

Het atoom als gereedschap

De zin en onzin van nanotechnologie

De Academische Boekengids 49, maart 2005, pp. 13-15.

Hoewel thrillerschrijvers ons willen doen geloven dat met de opkomst van nanotechnologie de wereld overspoeld zal worden met zichzelf reproducerende robotjes, valt dat in werkelijkheid mee. Toch zou het een goed idee zijn om de technologie streng te controleren, zo vader en zoon Ratner in een nieuw boek. Dat schept vertrouwen bij het publiek.

In 1999 lanceerde de Amerikaanse president Clinton het *National Nanotechnology Initiative* met een budget van 500 miljoen dollar per jaar. Wereldwijd wordt jaarlijks meer dan tweemaal dit bedrag geïnvesteerd in wetenschappelijk onderzoek gericht op nanotechnologie. China, zich sterk ervan bewust dat de eerste Industriële Revolutie en de opkomst van de elektronische industrie aan het land voorbij zijn gegaan, heeft zich voorgenomen ditmaal de boot niet te zullen missen. De Nederlandse overheid heeft recent een grote investering gedaan in nanotechnologisch onderzoek, ter waarde van 275 miljoen euro aan BSIK gelden, toegekend aan een programma onder de titel NanoNed (BSIK staat voor: Besluit subsidies investeringen in de kennisinfrastructuur). De nanotechnologie schept grote verwachtingen, maar welke dat precies zijn, blijft voor het grote publiek nog vaag. De hier besproken boeken trachten de kenniskloof te overbruggen.

Het voorvoegsel 'nano' is afgeleid van de aanduiding van een lengteschaal, de nanometer. Een nanometer is het miljoenste deel van een millimeter, de schaal van atomen en moleculen. Het is de schaal waarop we technologie willen gaan bedrijven.

Getallen spelen een belangrijke rol in dit verhaal, en heel grote of heel kleine getallen zijn niet eenvoudig te bevatten. Volgens een bekende legende mocht Sissa, een geleerde aan het hof van de Indische radja Balhait, voor zijn uitvinding van het schaakspel een willekeurige beloning vragen. Sissa vroeg om een korrel rijst op het eerste vakje van het speelveld, twee korrels op het tweede vakje, vier op het derde, en zo telkens verdubbeld tot het vierenzestigste vakje. De radja vond dit een zeer bescheiden wens, totdat hij erachter kwam dat hij voor het laatste vakje ruim achttien miljard-maal-miljard korrels nodig had. Met de benodigde hoeveelheid rijst zou heel India met een laag van een centimeter dik kunnen worden bedekt. Wanneer je lang genoeg blijft vermenigvuldigen, worden kleine getallen onvoorstelbaar groot.

Op 29 december 1959 hield Richard P. Feynman een toespraak voor de jaarvergadering van de *American Physical Society*. Feynman was een van de meest briljante en kleurrijke natuurkundigen van de vorige eeuw en zijn toespraak kan zonder twijfel visionair genoemd worden. In een tijd waarin van micro-elektronica nog geen sprake was, laat staan van nanotechnologie, schetste hij de mogelijkheden voor onderzoek en technologische toepassingen wanneer we in staat zouden zijn om de materie te manipuleren op de schaal van individuele atomen en moleculen. Feynman kon slechts speculeren over de technieken die dat mogelijk zouden moeten maken, maar hij toonde aan dat de natuurwetten geen belemmering vormden. In principe moest het mogelijk zijn om, bijvoorbeeld, de volledige inhoud van de vierentwintig delen van de *Encyclopaedia Britannica* te schrijven op de kop van een naald. Hij voegde eraan toe: 'In the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1960 that anybody began seriously to move in this direction.' Zelfs zijn schatting van de tijdschaal klopt! Maar Feynmans voorspellingen hebben destijds niemand aangezet tot het ontwikkelen van de benodigde technologie; de tijd was er nog niet rijp voor.

Los hiervan begon in de jaren zestig de ontwikkeling van de micro-elektronica, wat later een belangrijke drijvende kracht en bron van inspiratie zou zijn voor het nieuwe onderzoeksgebied. De fabricage van halfgeleiderchips berust nog steeds op dezelfde principes als veertig jaar geleden: ze maakt gebruik van een fotografisch proces om de onderdelen van de schakelingen in de plak silicium te schrijven. De ingenieurs zijn de moderne monniken die hun miniaturen steeds verder verfijnen. En deze verfijning verloopt in een verassend strak tempo. De bouw van microprocessoren startte in 1971 met 2250 transistors op een chip; sinds die tijd verdubbelt dit aantal elke anderhalf jaar. Sissa zou ons dan hebben kunnen vertellen dat we op grote getallen afstevenen. De nieuwste Intel processor bevat intussen 410 miljoen transistors. Deze ontwikkeling is de motor achter een industrie met wereldwijd een jaaromzet van enkele honderden miljarden dollars.

'HET ONDERZOEKSTERREIN VAN DE NANOTECHNOLOGIE IS ONTSTAAN UIT PARALLELE ONTWIKKELINGEN IN ZEER DIVERSE VAKGEBIEDEN DIE ONS NU HET GEREEDSCHAP LEVEREN WAARMEE INSTRUMENTEN EN MATERIALEN GEFABRICEERD KUNNEN GAAN WORDEN OP DE SCHAAL VAN ATOMEN EN MOLECULEN.'

Hoewel men met het proces van voortdurende verkleining van de componenten op een chip inmiddels is

aangeland op een schaal van negentig nanometer, wordt de micro-elektronica zelf niet tot de nanotechnologie gerekend. Het is een technologie die evolutionair voortbouwt op bestaande concepten, en waarvan het einde nu in zicht komt. Maar het optimisme rond de toepassingen op basis van nanotechnologie wordt gevoed door het succesverhaal van de micro-elektronica. Dat laat zien dat de grootschalige productie van zeer kleine objecten een dominant drijvende kracht in de economie kan zijn. Een goede hedendaagse shootcomputer bundelt de rekenkracht van alle computers in de wereld van vijfendertig jaar geleden. Volgens Stan Williams van Hewlett Packard Research is het denkbaar dat we over vijfendertig jaar nog eens een dergelijke slag maken.

Maar nanotechnologie richt zich op veel meer dan alleen elektronica. Het onderzoeksterrein is ontstaan uit parallelle ontwikkelingen in zeer diverse vakgebieden die, gezamenlijk, ons nu het gereedschap leveren waarmee instrumenten en materialen gefabriceerd kunnen gaan worden op de schaal van atomen en moleculen. Belangrijke bijdragen aan deze gereedschapskist komen uit de moleculaire biologie, de fysica en de chemie.

De nanoschaal is niet zomaar klein, het is een speciaal soort klein. Het is de schaal waarop de moleculen van het leven bewegen en interacties aangaan. De beweging van een spier kan worden herleid tot de beweging van grote aantallen moleculen over moleculaire buisjes in een cel – tegenwoordig zijn we in staat om de beweging van een individuele molecuul waar te nemen. We kunnen biomoleculen naar wens veranderen en ontwerpen om ze nieuwe functies te geven. De moleculaire biologie vormt een rijke bron van inspiratie. We zien hoe de natuur oplossingen heeft gevonden voor taken als het opslaan en verwerken van gegevens, het waarnemen van de omgeving en het transporteren van materie, allemaal op basis van moleculaire bouwstenen. We leren daaruit dat het in principe mogelijk is instrumenten op deze schaal te bouwen. Maar onze toepassingen en doelstellingen zullen anders zijn dan die van natuurlijke systemen, en zo ook onze oplossingen. We hebben van vogels gezien dat het mogelijk is om te vliegen, maar een vliegtuig klapt niet met zijn vleugels.

De nanoschaal is ook de schaal waarop de ons bekende natuurwetten van de mechanica vervangen worden door de subtiele wetten van de kwantummechanica. In 1981 beschreven Gert Binnig en Heinrich Rohrer van het IBM research laboratorium in Zürich een instrument waarmee ze voor het eerst in staat waren individuele atomen aan een metaaloppervlak zichtbaar te maken: de rastertunnelmicroscop (meestal aangeduid met de Engelse afkorting STM). Het principe is te vergelijken met dat van een ouderwetse platenspeler, waarbij een naald het oppervlak van de grammofoonplaat aftast. In het geval van de STM worden de principes van de kwantummechanica benut om de atomen dusdanig subtiel af te tasten dat hun posities niet worden verstoord. De STM is sinds zijn ontdekking uitgebreid met sensoren voor de waarneming van een veelheid aan eigenschappen op atomaire schaal. Bovendien is het mogelijk om met een STM atomen en moleculen als losse bouwstenen op te pakken, te verplaatsen, en tot chemische binding aan te zetten. Dit is nanotechnologie in haar zuiverste vorm. De uitvinding van de STM heeft een enorme invloed gehad op het onderzoek in de fysica, de chemie en de biologie, en is in 1986 beloond met een Nobelprijs.

De chemie is het derde vakgebied dat in belangrijke mate heeft bijgedragen aan het ontstaan van de nanotechnologie. Scheikundigen beweren soms schertsend dat ze nooit anders gedaan hebben dan bouwen met moleculen. Maar er is een belangrijk verschil. Waar de traditionele chemie eigenschappen van een stof probeert te ontwerpen door synthese van de juiste moleculen voor die stof, wordt binnen de nanotechnologie nagedacht over interacties tussen diverse soorten moleculen die gezamenlijk een complexer geheel bouwen. De moleculen worden ontworpen met eigenschappen die ervoor zorgen dat ze zich op een unieke manier spontaan aan andere moleculen hechten. Dit concept van *self assembly* speelt een belangrijke rol in de nanotechnologie. Wanneer je nano-objecten bouwt, zul je dat efficiënt en snel moeten doen om op menselijke schaal enige zoden aan de dijk te kunnen zetten.

Het beeld van de nanotechnologie zoals dat bij veel mensen op het netvlies staat, is geschapen door K. Eric Drexler met zijn boek *Engines of Creation* uit 1986. Hij schetst hierin een toekomstbeeld van autonoom functionerende nanorobotjes die goedkoop en massaal gefabriceerd kunnen worden. De nanomachines zouden dan ingezet kunnen worden ter bestrijding van de grootste problemen in deze wereld: ziekte, milieuvervuiling, energieschaarste en nog veel meer. Drexler completeert dit zeer optimistische toekomstbeeld met een afweging van ethische en milieubezwaren. Een van de meest geciteerde gevaren die hij bespreekt, is die van zichzelf reproducerende nanomachines die zich tegen ons keren. Een massale invasie van dergelijke destructieve nanorobots zou zich als een *gray goo* (grijs goedje) door het milieu kunnen verspreiden. Dit beeld heeft Michael Crichton (de schrijver van *Jurassic Park*) geïnspireerd tot zijn boek *Prey* (2002), dat natuurlijk ook al verfilmd is. Of Drexler in zijn voorspellingen even visionair is als Feynman wordt door de meeste deskundigen betwijfeld, onder wie Mark en Daniel Ratner. Maar dat hij veel in gang gezet heeft, staat buiten kijf.

Mark Ratner is als chemicus verbonden aan Northwestern University in de Verenigde Staten en wordt gezien als de grondlegger van de moleculaire elektronica, een van de onderzoeksrichtingen binnen de nanotechnologie. Met *Nanotechnology. A Gentle Introduction to the Next Big Idea* richten hij en zijn zoon Daniel zich op de geïnteresseerde leek. De auteurs trachten een realistisch en evenwichtig beeld te geven van de mogelijkheden en moeilijkheden van de nanotechnologie. Na een korte introductie van de benodigde voorkennis passeren vele onderwerpen van onderzoek en van in ontwikkeling zijnde toepassingen de revue. Hoewel ze hiermee inderdaad een accuraat beeld geven van wat nanotechnologie

inhoudt, vraagt de lange lijst aan deelonderwerpen – gevolg van de diversiteit van het vakgebied – veel volharding van de lezer.

In de andere twee hier besproken boeken is in dat opzicht een gelukkiger keuze gemaakt, door nanotechnologie niet uitputtend te willen bespreken, maar zich te richten op een afgebakende doelgroep. Ze zijn voor de leek daardoor ook beter toegankelijk. Ik kan niet beoordelen of *The Investor's Guide to Nanotechnology and Micromachines* van Glenn Fishbine van praktisch nut is voor mensen die grote sommen geld beschikbaar hebben, maar het boek geeft een goed perspectief van de nanotechnologie. Bovendien geeft het inzicht in de mechanismen van sturing en financiering van het onderzoek door de overheid, en in de betrokkenheid van de industrie in deze sector. Fishbine stelt duidelijk dat de nanotechnologie nog niet gereed is voor *prime time*; het aantal winstgevendende bedrijven dat zich volledig op de nieuwe technologie richt, is op de vingers van één hand te tellen.

'WANNEER WE NANOBUISJES TOT LANGE KABELS KUNNEN VLECHTEN, MOET EEN KABEL TER DIKTE VAN EEN MENSENHAAR STERK GENOEG ZIJN OM EEN LOCOMOTIEF TE KUNNEN TILLEN.'

Fishbine ordent de veelheid aan onderwerpen door een opeenvolgende bespreking van de componenten die nodig zullen zijn voor een complete nanorobot: een energiebron, beweging, programmeerbaarheid, sensoren, manipulatie en zelfreparatie (of zelfdestructie). Dit heeft weliswaar het voordeel van een aansprekend en samenhangend doel, maar de auteur erkent dat het geen geloofwaardig concept is op afzienbare termijn; niet onbelangrijk voor een investeerder. Hij ondervangt dit probleem door expliciet micromachines in zijn bespreking te betrekken.

Micromachines worden gefabriceerd met technieken vergelijkbaar met chips in elektronica. De componenten ervan zijn zeker duizendmaal groter dan de nanoschaal. Veel van het instrumentarium dat nodig is voor nanorobots zal eerst in micromachines toepassing vinden. Ik verwacht overigens niet dat de nanorobots van Drexler er ooit zullen komen, en sluit me hierin aan bij de overtuiging van de Ratners. Maar zelfs zonder deze wezentjes komt de Amerikaanse National Science Foundation tot een schatting van een marktaandeel van producten op basis van nanotechnologie van een triljoen dollar over vijftien jaar. Dat moet toch interessant zijn voor investeerders.

Het is goed om hier kort enkele toepassingen van de nanotechnologie te noemen die al op de markt zijn, of waarvan we snel producten kunnen verwachten. Deze voorbeelden hebben met elkaar gemeen dat ze niet het spectaculaire aura hebben van de nanorobotjes. In de meeste gevallen gaat het om verbeterde materiaaleigenschappen, maar deze zijn vaak cruciaal in nieuwe toepassingen. Een van de meest besproken nieuwe materialen zijn de koolstofnanobuisjes.

Koolstofatomen kunnen op verschillende wijzen aan elkaar gekoppeld worden; de meest bekende verschijningsvormen van koolstof zijn diamant en grafiet. In nanobuisjes zijn de koolstofatomen gerangschikt op de wand van een kokertje met een zeer kleine diameter van één nanometer, of enkele malen groter, maar met een willekeurige lengte. Die uiterst dunne buisjes hebben een treksterkte die door geen enkel materiaal wordt overtroffen. Omdat koolstof ook nog heel licht is, kunnen hiermee zeer sterke en lichte vezels gemaakt worden. Er bestaan al enkele luxeproducten waarin nanobuisjes worden verwerkt, zoals tennisrackets. Maar wanneer we ze tot lange kabels kunnen vlechten, moet een kabel ter dikte van een mensenhaar sterk genoeg zijn om een locomotief te kunnen tillen.

Een toepassing waarmee velen al vertrouwd zijn is de zwangerschapstest. De test maakt gebruik van een 'Assepoester-effect' op moleculair niveau. Een zeer specifiek molecuul, het glazen schoentje, past precies op de gezochte signaalmolecuul, hCG, en de binding van de twee leidt tot de verkleuring van een specifiek deel van de teststrook. De test ziet er zeer eenvoudig uit, maar er zit veel technologie in verborgen. Een dergelijke moleculaire herkenning zal een grote vlucht nemen voor veel medische toepassingen.

Zoals gezegd, is de micro-elektronica nog niet gebaseerd op nanotechnologie, maar sommige belangrijke componenten al wel. De enorme opslagcapaciteit van de harde schijf van uw computer is mede mogelijk gemaakt door een leeskopje dat gebaseerd is op het zogenoemde *Giant Magneto-Resistance* effect, een van de vruchten van het nano-onderzoek. De markt van harde schijven alleen al kent een omzet van veertig miljard dollar per jaar.

In hun meest recente boek *Nanotechnology and homeland security* spelen de Ratners in op het nieuwe gevoel van onveiligheid in de Verenigde Staten. De onconventionele manier waarop moderne conflicten worden uitgevochten, vraagt om een nieuwe wijze van bescherming. Aan de hand van concrete doelen die de beveiliging van het vaderland stelt, bespreken de auteurs de mogelijke toepassingen van nanotechnologie. De verspreiding van met miltvuurbacteriën besmette brieven vormde een traumatische ervaring en legde de kwetsbaarheid bloot van publieksvoorzieningen als de posterijen, drinkwaterleidingen en het openbaar transport. Met behulp van nanotechnologie kunnen op basis van de eerdergenoemde moleculaire herkenning goedkope sensoren ontwikkeld worden die zeer gevoelig zijn en specifiek biologische en chemische verontreinigingen detecteren. Op alle kwetsbare punten zouden dan sensoren voor een grote verzameling potentiële gevaren kunnen worden ingezet. Voor militairen op gevaarlijk terrein zouden dergelijke sensoren in de kleding kunnen worden geïntegreerd. Hoewel de

meeste besproken toepassingen geselecteerd zijn op een uitsluitend defensief karakter, passeren ook enkele ontwikkelingen de revue die offensief kunnen worden gebruikt. Een duidelijk voorbeeld hiervan zijn de onbemande miniaturvliegtuigjes of -voertuigjes die als een zwerm in de strijd kunnen worden ingezet. Veel van de besproken technologie is van een aard dat ze, los van veiligheidskwesties, ook in civiele toepassingen van groot nut kan zijn.

De Ratners eindigen hun beide boeken nadrukkelijk met een bespreking van de implicaties van de opkomst van de nanotechnologie voor de maatschappij, de ethiek en het milieu. Het beeld van de *gray goo* heeft de belangstelling van de milieubeweging gewekt. Hoewel die ook in meerderheid erkent dat het spookbeeld van de autonome nanorobotjes tot de sciencefiction moet worden gerekend, is het positieve neveneffect van dit door Drexler opgeroepen angstbeeld dat er in een vroeg stadium belangstelling is ontstaan voor de mogelijke gevolgen voor het milieu en voor mogelijke ethische kwesties rond nanotechnologie.

Maar wanneer het debat hierover niet met voldoende nuance gevoerd wordt, kan dat leiden tot een brede maatschappelijke weerstand tegen de techniek, zoals ook genetische modificatie die heeft ondervonden - en ondervindt. Met de toepassing van gentechnologie op gewassen, bacteriën en virussen zijn grote voordelen te behalen, onder andere op de gebieden van milieu, energiegebruik en gezondheidszorg. De gerechtvaardigde bedenkingen bij enkele specifieke toepassingen hebben deze vele zegeningen in de schaduw gezet.

‘MARK EN DANIEL RATNER STELLEN VOOR, NAAST DE BESTAANDE AMERIKAANSE FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, EEN APARTE TOEZICHTHOUDER VOOR NANOTECHNOLOGIE IN HET LEVEN TE ROEPEN.’

Er wordt nu getracht het maatschappelijk debat over nanotechnologie naar voren te halen. Via overheidsfinanciering is al een begin gemaakt met het onderzoek naar mogelijke milieueffecten. Het is echter de vraag of je wel een zinnige discussie kunt voeren over een technologie die nog grotendeels ontwikkeld moet worden. Bovendien bestaat er in de diversiteit van de nanotechnologie een groot verschil met eerdere technologische innovaties. Je kunt je met enig recht zorgen maken over de toepassing van nanodeeltjes in cosmetica, maar er hoeft bijvoorbeeld geen enkel bezwaar te bestaan tegen het gebruik van badkamertegels die niet meer vuil worden dankzij een nanogestructureerde beschermlaag.

Een alomvattende discussie zal daarom lastig zijn. En voor de bespreking van de afzonderlijke toepassingen is goede publieksvoorlichting vereist. Het vertrouwen van de consument is mogelijk het best gediend bij een gedegen toezicht op nieuwe producten door de overheid. De Ratners stellen daarom voor, naast de bestaande Amerikaanse Food and Drug Administration, een aparte toezichthouder voor nanotechnologie in het leven te roepen. Dit zou ook in Nederland overwogen kunnen worden. Maar de maatschappelijke implicaties van de opkomst van nanotechnologie krijgen hier voorlopig nog weinig aandacht. Gelukkig is binnen het NanoNed onderzoeksprogramma wel enige ruimte gereserveerd voor research naar maatschappelijke implicaties van de nieuwe technologie.

Jan van Ruitenbeek is als hoogleraar experimentele natuurkunde verbonden aan het Kamerlingh Onnes Laboratorium van de Universiteit Leiden.

Besproken boeken:

Nanotechnology and homeland security. New weapons for new wars
door **Mark Ratner en Daniel Ratner**
Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 2004.
160 pag., € 33,90

Nanotechnology. A gentle introduction to the next big idea
door **Mark Ratner en Daniel Ratner**
Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 2003.
208 pag., € 33,90

The Investor's guide to nanotechnology and micromachines
door **Glenn Fishbine**
John Wiley & Sons. New York 2002.
258 pag., € 52,00