanotechnologie bovendien een onmisbare bijdrage zal leveren aan de oplossing van wereldwijde milieuproblemen doordat zij specifiekere inzetbare producten en procédés mogelijk maakt, waardoor minder grondstoffen nodig zijn en minder afval en uitstoot wordt geproduceerd.

Op dit moment ligt het tempo in de mondiale nanotechnologie wedloop hoog. Europa heeft al vroeg geïnvesteerd in talrijke nanotechnologieprogramma's, die in de tweede helft van de jaren negentig van start zijn gegaan. Daardoor heeft het een solide kennisbasis kunnen ontwikkelen. Het is nu zaak ervoor te zorgen dat de Europese industrie en samenleving de vruchten kunnen plukken van deze kennis door nieuwe producten en procédés te ontwikkelen.

De Commissie heeft recentelijk een mededeling aan nanotechnologie gewijd («Naar een Europese strategie voor nanotechnologie»). In die mededeling wordt niet alleen voorgesteld meer te doen aan onderzoek op het gebied van nanowetenschappen en nanotechnologieën, maar ook om rekening te houden met een aantal andere, onderling afhankelijke factoren:

- Een betere coördinatie van de nationale onderzoekprogramma's en meer investeringen om ervoor te zorgen dat de onderzoeksteams en -infrastructuren («expertisecentra») in Europa internationaal meetellen. Tegelijkertijd is meer samenwerking tussen onderzoekorganisaties in de openbare en de particuliere sector in Europa essentieel voor het bereiken van een kritische massa.
- Andere concurrentiebepalende factoren mogen niet worden vergeten, zoals een gedegen metrologie, regelgeving en intellectuele-eigendomsrechten, zodat de weg kan worden vrijgemaakt voor industriële innovatie die weer tot concurrentievoordelen moet leiden, zowel voor grote bedrijven als voor het MKB.
- Activiteiten op het gebied van opleiding en onderwijs zijn van groot belang. Waar het in Europa vooral aan schort is ondernemingsgeest van onderzoekers en vernieuwingszin van productie-ingenieurs. Voor onderzoek met een waarlijk interdisciplinair karakter is het wellicht ook noodzakelijk nieuwe benaderingen te ontwikkelen voor onderwijs en opleiding die afgestemd zijn op het onderzoek en de industrie.
- Maatschappelijke aspecten (zoals publieksvoorlichting, gezondheids- en milieu-aspecten, en risicoanalyse) zijn andere sleutelfactoren voor een verantwoorde ontwikkeling van nanotechnologie die aansluit bij de verwachtingen van de bevolking. Het vertrouwen van het publiek en van investeerders in nanotechnologie is van cruciaal belang voor de langetermijntwikkeling en vruchtbare toepassing ervan.

Het doel van deze brochure is te illustreren wat nanotechnologie eigenlijk is en wat deze de Europese burger te bieden heeft.

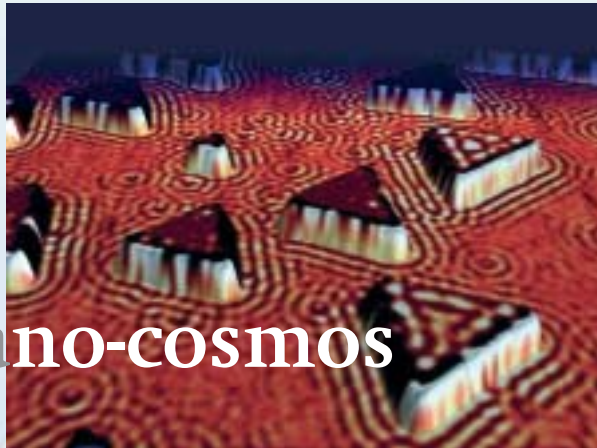
Ezio Andreta  
Directeur "Industriële technologieën"  
Directoraat generaal Onderzoek  
Europese Commissie

# Inhoud

3 Voorwoord

4-5 Inhoud

Een reis door de **nanocosmos**



6-7 **Het atoom: Een oud idee, een nieuwe werkelijkheid**

8-13 **Nanotechnologie in de natuur**

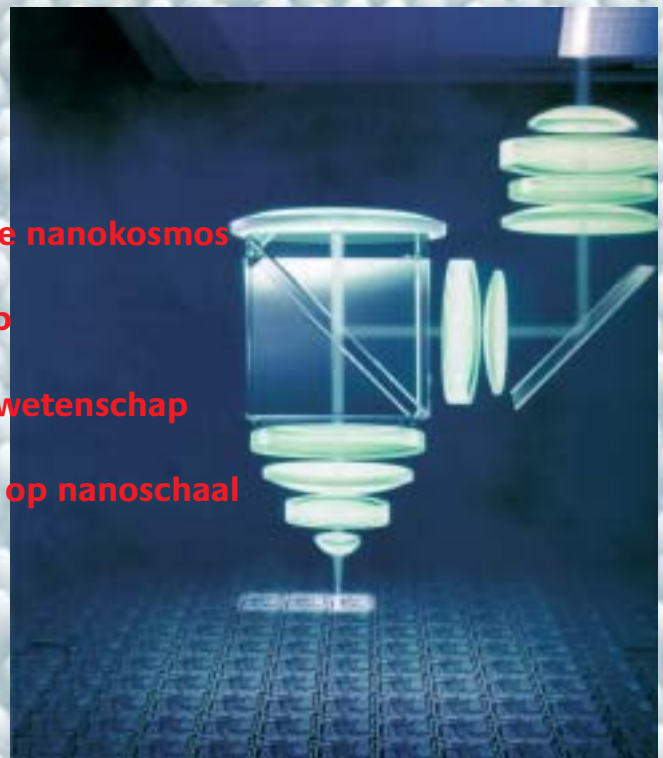
Instrumenten  
en procédés

14-15 **Ogen gericht op de nanokosmos**

16-17 **Schrijfgereedschap**

18-19 **Impulsen voor de wetenschap**

20-21 **Materiaalontwerp op nanoschaal**



# Nanotechnologie voor de samenleving



22-27

**Nano-elektronica: een wereld van netwerken**

28-29

**Nanotechnologie in het toekomstige leven van alledag**

30-33

**Mobiliteit**

34-37

**Gezondheid**

38-41

**Energie en milieu**

42-43

**Nanotechnologie voor sport en vrije tijd**

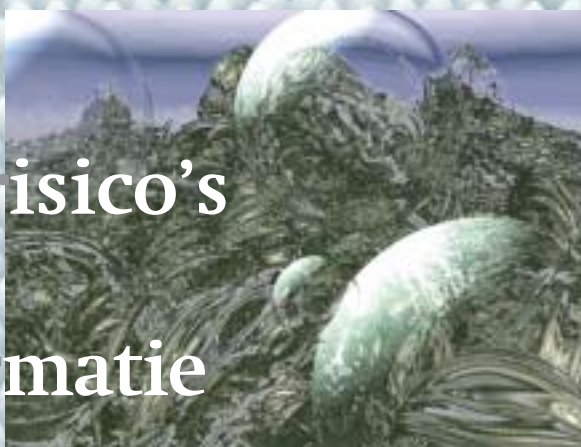
44-45

## Visies

46-47

## Kansen en risico's

## Nadere informatie



48

**Hoe word ik nano-ingenieur?**

49

**Contactpersonen, links, literatuurverwijzingen**

50-51

**Lijst van begrippen**

52

**Register van afbeeldingen**

# Reis door de nanokosmos

## Het atoom: Een oud idee, een nieuwe werkelijkheid



Amedeo Avogadro (1776-1856), natuurkunde-professor in Turijn, die regendruppels "berekenbaar" gemaakt heeft.



De stoffelijke wereld om ons heen bestaat uit atomen. De Griekse wijsgeer Democritus beweerde dit al ongeveer 2400 jaar geleden. De moderne Grieken waren hem hiervoor zo dankbaar dat ze zijn beeltenis op een munt van 10 drachme zetten. Deze kende, net als het atoom, een gigantische verspreiding. Een regendruppel bevat maar liefst 1.000.000.000.000.000.000.000 atomen, want atomen zijn uiterst klein, ongeveer een tiende nanometer. Eén nanometer is één miljoenste millimeter.

De verhouding tussen de diameter van een magnesiumatoom en die van een tennisbal is gelijk aan de verhouding tussen de diameter van een tennisbal en die van de aarde. Denk daaraan bij het innemen van uw volgende magnesiumtabletje!



De Romeinse schrijver Lucretius zei een paar honderd jaar later in een van zijn gedichten het volgende over atomen:

*Het universum is een oneindige ruimte met een oneindig aantal ondeelbare partikels, atomen, van een daarentegen eindig aantal verschillende soorten. Atomen onderscheiden zich enkel door hun vorm, grootte en gewicht; ze zijn ondoordringbaar hard, onveranderlijk, de grens van de fysieke deelbaarheid ...*

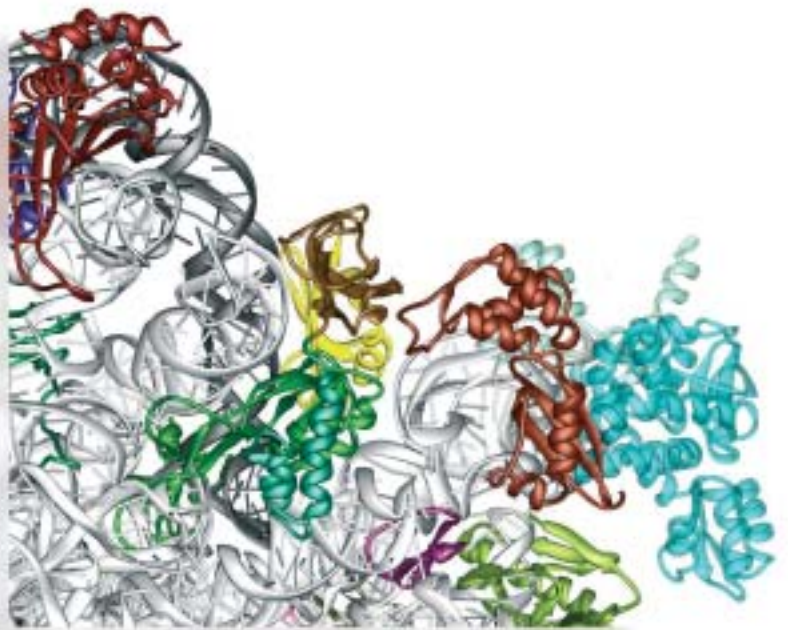
Lang niet slecht, maar wel pure speculatie. Daarna werd lange tijd niet meer over zulke dingen nagedacht.

In de zeventiende eeuw wijdde Johannes Kepler, de beroemde sterrenkundige, een beschouwing aan sneeuwvlokken, die hij in 1611 publiceerde: De regelmatige vorm kon volgens hem eigenlijk alleen door eenvoudige, gelijkvormige bouwstenen ontstaan. Het concept atoom kreeg nieuwe glans.



De geest van Democritus zweeft boven de nanowereld, een zee van eindeloze mogelijkheden.



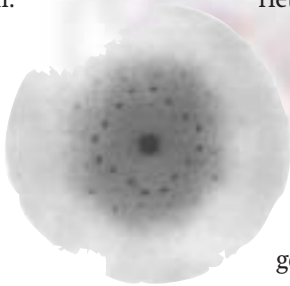


Nanomachines zoals het ribosoom kunnen door prof. Ada Yonath van het DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) kristallografisch ontcijferd worden.

Geleerden die zich in mineralen en kristallen verdiepten, raakten steeds meer overtuigd van het bestaan van atomen. Maar pas in 1912 kon aan de Universiteit van München een direct bewijs worden geleverd.

Een kopersulfaatkristal bleek röntgenstraling net zo te verstrooien als een paraplu het licht van een straatlantaarn.

moest dus atomen net zo gerang-waren als van of als op-sinaasappels in een



Het kristal wel uit bestaan die regelmatig schikt het weefsel paraplu doek gestapelde uitstalkraampje.

Met moderne analyseapparatuur is men erin geslaagd zulke complexe bestanddelen van de levende materie tot op nanoschaal zichtbaar te maken.

In de jaren tachtig van de vorige eeuw werd uiteindelijk de rastertunnelmicroscop ontwikkeld, waarmee afzonderlijke atomen van een kristal niet alleen afgebeeld – in het begin werden de afbeeldingen vaak voor bedrog gehouden – maar ook gemanipuleerd konden worden.

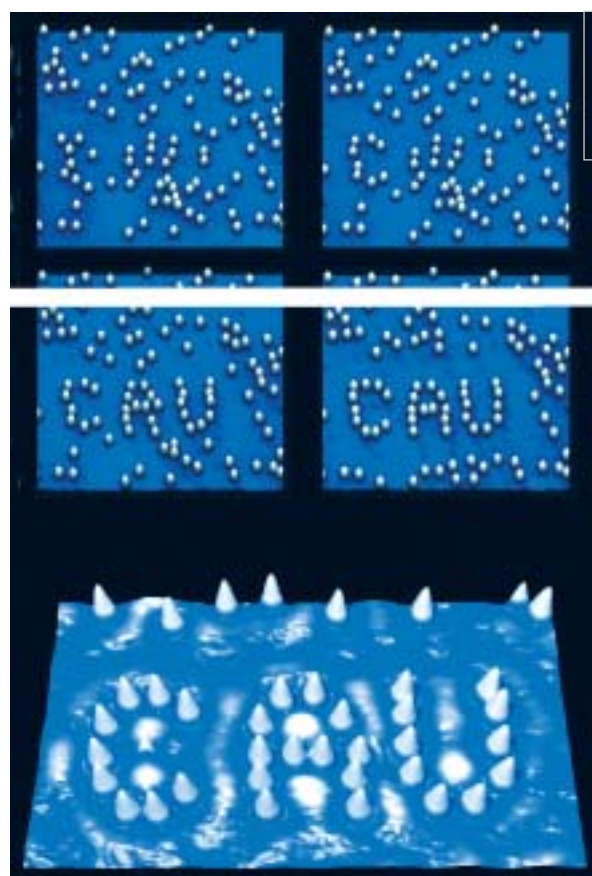
De tijd was rijp voor een zeer energieke vernieuwing: de nanotechnologie.

Waarom de kristal zich matig rang-eenvoudig verklaren: maakt het mogelijk, regelmaat is aangenaamst. Al wanneer noten op een schaal worden geschud, ontstaan er regelmatige patronen; bij atomen gebeurt dit nog veel sneller.



atomen in een zo regel-schikken is te De materie zichzelf zo comfortabel en orde en nu eenmaal het

Maar eenvoudige patronen hebben zich niet altijd ook het meest verspreid. De materie op aarde heeft zich, gedreven door zelfordenende krachten, in miljarden jaren ontwikkeld tot schitterende, ingewikkelde, levende structuren.



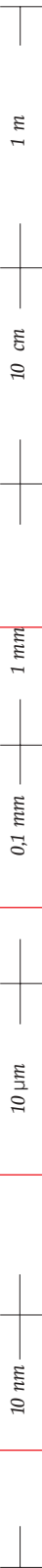
Bij prof. Berndt in Kiel worden mangaanatomen gebruikt om het logo voor de Christian-Albrechts-Universität af te beelden.

# Nanotechnologie in de natuur

nanokosmos

Nanotechnologen hebben veel respect voor de levende natuur. Want in de vier miljard jaar van haar bestaan heeft deze soms verbluffende oplossingen voor haar problemen gevonden. Typierend daarbij is dat de levende natuur haar materie tot in de kleinste details structureert, tot op het niveau van de atomen. Nanotechnologen willen dat ook.

Reis door de



Atomen zijn niet erg populair. Ze worden vaak geassocieerd met bommen of gevaarlijke straling. Maar dit is alleen aan de orde bij technieken die de atoomkern manipuleren. De nanotechnologie houdt zich alleen bezig met de atoomschil. Die atoomschil is het speelterrein van de nanotechnologie.

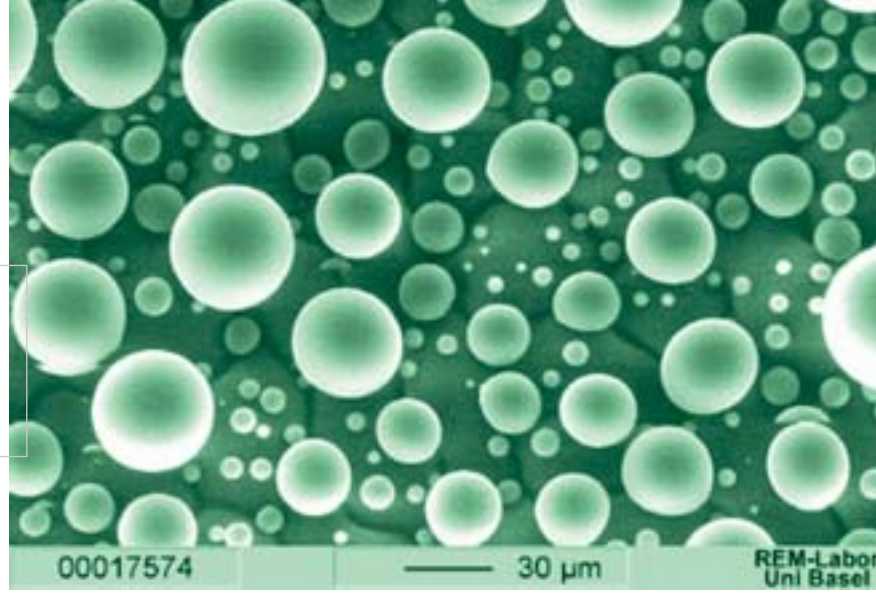
Maar om elke twijfel uit de weg te ruimen en duidelijk te maken dat atomen echt heel gewone, in verbindingen soms zelfs heel smakelijke structuren zijn, kiezen we als vertrekpunt voor onze reis door de nanokosmos een stuk kaas.

Mimolette is een kaassoort die in Vlaanderen is uitgevonden. Het aanzicht van het met talloze gaatjes bespikkelde oppervlak doet al vermoeden dat deze kaas «bewoond» is. Met toestemming van de eigenaar overigens, want de activiteiten van de mijten komen het aroma van Mimolette ten goede. De mijten zijn één tiende millimeter groot. Met de ESEM, een speciale rasterelektronenmicroscop, kunnen zelfs levende mijten worden geobserveerd. Net als alle andere levensvormen zijn ook mijten uit cellen opgebouwd. De afmetingen van zo'n cel liggen in het micrometerbereik. Het mechanisme ervan is uitermate gecompliceerd. Een belangrijke rol spelen de ribosomen, die naar de specificaties van het erfelijke materiaal, het DNA, allerlei eiwitmoleculen vervaardigen. De grootte van de ribosomen ligt in de orde van 20 nanometer. Inmiddels zijn onderdelen van de ribosoomstructuur tot op afzonderlijke atomen bepaald. Deze vorm van nanobiotechnologie heeft al haar eerste vruchten afgeworpen, namelijk nieuwe medicijnen die bacteriële ribosomen blokkeren.



De lotusbloem reinigt haar bladeren met het naar deze plant genoemde lotuseffect.

Waterdruppels op een blad van de Oost-Indische kers, afgebeeld met een speciale elektronenmicroscop (ESEM) van de Universiteit van Basel.

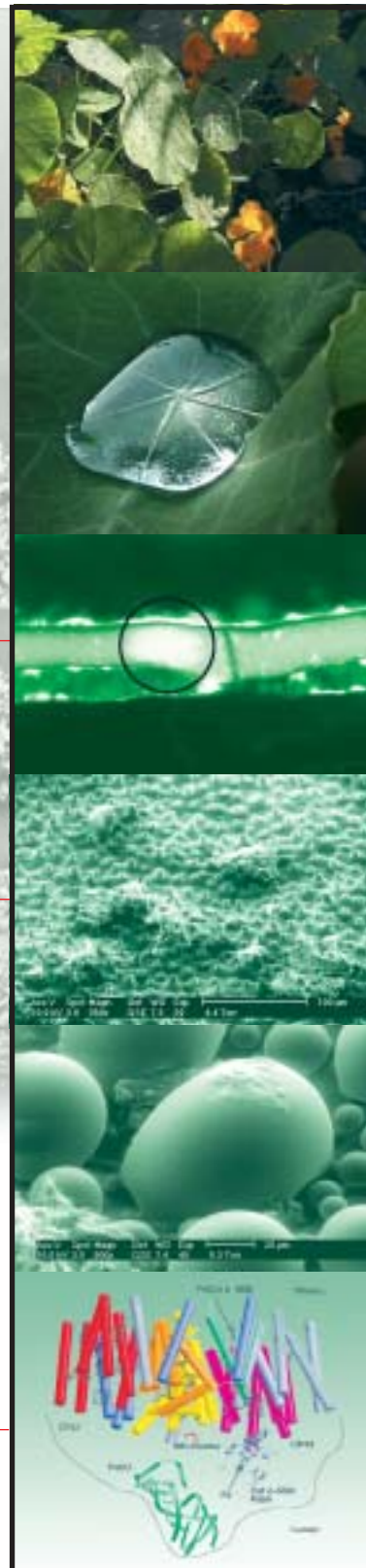


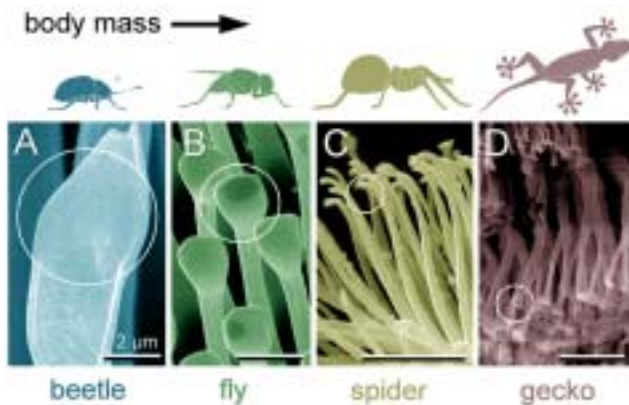
## Lotuseffect & Co.

De Oost-Indische kers houdt zijn bladeren dankzij het lotuseffect schoon. De ESEM-rasterelektronenmicroscop toont hoe waterdruppels afstand houden tot het bladoppervlak. Dit komt door de noppenstructuur van de bladeren. Die laat het water met hoge snelheid van het blad afglijden, waardoor het vuil wordt meegesleurd. Het door prof. Barthlott en zijn medewerkers aan de Universiteit van Bonn bijzonder uitvoerig onderzochte lotuseffect wordt al in een hele reeks producten gebruikt, zoals gevelverf waarbij de waterdruppels het vuil oplossen. Keramisch sanitair met een lotusstructuur is gemakkelijk schoon te houden.

In de bladeren van planten zit nog meer nanotechnologie verstopt. De waterhuishouding van het blad wordt vaak door forisomen geregeld. Dat zijn microscopisch kleine spieren die in het capillairsysteem van planten bepaalde doorgangen openen of - wanneer de plant gewond is - sluiten. Maar liefst drie Fraunhofer-instituten en de Universiteit van Gießen proberen nu deze plantenspieren in de techniek te gebruiken, zoals voor microscopisch kleine lineaire motortjes voor bijvoorbeeld het laboratorium-op-een-chip.

Een ander voorbeeld van een uiterst geraffineerde techniek op atomaire schaal: het fotosynthese-complex, dat voor de energie zorgt voor het leven op aarde. Hier komt het op elk afzonderlijk atoom aan. Wie daar met nanotechnologie een kopie van kan maken, heeft genoeg energie voor de eeuwigheid.





## Met nano op het plafond: de gekko

**G**ekko's kunnen elke muur beklimmen, ondersteboven over het plafond rennen en daar met één voet aan blijven hangen, dankzij nanotechnologie natuurlijk. De voet van de gekko is van uiterst fijne haren voorzien, die zich zo dicht tegen de ondergrond aanvlijen dat zij deze tot op enkele nanometers kunnen naderen. Op dergelijke afstanden begint de vanderwaalskracht een rol te spelen. Die is weliswaar zeer zwak maar levert dankzij de miljoenen aangrijpingspunten toch voldoende hechtvermogen. Een dergelijke hechting laat zich weer gemakkelijk lossen door «afwikkelen», zoals bij een rolletje plakband. Zo kan de gekko over het plafond lopen. Materiaalwetenschappers verheugen zich nu al op een synthetisch «gekkoline».

Wanneer de lokstofconcentratie op haar hoogtepunt is, blijven de leukocyten vastzitten en trekken andere kleefmoleculen de bloedlichaampjes door de wand van het bloedvat heen naar de plaats van de beet om daar de indringers te lijf gaan: kleeftechiek tot in de perfectie. Onder het motto «bonding on command» (kleven op commando) wordt onderzoek gedaan naar nanotechnologische imitaties hiervan.



*Kevers, vliegen, spinnen en gekko's hebben in het Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart de geheimen van hun hechtvermogen prijsgegeven. Zij hechten zich aan de ondergrond door middel van haartjes die daarmee een vanderwaalsbinding aangaan. Hoe zwaarder het dier, des te fijner en talrijker de haartjes.*

## Lijm voor het leven

**E**r zou geen leven mogelijk zijn als de bouwstenen ervan niet met verfijnde nanotechnologische hechtmechanismen aaneengeschaakeld zouden worden. Dit klefeffect speelt ook een rol bij de wondgenezing, zoals bij muggenbeten: de plaats van de beet wordt rood omdat de haarvaten wijder worden, zodat leukocyten, witte bloedlichaampjes, in grote hoeveelheden kunnen worden aangevoerd. De cellen rond de beet scheiden een lokstof af. Afhankelijk van de concentratie

daarvan sturen de wand van het bloedvat en de leukocyten op elkaar afgestemde kleefmoleculen naar elkaar toe, waardoor de leukocyten steeds meer worden afgeremd.



Vliegenpoten in close-up

## Mosselen als verlijmingskunstenaars

**D**e gewone mossel – die in restaurants wordt gegeten – is een nanotechnologische goochelaar als het op lijmen aankomt. Als zij zich wil vasthechten, opent zij de kleppen van haar schelp en schuift zij haar voet op een rots, waarna zij deze welft tot een zuignap. Door dunne buisjes stromen vervolgens kleverige bolletjes, micellen, in de ruimte onder de zuignap. Deze bolletjes knappen door de onderdruk, waardoor een krachtige watervaste kleefstof vrijkomt die tot een kussentje opzwelt. Aan deze trillingsdemper gaat de mossel voor anker met behulp van elastische byssusdraden, zodat zij zonder gevolgen door de branding heen en weer kan worden geschud.



Mossel met byssusdraden en voet



Het Fraunhofer-Institut IFAM in Bremen doet onderzoek naar gemodificeerde mosselkleefstoffen waarmee zelfs gebroken serviesgoed weer vaatwasserbestendig kan worden verlijmd. Ook het expertisenetwerk «Nieuwe werkzame stoffen en biomaterialen» in Rostock en Greifswald neemt de mossel onder de loep.

## Biominalisatie

**M**aar mosselen kunnen nog meer. Hun paarlemoer bestaat uit ontelbare minuscule kalkkristallen van aragoniet, een mineraal dat op zichzelf zeer bros is. In de mossel zijn zij echter door schroefvormige, uiterst elastische eiwitten met elkaar verlijmd. Drie gewichtsprocent eiwit is voldoende om de breuksterkte van het huis van een zeeoor drieduizend keer zo groot te maken als dat van zuiver calciëtkristal. Zee-egels versterken op deze manier hun soms wel dertig centimeter lange stekels, waardoor zij de branding kunnen weerstaan.

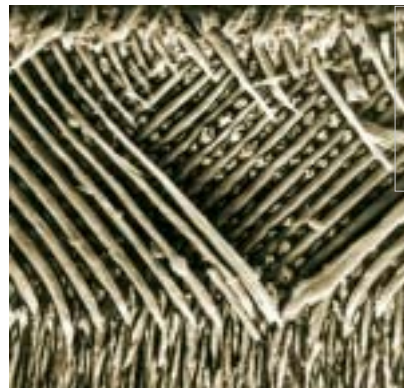
Door biominalisatie kunnen ook filigraanstructuren ontstaan. In een klein gebied in de buurt van de Filippijnen leeft op de zeebodem een spons met de naam «venuskorfje». Deze spons is gebogen als de schede van een Turks kromzwaard, maar dan met een ronde dwarsdoorsnede. Zijn naam heeft deze spons te danken aan de vorm van het inwendige skelet van de huls. Het is een weefsel van fijne kiezelnaalden, geperforeerd zoals het rieten vlechtwerk van de achterkant van een houten stoel.

Dit weefsel is zowel rechthoekig als diagonaal gevlochten. Het venuskorfje geldt als meesterwerk van de biominalisatie: Eerst voegen kleine elementaire bouwstenen van kiezelnaalden (siliciumdioxide) de cellen van de spons samen tot ragfijne lagen. Vervolgens worden deze zo opgerold dat er kiezelnaalden



ontstaan. Deze vormen weer de basis voor het vlechtwerk dat zo goed bestand is tegen drukveranderingen.

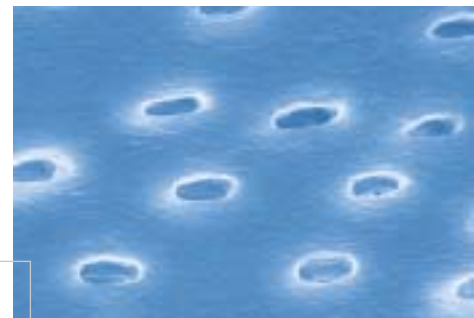
Venuskorfje – deze diepzeespons wordt beschouwd als biologisch voorbeeld voor geleiders van lichtgolven.



Het driedimensionale biominaalweefsel in het tandglazuur van de kies van een woelmuis beschermt het kauwvlak tegen breuk.

Technische biominalisatie: Nanodeeltjes herstellen tanden.

Wanneer tanden erg gevoelig voor koude worden of onder inwerking van zuur pijn doen, is dit meestal te wijten aan kleine kanalen in het tandglazuur, open dentinekanaaltjes. Deze kunnen met nanodeeltjes van kaliumfosfaat (apatiet) en eiwit van de firma SusTech tien keer zo snel worden hersteld als met de gebruikelijke apatietpreparaten. De nieuw geminaliseerde materiaallaag gedraagt zich in de mond net zoals het lichaamseigen tandmateriaal.



## Nanotechnologie in de natuur

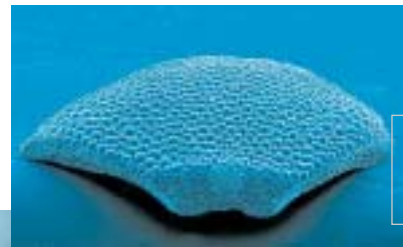
Vroeger had de biomineralisatie bij diatomeeën, kiezelwieren, een strategische betekenis. Deze microscopisch kleine organismen beschermen zich met schalen van kiezelzuur, waarvan  $\text{SiO}_2$ , siliciumdioxide, het voornaamste bestanddeel is. Net als kwartsglas, dat ook uit siliciumdioxide bestaat, zijn de kiezelzuurschalen tamelijk goed bestand tegen bijtende zuren en logen, zodat zij door nanotechnologen geschikt worden geacht als reactievat voor kristalletjes op nanometerschaal. Want om met een chemische reactie deeltjes op nanoschaal te krijgen, moet het reactievolume beperkt worden gehouden. Zodra de reactiestoffen in het reactievat op zijn, stopt namelijk de groei van de door de reactie ontstane kristallen. In de schalen van diatomeeën bevinden zich talloze microscopisch kleine poriën die als nanoreactoren dienst kunnen doen.

Hoe ontstaan nu eigenlijk die zo kunstige kiezelwierschalen? Langzaam beginnen er antwoorden te komen op deze vraag. Onderzoekers van de Universiteit van Regensburg hebben ontdekt dat varianten van een bekende eiwitgroep, polyamine, in een kiezelzuuroplossing met de juiste concentratie nanobolletjes met een diameter van 50 tot 900 nanometer kunnen produceren. Dit gebeurt geheel spontaan, onder invloed van de zelfordenende krachten. Op grond van eenvoudige groeimodellen kan worden verondersteld dat kiezelzuurschalen op soortgelijke wijze spontaan ontstaan.

Waarom waren kiezelwierschalen vroeger eigenlijk van strategische betekenis? In 1867 ontdekte Alfred Nobel dat kiezelgoer, kiezelaarde uit fossiele afzettingen van diatomeeën, nitroglycerine opzuigt, waardoor de neiging van deze springstof om spontaan tot explosie te komen sterk vermindert. Hij noemde het mengsel dynamiet. Met het vele geld dat hij daarmee verdiende, werd later de grondslag gelegd voor de stichting die vandaag de dag de Nobelprijzen financiert.



De zeester *Ophiocoma wendtii* is met haar perfecte microlenzensysteem goed uitgerust voor optische waarneming. Boven: aanblik bij dag, onder: bij nacht.



Pantser en microlens tegelijk

Nanotechnologie in de natuur: *Ophiocoma wendtii*, een haarster ter grootte van een handpalm heeft lange tijd haar geheimen niet willen prijsgeven. Het dier, met schijfvormig lichaam en vijf armen, verstopt zich bij nadering van mogelijke vijanden ofschoon het geen ogen lijkt te hebben. Uiteindelijk werden die toch gevonden in de kalkschaal van het dier. Die is namelijk bedekt met talloze perfecte microlenzen die het hele lichaam van de haarster eigenlijk tot één groot oogcomplex maken. Welke rol speelt de nanotechnologie nu hierin? De kristallisatie van de afzonderlijke lenzen vindt zo plaats dat een van de eigenschappen van kalkspaat – het veroorzaken van dubbele beelden – niet tot uitdrukking kan komen door sturing van het kristallisatieproces op nanotechnologische schaal. Bovendien zijn de lenzen door subtiele magnesiumtoevoegingen ook nog eens gecorrigeerd voor sferische aberratie, zodat ongewenste kleurranden worden voorkomen. *Ophiocoma* heeft dus dezelfde nanotechnologische finesses in de vingers die Carl Zeiss ooit zo beroemd hebben gemaakt.

Kiezelwierschalen – boven het analogon van de spons van Menger“ (zie ook blz. 21) – hebben dankzij hun optimale vorm de grootste sterke bij het kleinste gewicht. Waarschijnlijk fungeren zij ook als lichtgeleiders voor hun fotosynthese-apparaat, de chloroplasten.



Het Institut für Neue Materialien (INM) in Saarbrücken heeft een nanodeeltesprocédé ontwikkeld om metalen delen te voorzien van slijtvaste hologrammen om vervalsing tegen te gaan.



Ook dit kan de natuur niet: met nanoroet gedoteerd keramiek voor corrosievaste ontstekers, bijvoorbeeld voor gasketels. Dankzij het regelbare geleidingsvermogen kan een transformator worden uitgespaard.

## Grenzen van de natuur, voordelen van de techniek

**N**anotechnologie is dus puur natuur. Toch zijn de mogelijkheden van de levende natuur begrensd. Zo werkt zij niet met hoge temperaturen, zoals bijvoorbeeld keramisten dat kunnen, en al evenmin met metalen geleiders. De moderne technologie kan daarentegen gebruik maken van allerlei kunstmatige omstandigheden – extreme materiaalzuiiverheid, koude, vacuüm – waarbij de materie verrassende kenmerken vertoont. We noemen met name kwantumeffecten, die deels sterk in tegenspraak met de wetten van de alledaagse werkelijkheid lijken te zijn. Zo gedragen deeltjes zich in de nanokosmos tevens als elektromagnetische golven. En een atoom, dat eigenlijk één geheel is, kan

als een golf twee spleten tegelijk passeren om zich daarna weer als een eenheid te gedragen.

Deeltjes vertonen geheel nieuwe eigenschappen als hun grootte in de buurt van de nanometer komt: Metalen gaan zich bijvoorbeeld als halfgeleiders of als isolatoren gedragen. Onopvallende stoffen zoals cadmiumtelluride (CdTe) lichten in de nanokosmos op in alle kleuren van de regenboog en andere stoffen zetten licht om in stroom.

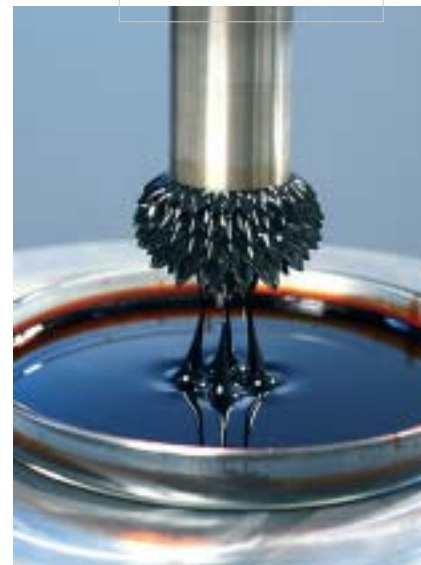
Wanneer deeltjes nanoscopisch klein worden, neemt het aandeel atomen aan de oppervlakte sterk toe. Oppervlakteatomen hebben vaak andere eigenschappen dan

atomen midden in de deeltjes, zij gaan gemakkelijker chemische reacties aan. Goud wordt op nanoschaal een goede katalysator voor gebruik in brandstofcellen (zie ook Mobiliteit). Nanodeeltjes kunnen ook gemakkelijk worden voorzien van laagjes van andere stoffen, waardoor in een zo samengesteld materiaal meerdere eigenschappen kunnen worden gecombineerd. Voorbeeld: nanodeeltjes van keramiek met een organische omhulling die de oppervlaktespanning van water verlagen, worden gebruikt voor de bekleding van badkamerspiegels die niet kunnen beslaan.

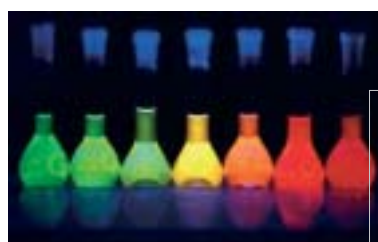
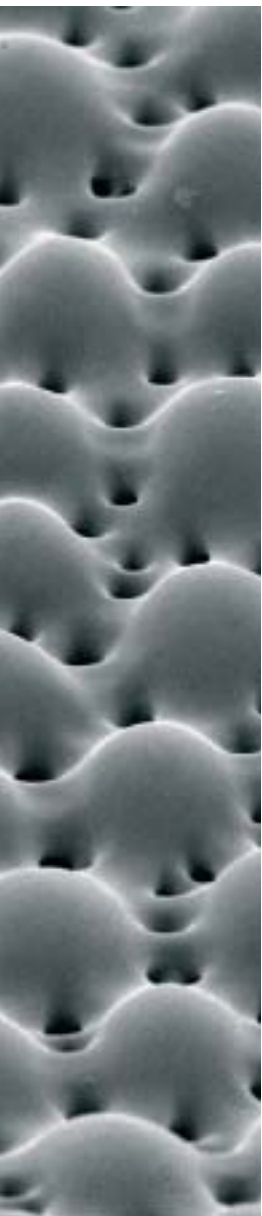
Speciaal gecoate nanodeeltjes van magnetiet, een ijzeroxide, vormen met olie een magnetisch vervormbare vloeistof, een ferrofluïde. Ferrofluïdes worden voor steeds meer toepassingen gebruikt, waaronder als dichtingsmiddel voor draaidoorvoeren voor vacuümvat en harddiskbehuizingen, of in regelbare schokdempers voor machines of auto's.

Niemand hoeft zich door de complexiteit van nanotechnologie te laten afschrikken. Ook een appel is ingewikkeld – cellen, ribosomen, DNA – en toch is deze vrucht er niet minder geliefd om. Appels zijn immers, net als goede nanotechnologie, eenvoudig te hanteren.

Nanodeeltjes van magnetiet in olie. De vloeistof laat zich magnetisch vervormen.



«Magnetotacticum bavaricum». Magneetbacteriën kunnen ketens van nanomagneetjes vormen en als kompasnaald gebruiken.



Cadmiumtelluridedeeltjes fluoresceren. De kleuren zijn uitsluitend afhankelijk van de deeltjesgrootte.

# Instrumenten en procédés

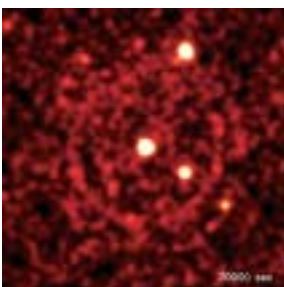
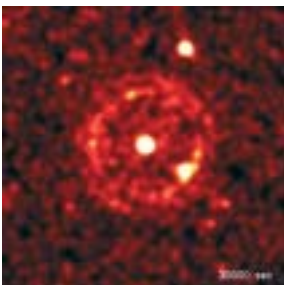
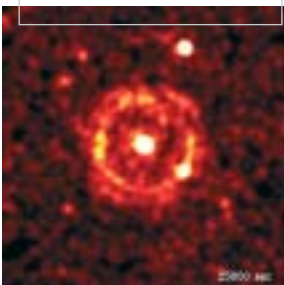
## Ogen gericht op de nanokosmos



Nanotechnologie in het heelal: De spiegels van de Europese röntgentelescoop «Newton» zijn in het midden tot op 0,4 nanometer nauwkeurig glad gepolijst en kijken hier naar röntgenstralers in de Andromeda-nivel.



Een wetenschappelijke sensatie: Een flits gammastralen brandt ringen in een galactische stofwolk.



Wat heeft de Europese röntgentelescoop «Newton» met nanotechnologie te maken? Hij vangt röntgenstraling van verre objecten op met behulp van 58, als de schillen van een ui in elkaar geschoven schotelspiegels ter grootte van een papiermand. De spiegels zijn voorzien van een opgedampte goudlaag met een gemiddelde oppervlakteruwheid van slechts 0,4 nanometer – een meesterstukje waaraan Carl Zeiss AG een belangrijke bijdrage heeft geleverd.

Precisieröntgenspiegels voor röntgenspectroscopie en -microscopie bestaan uit enkele honderden lagen die uit verschillende zware elementen zijn opgebouwd. Maar er worden nog zwaardere eisen gesteld aan dergelijke spiegels, want de lagen mogen in het midden slechts enkele fracties van de atoomdiameter van de ideale waarde afwijken. Het Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden heeft de techniek hiervoor in huis.

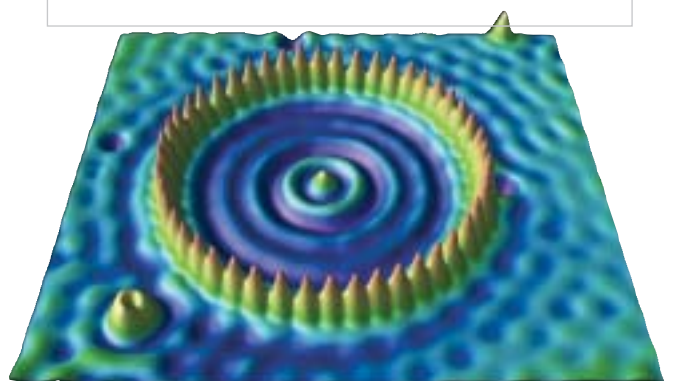
Deze truc met gelaagde reflectoren is voor zichtbaar licht ook door de natuur uitgevonden. De 's nachts levende inktvis *Euprymna scolopes* weerkaatst met spiegeltjes van reflectine-eiwitten het licht van lichtgevende bacteriën naar beneden en tovert de

onder hem zwevende vijanden een stuk sterrenhemel voor. Dit voorbeeld van biologische nanotechnologie is onlangs ontdekt door de Universiteit van Hawaiï.

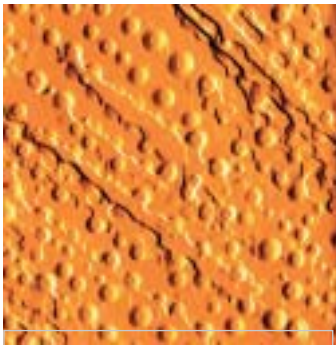
### Scanning probes

Scanning probes als ogen voor de nanokosmos lijken niet erg spectaculair maar zijn dit wel, want de ontwikkeling van de oervader van alle scanning probe-instrumenten, de rastertunnel-microscopie, heeft een Nobelprijs opgeleverd. In scanning probe-instrumenten voeren piëzokristallen keer op keer een peilsonde lichtjes verschoven over het bestudeerde object, bijvoorbeeld een veld van atomen. De bewegingen zijn zo fijn dat de afstand

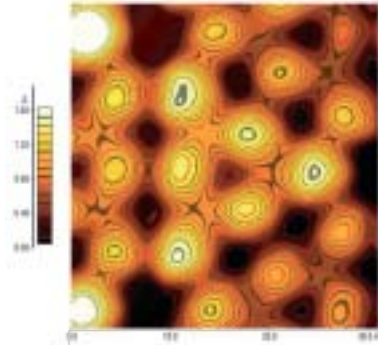
«Quantum Corral», door Don Eigler, IBM. De golven in het midden weerspiegelen de waarschijnlijkheid om een elektron aan te treffen.



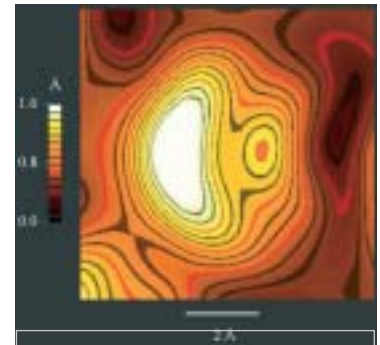




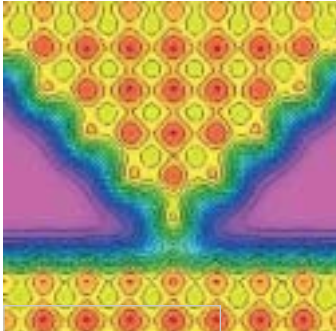
Kaliumbromidekristal met atoomterrassen. Het zout op een ontbijtei ziet er bijna net zo uit.



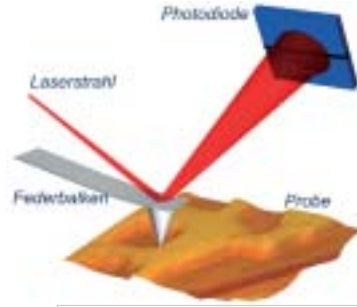
Silicium van heel dichtbij, contouren van de elektronendichtheid onder de ATM-microscop.



Het voorste atoom van een scanning probe maakt twee elektronenwolken - orbitalen - zichtbaar, precies zoals dat in de leerboeken staat.



Klassieke probe van een rastertunnelmicroscop (schematisch).



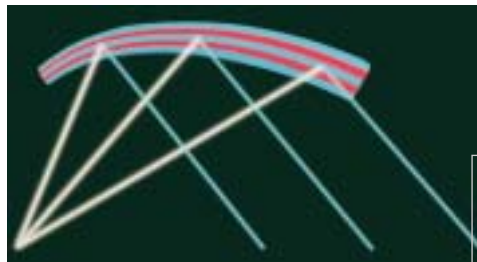
Atomic Force Microscope: De positie van de peilsonde wordt door een laserstraal aan een fotocel doorgegeven.



Met «capacitieve» probes kunnen de schakelprocessen op een chip zichtbaar worden gemaakt.

tussen de tip en het atoomveld meestal kleiner is dan de diameter van de atomen. Daarbij doen zich verschillende verschijnselen voor. Soms gaat er stroom lopen, soms ook worden er nietige magneetveldjes gedetecteerd. Met computers worden de meetwaarden grafisch in het platte vlak uitgezet waardoor een beeld ontstaat, dat, afhankelijk van het meetprincipe, nauwkeurig is tot op de diameter van een atoom of minder. Een uitermate slim apparaat is de Atomic Force Microscope (AFM). Deze detecteert de minieme krachten die de atomen in het atoomveld of het voorste atoom van de scanning probe uitoefenen. Met deze methode kan zelfs tot in de elektronenschillen van de atomen worden gekeken,

waardoor de geheimen tot op het laagste niveau kunnen worden ontsluit. Het wereldrecord oplossend vermogen is op dit moment in handen van de Universiteit van Augsburg.

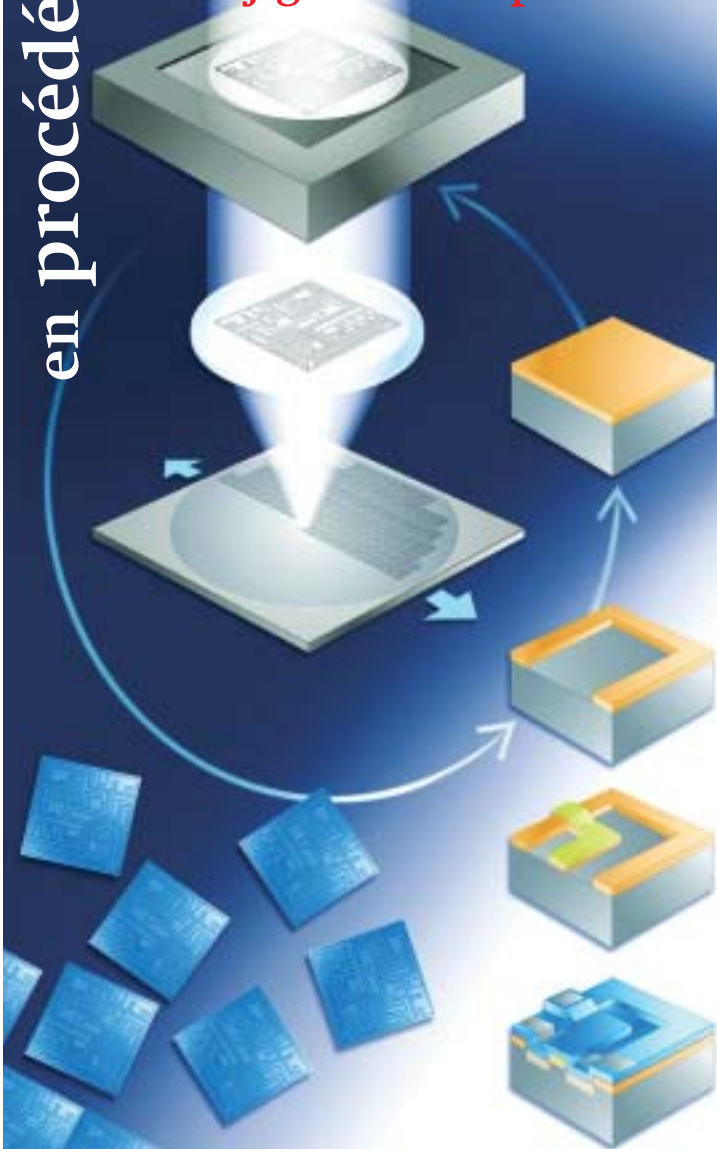


Gebogen meerlaagsspiegels voor geavanceerde röntgenanalyse.

«Euprymna scolopes» misleidt zijn vijanden met meerlaagsspiegels van reflecterende eiwitten. Het licht is afkomstig van lichtgevende bacteriën.



## Schrijfgereedschap



## Lithografie

In de computerwereld wordt de term lithografie gebruikt voor de techniek waarbij met behulp van licht structuren worden aangebracht op elektronische chips. Daarbij wordt een uiterst fijn gepolijste schijf halfgeleidermateriaal, de siliciumwafer, met een lichtgevoelige deklaag bedekt waarop met behulp van een masker een patroon wordt afgebeeld. Bij het ontwikkelen van de fotogevoelige laag komen de belichte (of onbelichte) delen van de wafer bloot te liggen. Daarna worden deze gebieden met allerlei behandelingstechnieken, zoals etsen, doperen met vreemde atomen en depositie, bewerkt om deze de gewenste elektrische eigenschappen te geven. Door dit proces te herhalen met steeds weer nieuwe maskers kunnen de meest complexe structuren worden gemaakt die de mens ooit heeft voortgebracht: hooggeïntegreerde schakelingen of chips. Inmiddels is de dichtheid van de transistors zo hoog dat onder de punt van een potlood meer dan een half miljoen transistors passen.



## Lithografieproces:

Een chip is een driedimensionale structuur waarbij de schakelementen in verschillende lagen zijn geordend. Voor de moderne chip zijn 25 tot 30 van dergelijke lagen nodig, waarvoor steeds weer een ander lithografiemasker nodig is. Het maskerpatroon wordt met behulp van licht en het lenzensysteem van de waferstepper, een soort diaprojector, op de wafer afgebeeld. Met elk nieuw masker van de maskerset worden nieuwe functies op de chip aangebracht waardoor de complexiteit toeneemt.

Moderne chips hebben structuren die kleiner zijn dan de golflengte van het licht dat bij de lithografie wordt gebruikt. Daarom worden kryptonfluoridelasers gebruikt met een golflengte van 193 nanometer om een minimum afmeting van 130 en binnenkort 90 nanometer te realiseren, wat met een reeks optische trucs zoals «Optical Proximity Correction» en «Phase Shifting» mogelijk is. Op dit moment wordt de grondslag gelegd voor lithografie met extreem ultraviolet licht, EUV-lithografie, waarbij licht met een golflengte van 13 nanometer wordt gebruikt om structuren met een «feature size» van 35 nanometer in silicium te produceren. De aan het maskermateriaal gestelde eisen zijn dermate extreem, dat een tien centimeter lange plaat bij een temperatuurstijging van één graad Celsius niet meer dan enkele tientallen nanometers, d.w.z. enkele malen de diameter van een atoom, mag uitzetten. Ook de vereiste gladheid van enkele malen de diameter van een atoom benadert de grenzen van het theoretisch haalbare.

De ontstaansgeschiedenis van de elektronicapool Dresden is een succesverhaal van de Duitse onderzoeksbevordering. Er zijn in deze regio ongeveer 16.000 arbeidsplaatsen geschapen met een hoog innovatiepotentieel voor de Duitse economie als geheel. In door het BMBF gestimuleerde projecten hebben 44 industriële partners en onderzoekinstellingen van de overheid de basis gelegd voor de toepassing van 300 mm-wafers, siliciumschijven, bij de vervaardiging van complexe geïntegreerde schakelingen. Het centrum voor maskertechnologie in Dresden, waar de bewerkingstechnieken voor toekomstige nanochips worden ontwikkeld, heeft daarin een hoofdrol gespeeld.



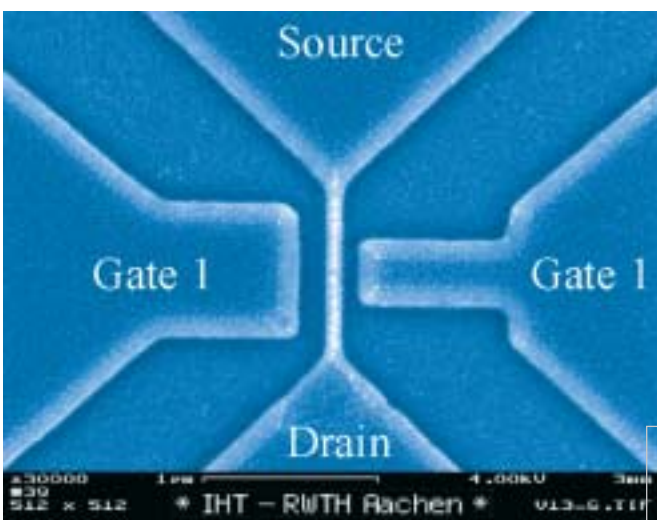
Prototype van een EUV-waferstepper-installatie voor de productie van toekomstige chipgeneraties

## Nanostempels voor de middenstand

Wie de term nano-elektronica hoort, denkt meestal aan miljardenverslindende inrichtingen waarmee dankzij grote productievolumes toch nog betaalbare producten worden geleverd. Desondanks zijn er ook voor de middenstand nog mogelijkheden voor een reisje door de nanokosmos. Deze doen op het eerste gezicht nogal ouderwets aan: zo worden nanostructuren bij het UV-Nano Imprint-proces geheel mechanisch in een laklaag gedrukt die het elektronische dragermateriaal, silicium bijvoorbeeld, afdekt. De stempel, waarin filigraan nanostructuren zijn aangebracht, is gemaakt van kwartsglas, dat UV-licht doorlaat. Zodra de stempel in de lichtgevoelige lak is doorgedrongen, wordt deze met een UV-lichtpuls gepolymeriseerd, waardoor hij uithardt. Daarna wordt de stempel verwijderd en het lakreliëf eronder opgelost. Het blootgelegde silicium kan daarna naar wens worden gemanipuleerd. Door dit proces te herhalen met steeds weer andere stempels ontstaat

uiteindelijk de complexe structuur van een chip met transistors, geleiders, enz. In het laboratorium zijn zo structuren met een minimum afmeting van 10 nanometer bereikt. Deze methode is niet alleen voor elektronische bouwstenen geschikt. Er kunnen ook uiterst fijne structuren mee in metaal of plastic worden gemaakt. Zij zou ook tot het laboratorium-op-een-chip kunnen leiden. De kosten van een UV-Nano-Imprint-machine worden op dit moment op minder dan een miljoen euro geschat, een fractie van wat de apparatuur voor een moderne conventionele chipfabriek kost. Toch kunnen met de UV-Nano-Imprint-techniek geen goedkopere producten worden gemaakt, omdat de productievolumes veel kleiner zijn. Voor speciale mini-oplages – vergeleken met de massaproductie van de processorfabrikanten – zou UV-Nano-Imprint desondanks de meest gebruikelijke methode kunnen worden.

Zerodur voor lithografiemaskers, dit speciale keramische product is zelfs op nanoschaal vormstabiel.



Al stempelend de nanokosmos in: Aan het Institut für Halbleitertechnik (IHT) van de RWTH Aachen zijn met mechanische/optische methodes al chips met structuren van 80 nanometer mogelijk. Toepassing: kleine series van zeer complexe schakelingen.

## Impulsen voor de wetenschap

Gangbare spectrometers voor röntgenstructuuranalyse. Aan dergelijke instrumenten heeft de wetenschap een groot deel van haar kennis over de nanokosmos te danken.

Onderaardse renbaan voor snelle elektronen.



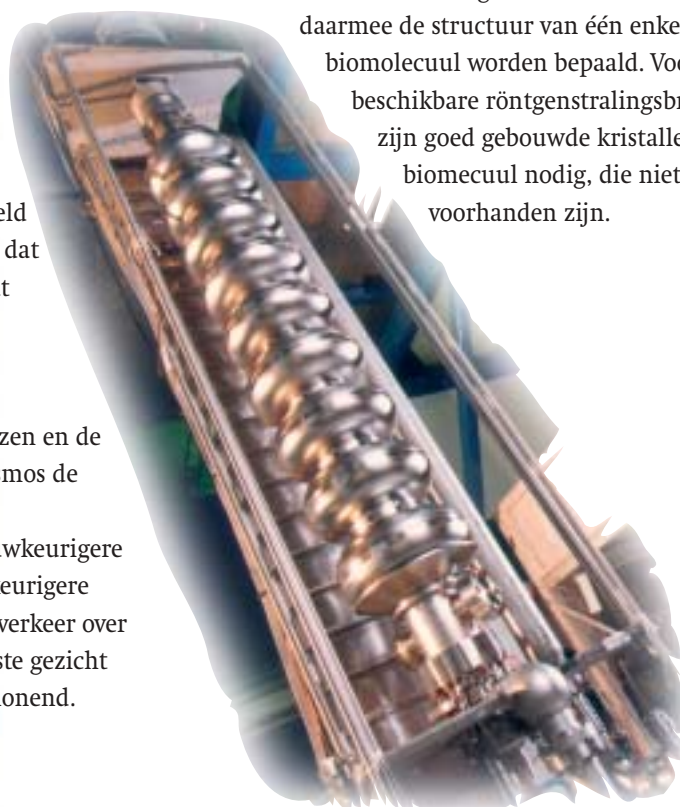
### Kwantumeffecten

**A**n de Ludwig-Maximilians-Universiteit in München wordt materie inmiddels routinematig onder extreme nanotechnologische omstandigheden gebracht, waarbij deze bizarre eigenschappen begint te vertonen. Wanneer bijvoorbeeld een damp bestaande uit honderdduizenden rubidiumatomen tot één miljoenste graad boven het absolute nulpunt ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wordt afgekoeld en door een magneetveld wordt samengedreven, ontstaat er een «Bose-Einstein-condensaat». Daarin verenigen de atomen zich tot een eenheid, zoals een troep marcherende soldaten.

De kwantumoptici uit München zijn erin geslaagd een dergelijk condensaat in een driedimensionaal raster van staande lasergolven te brengen en te manipuleren, bijvoorbeeld door de lichtbundel zo sterk te maken dat het condensaat in een Mott-condensaat uiteenvalt. Zij hebben daarvoor een belangrijke prijs ontvangen. Waarom? Door dit soort onderzoek wordt de kwantumtheorie nieuw leven in geblazen en de kwantumtheorie maakt in de nanokosmos de dienst uit. Wie vertrouwd is met de kwantumtheorie kan bijvoorbeeld nauwkeurigere tijdreferenties ontwikkelen. En nauwkeurigere klokken kunnen weer helpen het dataverkeer over internet te versnellen – het op het eerste gezicht esoterische onderzoek blijkt dus toch lonend.

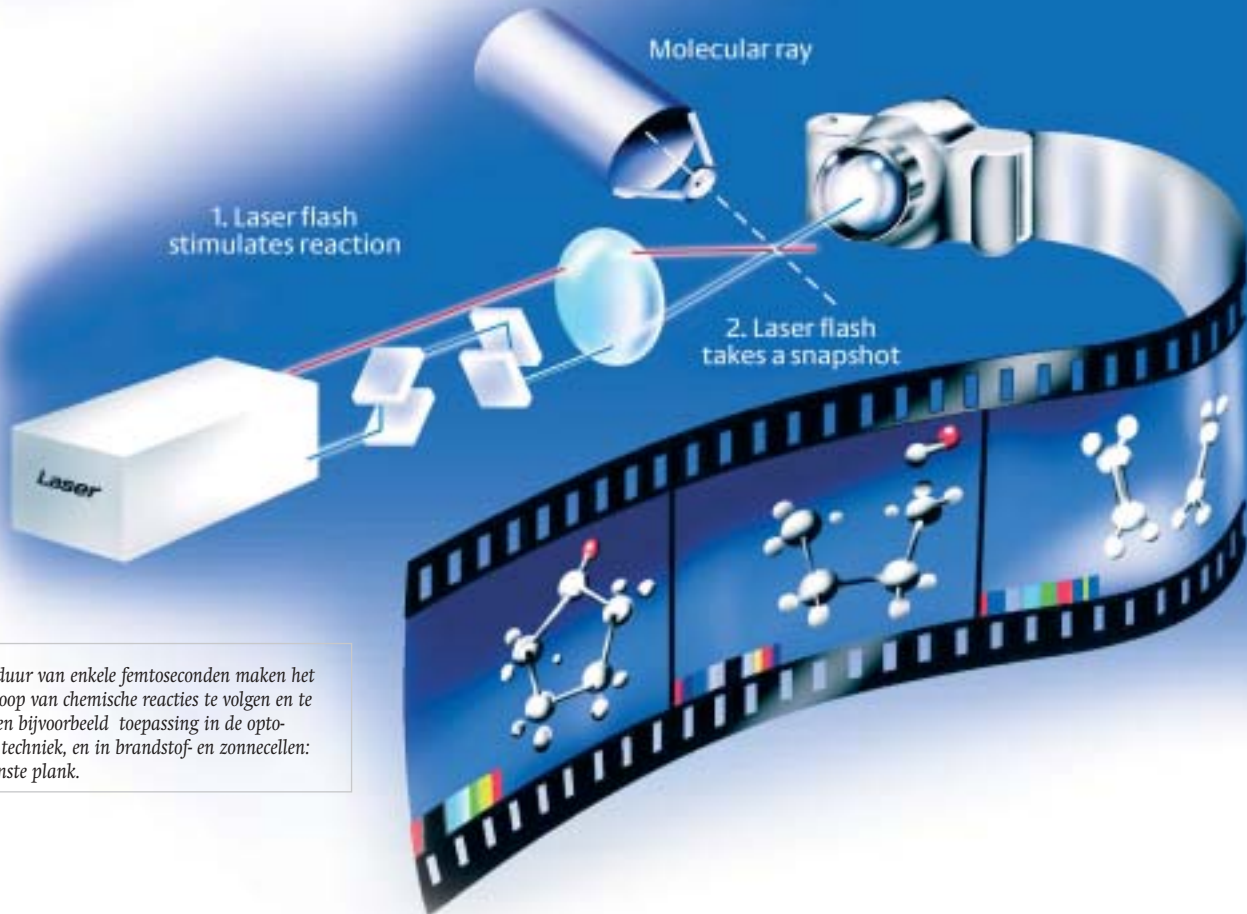
### De XFEL-röntgenlaser – krachtig licht voor de nanotechnologie

**W**anneer alles volgens plan verloopt zullen een paar miljard elektronen in het jaar 2012 iets heel spannends beleven. Vanaf het DESY-terrein in Hamburg-Bahrenfeld zullen ze door een supergeleidende elektronenversneller tot een zeer hoog energieniveau worden versneld en 3,3 kilometer verder door magneten systematisch zigzagsgewijs uit hun baan worden gebracht. Daarbij ontstaat een heel bijzonder soort kortgolvlige röntgenstraling: laserstralen. Nooit eerder hebben wetenschappers de beschikking gehad over zo'n waardevolle straling. Met een enkele impuls kan daarmee de structuur van één enkel (!) biomolecuul worden bepaald. Voor de nu beschikbare röntgenstralingsbronnen zijn goed gebouwde kristallen van een biomolecuul nodig, die niet altijd voorhanden zijn.



«Mott-condensaat» - exotische materie voor ultranauwkeurige tijdsbepaling

Supergeleidende elementen voor een elektronenversneller



Röntgenlaserflitsen met een duur van enkele femtoseconden maken het mogelijk om het precieze verloop van chemische reacties te volgen en te begrijpen. Deze reacties vinden bijvoorbeeld toepassing in de optoelektronica, de fotovoltaïsche techniek, en in brandstof- en zonnecellen: nanotechnologie van de bovenste plank.

De röntgenflitsen zijn zo kort dat verschillende bewegingsstadia van een molecuul rechtstreeks gefilmd kunnen worden. Wat met andere technieken een wazige wervelwind lijkt, neemt onder de röntgenlaser herkenbare vormen aan.

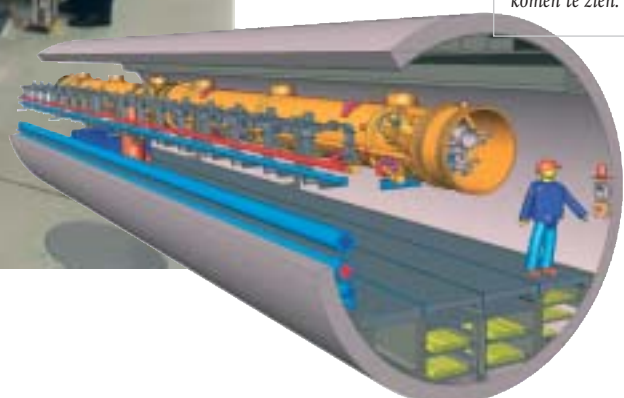
De geheimen van de wrijving kunnen worden ontrafeld. Wat nu precies tegen elkaar aanwrijft, wordt bepaald door nano-eilandjes van slechts enkele honderden atomen.

De eigenaardigheden van afzonderlijke clusters, hoopjes van enkele honderden atomen, zijn met de XFEL eveneens beter te onderzoeken dan met welk ander instrument ook. Kortom: wetenschap en techniek krijgen met dit kunststukje van Europa een krachtige impuls. De in totaal daarvoor uitgetrokken 684 miljoen euro (stand 2003) zullen naar het zich laat aanzien ruimschoots worden terugverdiend. En niet alleen in termen van pure kennis, maar ook in klinkende munt.



De vrije-elektronenlaser in opbouw.

Zo zal de onderaardse elektronenversneller eruit komen te zien.



# Materiaalontwerp op nanoschaal

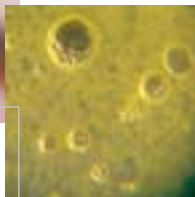
## Sol/gel-technieken leggen de grondslag voor nieuwe materialen

**B**earnaisesaus werd zo genoemd ter ere van de Franse koning Hendrik IV, die uit de streek Béarn kwam. Het recept van deze saus is op de webpagina <http://www.weltderphysik.de/themen/stoffe/magazin/materie/index.html> gezet, omdat het een fraai (en smakelijk) voorbeeld is van een colloïdaal systeem. Men spreekt van een colloïde wanneer een groot aantal druppeltjes van een stof stabiel in een andere stof zweeft. Bij bearnaisesaus

Er zijn honderden verschillende sol/gel-technieken voor allerlei stoffen. Gegeleerde solen laten zich ook tot draden vormen, die door bakken in keramiekvezels veranderen. Van solen kunnen nanopoeiers worden gemaakt die veel lichter zijn en bij lagere temperaturen tot keramische voorwerpen kunnen worden gebakken dan de gebruikelijk poeders, en die tegen zeer hoge druk en temperatuur bestand zijn.

Sol/gel-technieken zijn zelfs geschikt voor de vervaardiging van hoogwaardige optische componenten zoals lichtgeleiders, frequentieverdubbelers, microlensvelden, enz. Dit soort nanotechnologie brengt een ware revolutie in de materiaaltechniek te weeg.

Het oplosmiddel van het gel laat zich onder bepaalde voorwaarden ook zo verwijderen dat het gellichaam zijn externe volume behoudt. Er ontstaat dan een uiterst poreus materiaal met een geringe dichtheid, een aërogel.

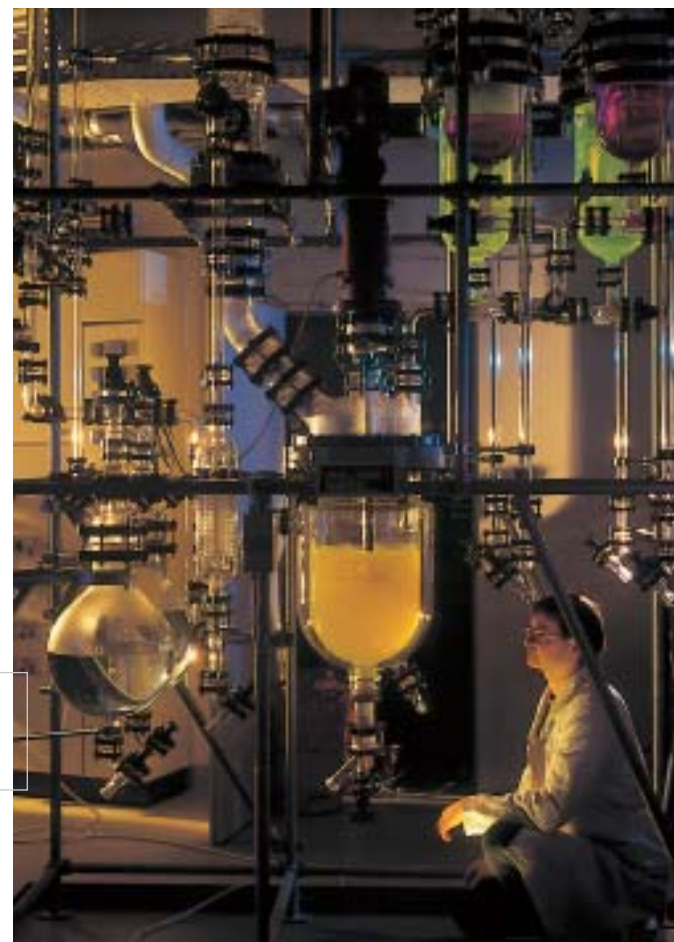


Een koninklijk sol/gel: bearnaisesaus ter ere van de Franse koning Hendrik IV.

zijn het azijndruppeltjes die in botervet zweven. Ook crèmes en verven zijn colloïden. Met sol/gel-technieken kunnen colloïden rechtstreeks worden ingezet in de geavanceerde technologie.

Bij sol/gel-technieken wordt uit oplosbare verbindingen van bijvoorbeeld silicium een (meestal colloïdaal) sol vervaardigd, waarbij de siliciumhoudende druppeltjes in een dragervloeistof zweven. Wanneer deze bijvoorbeeld op blik worden gespreid en worden verhit, verdampt de dragervloeistof en vormen de siliciumdruppeltjes een netwerk waardoor zij in een gel overgaan. Uiteindelijk verandert het gegeleerde netwerk in een harde keramische laag. Het blik is nu tegen corrosie en krassen beschermd.

Klaar voor de kleinste deeltjes: een reactievat voor sol/gel-deeltjes





Met aërogeel gevuld dubbel glas stopt warmteverliezen.



Aërogeel als wetenschappelijke stofzuiger. Ingevangen deeltjes worden veilig ingesloten in een gesmolten aërogeelmassa.

De komeet «Wild 2» kreeg bezoek van een aërogeel.



## Aërogels

**A**ërogels zijn dagelijkse kost. Sinds jaar en dag kunnen ze al bij de bakker worden gekocht onder de naam «schuimpje», een zoetigheid van gebakken, opgeklopt eiwit. Wie het schuimpje in zijn handen neemt, merkt dat zijn vingers warm worden. Dat komt doordat de lucht in het schuimpje in miljoenen microscopisch fijne blaasjes is ingesloten. Deze kan daarom niet circuleren en dus geen warmte uitwisselen, zodat een schuimpje zich net als piepschuim als een warmte-isolator gedraagt. Andere aërogels van opgeschuimd glas met een soortgelijke structuur zijn eveneens uitstekende warmte-isolatoren.

Eiwit is kleurloos, terwijl schuimpjes wit zijn. Dat ligt aan de verdeling van het eiwitschuim in microscopische blaasjes. Aan *micro*structuren valt het licht echter in alle kleuren uiteen en de optelsom daarvan is wit. Nanoporiën verstrooien het licht niet meer. Schuim uit glasachtig materiaal met nanoporiën is daarom net zo helder als gewoon vensterglas. Dubbel glas dat met zulk schuim is gevuld, is geschikt voor ramen en beschikt over uitstekende warmte-isolerende eigenschappen.

Omdat dit soort schuim bijna uitsluitend uit lucht bestaat, wordt het een aërogeel genoemd. De term «gel» is te danken aan het productieproces. Aan een waterige oplossing van een geschikt materiaal wordt een katalysator toegevoegd waardoor uiterst kleine, dunwandige belletjes ontstaan die zich in ketens aaneenrijgen en tenslotte tot ketenhopen samenklonteren: een gel. Het gel wordt door droging veranderd in een vederlicht aërogeel.

Het meest bereide aërogeel bevindt zich in het stofanalyse instrument CIDA van de firma Hoerner & Sulger GmbH, dat in januari 2004, na een reis van vijf jaar en een afstand van 3,22 miljard kilometer, stof van de komeet «Wild 2» heeft verzameld.

Een materiaal met vele blaasjes heeft een grote binnenoppervlakte. De grootst mogelijke oppervlakte, namelijk oneindig, heeft de «spons van Menger» en daarbij is zijn volume nul. De spons bestaat evenwel alleen in de hoofden van wiskundigen. Maar ook de werkelijke binnenoppervlakte van aërogels is groot genoeg om opmerkelijke effecten mogelijk te maken. Zo is de binnenoppervlakte van een stuk aërogeel ter grootte van een suikerklontje 2.000 vierkante meter. Deze en andere eigenschappen hebben bepaalde aërogels van koolstof een plaats verzekerd in de energietechniek van de toekomst. Zij maken het mogelijk condensatoren met een capaciteit tot 2500 Farad te bouwen, die als energieopslag voor het opvangen van de pieklast van bijvoorbeeld elektrische auto's kunnen dienen. Met het geniale schuim kunnen ook betere lithiumaccu's, nieuwe brandstofcellen e.d. worden ontwikkeld. Zelden heeft zo iets kleins, zo'n groot potentieel gehad. Maar dit is nu typisch nanotechnologie.

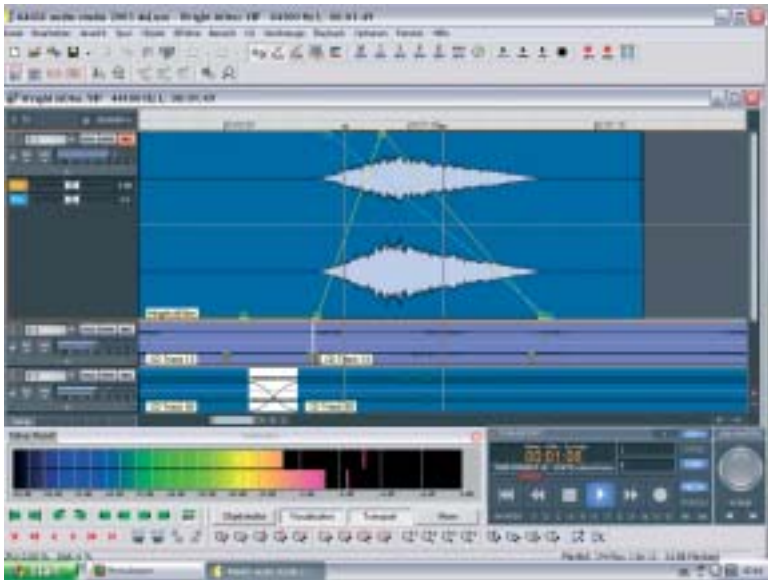
De spons van Menger wordt door wiskundigen als «universele kromme» gezien. Hij ontstaat wanneer de hieronder getoonde werkwijze tot in het oneindige wordt herhaald.



# Nanotechnologie voor de samenleving

## Nano-elektronica – een wereld van netwerken

**Van een notebook in een studio naar een studio in een notebook – stand van de techniek**



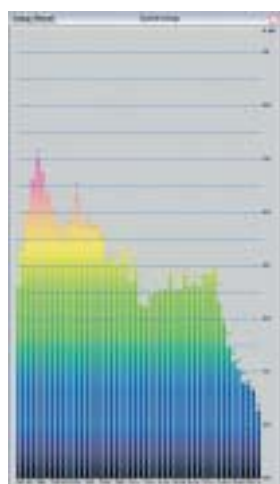
het geluidbewerkingsprogramma op verschillende sporen parallel opgenomen. Het vliegtuig vliegt van links naar rechts, daarvoor zorgt hij met de panoramaregeling. Het motorgeronk zwelt aan om daarna weer zwakker te worden, dat doet hij met de geluidsterkeregeling. En dan is het zover: Orville Wright vliegt opnieuw met de *Flyer One* over de *Kill Devil Hill*, net zoals op 17 december 1903, met branding en helmgrasgeritsel op de achtergrond – maar nu in een notebook. (Andere luchtvaartpioniers zoals de Duitser Gustav Weißkopf knetterden al in 1901 door de lucht, maar konden hun ontwikkelingen niet echt geschikt maken voor de praktijk.)

**D**e opdracht : een sfeervol radioverslag van vier minuten over de eerste gemotoriseerde vlucht van de gebroeders Wright maken. Wat doet een radioverslaggever met een beetje hart voor de zaak? Hij neemt eerst eens een kijkje op de «plek des onheils». Op de virtuele aardbol vindt hij Kitty Hawk op een enkele kilometers brede landstrook aan de kust van de Noord-Atlantische Oceaan met de *Kill Devil Hill* aan de rand. De gebroeders Wright zullen dus het gerommel van de branding hebben gehoord. Dat vindt hij in het

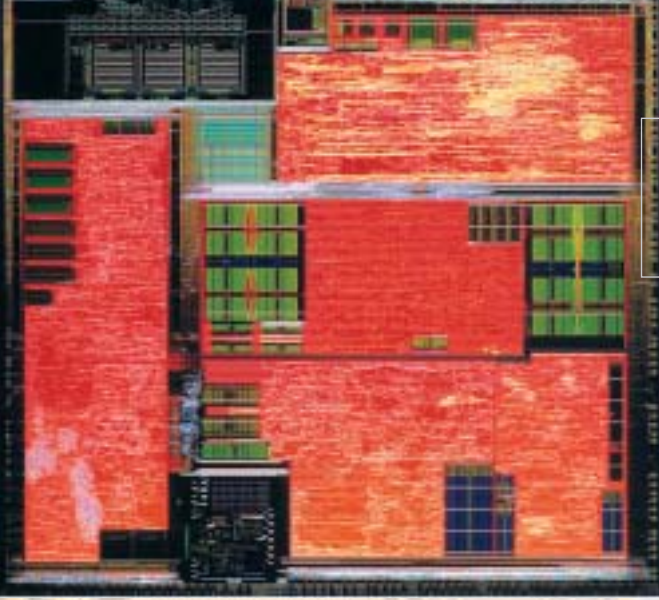
geluidsarchief, net als het geluid van de – volgens de Encyclopaedia Britannica – stijve bries tijdens de eerste vlucht, samen met het geritsel van het helmgras. De motor draaide met 1200 toeren per minuut en in het geluidsarchief vindt hij een Chrysler-oldtimer, met een mooi, diep brommend geluid. Dankzij de spectrum analyser van het geluidbewerkingsprogramma ziet hij dat de frequenties inderdaad aannemelijk zijn, daarom bevestigt hij zijn keuze. Twaalf seconden heeft de eerste vlucht geduurd, dus kiest hij een passage waarbij de toonhoogte op het einde omlaag gaat: het dopplereffect bij het voorbijvliegen. Alles wordt in

Twintig jaar geleden zou dit voor een radioverslaggever een onbetaalbare onderneming zijn geworden waarvoor tonnensware apparatuur nodig zou zijn geweest. Vandaag zijn een notebook, een bureautje en een paar uur tijd genoeg. De encyclopedie staat nu op een dvd, die 30 zware boekdelen vervangt en die voor snelle opzoeken oneindig veel comfortabeler is dan haar papieren tegenhanger. Het geluidbewerkingsprogramma staat in volledig immateriële vorm op de harde schijf en biedt in talloze virtuele racks eindeloze geluidseffecten. De ontwikkeling van de computer heeft een dematerialisatiegolf op gang gebracht die ook tot een vermindering van de energiestromen zal leiden. Door de dalende prijzen van hard- en software hebben tegelijk ook minder gefortuneerde creatievelingen productiemiddelen in handen gekregen waarvan zij vroeger alleen maar konden dromen.

In de toekomst zal de «polsbibliotheek» net zo gewoon worden als interactieve mobiele communicatie.







Een televisiestudio ter grootte van een vingernagel: een multimediachip met controller voor de aansturing van hoge-resolutie-schermen, met het energieverbruik van een zaklamp.



## Go Nano! De jaren voor ons

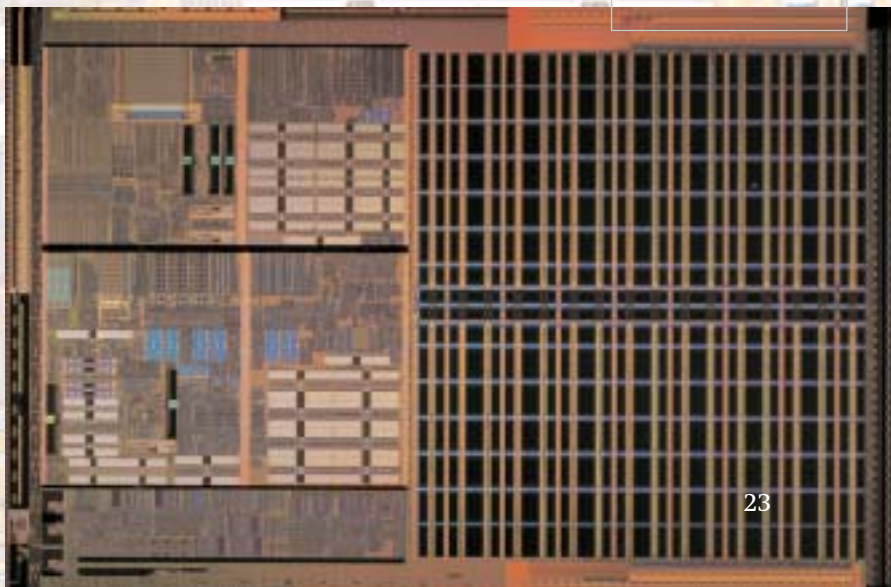
De transistortechniek die vandaag de dag in processoren voor computers wordt gebruikt, heet CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Zij is onder meer ontwikkeld voor de eerste elektronische polshorloges, omdat zij veel minder stroom gebruikte dan oudere technieken. Sinds de jaren zeventig voorspellen de deskundigen dat elke techniek na tien tot vijftien jaar haar grenzen bereikt. Dat is ook nu weer het geval. Ditmaal heeft de elektronica-industrie een dwingende reden om een breuk te maken met de traditie van voortdurende verkleining van de structuurgroottes. Op weg naar de microkosmos begint de korreligheid van de materie – de atoomstructuur – een rol te spelen. De elektronenschillen van de atomen zijn de kleinste bouwstenen die zich onder normale omstandigheden tot duurzame technische structuren laten samenvoegen. Er is dus een principiële grens in zicht. Een geleider kan namelijk niet dunner zijn dan een atoom.

De CMOS-technologie stuit echter al veel eerder op grenzen, die soms merkwaardig overkomen. Zo zijn de geleiderbanen waarmee de transistors op een chip met elkaar verbonden zijn, nu al zo klein dat aluminiumatomen instabiel zouden zijn. Ze zouden net als kiezelstenen in een beekje door de elektronenstroom worden weggespoeld, wat in het jargon elektromigratie wordt genoemd. Een oplossing hiervoor is het gebruik van koper, dat bovendien nog beter geleidt, waardoor de signalen op de chip sneller worden doorgegeven. De geleiders liggen intussen zo dicht bij elkaar, dat daardoor duidelijk een capaciteitseffect optreedt, zoals bij condensators. Als daar bij het chipontwerp geen rekening zou worden gehouden, zou de chip «uit de maat» kunnen raken.

Sommige structuren van chiptransistors worden langzamerhand kleiner dan twintig nanometer. Daarmee komen zij op het terrein van de kwantumtheorie, het tunneleffect begint een rol te spelen. Er beginnen stromen te lopen waar bij grotere transistors eigenlijk geen stromen zouden horen te lopen - het elektronische sluisstelsel raakt lek. Weliswaar zijn deze stromen uiterst klein, maar bij miljoenen transistors zorgt de optelsom ervan voor aanmerkelijke verliezen: de processor wordt heet. Bovendien veroorzaken zwerfvliegende ladingen logische fouten die fataal kunnen zijn.

Bij zeer fijne structuren begint uiteindelijk – zoals de kwantumtheorie beschrijft – het golfkarakter van het elektron mee te spelen. Maar dit wordt door vele wetenschappers ook beschouwd als een nieuwe kans om tot een geheel ander soort elektronica te komen die kwantumcomputers mogelijk maakt. Zij leveren de sleutel tot een geheel nieuw wiskundig universum.

64bit-processor van AMD voor pc-toepassingen met 106 miljoen transistors in 130 nm-technologie.



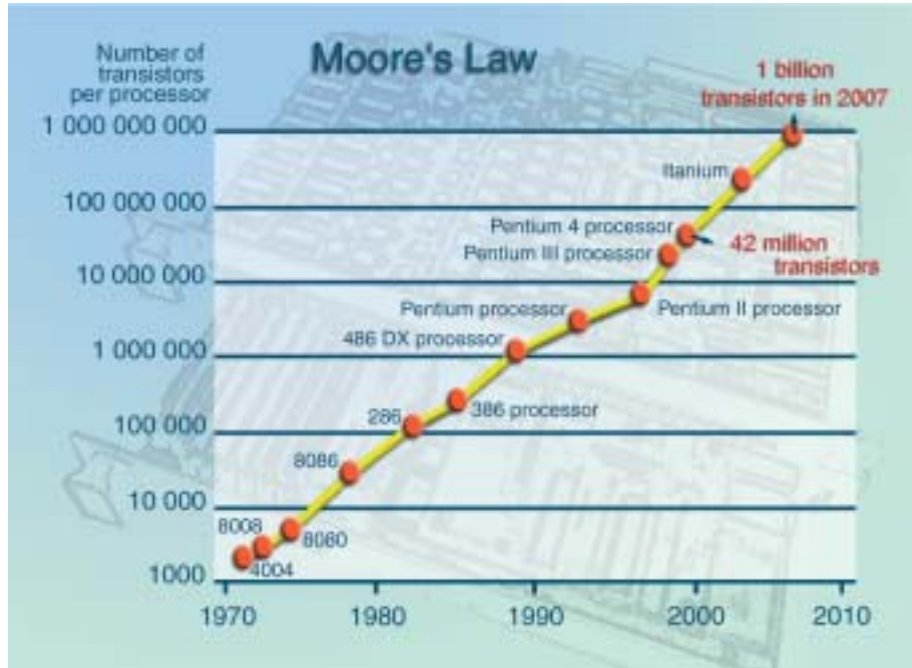
#### De grenzen aan de wet van Moore

**A**l in 1965 ontdekte Gordon Moore, medeoprichter van de firma Intel, dat de capaciteit van microchips ongeveer om de 18 maanden verdubbelt. Deze «wet» wordt nu ook in verband met een menselijk aspect in twijfel getrokken. Terwijl het aantal transistors op een chip elk jaar met ongeveer 50% groeit, klagen deskundigen dat de productiviteit bij het chip-design met niet meer dan 20% per jaar stijgt.

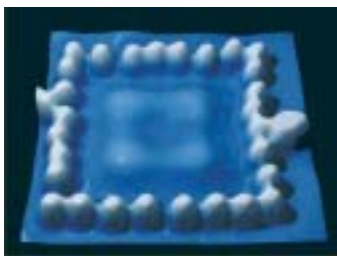
Deze is onder druk komen te staan door de gestage groei van de design-teams in de industrie, die nu met hun 250 tot 300 leden niet meer te managen blijken.

Eeuwige groei stuit ook op de tweede wet van Moore, die zegt dat bij kleinere structuurgroottes de productie-installaties duurder worden. Voor het zover is dat al deze beperkingen de ontwikkeling duurzaam in de weg staan, zal de nanotechnologie steeds meer ruimte in de nano-elektronica voor zich opeisen. Nu al hebben de moderne processoren structuren die kleiner dan 100 nanometer zijn en bevatten zij meer

dan 100 miljoen transistors. Als we uitgaan van de roadmap van de halfgeleiderindustrie – wier voorspellingen meestal nog worden overtroffen door de werkelijke technische ontwikkeling – dan staan ons over enkele jaren 45 nm-structuren te wachten (2010) en chips met meer dan een miljard transistors. Daarmee komen toepassingsmogelijkheden binnen bereik waarvan we nu alleen nog maar



Een siliciemeilandje op een siliciumkristal lost bij 450 °C langzaam op. Inzicht in dergelijke verschijnselen is belangrijk voor de kwaliteit van dunne films.

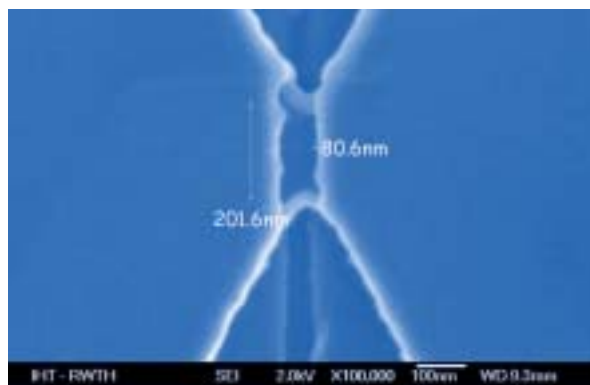


Mangaanatomen op zilver, aan de Christian-Albrechts-Universiteit van Kiel. Het distributiepatroon van de door het hek van mangaanatomen ingesloten elektronen is afhankelijk van de aangelegde elektrische spanning. Dergelijke effecten zijn van belang voor de elektronica van morgen.

## Phase Change RAM (faseveranderingsgeheugen)

De huidige opslagmedia zijn gebaseerd op uiteenlopende technologieën, die alle hun voor- en nadelen hebben.

Magnetomechanische harde schijven hebben een zeer hoge gegevensdichtheid en bewaren de gegevens ook zonder permanente voedingsbron, maar zijn zeer traag. DRAM's zijn snel, maar verliezen hun gegevens zonder voortdurende «refreshes» met stroompulsen. Flash-geheugens, die bijvoorbeeld in mp3-spelers, mobiele telefoons en camera's worden gebruikt, bewaren hun data ook zonder voeding, maar zijn minder snel dan DRAM's en kunnen maar ongeveer 1 miljoen maal beschreven worden. Toekomstige nanotechnologische opslagconcepten, die praktisch alleen de genoemde voordelen – hoge dichtheid, snel, geen dataverlies zonder voeding en lange levensduur – combineren, zijn volgens de huidige opvattingen de MRAM (Magnetic Random Access Memory) en het hieronder beschreven Phase Change RAM. Vaste stoffen kunnen zich in twee extreme toestanden, fasen, bevinden: in kristallijne vorm, waarin de atomen netjes geordend zijn zoals sparren in een productiebos, of als amorf materiaal, waarbij de atomen niet geordend zijn. Een bekende amorfe vaste stof is glas, bijvoorbeeld kwartsglas. Maar dezelfde stof, siliciumdioxide, is in de mineraalhandel ook verkrijgbaar in kristallijne vorm en heet dan bergkristal. Van die twee materiaaltoestanden, kristallijn en amorf, zullen we in de toekomst nog vaker horen, want ze zijn waarschijnlijk essentieel voor de massageheugens van de toekomst. Vele vaste stoffen laten zich op gemakkelijke of minder gemakkelijke wijze van amorf in kristallijne toestand brengen en omgekeerd. Deze, meestal door toevoer van warmte bereikte faseveranderingen hebben bij optische media ruime toepassing gevonden.

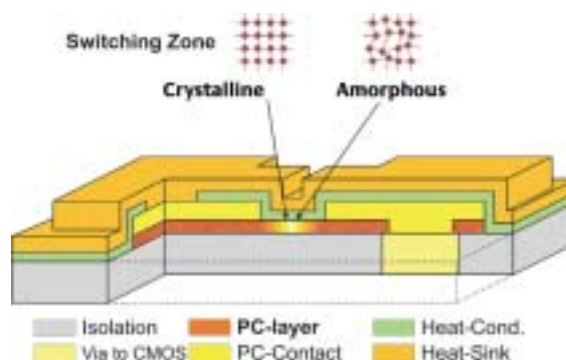


Wanneer bijvoorbeeld een opnieuw beschrijfbaar DVD wordt gebrand, verandert een speciale laag onder invloed van een door een laserpuls veroorzaakte warmteschok lokaal van kristallijne in amorfe toestand. Hierdoor veranderen de reflectie-eigenschappen zodat een leesbaar bitpatroon ontstaat. Door een langere en krachtigere inwerking van de laser worden de amorfe plekken weer kristallijn, zodat de DVD opnieuw kan worden beschreven.

De faseveranderingsmaterialen staat zeer waarschijnlijk nog een tweede carrière te wachten, namelijk in *elektronische* opslagmedia in de vorm van faseveranderingsgeheugens: Phase Change RAM. De faseverandering wordt daarbij niet langs optische, maar langs elektronische weg bereikt. Korte stroomstoten maken het materiaal amorf met een hoge elektronische weerstand, langere impulsen maken het materiaal weer kristallijn met een lage elektrische weerstand. Voor het uitlezen van de informatie wordt de weerstand van de geheugencellen bepaald. Bij Phase Change RAM's kan de opslagdichtheid zo hoog worden dat 1 Terabit informatie – bijvoorbeeld tien uur ongecomprimeerde video van de beste kwaliteit – op een postzegel past. Notebooks met dit soort geheugens kunnen meteen doorgaan waar de gebruiker eerder is opgehouden – booten is niet meer nodig.

Rechts: Met stroomstoten en de daarmee gepaard gaande warmtepulsen van uiteenlopende duur kunnen de bits van een faseveranderingslaag (Phase Change layer) van amorf in kristallijne toestand en omgekeerd worden gebracht. Het geoptrooieerde ontwerp van de RWTH Aachen maakt snelle geheugens met een laag energieverbruik mogelijk.

Links: Concrete uitvoering van een faseveranderingsgeheugen

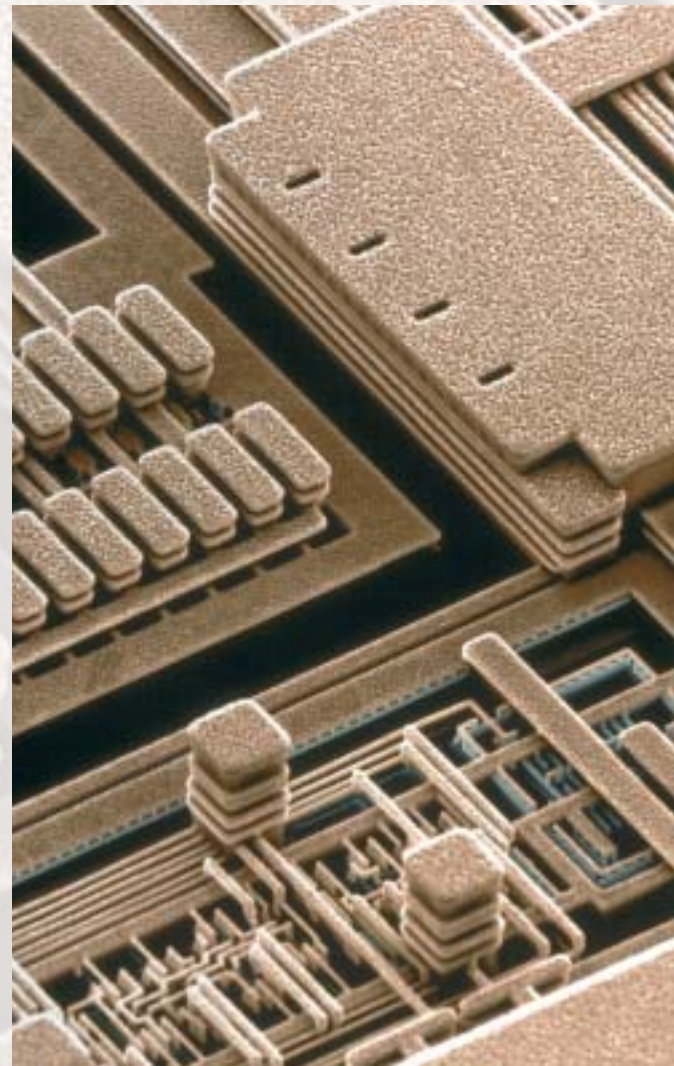


### Nano-elektronica - een wereld van netwerken

#### Chips op weg naar de derde dimensie

Op de schaarse grond van Manhattan waren wolvenkrabbers economisch gezien de beste keuze wanneer het erom ging nieuwe kantoor- en woonruimte te scheppen. Natuurlijke hebben ook chipontwerpers al in een vroeg stadium aan de derde dimensie gedacht, maar door allerlei tegenslagen bleven successen uit.

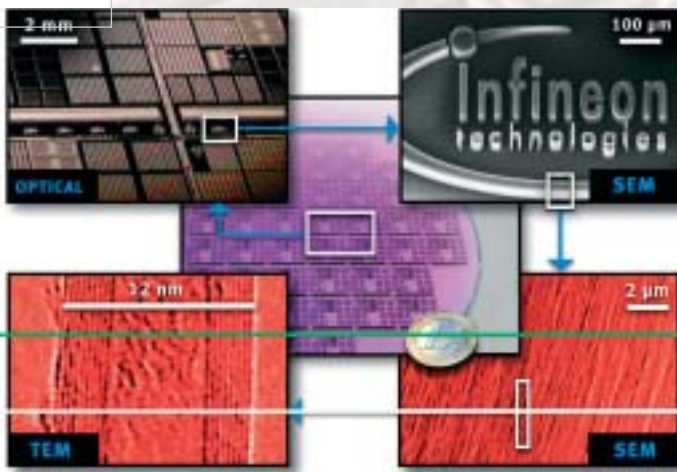
Toch zou het bedrijf Infineon AG uit München wel eens de weg naar de derde dimensie gevonden kunnen hebben. Dit bedrijf is er namelijk in geslaagd op reproduceerbare wijze koolstofnanobuisjes (CNT's) te laten aangroeien op siliciumwafers, de gepolijste schijven waarop chips worden aangebracht. De fullereenbuisjes zijn uitstekende elektrische geleiders waardoor zij weinig warmte verliezen produceren. Ze kunnen ook als mechanisch belastbare verbindingen, via's, tussen de verschillende bedradingslagen van een chip worden gebruikt. De onderzoekers van Infineon achten het op lange termijn mogelijk met CNT's een echte 3D-chiptechnologie te ontwikkelen, vooral omdat CNT's ook uitstekende warmtegeleiders zijn die de warmte uit het hart van de 3D-chip kunnen afvoeren.



10  $\mu\text{m}$

Gerichte aangroei van nanobuisjes op vooraf gedefinieerde plaatsen op een siliciumwafer door een met micro-elektronica compatibel procédé

Hedendaagse kunst: experimentele structuren voor spintronica-geheugens.

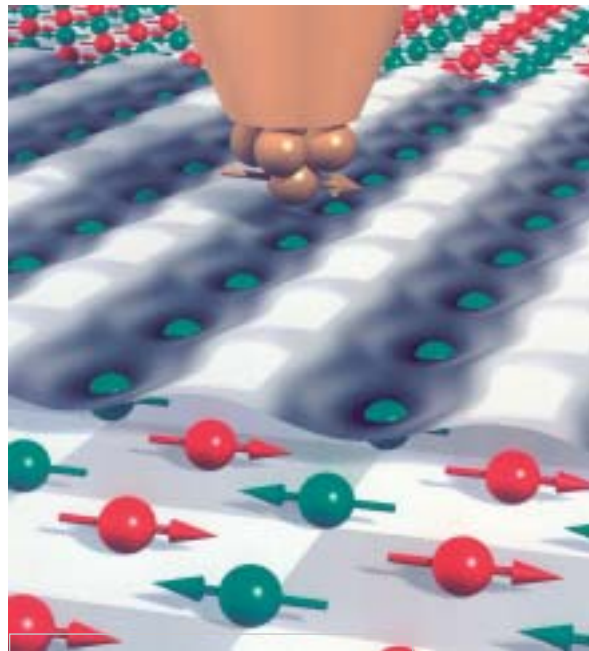




Zo ingewikkeld als een stad – door etsing blootgelegde koperverbindingen op een chip (IBM), afgebeeld met behulp van een rasterelektronenmicroscopie. Moderne chips hebben tot negen bedradingslagen.

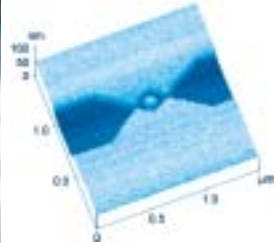


Afzonderlijke organische moleculen op een siliciumsubstraat. Opname van een rastertunnelmicroscopie, Ruhruniversität Bochum.

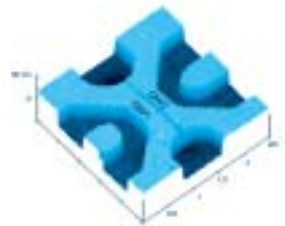


De magnetische probe van een spingepolariseerde rastertunnelmicroscopie tast de magnetische eigenschappen van afzonderlijke atomen af.

Vingeroefeningen voor de kwantumcomputer: Aharonov-Bohm-interferometer aan de Ruhruniversität Bochum, gestructureerd met een ATM-microscopie.



Tunnelgekoppelde kwantumdraden – Elektronen doorkruisen passages die in de klassieke theorie gesloten zouden zijn. Nanotechnologische experimenten beginnen de theorie in te halen.



In MRAM's, magnetische geheugenchips, wordt de informatie in de spin van de magnetische lagen opgeslagen. Deze ontwikkeling is interessant voor niet-vluchtig werkgeheugen waardoor zij op lange termijn de mechanisch aangedreven harde schijven kunnen gaan vervangen.

Aan de spintronica wordt ten slotte ook nog gedacht als technologie voor kwantumcomputers. Hiernaar wordt bijvoorbeeld aan de Universiteit van Würzburg onderzoek gedaan.

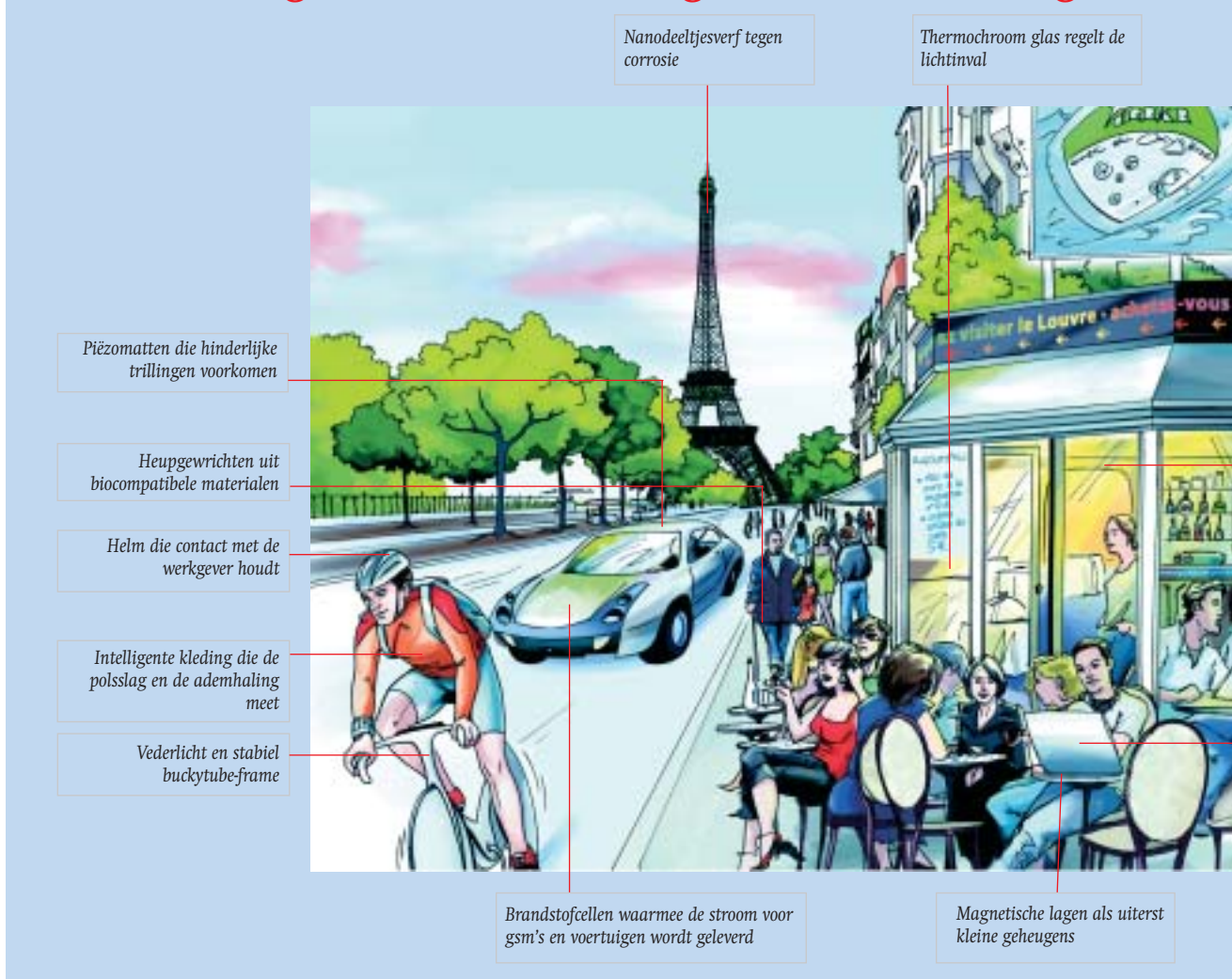
Nieuwe effecten voor grote harde schijven: De leeskop maakt met behulp van een uit meer dan 20 nanoschaallagen opgebouwd halfgeleiderelement gebruik van GMR (Giant Magnetic Resistance).



## Spintronica – Rekenen met rondtollende elektronen

Een ware revolutie, waardoor de wet van Moore tot ver in de toekomst geldig blijft, zou wel een door de zogenaamde spintronica-bouwstenen kunnen worden ontketend. Deze maken niet alleen gebruik van de elektrische eigenschappen van elektronen, maar ook van een magnetische: de elektronspin. De elektronspin manifesteert zich door een minuscuul magnetisch moment dat op ingewikkelde wijze reageert op andere magnetische omstandigheden. Hiervan kan in elektronische schakelingen gebruik worden gemaakt. Een toepassing van deze spintronica of magneto-elektronica heeft nu al ingang gevonden: nieuwe harde schijven beschikken over «spin valve»-leeskoppen in dunnefilmtechnologie, die dankzij hun gigantische magnetische weerstand (GMR) zeer kleine magnetische domeinen kunnen waarnemen zodat een zeer hoge opslagdichtheid mogelijk is.

### Nanotechnologie in het toekomstige leven van alledag



Piëzomatten die hinderlijke trillingen voorkomen

Heupgewrichten uit biocompatibele materialen

Helm die contact met de werkgever houdt

Intelligente kleding die de polsslag en de ademhaling meet

Vederlicht en stabiel buckytube-frame

Nanodeeltjesverf tegen corrosie

Thermochroom glas regelt de lichtinval

Brandstofcellen waarmee de stroom voor gsm's en voertuigen wordt geleverd

Magnetische lagen als uiterst kleine geheugens

Wanneer de nanotechnologie haar intrede in het dagelijks leven doet, brengt dit aan de buitenkant niet noodzakelijk dramatische veranderingen mee. De mensen zullen nog steeds graag hun buurtcafé bezoeken, misschien nog wel met meer plezier dan nu. Want het gedreun van de verbrandingsmotor is afgelost door een beschaafd zoemen en sissen, zoals we dat kunnen horen bij het sluiten van de tussenschotten in het ruimteschip *Enterprise*. De stank van uitlaatgassen heeft plaatsgemaakt voor een incidentele, nauwelijks waarneembare methanolgeur waarmee de brandstofcellen worden gevoed. De bediening zal vlot zijn: Door de gewenste gerechten op de elektronische menukaart aan te kruisen wordt de keuken al in paraatheid gebracht. Betalen gebeurt door het eurosymbool in de hoek van de menukaart met een betaalkaart aan te tikken. Muntgeld is er nog steeds als fooi, maar alleen omdat het zo prettig rinkelt. Wel is het van een laag antibacteriële nanodeeltjes

voorzien. De ruiten van het café zijn best duur geworden omdat ze zoveel functies hebben. Maar uiteindelijk blijken ze daardoor toch weer goedkoop te zijn: ze zijn namelijk vuilafstotend en krasbestendig, ze worden donkerder als het buiten lichter wordt, ze zetten licht om in elektriciteit en kunnen als reusachtig beeldscherm dienen. Het is gezellig om in het café of op het terras met andere mensen naar het wereldkampioenschap te kijken.

Met volwassen nano-elektronica worden aantrekkelijke toepassingen mogelijk zoals een echte PDA (Personal Digital Assistant) op kredietkaartformaat (niet dat het niet kleiner zou kunnen, maar het moet «handig» blijven).

Het zou een matzwart ding uit één stuk kunnen zijn, zonder herkenbare structuren. De zwarte kleur neemt zonlicht op dat in elektriciteit wordt omgezet. Het ding is ook met een vliedunne diamantlaag



OLED's als displays

Fotovoltaïsche film die licht in elektriciteit omzet

Lichtdioden die met gloeilampen kunnen concurreren. De terugverdientijd is slechts een jaar.

Gelaagd krasbestendig glas met lotuseffect

Menukaart van elektronisch karton

Nanobuisjes voor notebook displays

Vlekbestendige stof



Nanodeeltjes van het bedrijf Nanosolutions fluoresceren in UV-licht, maar zijn voor de rest geheel onzichtbaar. Omdat zij in vloeistoffen fijn verdeeld worden, kunnen zij met inkjettechnologie worden aangebracht zonder het ontwerp of de functie van het gemerkte voorwerp te beïnvloeden. Nanopigmenten zijn dan ook heel geschikt als bescherming tegen vervalsing.



«Fotochrom glas»: De lichtdoorlaatbaarheid van dergelijk glas is afhankelijk van de spanning – voor de klimaatregeling in het kantoor van morgen.

krasbestendig gemaakt. Daaronder zit nog een dunne piëzokeramische laag die geluid in spanning omzet en omgekeerd, zodat spraakcommunicatie mogelijk is. Optische en draadloze dataoverdracht ontbreken natuurlijk evenmin.

Deze PDA met een vlak objectief en een beeldconversiechip met zeer hoge resolutie zal kunnen «zien» en daarnaast ook als display kunnen fungeren. Daarmee zou het audiorecorder, camera, videorecorder, tv, gsm en, met GPS, navigatiehulpmiddel tegelijk zijn. Desgewenst zou hij in een Parijs' café de menukaart kunnen lezen, vertalen en verklaren, om daarna de keuze in vriendelijk Frans door te geven en de rekening te betalen.

Natuurlijk zou hij de stem en de vingerafdruk herkennen van degenen die de PDA mogen gebruiken om zich zo tegen misbruik te beschermen.



Virtueel toetsenbord: De aanraking van een geprojecteerd toetsenbord wordt door het systeem herkend en als toetsaanslag geïnterpreteerd.

Net als in andere sectoren van de industrie vervangt de nanotechnologie in de autotechniek kwantiteit door kwaliteit. Meer technologie en minder grondstoffen dus. De techniek verzoent zich met de natuur.

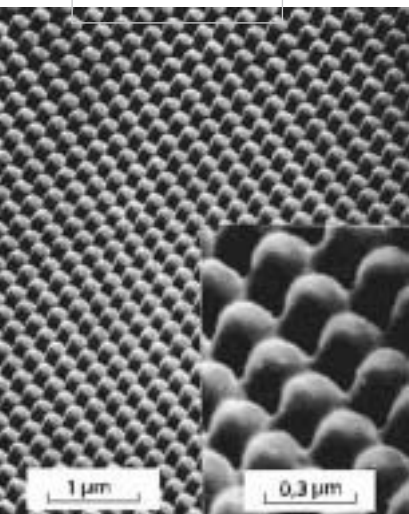
## Nanotechnologie in de auto

*Kleine noppen voor een grote transparantie. Met behulp van regelmatige microscopisch kleine noppenstructuren worden storende lichtreflecties van displays en ruiten in de auto voorkomen. Als voorbeeld dient het oog van de mot. Die wil 's nachts zoveel mogelijk zien zonder zelf gezien te worden.*

Voorruit kunnen dankzij coatings die met sol/gel-technieken zijn vervaardigd en harde nanodeeltjes bevatten, krasbestendig worden gemaakt. Ze blijven volledig transparant omdat de nanodeeltjes zo klein zijn dat ze het licht niet verstrooien. Het principe wordt al gebruikt voor brillenglazen, al werkt het nog niet geheel volmaakt. Autolakken kunnen van een lotusbladstructuur worden voorzien waardoor vuil gemakkelijk kan worden afgespoeld.

Bij de klimaatregeling in auto's kan geprofiteerd worden van voorruit met nanoschaalcomponenten waarvan de licht- en warmtereflectie elektrisch geregeld kunnen worden. Een dergelijk techniek zou bij toepassing in kantoorruimte veel energie kunnen besparen. De autoverlichting ten slotte, is

nu al voor een goed deel op nanotechnologie gebaseerd: de lichtdioden van hoogwaardige remlichten hebben – zoals alle LED's – ingenieuze nanometerdikke lagen waarin een elektrische stroom zeer efficiënt in licht wordt omgezet. Nog een pluspunt is dat LED's de stroom onmiddellijk omzetten in licht dat voor het menselijk oog waarneembaar is. Remlichten met gloeilampen doen daar iets langer over. Dit kan een verschil in remweg betekenen van enkele meters. Inmiddels is de lichtsterkte van LED's zo hoog dat groepjes LED's samen voldoende licht voor het dimlicht van de koplampen kunnen leveren.



LED's in verkeerslichten zijn zuinig in onderhoud en gebruik. De investeringen kunnen in één jaar worden terugverdiend.

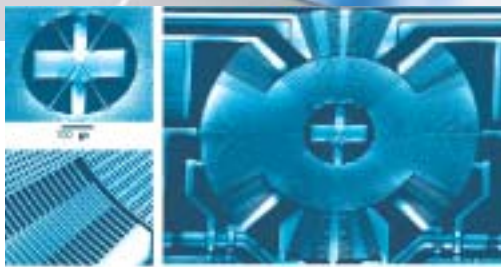




De huidige elektronische veiligheidssystemen zoals ABS en ESP grijpen in gevaarlijke situaties in terwijl toekomstige systemen het gevaar zelfs kunnen vermijden.



Injector van een dieselmotor: Toekomstige systemen zullen van een enkele tientallen nanometers dikke diamantachtige slijtbeschermingslaag worden voorzien.



Evenwichtsorganen van silicium: toerentalsensor voor voertuigstabilisatie



Witte LED's zijn zo krachtig geworden dat zij in de toekomst als lichtbron van het dimlicht kunnen worden gebruikt.

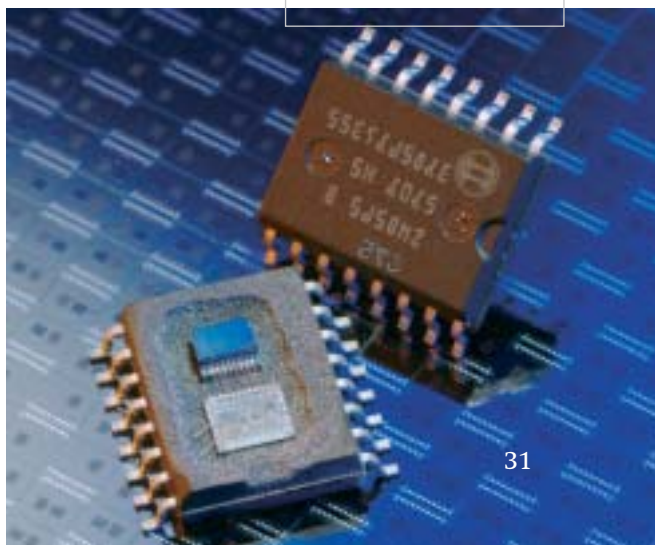
De laklaag van de auto kan dankzij nanotechnologie als zonnecel worden gebruikt (een nog niet bestaande optie). De energie daarvan zou op de parkeerplaats de accu kunnen opladen – met conventionele zonnecellen is deze optie al verkrijgbaar – of het interieur met een warmtepomp koel kunnen houden. De warmtepomp zou weer als een nanotechnologisch

systeem van halfgeleiderlagen zonder bewegende delen kunnen zijn uitgevoerd. Wanneer omgekeerd de aanzienlijke warmteverliezen van een verbrandingsmotor aan een dergelijk halfgeleidersysteem wordt toegevoerd, ontstaat weer stroom – zie ook «Thermo-elektriciteit systemen» onder «Energie en milieu».



Dankzij brandstofcellen (zie blz. 33) wordt de auto schoner in gebruik. Wanneer de waterstofhoudende brandstof nu ook nog uit duurzame energiebronnen komt, is deze vorm van aandrijving uitgesproken milieuvriendelijk.

Rechts: Elektronica voor de reddende knal: een vertragingssensor voor een front airbag



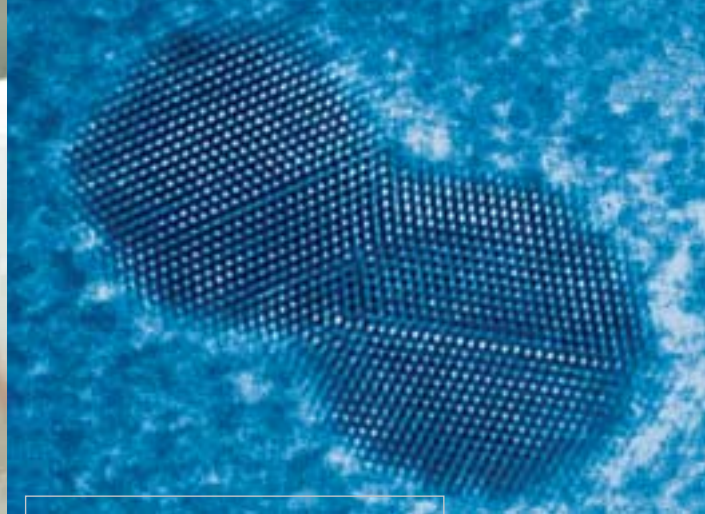
Nanoschalige geur capsules moeten leer aantrekkelijk maken.

### Goudkatalysators

Nanotechnologie kan ook goud aan een nieuwe carrière helpen. Terwijl «grof» goud het als katalysator veel minder goed doet dan platina, leveren gouddeeltjes op nanoschaal die op een poreus dragermateriaal zijn aangebracht een bruikbare katalysator op die al vanaf de koude start stikstofoxide en koolmonoxide in onschadelijke stoffen ontleedt. Van gouden nanodeeltjes wordt ook veel verwacht als katalysator voor brandstofcellen.

Natuurlijk zou al deze vooruitgang ook ten goede komen aan vervoersmiddelen die niets met auto's van doen hebben. Zo zou bij de fiets heel goed geprofiteerd kunnen worden van nanotechnologie, vooral bij brandstof- en zonnecellen. Daardoor zou een «perpetuum mobile» kunnen worden gemaakt, dat alleen gedragen door licht, lucht en water vederlicht door het landschap zoekt, dat alles dankzij een koolstofnanovezelframe, LED-verlichting, enz.

Urinoir met vandalismebestendige microsysteemtechniek voor wegrestanten. De nanoschaal lotuseffectcoating is erg onderhoudsvriendelijk.



Gouden nanodeeltjes voor nieuwe katalysators

### Goud tegen luchtjes

Katalysatoren met gouden nanodeeltjes worden intussen ook getest als geurbestrijders. In kleine airco-installaties voor auto's bijvoorbeeld, kunnen ze worden gebruikt om hinderlijke geuren te bestrijden die veroorzaakt worden door bacteriën die zich in zulke apparaten nestelen. In Japan doen zij zelfs al dienst in toiletten.

### Nanotechnologie in wegrestanten

Automobilisten kunnen in wegrestanten in ieder geval al kennismaken met microsysteemtechniek. In de urinoirs van moderne toiletten zijn sensoren aangebracht die temperatuurstijgingen doorgeven aan de elektronica daarachter die de spoeling van de urinoirs aanstuurt. De elektrische energie hiervoor wordt geleverd door een miniwaterturbine. Het systeem kan niet – zoals bij systemen met infraroodogen – met kauwgom buiten gevecht worden gesteld.

Nanotechnologische urinoirs gaan eenvoudiger én slimmer te werk. Dankzij het lotuseffect van de bassinwand parelen vloeistoffen langs de wand naar beneden, waarna zij via een geurslot worden afgevoerd zonder sporen achter te laten – of dat ook voldoet moet de praktijk uitwijzen. Particuliere huishoudens kunnen natuurlijk ook van dergelijke technieken profiteren.



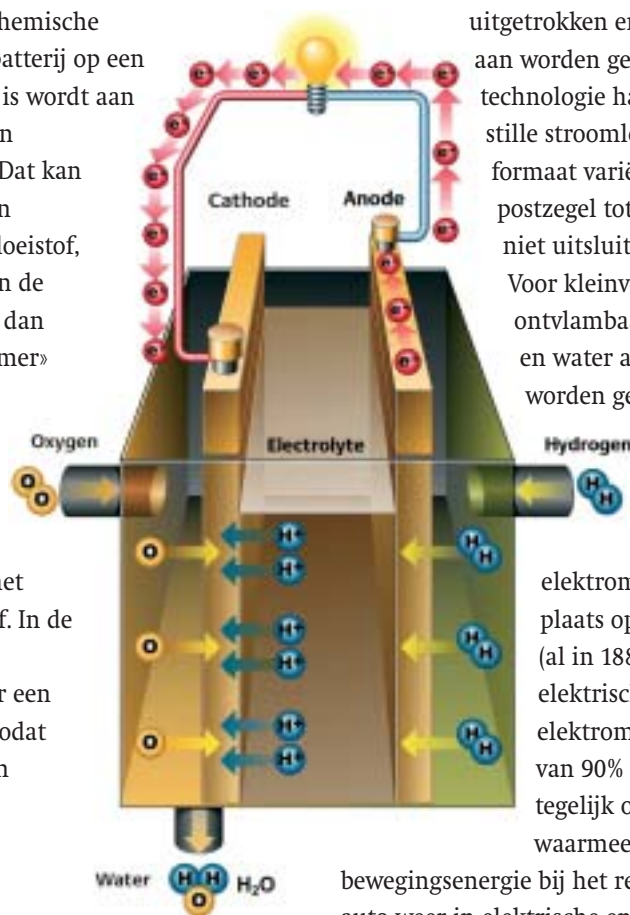
Metalen «nanoblokjes» van BASF kunnen met hun nanoporositeit grote hoeveelheden water opslaan.

## De brandstofcel – een aggregaat voor duizend-en-één toepassingen

**B**randstofcellen lijken op batterijen: ze leveren stroom. Terwijl de chemische inventaris van een batterij op een gegeven moment uitgeput is wordt aan de brandstofcel continu een energiedrager toegevoerd. Dat kan zuiver waterstof zijn, of een waterstofhoudend gas of vloeistof, zoals aardgas of raapolie. In de twee laatste gevallen moet dan het waterstof in een «reformer» afgesplitst worden voordat het in de brandstofcel kan worden gebruikt. Bij de reactie tussen waterstof en zuurstof migreren elektronen van het waterstof naar het zuurstof. In de brandstofcel worden deze elektronen doorgeleid naar een uitwendige stroomkring, zodat bijvoorbeeld een motor kan worden aangedreven. Als reactieproduct ontstaat uiteindelijk zuiver water.

Brandstofcellen hebben een hoog rendement, dat – afhankelijk van het type – vrijwel onafhankelijk van de grootte is. Er bestaan talloze varianten. De nanotechnologie kan deze techniek perfectioneren met behulp van keramische folies, nano-structureerde oppervlakken en katalytisch actieve nanodeeltjes. In de laatste paar jaar is wereldwijd 6-

8 miljard dollar voor brandstofceltechnologie uitgetrokken en er kan redelijkerwijs niet aan worden getwijfeld dat deze technologie haar nut zal bewijzen. Deze stille stroomleveranciers met een formaat variërend van dat van een postzegel tot dat van een container zijn niet uitsluitend voor auto's geschikt. Voor kleinverbruikers zou een niet ontvlambaar mengsel van methanol en water als waterstofbron kunnen worden gebruikt; getankt zou dan kunnen worden in de supermarkt.



bewegingsenergie bij het remmen van een auto weer in elektrische energie kan worden omgezet. De in nieuwe elektromotoren en generatoren gebruikte magnetische materialen met hun uitstekende prestaties zijn natuurlijk ook nanokristallijn.

De brandstofcel kan de elektromotor opnieuw de hoogste plaats op het erepodium bezorgen (al in 1881 reed in Parijs de eerste elektrische auto). Alleen een elektromotor kan een rendement van 90% halen en alleen hij kan tegelijk ook als generator dienen waarmee bijvoorbeeld de

Brandstofcellen zullen ook in particuliere huishoudens hun intrede doen en tegelijkertijd warmte en stroom leveren.





Een ontbijt met gevolgen in het jaar 2020:

**Bestaat er nog koffie? Jazeker! En sinaasappelsap? Ook, natuurlijk! Maar de verpakking ervan zou wel eens heel bijzonder kunnen zijn, omdat zij als een soort «elektronische tong» het sap in de verpakking voorproeft om te kijken of het niet bedorven is.**

**O**ok zou met een sensor aan de buitenkant een analyse van het transpiratievocht van de vinger kunnen worden gemaakt om een eventueel tekort aan calcium of andere mineralen op te sporen, dat weer met «functional food» zou kunnen worden opgeheven. Of met traditionele geitenkaas, het OLED-etiket op de verpakking weet wat het beste is.

apatiet en eiwit, het natuurlijke tandmateriaal, die moeten helpen de tand weer in de oorspronkelijke staat terug te brengen (zie ook biomineralisatie). In dagcrème die nu al in de winkel ligt, zitten nanobolletjes van zinkoxide tegen schadelijke UV-straling. De bolletjes zijn vanwege hun nanoafmetingen onzichtbaar, zodat de crème niet wit is maar volkomen doorzichtig.

### Spionnen aan de vingertop

**N**anotechnologie, nano-elektronica, microsysteemtechniek en consorten maken complexe analyseapparaten mogelijk die ook voor particuliere huishoudens geschikt zijn. Een kleine prik in de vinger is in de toekomst al genoeg om een bloedanalyse te maken. Zijn de cholesterolwaarden niet te hoog? Ligt de suikerspiegel wel binnen de normale grenzen? De resultaten zouden via internet naar het dichtstbijzijnde nanomedisch centrum kunnen worden gemaïld, waar opdracht kan worden gegeven voor een nauwkeurigere analyse of waar in microreactoren een op de persoon in kwestie afgestemd medicijn kan worden samengesteld. Dit medicijn kan door het lichaam worden getransporteerd door nanodeeltjes met een zodanige bekleding dat zij zich alleen aan de ziektehaard kunnen hechten. Kortom: een haarfijne toediening van medicijnen. Een arts waarop je kan vertrouwen!

*Afbeelding linksboven:  
Dankzij versfolies met nanodeeltjes kunnen levensmiddelen langer worden bewaard.*

*Afbeelding rechtsboven:  
een intelligente verpakking met transponderchip op polymeerbasis*

*Intelligente omgeving:  
Een - dankzij nano-elektronica - slimme spiegel geeft les in tanden poetsen.*





*Diagnostiek van morgen. Dankzij nanotechnologie blijven steeds ingewikkeldere onderzoeken toch betaalbaar.*

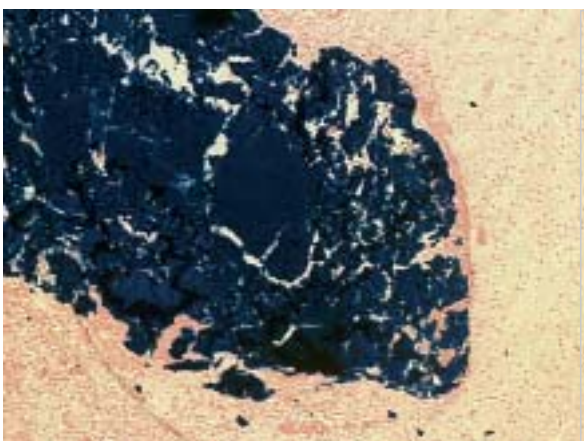
## Supramoleculaire medicijnencapsules

**D**e voorgeschreven geneesmiddelen zouden op uiterst geraffineerde wijze kunnen worden toegediend. Zij zouden in supramoleculaire holle moleculen (wordt aan gewerkt) kunnen worden ingebracht, een soort transportcontainers op nanoschaal met antennes waarop op antistoffen gelijkende eiwitten zitten. Wanneer die in contact komen met voor de ziekteverwekker karakteristieke structuren – zoals de omhulling van kankercellen of bacteriën – klampen ze zich hieraan vast, waarna ze een signaal naar het holle molecuul sturen dat daarop openklapt en zijn inhoud vrijgeeft. Met dergelijke nanotechnologische methoden kunnen geneesmiddelen in hoge doses tot bij de ziektehaard worden gebracht zonder de rest van het organisme te belasten.

## Magnetische deeltjes in de strijd tegen kanker

**M**et soortgelijke trucs kunnen ook magnetische nanodeeltjes aan een tumor worden gehecht zodat ze daarna door een wisselend magnetisch veld kunnen worden verhit om de tumor te vernietigen. Nanodeeltjes kunnen ook de als filtersysteem dienende «bloed-hersenbarrière» passeren, zodat zij tot bij een hersentumor kunnen worden gebracht.

Deze zogenaamde magneetvloeiostofhyperthermie werd door een werkgroep rondom de bioloog Andreas Jordan ontwikkeld. Inmiddels is een begin gemaakt met de klinische beproeving ervan.



Kankercellen van een glioblastoomhersentumor hebben op het raakvlak met gezond weefsel magnetische nanodeeltjes met een speciale omhulling opgeslorpt. Wanneer deze deeltjes met behulp van een elektromagnetisch veld worden verhit wordt de tumor vatbaar voor andere, aanvullende behandelingen. In 2005 zou deze techniek al klaar moeten zijn voor toepassing in de praktijk.

## Sortermachines op chipformaat

**M**icrosysteemtechniek en nanotechnologie – de scheidslijn hiertussen is dun – verdienen zich in de medische sector alleen al terug doordat zij de bestaande technieken kleiner en ook goedkoper maken, soms wel meer dan honderdduizend maal. Dat geldt bijvoorbeeld voor de uitgekende machines die miljoenen cellen, bijvoorbeeld bloedcellen, op bepaalde kenmerken controleren en levend eruit kunnen pikken. Dat zou als volgt in zijn werk kunnen gaan:

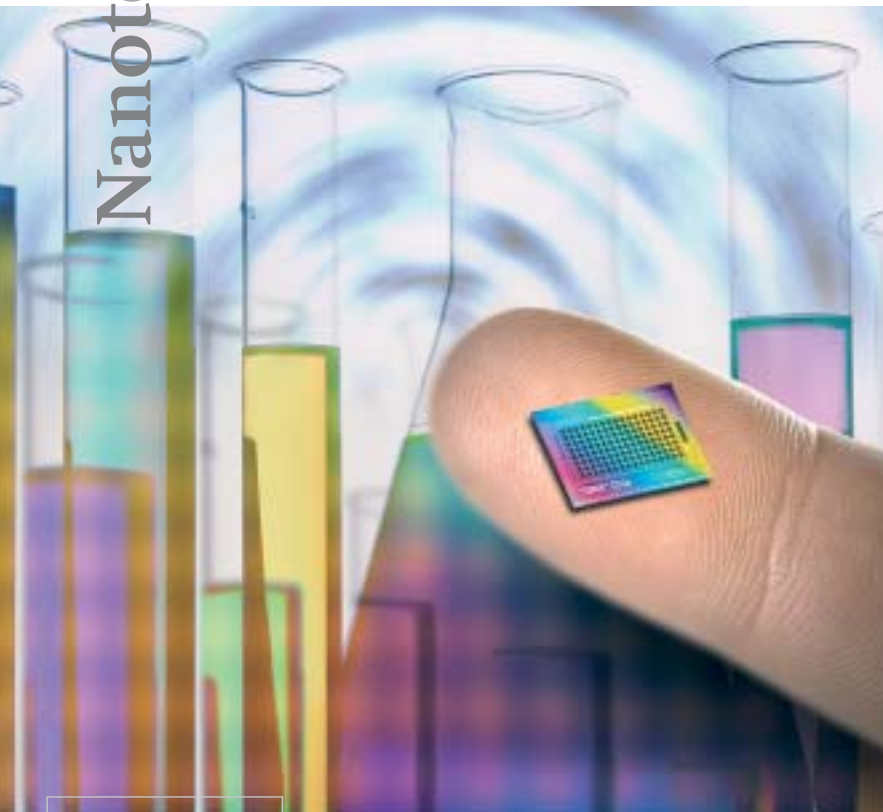
### Gezondheid

Met nanodeeltjes als grondstof kunnen foutarme, betrouwbare keramische lichamen voor bijvoorbeeld implantaten worden vervaardigd (gesinterd).

Aan het bloed worden antilichamen toegevoegd die zich alleen vastklampen aan een bepaald soort cellen en niet aan andere. Ze bevatten tevens een fluorescerende stof die in laserlicht oplicht. In de celsorteerder passeren de cellen, gevat in druppeltjes, een laser. Wanneer er fluorescentie optreedt wordt het druppeltje en daarmee ook de cel met elektrische velden afgebogen naar een verzamelreservoir, een techniek die voor een deel van de inkjetprinter is afgekeken. Celsorteerders maken gebruik van geavanceerde micromechanica, optica en elektronica



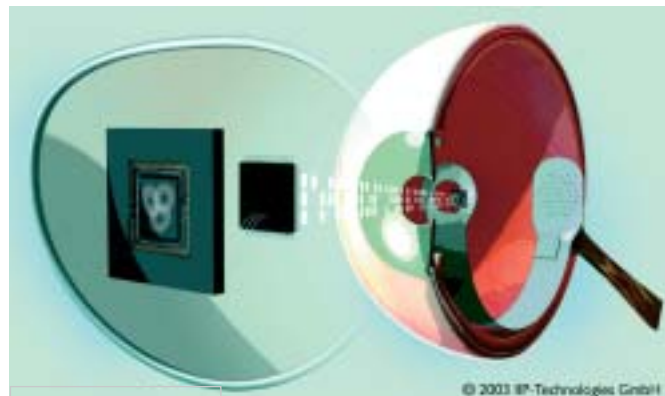
enkele vierkante centimeters groot worden, enorm dus vergeleken bij de erop aangebrachte nano-instrumenten, omdat hierin vloeistoffen zouden moeten circuleren die in de nanokosmos zo stroperig als honing zijn en daarom veel plaats nodig hebben. Het laboratorium-op-een-chip zal een revolutie in de biologie te weeg brengen, omdat het in de toekomst met zo'n nanolab mogelijk wordt stap voor stap te volgen wat zich in afzonderlijke cellen afspeelt. Uiteindelijk zou hiermee een soort video kunnen worden gereconstrueerd, een video van het leven. En de cel kan niet alleen geobserveerd, maar ook geprikkeld worden om te zien hoe ze daarop reageert teneinde zo het raadsel van het leven te ontsluiten.



Klein maar fijn, het «lab-on-a-chip», een laboratorium in vingertopformaat

en zijn daarom erg duur. Met nanotechnologie kan de omvang van de nu noch kastgrote celsorteerders worden teruggebracht tot postzegelformaat. Deels ook zullen het wegwerpdeeltjes worden. De vooruitgang op medisch gebied kan zo in een stroomversnelling worden gebracht.

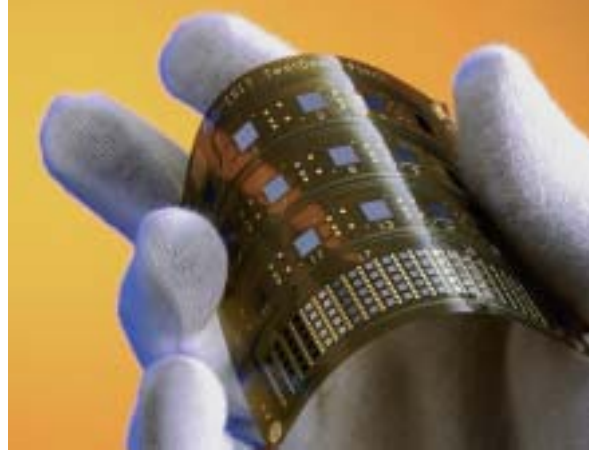
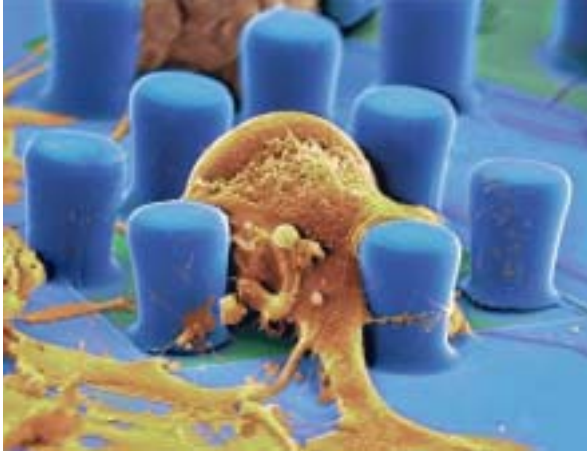
Nog hoogwaardigere nanotechnologie is nodig voor het «lab-on-a-chip». Daarop moeten volgens toonaangevende ontwikkelaars miljoenen nano-instrumenten komen die op gecoördineerde wijze een bepaalde taak moeten uitvoeren. De chips zouden



Netvliesimplantaat

### Neuroprothetiek

Een uiterst geavanceerde toepassing van de microsysteem- en nanotechnologie gaat momenteel de experimentele fase in: een zelflerend netvliesimplant. Het moet retinitis pigmentosa-patiënten die blind zijn geworden een deel van hun gezichtsvermogen teruggeven.



Afbeelding rechts: Dunne siliciumchips op buigzame dragers die bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden als intelligente etiketten die op de verpakking van levensmiddelen of in kledingstukken kunnen worden aangebracht.

Afbeelding links: Aansluiting van elektrische contacten op zenuwcellen

Het systeem bestaat uit een kleine camera in het brilmontuur die beelden uit de omgeving aan een speciale zelflerende signaalprocessor toevoert. Deze processor stuurt de beeldgegevens draadloos door naar het oog van de patiënt. Daar bevindt zich een flexibele folie met miniatuurelektroden die op de huid van het netvlies zijn aangebracht en daaraan de overeenkomstige prikkels toevoeren. Als dit lukt is de eerste «mens-machine-interface» voor het gezichtsvermogen een feit. Ook talloze doven kunnen, met een cochleaire implant, geholpen worden. Dankzij nanotechnologie worden zulke protheses steeds beter.

## Thuiszorg

Door een betere voeding en gezondheidszorg bereiken steeds meer mensen een steeds hogere leeftijd. Aan deze op zichzelf wenselijke ontwikkeling kleeft ook een natuurlijk nadeel, namelijk dat ook steeds meer mensen op hulp zijn aangewezen. Deze hulp kan gedeeltelijk door nano-elektronica worden geboden. Te denken valt bijvoorbeeld aan in de kleding ingeweven sensoren en

signaalverwerkingscapaciteit waarmee de gezondheidstoestand van ouderen – polsslslag, ademhaling en stofwisseling – continu in de gaten kan worden gehouden. Bij storingen waarschuwt dit medisch jasje zelf de huisarts of naasten. De locatie wordt doorgegeven door een eveneens ingenaaide GPS- of Galileo-module (Galileo is de toekomstige Europese variant van GPS).

## Automatische verpleegster

Het «oude Europa» haalt voorlopig nog zijn neus op voor geautomatiseerde hulpmiddelen, maar in Japan staat de massaproductie van mobiele robots al voor de deur. Het is best mogelijk dat dit uiteindelijk in geautomatiseerde ziekenverzoekers uitmondt, er wordt in ieder geval aan gewerkt. De robotica zal de steeds groeiende rekencapaciteit van de nano-elektronica zonder problemen in grote hoeveelheden kunnen absorberen.



Robots met inlevingsvermogen van de universiteit van Oxford. Als eendenhoeders zijn zij al geschikt, maar van automatische verpleegsters wordt meer verwacht.



Intelligente kleding: Geïntegreerde elektronica speelt mp3-muziek af, leidt ons door de stad en houdt de vinger aan de pols: lijfelijk ondervonden meerwaarde dus.



Een spectaculaire rendementsverbetering dankzij LED's

**Anders dan bij technologische ontwikkelingen in het verleden maakt nanotechnologie economische groei bij een lager grondstoffenverbruik mogelijk.**

**Economische ontwikkeling «à la nano»: meer comfort bij minder materiaalverbruik**

In Duitsland wordt ongeveer 10% van de opgewekte elektriciteit voor verlichting gebruikt. Met LED's, licht emitterende diodes, kan inmiddels ook wit licht worden gemaakt zodat zij de gangbare verlichting kunnen gaan vervangen. Zo worden grote besparingen mogelijk want LED's gebruiken voor dezelfde hoeveelheid licht maar ongeveer de helft van

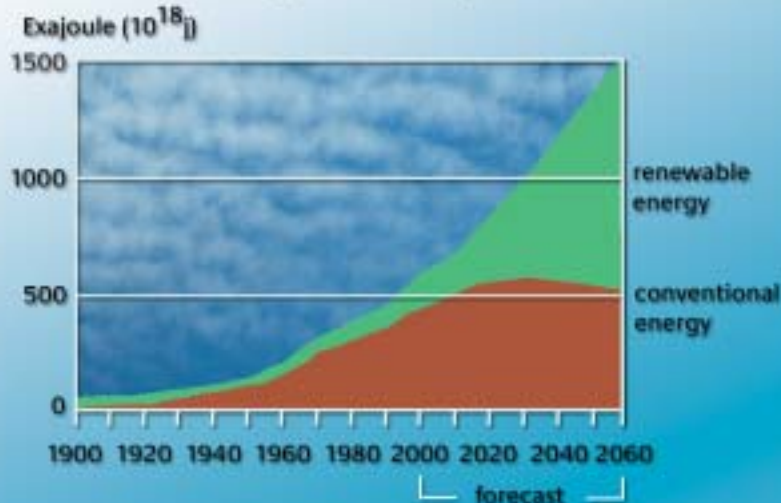
het vermogen van een gewone gloeilamp. Het Duitse bondsministerie voor milieu heeft het besparingspotentieel in de verlichtingssector op 77% becijferd.

In de Europese huishoudens staan miljoenen tv's met beeldbuizen die binnenkort zullen worden vervangen door apparaten met LCD- of op langere termijn OLED-schermen. Met beide technieken zou het energieverbruik met 90% kunnen dalen. LED's en OLED's worden met nanotechnologie vervaardigd. Wanneer miljoenen huishoudens één kilowatt besparen, zijn dat samen gigawatts, de capaciteit van enkele grote elektriciteitscentrales.

Het door brandstofcellen geleverde vermogen kan snel worden aangepast. Inmiddels doen de eerste verwarmingssystemen met brandstofcellen hun intrede in de huishoudens. Daarmee wordt – instelbaar – zowel warmte als stroom opgewekt. Wanneer miljoenen huishoudens over een dergelijk apparaat beschikken kunnen deze via het elektriciteitsnet en internet met de grote centrales worden verbonden waardoor een theoretische maximumcapaciteit van 100 gigawatt wordt bereikt.

Een prognose van Shell. Voor duurzame energie is nanotechnologie de beste keuze.

### World energy consumption







Op lange termijn zou het aardgas kunnen worden vervangen door waterstof uit hernieuwbare bronnen. De nanotechnologie speelt hierin, met haar nieuwe materialen en katalysatoren, een rol.

Keramische membranen met nanofilters worden van steeds grotere betekenis voor de zuivering van vloeistoffen en ook voor de vervaardiging van schoon drinkwater.

Nanotechnologie maakt zonne-energie lucratief. Op grond van de eigenschappen van halfgeleiderverbindingen van indium, gallium en stikstof worden zonnecellen met een rendement van 50% voor mogelijk gehouden. Maar rendement is niet het enige criterium, de nanotechnologie zorgt er ook voor dat de kosten van zonnecellen drastisch worden verlaagd dankzij dunnefilm- of deeltjestechneken. Prototypes van zonnecelfilms die met soortgelijke coating-technieken zijn gemaakt als voor LED's en OLED's worden gebruikt, zijn in staat om met 30 gram materiaal een vermogen te leveren van 100 Watt, een radicale stap naar materiaalbesparing bij de opwekking van energie uit de koker van Solarion in Leipzig.

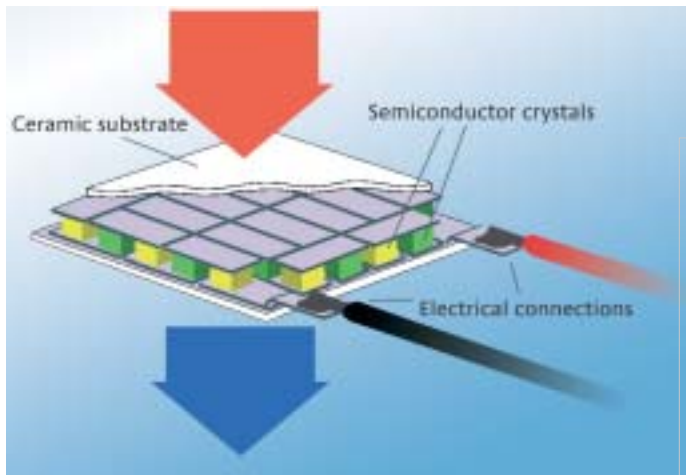
Een rendement van 5% claimen onderzoekers van Siemens voor de nieuwe organische zonnecellen die op plastic film kunnen worden gedrukt en uitermate goedkoop moeten worden. De fotolaag is nog maar 100 nanometer dik en de levensduur ligt inmiddels op enkele duizenden uren zonlicht. De eerste producten met deze technologie worden in 2005 verwacht.

*Breed spectrum: De glazen gevel van een hal van het Park Hotel Weggis aan het Vierwoudstedenmeer wordt met 84 000 LED's van Osram verlicht in alle kleuren van de regenboog.*

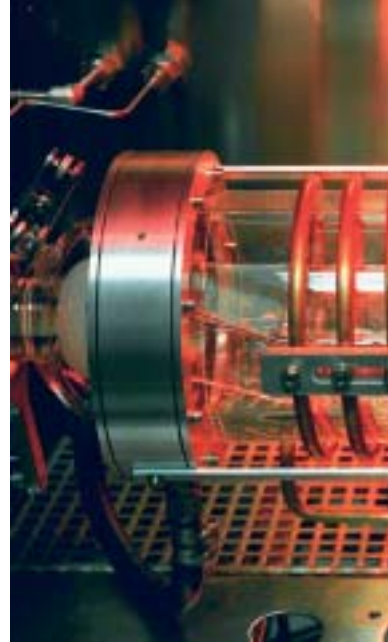
*OLED's, organische LED's, zullen in de toekomst steeds vaker in beeldschermen worden toegepast.*



### Energie en milieu



Conventionele thermo-elektrische module : Een warmtestroom wordt door halfgeleiderblokken in elektrische stroom omgezet. Nanostructuren verhogen het rendement van deze techniek waardoor nieuwe markten ontstaan.



De nanotechnologie blaast allerlei oude ideeën, die door inefficiënt gebruik van de beschikbare materialen gesneuveld waren, weer nieuw leven in. Neem bijvoorbeeld thermo-elektrische elektriciteitsopwekking.

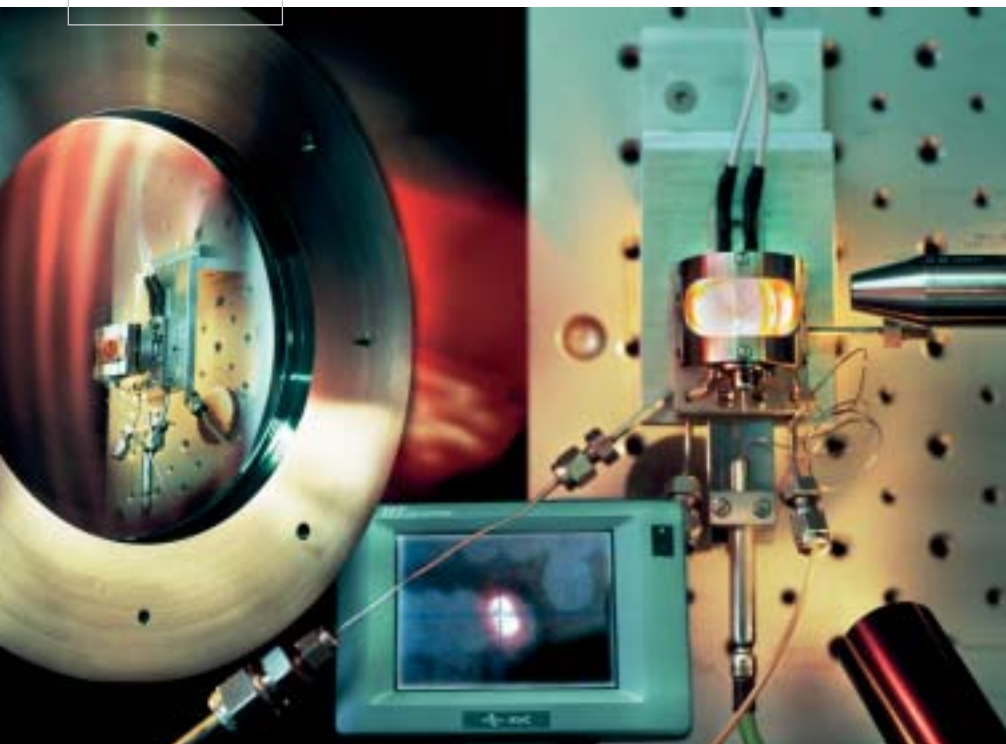
#### Stroom uit warme en warmte uit stroom: thermo-elektriciteit

Er bestaat een lange reeks van bekende, eerbiedwaardige natuurkundige verschijnselen die, ver van de openbaarheid, in uithoeken van de markt een eerder bescheiden rol spelen. Zo is er de koelbox die aan de sigarettenaansteker van de auto wordt aangesloten en dan werkelijk koelt. In het binnenste van deze koelbox is onzichtbaar een erfenis

aan het werk van Jean-Charles Athanase Peltier, een Franse geleerde die in 1834 het naar hem genoemde effect ontdekte: Wanneer stroom door het contactvlak van twee verschillende metalen loopt, wordt aan de ene zijde hiervan warmte en aan de andere zijde koude geproduceerd. Dertien jaar eerder had de Duitser Thomas Johann Seebeck het omgekeerde

effect ontdekt, namelijk dat wanneer het contactvlak van twee verschillende materialen wordt verwarmd hierover een elektrische spanning ontstaat. Beide heren zouden dankzij de nanotechnologie nieuwe roem oogsten omdat dankzij de nanotechnologie nieuwe materialen kunnen worden gemaakt waarin deze twee effecten – eindelijk – een hoog rendement hebben. Voor de vervaardiging van dergelijke materialen worden al weer dezelfde soort machines gebruikt als waarmee LED's worden gemaakt.

Chemische microreactietechnologie voor een efficiënte vervaardiging van exotische materialen





Aixtron-reactoren voor onderzoekdoeleinden (links) en voor de tot op het atoom nauwkeurige vervaardiging van dunne films van verbindingshalfgeleiders (rechts)

Deze machines kunnen op een ongeveer één nanometer dikke laag bismuth telluride een vijf nanometer dikke laag antimoontelluride opbrengen en dit proces herhalen totdat een halfgeleiderfilm is ontstaan waar Peltier en Seebeck verrukt van zouden zijn. Wanneer er stroom door loopt, wordt de ene zijde van de film heet en de andere koud. De film laat zich zeer nauwkeurig structureren waardoor hij kan worden gebruikt voor de precisiekoeling van chips of voor de besturing van minuscule reactievaten in een lab-on-a-chip waarin DNA wordt vermeerderd met behulp van snelle temperatuurwisselingen. Het is goed denkbaar dat Peltier-elementen dankzij hun snel toenemende rendement in de gehele koude-industrie het middel bij uitstek zullen worden. Omgekeerd, wie over goedkope warmtebronnen zoals aardwarmte beschikt, kan met dergelijke thermo-elektrische lagen goedkoop elektriciteit maken. IJsland zou wel eens een energiegigant kunnen worden dankzij langs elektrolytische weg gemaakte waterstof.

In de chemische industrie zullen technieken zoals deze worden toegepast om de gigantische hoeveelheden afvalwarmte – op geluidloze, bijna onzichtbare en efficiënte wijze – in elektriciteit om te zetten. Alweer dankzij nanotechnologie.

## Thermofotovoltaïsche systemen

**T**hermo-elektriciteit is niet de enige manier om afvalwarmte elegant in stroom om te zetten. Bij thermofotovoltaïsche opwekking (TPV) wordt gebruik gemaakt van de (onzichtbare) warmtestraling van hete voorwerpen: infraroodstraling.

De nanotechnologie is verantwoordelijk voor de emitterstructuren, die het spectrum van de warmtebronnen aan de spectrale gevoeligheid van de TPV-cellen moeten aanpassen.



Bij thermofotovoltaïsche cellen is kaarslicht al voldoende om een radio te laten spelen.



Wolframemitter met nanostructuur voor de aanpassing van het infraroodspectrum.

## Nanotechnologie voor sport en vrije tijd

Door de voortdurende miniaturisering in de technologie, nu ook tot op nanoschaalniveau, keren oude ideeën die het vroeger niet gehaald hebben weer terug, zoals het idee van vliegen op zonlicht.

De Icaré II, een zonnevliegtuig dat even zwaar als een gewoon zweefvliegtuig kan worden belast maar op eigen kracht kan opstijgen.

Boven: Na een officieuze recordvlucht van Stuttgart naar Jena.

In juni 1979 vloog Bryan Allen in zijn *Gossamer Albatros* uitsluitend op eigen pedaalkracht over het Kanaal. Hij won daarmee de Cremerprijs van 100 000 Britse pond. Door nieuwe materialen te gebruiken was Paul MacCready erin geslaagd de *Gossamer Albatros* vederlicht te maken. In 1981 lukte nog een andere langeafstandsvlucht, nu enkel op zonne-energie, al was de *Solar Challenger* wel erg kwetsbaar.

In het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw schreef de stad Ulm ter nagedachtenis aan de minder succesvolle luchtvaartpionier Albrecht Ludwig Berblinger («de kleermaker van Ulm») een wedstrijd uit voor de ontwikkeling van een in de praktijk bruikbaar zonnevliegtuig. In juli 1996 kwam het motorzweefvliegtuig Icaré 2 van de universiteit van Stuttgart als duidelijke overwinnaar uit de strijd.

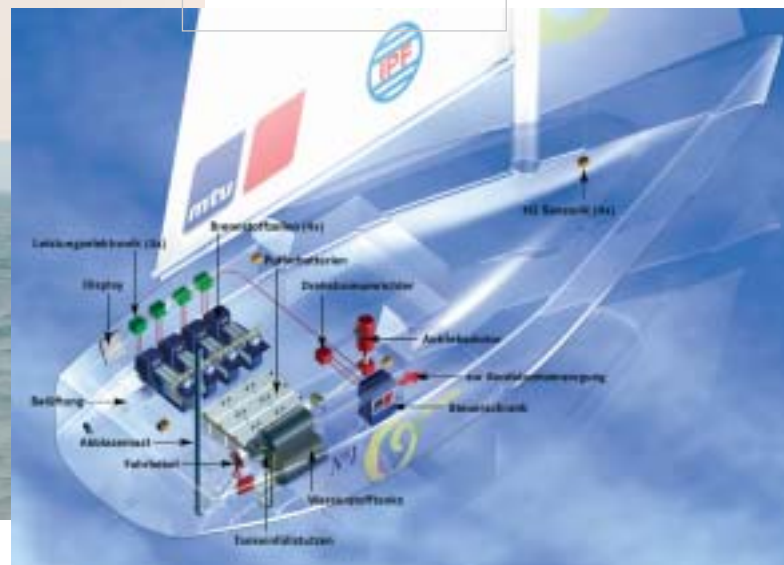
Als alternatief voor satellieten heeft de NASA het experimentele zonnevliegtuig HELIOS ontworpen, dat overdag door zonlicht wordt aangedreven en 's nachts door een «oplaadbaar» brandstofcelaggregaat in de lucht wordt gehouden. HELIOS is erin geslaagd een hoogte van bijna dertig kilometer te bereiken.

In het jaar 2003 zijn in Zwitserland experts in thermodynamica, aërodynamica, elektrische systemen, composietmaterialen, fotovoltaïsche energieopwekking, energieconversie en computersimulatie – nanotechnologie speelt overigens in bijna al deze disciplines een rol – bijeengekomen om te praten over een project dat de ontwikkeling van nieuwe technologieën voor een milieuvriendelijke toekomst vleugels moet geven. En dat moet letterlijk worden genomen. Het ambitieuze project moet Bertrand Piccard en Brian Jones, die 1999 in een ballon non-stop om de wereld zijn gevlogen, nogmaals om de aarde voeren, maar dit keer non-stop in een vliegtuig dat alleen door zonne-energie wordt aangedreven!





Door brandstofcellen aangedreven zeiljacht van MTU, Friedrichshafen, op de Bodensee. Dankzij nanotechnologie hoeven dergelijke vaartuigen zeker niet minder elegant te zijn. Gedacht kan worden aan zeilen van flexibel zonneceltextiel, die echter wel donker van kleur moeten zijn.



De «luchtworm» van de universiteit van Stuttgart. Het is de bedoeling dat deze als relaisstation voor draadloze telefonie wordt gebruikt.

Ontwerpstudie van de firma Fuseproject, een door een brandstofcel aangedreven elektrische step die je geruisloos door de stad vervoert.

Door dit project zouden de nieuwe technologieën eindelijk het respect krijgen dat zij verdienen. Dit zou het begin kunnen zijn van een lange reeks nieuwe vervoersmiddelen zoals door computers, sensoren en het Galileo-systeem gestuurde zonnevliegtuigen waarmee ook ongevoelenden – geruisloos en zonder luchtverontreiniging – het luchtruim kunnen kiezen. Onder het motto «boven de wolken moet de vrijheid wel eindeloos zijn». Op de Mecklenburgse meren varen dan misschien zelfs catamarans op zonne-energie. Aan de wal helpen pedelecs, elektrische

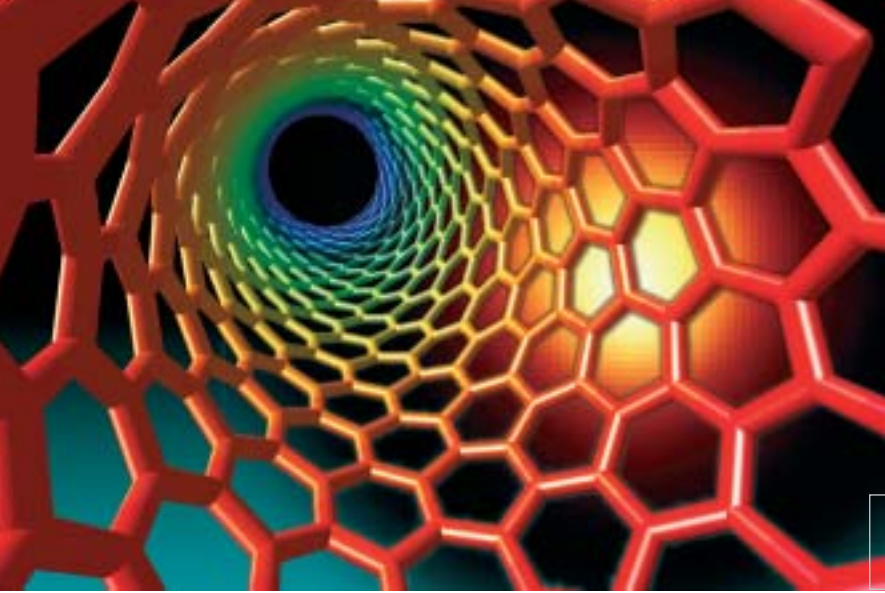
fietsen, oudere mensen weer in het zadel, die zonder hulp nog maar moeilijk kunnen fietsen. Kleine elektrische voertuigen zullen op veel plaatsen hun opmars maken, alleen al om de dynamische industriegebieden met hun luchtverontreiniging van de verstikkingsdood te redden.



Catamaran op zonne-energie van Kopf Solar design GmbH, die trips in en om Hamburg maakt.



# Visies



Een nanobuisje met op de achtergrond Beteigeuze, een rode reus, in de atmosfeer waarvan fullerenen voorkomen.

## Trilstraat

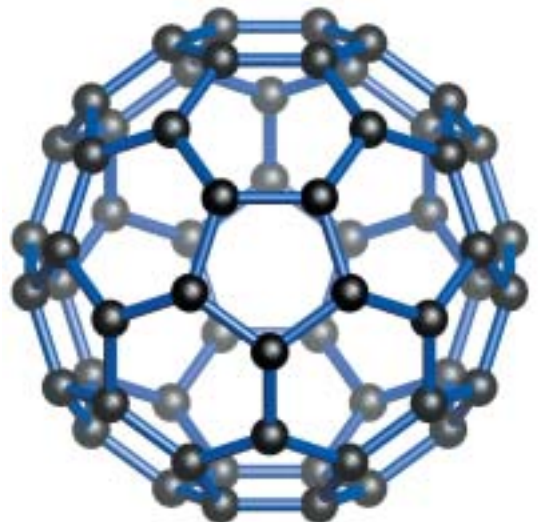
**M**et nanotechnologie zijn ook echt utopisch aandoende vervoersystemen denkbaar, zoals de «trilstraat». Als ooit in de praktijk bruikbare kunstspieren hun intrede doen – en daar wordt nu al aan gewerkt –, kan men zich een met een soort «vingers» uitgeruste straat indenken die voorwerpen daarop door trilbewegingen vervoert. Net zoals de trilharen van cellen, de cilia, die door heen en weer gaande bewegingen vuil uit de longen verdrijven of waarmee pantoffeldiertjes zich voortbewegen. Dit principe kan op allerlei manieren worden gerealiseerd. Zo wordt er serieus gedacht aan minuscule, op dit principe gebaseerde lineaire motoren die met plantenspieren, «forisomen», werken. Eigenlijk is dit idee lang niet zo fantastisch als de ruimtelift, waarnaar NASA serieus onderzoek doet en die eigenlijk aan het brein van een Russische ruimtevaartpionier, Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski, is ontsproten.

Constantin Edouardovitch Ziolkovsky.



## Koolstofnanobuisjes voor de ruimtelift

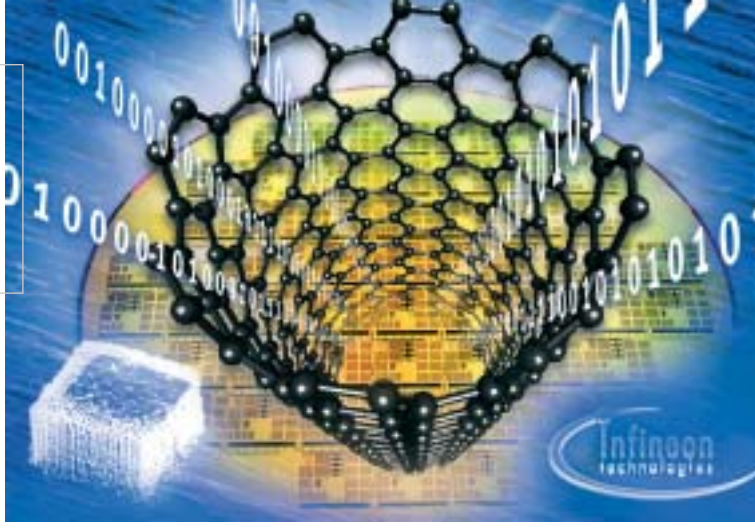
**H**et recept komt uit het heelal: In de schil van oude sterren, zoals Beteigeuze, een rode reus, wervelen allerlei elementen kras door elkaar heen. Bij chemische reacties tussen deze elementen ontstaan onder meer nanokristallen uit siliciumcarbide, siliciumoxide, korund en zelfs diamant. Dit is ontdekt door onderzoek aan meteorieten die uit dergelijk stof zijn ontstaan. Om meer te weten te komen hebben wetenschappers de omstandigheden in deze schillen in het laboratorium nagebootst en in 1985 hebben zij sporen ontdekt van een totaal onbekende stof. Het bleek om een nieuwe koolstofverbinding te gaan: een hol molecuul met een sterk op een voetbal gelijkende vorm. Een nieuwe blik in de ruimte wees uit dat dit molecuul ook in de schillen van sterren ontstaat.



Fullerenen, holle ruimtes uit koolstofnetwerken, geven reden tot hoop bij het onderzoek naar exotische materialen.



Reuzenmoleculen als rekenmeesters: Nanobuisjes zouden zich kunnen ontpoppen als de basis voor de krachtige chips van de toekomst.



Robert Curl, met aan zijn vingers de fullerenen die hem de Nobelprijs hebben opgeleverd.

Droombeeld van een ruimtelift

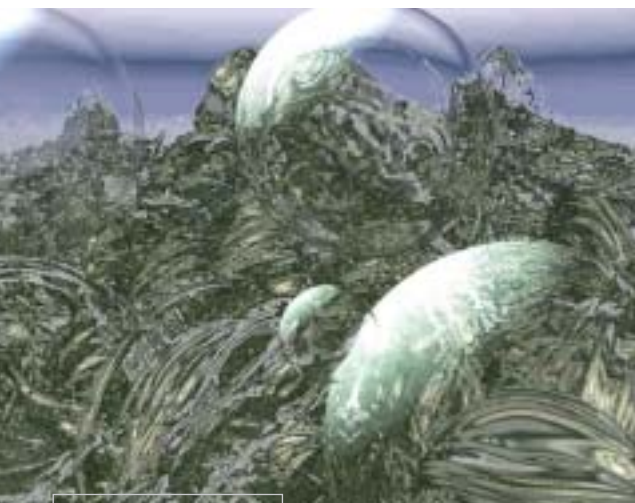
Er zijn al diverse varianten van netwerkvormige koolstofstructuren bekend, zoals koolstofnanobuisjes, de uiterst kleine buisjes van koolstof die zich tot oersterke materialen laten combineren. De problematiek van de massaproductie ervan is technisch gezien eigenlijk al opgelost.

Aan geavanceerde verbindingsdraden van nanobuisjes worden inmiddels enorme trek- en breeksterktes toegedicht. In volle ernst laat de NASA momenteel een studie maken van een project dat uiteindelijk – op basis van een soort Indiase touwtruc – tot een «lift naar de sterren» moet leiden. In een van de scenario's wordt een band van verbindingmateriaal van nanobuisjes van één meter breed, maar dunner dan papier, met conventionele raket- en satelliettechnologie in de ruimte opgespannen. Het ene uiteinde zou zich op 100.000 kilometer hoogte in de ruimte bevinden, het andere zou op een punt in de Stille Oceaan nabij de evenaar worden verankerd. De zwaartekracht in de richting van de aarde en de tegenovergestelde middelpuntvliedende kracht moeten deze band strak houden. Via deze band kunnen dan tonzware payloads in een omloopbaan om de aarde worden gebracht of zelfs naar Venus en de asteroidengordel. Nuttige nevenproducten van dergelijke droombeelden zijn oersterke bouwmaterialen voor torenflats, bruggen, en dergelijke, en natuurlijk liften.



# Kansen en risico's

Het pEn niet alleen omdat een welbepaald atoom moet worden gepakt, want bij het assembleren moeten alle atomen in een kubieke nanometer worden gecontroleerd zodat de vingers elkaar onvermijdelijk in de weg zouden zitten. Tot zover het «dikke-vinger-probleem». Daarnaast is er ook nog het «plakvinger-probleem»: de uitgezochte atomen zouden, soortafhankelijk, niet naar believen vastgepakt en weer losgelaten kunnen worden, zij zouden namelijk onvermijdelijk bindingen aangaan – een uit de praktijk bekend verschijnsel. Het is niet zo eenvoudig een plakkerig kogeltje van je vinger te verwijderen. Dit zijn principiële bezwaren die niet te omzeilen zijn. Met mechanische nanorobots is dit gedoemd te mislukken. Richard Smalley zal gelijk krijgen: de angst dat legers van mislukte nanomachines de wereld in hun greep kunnen krijgen en er een grauwe smeer van maken, is ongegrond.



Beter gefundeerd is de angst dat nanodeeltjes ook ongewenste effecten op mens en milieu kunnen hebben. Zij kunnen bijvoorbeeld dankzij hun geringe formaat in lichaamscellen binnendringen en biologische barrières (zoals de bloed-hersen-barrière)

*Het Gray-Goo-scenario van Eric Drexler is even onwaarschijnlijk als de kans dat de wereld door nanotechnologie in gombeertjes verandert. Het «dikke-vingerprobleem» verhindert dit.*

doorbreken, wat schadelijk voor de gezondheid kan zijn. Omdat nanodeeltjes – net als andere ultrafijne stoffen, zoals dieselroet in uitlaatgassen – stoffen zijn die onbekende neveneffecten kunnen hebben, moet eerst door wetenschappelijk onderzoek worden nagegaan of zij veilig zijn. Tot nu toe is er niet veel bekend over de veiligheid van nanodeeltjes en daarom moeten nanowetenschappers en toxicologen aan de hand van experimenten zo snel mogelijk een antwoord zien te vinden op alle vragen. Maar de risico's lijken beheersbaar, aangezien nanodeeltjes in de vrije natuur uiterst «kleverig» blijken. Ze klonteren al snel samen tot grotere klompen waarmee het



lichaam probleemloos afrekent. Van sommige nanodeeltjes is al bekend dat zij de gezondheid niet schaden. Ze worden daarom in zonnebrandcrème gebruikt als beschermende factor tegen zonlicht. Ook worden ze wel in gebonden vorm aan een ander materiaal toegevoegd zodat de consument helemaal niet met afzonderlijke nanodeeltjes in contact komt. Bovendien probeert de industrie met de nodige veiligheidsmaatregelen elk risico voor de gezondheid van de klant en personeel zoveel mogelijk uit te sluiten.





*Richard Smalley, Nobelprijswinnaar voor scheikunde, houdt – net als de meeste andere wetenschappers – de risico's van nanotechnologie voor beheersbaar.*

En niet alleen omdat een welbepaald atoom moet worden gepakt, want bij het assembleren moeten alle atomen in een kubieke nanometer worden gecontroleerd zodat de vingers elkaar onvermijdelijk in de weg zouden zitten. Tot zover het «dikke-vinger-probleem». Daarnaast is er ook nog het «plakvinger-probleem»: de uitgezochte atomen zouden, soortafhankelijk, niet naar believen vastgepakt en weer losgelaten kunnen worden, zij zouden namelijk onvermijdelijk bindingen aangaan – een uit de praktijk bekend verschijnsel. Het is niet zo eenvoudig een plakkerig kogeltje van je vinger te verwijderen. Dit zijn principiële bezwaren die niet te omzeilen zijn. Met mechanische nanorobots is dit gedaan te mislukken. Richard Smalley zal gelijk krijgen: de angst dat legers van mislukte nanomachines de wereld in hun greep kunnen krijgen en er een grauwe smeer van maken, is ongegrond.

Beter gefundeerd is de angst dat nanodeeltjes ook ongewenste effecten op mens en milieu kunnen hebben. Zij kunnen bijvoorbeeld dankzij hun geringe formaat in lichaamscellen binnendringen en biologische barrières (zoals de bloed-hersen-barrière) doorbreken, wat schadelijk voor de gezondheid kan zijn. Omdat nanodeeltjes – net als andere ultrafijne stoffen, zoals dieselroet in uitlaatgassen – stoffen zijn die onbekende neveneffecten kunnen hebben, moet eerst door wetenschappelijk onderzoek worden

nagegaan of zij veilig zijn. Tot nu toe is er niet veel bekend over de veiligheid van nanodeeltjes en daarom moeten nanowetenschappers en toxicologen aan de hand van experimenten zo snel mogelijk een antwoord zien te vinden op alle vragen. Maar de risico's lijken beheersbaar, aangezien nanodeeltjes in de vrije natuur uiterst «kleverig» blijken. Ze klonteren al snel samen tot grotere klompen waarmee het lichaam probleemloos afrekenet. Van sommige nanodeeltjes is al bekend dat zij de gezondheid niet schaden. Ze worden daarom in zonnebrandcrème gebruikt als beschermende factor tegen zonlicht. Ook worden ze wel in gebonden vorm aan een ander materiaal toegevoegd zodat de consument helemaal niet met afzonderlijke nanodeeltjes in contact komt. Bovendien probeert de industrie met de nodige veiligheidsmaatregelen elk risico voor de gezondheid van de klant en personeel zoveel mogelijk uit te sluiten.

Terwijl de schrikbeelden van nanorobots een hypothetisch karakter hebben, ogen de beloftes van materiaalwetenschappers die in de nanodimensie werken erg realistisch. De eerste producten bestaan immers al, zoals zeer gevoelige leeskoppen met een dikte van twintig nanometer of minder voor harde schijven. In elke notebookcomputer treffen we al nanotechnologie aan. Net als andere krachtige technologieën zal ook de nanotechnologie neveneffecten hebben. Zo zal zij vele eenvoudige werkzaamheden overbodig maken, waardoor er ruimte komt voor nieuwe activiteiten. Permanente educatie wordt steeds belangrijker, maar kan ook leuk zijn – met nanotechnologie.

# Nadere informatie

## Hoe word ik nano-ingenieur?

**W**ie een onderzoeksinstituut bezoekt waar intensief nanotechnologisch onderzoek plaatsvindt, treft daar deskundigen uit eigenlijk alle richtingen van de natuurwetenschappen aan: biologen, scheikundigen, ingenieurs op uiteenlopende vakgebieden, kristallografen, mineralogen, natuurkundigen - de gemeenschappelijke noemer is het niveau van het atoom en een belangrijk element van de gemeenschappelijke taal is de wiskunde. De traditionele natuurwetenschappelijke opleidingen kunnen dus allemaal tot een carrière in de nanotechnologie leiden. Toch begint zich langzamerhand ook een aparte studie nanotechnologie af te tekenen, zoals aan de Universiteit van Würzburg. Wie kiest voor nanotechnologie als vak, aldus Alfred Forchel, hoogleraar natuurkunde aan de universiteit van Würzburg, hoeft niet bang te zijn achter een «hype» aan te hollen (uittreksel uit «abi» 10/2003 van de universiteit van Würzburg), ...

*.. want de miniaturiseringstrend is geen eendagsvlieg, maar heeft al een lange weg afgelegd. Verwacht mag worden dat de schaal van de toepassingen op allerlei gebieden steeds kleiner wordt, zich als het ware van microschaal naar nanoschaal ontwikkelt, ongeacht of het nu gaat om informatietechnologie of scheikunde. Je hoeft niet helderziend te zijn om te stellen dat alles nog kleiner zal worden – en componenten zijn hiervan een voorbeeld – tot het gewoon niet meer kleiner kan.*

Natuurkundigen, scheikundigen en andere natuurwetenschappers kunnen met recht stellen dat zij altijd al nanotechnologie hebben bedreven. De studieobjecten van de klassieke atoomfysica en de moleculen van de scheikundigen hebben hun wortels immers in de nanokosmos. Dankzij de experimentele mogelijkheden van vandaag de dag – zoals de tot op het atoom precieze structurering van clusters, lagen en chips, de beschikbaarheid van uiterst zuivere stoffen en de nieuwe inzichten in de fijnste biologische structuren zijn er talloze nieuwe mogelijkheden geopend waarvan de praktijkgerichte

nano-ingenieur dankbaar gebruik kan maken. De carrièrevooruitzichten voor nano-ingenieurs worden door Alfred Forchels als tamelijk gunstig ingeschat:

*Natuurlijk zijn de kansen om een baan te vinden ook in onze branche afhankelijk van de conjunctuur. Maar dikwijls maken relatief kleine zaken toch een verschil: wanneer een bedrijf stapels sollicitaties ontvangt, is het moeilijk zich van anderen te onderscheiden. Maar door onze praktijkstage in de industrie is er op zijn minst één bedrijf dat de student al beter kent. Bovendien kunnen onze studenten hun afstudeerscriptie in de industrie schrijven en ook dat is weer een stap in de richting van een baan. Bovendien hebben zij minstens één niet-technisch keuzevak in hun pakket, zoals bedrijfseconomie, zodat zij eveneens op dit terrein over de voor het beroepsleven belangrijke basiskennis beschikken.*

Maar een degelijke natuurwetenschappelijke opleiding met wiskunde, daar kunnen nano-ingenieurs niet omheen, niet in Würzburg en ook niet elders:

*Je kunt niet alleen maar dromen van de ontwikkeling van een onderzeeër die door de aderen kan varen. Voor het zover is, moet je een hoop tijd en energie in je opleiding steken. Je moet leren wiskundige beschrijvingen op te stellen en de natuur- en scheikunde te beheersen, kortom je moet je de moeilijke en onaangename basisvaardigheden verwerven. Maar er is geen reden je hierdoor te laten afschrikken. Misschien helpen je nanofantasiën je er doorheen.*

Die onderzeeër die door de aderen vaart, was natuurlijk maar een film. De echte nanotechnologie ziet er anders uit, maar daar is dan ook echt geld mee te verdienen.

# Contactpersonen, links en literatuurverwijzingen

Deze brochure is oorspronkelijk afkomstig van het BMBF, het Duitse bondsministerie voor onderzoek. Zij was daarom in eerste instantie voor een Duits publiek bestemd. Gelieve voor links naar Europese, in plaats van Duitse cursussen, literatuur en websites het internetportaal voor nanotechnologie van de Europese Commissie te raadplegen ([www.cordis.lu/nanotechnology](http://www.cordis.lu/nanotechnology)).

## Studiemogelijkheden op het gebied van nanotechnologie:

**Opleiding nanostructuurtechniek in Würzburg**  
Universiteit van Würzburg  
Website: <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/nano/>  
E-mail: [ossau@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:ossau@physik.uni-wuerzburg.de)

**Bio- en nanotechnologie in Iserlohn**  
Technische hogeschool Zuid-Westfalen  
Website: <http://www2.fh-swf.de/fb-in/studium.bnt/bnt.htm>  
E-mail: [Werner@fh-swf.de](mailto:Werner@fh-swf.de)

**Moleculaire wetenschap in Erlangen**  
Universiteit van Erlangen-Nürnberg  
Website: <http://www.chemie.uni-erlangen.de/>  
Molecular-Science  
E-mail: [hirsch@chemie.uni-erlangen.de](mailto:hirsch@chemie.uni-erlangen.de)

**Master-opleiding micro- en nanotechniek in München**  
Technische hogeschool München  
Website: [http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb06/studiengaenge/mikro\\_nano/home.htm](http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb06/studiengaenge/mikro_nano/home.htm)  
E-mail: [sotier@physik.fh-muenchen.de](mailto:sotier@physik.fh-muenchen.de)

**Nanomoleculaire wetenschap in Bremen**  
Internationale Universiteit Bremen  
Website: <http://www.faculty.iu-bremen.de/plathe/nanomol>  
E-mail: [f.mueller-plathe@iu-bremen.de](mailto:f.mueller-plathe@iu-bremen.de)

**Nanostructuurwetenschap - Nanostructuren en moleculaire wetenschappen in Kassel**  
Universiteit van Kassel  
Website: <http://www.cinsat.uni-kassel.de/studiengang/studiengang.html>  
E-mail: [masseli@physik.uni-kassel.de](mailto:masseli@physik.uni-kassel.de)

**Experimentele bachelor-opleiding, afgesloten door het diploma Bachelor of Science in de biofysica of nanowetenschappen in Bielefeld**  
Universiteit van Bielefeld  
Website: <http://www.physik.uni-bielefeld.de/nano.html>  
E-mail: [dario.anselmetti@Physik.Uni-Bielefeld.de](mailto:dario.anselmetti@Physik.Uni-Bielefeld.de)

**Doctoraalopleiding «micro- en nanostructuren» in Saarbrücken**  
Universiteit van Saarland  
Website: <http://www.uni-saarland.de/fak7/physik/NanoMikro/InfoMikroNano.htm>

## Literatuurverwijzingen:

**BMBF-Programm IT-Forschung 2006 - Förderkonzept Nanoelektronik**  
Pub.: Federal Ministry of Education and Research; Bonn, March, 2002.

**Vom Transistor zum Maskenzentrum Dresden, Nanoelektronik für den Menschen**  
Pub.: Federal Ministry of Education and Research; Bonn, October, 2002.

**Nanotechnologie erobert Märkte- Deutsche Zukunftsoffensive für Nanotechnologie**  
Pub.: Federal Ministry of Education and Research; Bonn, March 2004.

Bachmann, G.  
**Innovationsschub aus dem Nanokosmos: Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien (Band 28)**  
Pub.: VDI Technology Center for the BMBF; 1998.

Luther, W.:  
**Anwendungen der Nanotechnologie in Raumfahrtentwicklungen und -systemen**  
Technology analysis (Vol. 43)  
Pub.: VDI Technology Center, for the DLR; 2003

Wagner, V; Wechsler, D.:  
**Nanobiotechnologie II: Anwendungen in der Medizin und Pharmazie**  
Technology definition (Vol. 38)  
Pub.: VDI Technology Center, for the BMBF; 2004.

Hartmann, U.:  
**Nanobiotechnologie – Eine Basistechnologie des 21. Jahrhunderts**  
ZPT, Saarbrücken, 2001.

Rubahn, H.-G.:  
**Nanophysik und Nanotechnologie**  
Teubner Verlag 2002

**Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft-WING**  
Pub.: Federal Ministry of Education and Research; Bonn, October 2003.

---

## Internetlinks:

Bevordering van het nanotechnologisch onderzoek door de EU  
<http://www.cordis.lu/nanotechnology>

Europees nanotechnologieportaal  
<http://www.nanoforum.org>

Nanotruck - Reise in den Nanokosmos  
<http://www.nanotruck.net>

Internetreise-Abenteuer hinterm Komma  
<http://www.nanoreisen.de>

News- en discussieforums voor nanotechnologie  
<http://www.nano-invests.de>

Bevordering van nanotechnologie door het BMBF  
<http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>

Nanotechnologieportaal van VDI-TZ  
<http://www.nanonet.de>

## Lijst van begrippen

**Brandstofcel:** Een apparaat waarin waterstof en zuurstof (meestal luchtzuurstof) zonder vlam tot water reageren, waarbij met een hoog rendement elektrische energie wordt opgewekt.

**Bysusdraad (in de volksmond mosselbaard):** Een materiaaltechnisch uiterst verfijnde draad waarmee mosselen zich aan de ondergrond hechten. Aan het ene uiteinde zijn ze zo elastisch als rubber, aan het andere zo stijf als nylon.

**Cluster:** Kleine groepen deeltjes, in dit geval atomen. Clusters vertonen meestal andere eigenschappen dan grote vaste lichamen van hetzelfde materiaal, onder meer omdat clusters veel oppervlakteatomen bevatten.

**CNT's (Carbon Nano-Tubes):** Koolstofnanobuisjes

**Diatomeeën of kiezelwieren:** Kleine, in zoet en zout water levende eencellige organismen met een indrukwekkend pantser van kiezelzuur: siliciumdioxide in water. Kiezelwieren zijn in staat tot fotosynthese en bezitten derhalve ook lichtgeleidende structuren.

**DNA (desoxyribonucleïnezuur):** Reuzenmolecuul in de vorm van een dubbele helix dat de informatie voor de bouw van het organisme en de recepten voor talloze eiwitten bevat.

**Eiwitten:** Grote, door ribosomen uit aminozuren samengestelde moleculen die in een cel worden gebruikt als nanoscopische gereedschappen, maar ook als bouwmaterialen, zoals in ooglenzen en vingernagels. De ontcijfering van het proteoom, de som van alle eiwitten in een cel en de wisselwerkingen daartussen staat nog in de kinderschoenen.

**ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope):** Een speciale rasterelektronenmicroscopie waarbij aan de scanning probe nog restlucht en vocht zijn toegestaan. De bestudeerde voorwerpen hoeven daarom niet meer te worden geprepareerd, bijvoorbeeld door het opdampen van goud.

**Fase:** Hier: toestand, zoals: geordend/ongeordend, kristallijn/amorf

**Forisomen:** Van het Latijnse woord voor deurvleugel afgeleide benaming voor planteneiwitten die onderzocht worden op hun geschiktheid als nanoscopische kunstspieren.

**Fotosynthese:** Groene planten, algen en cyanobacteriën (blauwwieren) halen hun energie uit fotosynthese. Met behulp van zonlicht wordt kooldioxide en water in suiker en zuurstof omgezet. Het rendement van fotosynthese ligt op het indrukken niveau van 80%.

**Frequentieverdubbelaar:** Hier: materiaal dat de frequentie van licht verdubbelt. Daarmee kan bijvoorbeeld infrarood licht in groen licht worden omgezet.

**Halfgeleider:** Materiaal waarvan de elektrische eigenschappen tussen die van een isolator en een geleider liggen. Halfgeleiders zijn de belangrijkste componenten van moderne elektronische schakelingen die in computers, gsm's enz. worden gebruikt.

**Kwantumcomputer:** Maakt gebruik van de karakteristieke regels van de kwantummechanica om problemen op te lossen die met traditionele computers praktisch niet op te lossen zijn, zoals encryptie van informatie.

**Lab-on-a-chip:** In het eindstadium van de ontwikkeling uiterst complexe chips met micromechanische, microfluidische, nanosensorische en nano-elektronische componenten waarmee geavanceerde onderzoeken naar cellen kunnen worden gedaan waarvoor momenteel nog een heel instituut nodig is. De benaming wordt evenwel ook al voor relatief eenvoudige microscopisch bedrukte microscoopglasjes gebruikt.

**Leukocyten:** Witte bloedlichaampjes die het lichaam beschermen door indringers in het bloed, zoals virussen en bacteriën, maar ook celafval en kankercellen, op te slokken of door als lymfocyten antilichamen te produceren. Antilichamen zijn uiterst specifieke kleefmoleculen.

**Lichtgeleider:** Een draad van uiterst doorzichtig materiaal die licht over grote afstanden kan overbrengen, meestal voor gegevensoverdracht maar ook wel voor energietransport.

**Lithografie:** Hier: de kunst om structuren in de microkosmos te produceren. Meestal gebeurt dit door fotolak met licht- of elektronenbundels te bestralen en daarna te ontwikkelen. Bepaalde structuren onder de fotolak kunnen zo worden beschermd tegen of desgewenst juist toegankelijk worden gemaakt voor de daarop volgende ets- en andere processen.

**Masker:** Een soort dia waarop de structuren van een computerchip zijn afgebeeld, die vervolgens langs fotolithografische weg op de wafer worden overgebracht.

**Micellen:** Kleine, kogelvormige structuren die door de natuur – hier: mosselen – ook als transportcontainers worden ingezet.

**Micro-lensvelden:** Micro-optische elementen die onder meer van belang zijn voor de overdracht van gegevens met behulp van licht.

**Piëzokristallen:** Piëzo-elementen wekken elektriciteit op als zij uitgerekt of samengedrukt worden. Dit gebeurt bijvoorbeeld in «elektronische» aanstekers. Omgekeerd kan een piëzokristal onder invloed van een elektrische spanning haarfijn, op fracties van de atoomdiameter nauwkeurig, worden vervormd.

**Reflectine:** Speciaal eiwit dat door organismen worden gebruikt voor de vervaardiging van lichtreflecterende structuren.

**Ribosomen:** Nanomachines die – gestuurd door een moleculaire band met informatie van het geërfde DNA – talloze eiwitten kunnen aanmaken.

**Röntgenstraling:** Kortgolvlige elektromagnetische straling die onder andere bij de analyse van kristalstructuren wordt gebruikt voor de bepaling van de nanoscopische vorm van moleculen.

**Tunnelstroom:** Een stroom die er normaal gesproken niet zou zijn omdat zij een isolatiemateriaal passeert, maar die in de nanokosmos toch loopt, zij het dat zij wel uiterst afhankelijk is van de dikte van het isolatiemateriaal. Dit effect heeft de rastertunnelmicroscopie mogelijk gemaakt.

**UV-straling:** Kortgolvlige straling die de vervaardiging van zeer fijne chipstructuren mogelijk maakt.

**Vanderwaalsbinding:** Zwakke chemische binding tussen moleculen waarvan de diepere oorzaken in de eigenschappen van de lege ruimte schuilen. Vanderwaalsbindingen zijn ook bepalend voor de eigenschappen van water en dus ook alle levensprocessen.

**Vrije-elektronenlaser:** Apparaat waarmee licht wordt opgewekt met behulp van een versnelde elektronenbundel in een vacuümbuis.

# Register van afbeeldingen

- Blz. 4, boven: Kompetenzzentrum Nanoanalytik, Universiteit van Hamburg  
Blz. 4, onder: Lambda Physik AG, Göttingen  
Blz. 5, boven: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 5, onder: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 6, linksboven: Chemical Heritage Foundation  
Blz. 6, boven + rechtsonder, linksonder: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 7, linksboven: NASA/ESA  
Blz. 7, rechtsboven: DESY, Hamburg  
Blz. 7, linksboven: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 7, rechtsonder: Instituut voor experimentele en toegepaste natuurkunde, Universiteit van Kiel  
Blz. 8, linksboven: REM-Labor, Universiteit van Basel  
Blz. 8, filmstrook, van boven naar beneden: BergerhofStudios, Keulen; id.; id.; REM-Labor, Universiteit van Basel; Nobelcomité Stockholm (bewerkt); DESY, Hamburg  
Blz. 9, linksboven: Botanisch instituut, Universiteit van Bonn  
Blz. 9, rechtsboven: REM-Labor, Universiteit van Basel  
Blz. 9, filmstrook, van boven naar beneden: BergerhofStudios, Keulen; id.; Fraunhofer Gesellschaft; Botanisch Instituut, Universiteit van Bonn; id.; TU Berlijn, FU Berlijn  
Blz. 9, achtergrondbeeld: BASF AG  
Blz. 10, linksboven + rechts: MPI voor metallurgisch onderzoek, Stuttgart  
Blz. 10, midden rechts: ESA  
Blz. 10, linksonder: MPI voor metallurgisch onderzoek, Stuttgart  
Blz. 11, linksboven: Ostseelabor Flensburg; daarnaast: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 11, rechtsboven: Universiteit van Florence, Italië  
Blz. 11, midden rechts: Paleontologisch Instituut, Universiteit van Bonn  
Blz. 11, linksonder: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 11, rechtsonder: SusTech, Darmstadt  
Blz. 12, boven, midden en rechtsonder: Bell Laboratories, USA  
Blz. 12, links: Faculteit der biochemie, Universiteit van Regensburg  
Blz. 13, boven: Instituut voor nieuwe materialen, Saarbrücken  
Blz. 13, midden rechts: Degussa AG Advanced Nanomaterials  
Blz. 13, rechtsonder: Instituut voor geofysica, Universiteit van München  
Blz. 13, onder: Instituut voor fysische chemie, Universiteit van Hamburg  
Blz. 14, boven + linksonder: ESA  
Blz. 14, rechtsonder: IBM Corporation  
Blz. 15, boven + midden links: Fysica IV, Universiteit van Augsburg  
Blz. 15, rechtsboven + midden: Expertisecentrum voor nanoanalyse, Universiteit van Hamburg  
Blz. 15, rechtsonder: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 15, onder: Universiteit van Hawaï, Honolulu  
Blz. 16, links: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen  
Blz. 17, rechtsboven: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen  
Blz. 17, linksonder: IHT RWTH Aken  
Blz. 17, rechtsonder: Schott AG, Mainz  
Blz. 18, linksboven: Bayer AG, Leverkusen  
Blz. 18, linksonder: MPI für Quantenoptik, Garching  
Blz. 19, alle afbeeldingen: DESY, Hamburg  
Blz. 20, linksboven: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 20, rechtsonder: Instituut voor nieuwe materialen, Saarbrücken  
Blz. 21, linksboven: HILIT, Joule III-programma van de EU  
Blz. 21, rechtsboven: NASA/ESA  
Blz. 21, rechtsonder: Universiteit van Stuttgart  
Blz. 22, alle afbeeldingen: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 23, linksboven: National Semiconductor, Feldafing  
Blz. 23, rechtsonder: Advanced Micro Devices, Dresden  
Blz. 24, rechtsboven: Grafik: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 24, midden links: Experimentalphysik IV RUB, Bochum  
Blz. 24, onder: Instituut voor experimentele en toegepaste natuurkunde, Universiteit van Kiel  
Blz. 25, rechtsboven: Grafik: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 25, onder: IHT RWTH Aken  
Blz. 26, rechtsboven: IBM Corporation  
Blz. 26, linksonder: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 26, rechtsonder: IBM/Infineon, MRAM Development Alliance  
Blz. 27, boven: Experimentele fysica IV, RUB Bochum  
Blz. 27, midden: Expertisecentrum voor nanoanalyse, Universiteit van Hamburg  
Blz. 27, rechts: Faculteit der nano-elektronica, RUB Bochum  
Blz. 27, onder: IBM Speichersysteme Deutschland GmbH, Mainz  
Blz. 28, Siemens AG, München  
Blz. 29, rechtsboven: Nanosolutions GmbH, Hamburg  
Blz. 29, midden: Instituut voor nieuwe materialen, Saarbrücken  
Blz. 30, onder: Siemens AG, München  
Blz. 30, boven: DaimlerChrysler AG  
Blz. 30, linksonder: Fraunhofer Allianz Optisch-funktionale Oberflächen  
Blz. 30, rechtsonder: Universiteit van Wisconsin, Madison  
Blz. 31, boven: Robert-Bosch GmbH, Stuttgart  
Blz. 31, midden: Audi/Volkswagen AG  
Blz. 31, linksonder: VW-persarchieff  
Blz. 31, rechtsonder: Robert-Bosch GmbH, Stuttgart  
Blz. 32, linksboven: Bayer AG, Leverkusen  
Blz. 32, rechtsboven: Instituut voor nieuwe materialen, Saarbrücken  
Blz. 32, linksonder: Keramag AG, Ratingen  
Blz. 33, boven: BASF AG, Ludwigshafen  
Blz. 33, midden: MTU Friedrichshafen  
Blz. 33, rechtsonder: Siemens AG, München  
Blz. 34, linksboven: Bayer AG, Leverkusen  
Blz. 34, rechtsboven: Siemens AG, München  
Blz. 34, onder: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 35, linksboven: Siemens AG, München  
Blz. 35, rechtsboven: Siemens AG, München  
Blz. 35, midden: Charité Berlin/Instituut voor nieuwe materialen, Saarbrücken  
Blz. 36, rechtsboven: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 36, links: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 36, rechts: IIP Technologies, Bonn  
Blz. 37, linksboven: Siemens AG, München  
Blz. 37, rechtsboven: Fraunhofer ISIT  
Blz. 37, midden rechts: Universiteit van Oxford  
Blz. 37, linksonder, rechts: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 38, linksboven: OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg  
Blz. 38, onder: Grafik: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 39, boven: Park Hotel Weggis, Zwitserland  
Blz. 39, onder: Siemens AG, München  
Blz. 40, linksboven: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 40, linksonder: Bayer AG, Leverkusen  
Blz. 41, boven: AIXTRON GmbH, Aken  
Blz. 41, rechts: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg  
Blz. 42: Instituut voor vliegtuigbouw, Universiteit van Stuttgart  
Blz. 43, linksboven, rechts: MTU Friedrichshafen  
Blz. 43, midden links: Instituut voor lucht- en ruimtevaartconstructie, Universiteit van Stuttgart  
Blz. 43, midden rechts: Fuse-project  
Blz. 43, onder: Kopf Solardesign GmbH, Hamburg  
Blz. 44, linksboven: Kollage: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 44, rechtsonder: RWTH Aken  
Blz. 45, linksboven: Siemens AG, München  
Blz. 45, rechtsboven: Infineon Technologies AG, München  
Blz. 45, onder: NASA  
Blz. 46, midden: BergerhofStudios, Keulen  
Blz. 47, IBM Corporation, Insert: Siemens AG, München



EUROPEAN  
COMMISSION

Community research

European Industrial Research

# Uncovering the secrets of nanotechnology



Films available from: <http://www.cordis.lu/nanotechnology>

**Contact:**

Renzo Tomellini, European Commission - email: [renzo.tomellini@cec.eu.int](mailto:renzo.tomellini@cec.eu.int)

**Industrial technologies websites:**

[http://europa.eu.int/comm/research/industrial\\_technologies/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/industrial_technologies/index_en.html)

<http://www.cordis.lu/fp6/nmp.htm>

<http://www.cordis.lu/nanotechnology>



NANOTECHNOLOGIES, KNOWLEDGE-BASED MATERIALS, NEW PRODUCTION

Europese Commissie

**EUR 21151 — Nanotechnologie – Innovatie voor de wereld van morgen**

Luxemburg: Bureau voor Officiële Publicaties der Europese Gemeenschappen

2004 — 56 blz. — 21,0 x 29,7 cm

ISBN 92-894-8889-1



Nanotechnologie wordt beschouwd als de kerntechnologie van de 21<sup>e</sup> eeuw. Zij biedt dankzij kleinere, lichtere en sneller en beter presterende materialen, onderdelen en systemen een oplossing voor allerlei problemen. Nanotechnologie scheidt nieuwe marktkansen en kan ook een essentiële bijdrage leveren tot de bescherming van mens en milieu.

Met deze brochure wordt getracht duidelijk te maken wat nanotechnologie nu eigenlijk inhoudt en tegelijkertijd een discussie op gang te brengen. Door een beschrijving te geven van wetenschappelijke achtergronden, technologische ontwikkelingen, toepassingsgebieden en mogelijke ontwikkelingen in de toekomst wordt in deze brochure een complex en volledig beeld geschetst van de nanotechnologie zoals die vandaag de dag wordt ervaren.