

Nanotechnologie: van agendering tot innovatie

Innovatiedynamiek op het gebied van drug-delivery,
zonnecellen, waterzuivering en computertechnologie



Auteurs:

Sander Kern
Dialogic Innovatie en Interactie

Anouschka Versleijen
Science System Assessment Rathenau Instituut

Projectleiding:

Rinie van Est
Bart Walhout

Rathenau Instituut
Den Haag

Mei 2007

COLOFON

Titel:

Nanotechnologie: van agendering tot innovatie – Innovatiedynamiek op het gebied van drug-delivery, zonnecellen, waterzuivering en computertechnologie

Auteurs:

Sander Kern
Dialogic Innovatie en Interactie

Anouschka Versleijen
Science System Assessment Rathenau Instituut

Redactie:

Taalcentrum VU

Projectleiding en eindredactie:

Rinie van Est, Bart Walhout
Rathenau Instituut

© Rathenau Instituut, Den Haag, 2007

Rathenau Instituut
Anna van Saksenlaan 51
Correspondentieadres:
Postbus 95366
2509 CJ Den Haag

Telefoon 070 - 342 15 42
Fax 070 - 363 34 88
E-mail info@rathenau.nl
Website www.rathenau.nl

Uitgever: Rathenau Instituut
Eindredactie: Rob van den Berg
Mei 2007

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Rathenau Instituut.

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Nanotechnologie in Focus | 1 |
| 1.2 | Doel en werkwijze..... | 2 |
| 1.3 | Opbouw van het rapport..... | 3 |
| 1.4 | Referenties | 3 |
| 2 | Nanotechnologie in drug delivery..... | 4 |
| 2.1 | Schets van het innovatiesysteem..... | 4 |
| 2.2 | Rol en mogelijke impact van nanotechnologie..... | 7 |
| 2.3 | Mogelijke barrières | 8 |
| 2.4 | Onderzoek en agendering | 10 |
| 2.5 | Conclusies | 12 |
| 2.6 | Referenties | 14 |
| 3 | Nanotechnologie en energie-voorziening via zonnecellen..... | 15 |
| 3.1 | Schets van het innovatiesysteem..... | 15 |
| 3.2 | Rol en mogelijke impact van nanotechnologie..... | 17 |
| 3.3 | Mogelijke barrières | 18 |
| 3.4 | Onderzoek en agendering | 18 |
| 3.5 | Conclusies | 19 |
| 3.6 | Referenties | 21 |
| 4 | Nanotechnologie voor waterzuivering..... | 22 |
| 4.1 | Schets van het innovatiesysteem..... | 22 |
| 4.2 | Rol en mogelijke impact van nanotechnologie..... | 23 |
| 4.3 | Mogelijke barrières | 25 |
| 4.4 | Onderzoek en agendering | 26 |
| 4.5 | Conclusies | 27 |
| 4.6 | Referenties | 29 |
| 5 | Nanotechnologie voor nieuwe computertechnologie..... | 30 |
| 5.1 | Schets van het innovatiesysteem..... | 30 |
| 5.2 | Rol en mogelijke impact van nanotechnologie..... | 31 |
| 5.3 | Mogelijke barrières | 32 |
| 5.4 | Onderzoek en agendering | 33 |
| 5.5 | Conclusies | 35 |
| 5.6 | Referenties | 37 |
| 6 | Conclusies en aanbevelingen | 38 |
| 6.1 | Innovatie: naar een visie met oog voor diversiteit én synergie | 38 |
| 6.2 | Onderzoek en maatschappelijke agendering..... | 40 |
| | Nawoord: lessen uit het project..... | 42 |
| | Bijlagen: Caseteksten enquête Nanotechnologie in Focus | 44 |

1 Inleiding

1.1 Nanotechnologie in Focus

Sinds 2003 besteedt het Rathenau Instituut actief aandacht aan nanotechnologie, het bestuderen en manipuleren van materie op nanoschaal. Het instituut heeft diverse activiteiten ondernomen om de ontwikkelingen van de nanowetenschappen en nanotechnologie in een breder perspectief te plaatsen. Die activiteiten zijn erop gericht om goed in beeld te brengen wat de maatschappelijke implicaties zijn van deze technologie. Daarnaast is het doel de dialoog hierover te stimuleren. Tijdens de publieke bijeenkomst *Kleine technologie – Grote gevolgen* in 2004 werd duidelijk dat er veel behoefte was om de discussie over nanotechnologie verder vorm te geven, bij voorkeur door in kleinere groepen concrete toepassingen te bespreken (Biesboer 2004). Naar aanleiding hiervan heeft het Rathenau Instituut in 2005 het project Nanotechnologie in Focus gestart.

Dit project bestaat uit twee fasen. De doelstelling van de eerste fase, die begin 2006 werd afgerond, was concrete toepassingen van nanotechnologie te identificeren. Het gaat hierbij om toepassingen die naar verwachting op relatief korte termijn (dat is: binnen tien jaar) geïntroduceerd worden, en die bovendien een grote maatschappelijke impact zullen hebben. Door middel van interviews en deskresearch is een groslijst met mogelijke toepassingen opgesteld (Enzing 2006). Op basis van een enquête onder de lezers van de *Nanotechnologie Nieuwsbrief* is een volgende selectie van toepassingen gemaakt met als doel die in de tweede fase van het project nader te belichten. Dit heeft drie concrete toepassingen opgeleverd:

- nanotechnologie in drug delivery;
- nanotechnologie in zonnecellen;
- nanotechnologie in waterzuivering.

De teksten uit de enquête zijn als bijlage in dit rapport opgenomen.

De uitkomst van de enquête sluit aan bij eerder verkennend onderzoek naar opkomende publiekspercepties van nanotechnologie (Hanssen 2004). Daaruit blijkt dat het publiek grote waarde hecht aan de mogelijke oplossingen die nanotechnologie biedt voor maatschappelijke vraagstukken op het gebied van gezondheid en milieu. Het gaat dan ook om de ontwikkeling van betere en nieuwe medicijnen, duurzame energievoorziening en technologie voor ontwikkelingslanden. In de huidige discussie over nanotechnologie is juist voor deze drie toepassingsgebieden de vraag belangrijk hoe kansen kunnen worden benut. Om die vraag te beantwoorden is inzicht nodig in hoeverre de actuele ontwikkelingen in wetenschap en technologie aansluiten bij de huidige verwachtingen. In dit rapport nemen we de nationale innovatiedynamiek (die uiteraard ook wordt bepaald door internationale ontwikkelingen) van de gekozen toepassingen onder de loep. Om voldoende vergelijkend inzicht op te doen, nemen we een extra toepassing mee: nanotechnologie voor nieuwe computertechnologie. De verwachting is namelijk dat nanotechnologie een grote rol zal spelen en veel impact zal hebben op dit toepassingsgebied.

1.2 Doel en werkwijze

De verwachtingen rondom nanotechnologie zijn hooggespannen. Vaak wordt beweerd dat deze samen met de biotechnologie zal zorgen voor de industriële revolutie van de eenentwintigste eeuw. Ook wordt haar een grote impact toegedicht op allerhande maatschappelijke en economische sectoren. Over het realiteitsgehalte van deze verwachtingen lopen de meningen echter uiteen. Volgens sommigen is het nog maar de vraag óf de nanowetenschappen hun beloften kunnen waarmaken. Maar volgens anderen is de vraag eerder wannéér nanowetenschappen voor grote doorbraken gaan zorgen. Deze diversiteit aan opvattingen en verwachtingen leidt tot een diffuus (toekomst)beeld. Een complicerende factor is dat veelal over nanotechnologie wordt gesproken alsof het gaat om een eenduidig en helder afgebakend domein waar een reeks (potentiële) toepassingen uit voortkomen. De realiteit is echter dat dé nanotechnologie niet bestaat. Het is, net als ICT en biotechnologie, een verzamelbegrip van onderliggende kennis- en toepassingsdomeinen. Vanuit verscheidene hoeken wordt kennis ontwikkeld en kunnen nieuwe producten ontstaan. Dit wordt soms beïnvloed door gemeenschappelijke en soms door heel verschillende factoren.

Visie op nanotechnologie

Deze complexiteit maakt dat er rondom nanotechnologie behalve enthousiasme ook misvattingen bestaan. En er zijn onvervulde of onterechte verwachtingen over de mogelijkheden en de impact van de technologie zelf, en over de termijn waarop deze merkbaar zullen worden. Voor beleidsmakers is het daarom de vraag wat er nodig is voor een doordachte visie. Dit rapport probeert deze vraag mee te beantwoorden. Dit doen we door stil te staan bij de vier gekozen toepassingen van nanotechnologie en bij de innovatieomgeving waarbinnen deze gerealiseerd moeten worden.

Netwerkperspectief op innovatie

In dit rapport wordt naar innovatie gekeken vanuit een *netwerk- of systeemperspectief* om een reëel verwachtingenpatroon te schetsen van wat nanotechnologie zal gaan opleveren. Innovatie komt voort uit een complex samenspel van partijen, die met elkaar bepalen hoe het innovatieproces verloopt en wat de uitkomsten ervan zijn. Ieder van deze partijen speelt een eigen specifieke rol in het proces. Sommige ontwikkelen vooral nieuwe kennis en andere vertalen die kennis in producten en diensten. Daarnaast zijn er partijen die een meer randvoorwaardelijke functie hebben, bijvoorbeeld de overheid voor wet- en regelgeving, maar ook financiële instellingen als het gaat om de beschikbaarheid van risicokapitaal. Ten slotte worden al deze partijen in hun innovatiegedrag beïnvloed door zaken als:

- de heersende normen en waarden;
- de innovatie- en ondernemingscultuur;
- de standaarden die gelden;
- de manier waarop de kennisinfrastructuur is samengesteld;
- de manier waarop de kennisinfrastructuur wordt aangestuurd;
- de manier waarop de arbeidsmarkt en financiële markten functioneren.

De betrokken partijen en instituties kunnen verschillend zijn samengesteld en kunnen op verschillende manieren samenspelen, afhankelijk van de sector of de specifieke toepassingsgebieden waarnaar gekeken wordt. Deze verschillen in organisatie en dynamiek van innovatie kunnen leiden tot verschillende ontwikkelingstrajecten, waarbij de uitkomsten van het innovatieproces niet overeen hoeven te komen met de oorspronkelijke verwachtingen.

Twee centrale vragen

We verkennen de dynamiek van de innovatiesystemen voor de vier genoemde toepassingsgebieden. Dit doen we aan de hand van de volgende twee vragen:

- **Innovatievraag:** Hoe realistisch is het om innovatieve toepassingen van nanowetenschappelijk en nanotechnologisch onderzoek te verwachten voor 2015?
- **Agenderingsvraag:** Op welke manier komt de onderzoeksagenda, al dan niet onder de noemer van nanotechnologie, tot stand?

Om deze vragen te beantwoorden, hebben we grotendeels gebruikgemaakt van deskresearch, aangevuld met informatie uit interviews. De bronnen die zijn gebruikt, geven we per hoofdstuk weer in de laatste paragraaf.

1.3 Opbouw van het rapport

In de hoofdstukken 2 tot en met 5 werken we de toepassingsgebieden verder uit. Voor het antwoord op de innovatievraag begint elk hoofdstuk met een korte schets van het innovatiesysteem waarbinnen de toepassingen tot stand komen. De samenstelling en de dynamiek van deze systemen bepalen de manier waarop innovaties gerealiseerd worden en onderzoeksagenda's tot stand komen. Vooral het samenspel tussen wetenschap, bedrijfsleven, maatschappij en overheid speelt hierbij een rol. Verder beschrijven we kort welke rol en impact de nanowetenschappen en –technologie kunnen hebben in het desbetreffende toepassingsgebied (wat zijn de beloften?). Vervolgens hebben we geïnteriseerd welke barrières van invloed kunnen zijn op de schaal en de termijn waarop innovatie leidt tot marktintroductie.

Voor de agenderingsvraag schetsen we voor ieder toepassingsgebied de huidige onderzoeksprogramma's in Nederland. Hoe zijn deze tot stand gekomen? En in hoeverre komen de barrières erin aan bod die zijn geïdentificeerd bij de beantwoording van de innovatievraag? Ook staan we stil bij de vraag wie betrokken is bij de totstandkoming van de onderzoekagenda's.

In hoofdstuk 6 trekken we conclusies uit het totaalbeeld dat uit de vier toepassingsgebieden naar voren komt. Ook gaan we in op de implicaties voor een beleidsvisie op nanotechnologie.

1.4 Referenties

- Biesboer, F. (2004). *Verslag workshop biomedische nanotechnologie*: stadskasteel Oudaen, Utrecht, 7 juli 2004. Den Haag: Rathenau Instituut.
- Enzing, C. en J. van Kasteren (2006). *Nanotechnologie in Focus: zoektocht naar maatschappelijk relevante oplossingen op korte termijn (2015)*. Den Haag: Rathenau Instituut.
- Hanssen, L. & R. van Est (2004). *De dubbele boodschap van nanotechnologie: een onderzoek naar opkomende publiekspercepties*. Den Haag: Rathenau Instituut.

2 Nanotechnologie in drug delivery

Het gebied van gezondheid is momenteel volop in beweging, niet in de laatste plaats door de vooruitgang van het (wetenschappelijk) onderzoek. De opkomst van nanotechnologie heeft in de wetenschappelijke wereld geleid tot een nieuw gebied: *nanomedicine*. Nanomedicine is een brede aanduiding voor nieuwe toepassingen binnen de gezondheidszorg van materialen met nanoafmetingen of nanostructuren die unieke medische eigenschappen bezitten. Het gaat hierbij om medicijnen en therapieën, afgiftesystemen van medicijnen in het lichaam (drug delivery), in vivo imaging, in vitro diagnostica, biomaterialen en implantaten (Wagner et al. 2006).

De meeste aandacht gaat op dit moment echter uit naar de ontwikkeling van drug-deliverysystemen. *Drug delivery* is het specifieke domein in de medische wetenschappen en industrie dat zich erop richt geneesmiddelen gericht af te leveren in het (menselijk) lichaam. Driekwart van de onderzoeksactiviteiten en van de 'nanomedicine markt' gaat hierover (Wagner et al. 2006). Nanotechnologie speelt al een (bescheiden) rol in dit domein en deskundigen verwachten dat dit voor 2015 sterk zal toenemen. In dit hoofdstuk schetsen we kort het innovatiesysteem waarbinnen dergelijke drug-deliverysystemen worden ontwikkeld. En we geven aan welke rol nanotechnologie kan spelen en op welke termijn. Ten slotte staan we stil bij hoe de onderzoeksagenda op dit gebied is ingevuld.

2.1 Schets van het innovatiesysteem

Het domein van drug delivery behoort tot het Nederlandse farmaceutische innovatiesysteem. Dit is bescheiden te noemen binnen de totale omvang van de farmaceutische industrie, en het internationale karakter daarvan.]. De Nederlandse geneesmiddelenmarkt voor consumenten bedroeg in 2004 € 3,6 miljard en groeit jaarlijks met iets meer dan 1 procent (Nefarma 2005; OECD 2006). Internationaal gezien heeft de Nederlandse markt slechts een beperkt aandeel, zo'n 3 procent van de Europese markt en nog geen 0,8 procent van de wereldmarkt (EFPIA 2006). Wat betreft de productiewaarde van farmaceutische producten neemt Nederland met € 5,6 miljard ongeveer 3,5 procent van de totale Europese productie voor zijn rekening.

Openbare gegevens over de nichemarkt voor drug-deliverysystemen zijn beperkt beschikbaar en variëren bovendien sterk. Schattingen door onderzoeksbureau BCC van de omvang van de totale markt voor drug-deliverysystemen in de Verenigde Staten geven voor 2005 een waarde van \$ 64.1 miljard, terwijl voor 2011 een groei naar \$ 153 miljard wordt verwacht (BCC 2006). De mogelijke markt in de Verenigde Staten voor drug-deliverysystemen op nanoschaal wordt hierbij geschat op \$ 980 miljoen in 2005, met een jaarlijkse groei van 54 procent over de komende vijf jaar (Lux research 2006). Een recent onderzoek naar de omzet van 38 nanomedicine producten (Wagner et al. 2006) schat de wereldwijde nanomedicine markt in 2004 op \$ 6,8 miljard. Hiervan nemen op nanotechnologie gebaseerde drug-deliveryproducten meer dan driekwart voor hun rekening: \$ 5,4 miljard.

Het aantal farmaceutische ondernemingen in Nederland schommelde in de periode 1994-2003 rond de honderd (CBS/Statline 2006). Het merendeel van deze ondernemingen zijn vestigingen in Nederland van grote buitenlandse farmaceutische ondernemingen. Die

houden zich hier bezig met research en development (R&D) en richten zich daarnaast ook sterk op de productie, verkoop en (internationale) logistiek. Gemeten naar omzet en werkgelegenheid zijn de (van oorsprong) Nederlandse farmaceutische bedrijven Organon en DSM (met de Pharmaceutical Products-divisie) de belangrijkste. De totale werkgelegenheid in de farmaceutische sector in Nederland bedroeg in 2004 circa zestienduizend werknemers, wat een groei van 3,8 procent betekende in vergelijking met de eerste helft van de jaren negentig (Nefarma 2005). In termen van werkgelegenheid werkt 2,6 procent van het totale aantal werknemers in de Europese farmaceutische sector in Nederland.

Biofarmacie

In het verlengde van de 'traditionele' farmaceutische industrie moet ook de biofarmaceutische sector in ogenschouw worden genomen. Tot deze relatief jonge sector horen die bedrijven die gebruikmaken van biotechnologie om nieuwe geneesmiddelen, behandelmethoden, diagnostiek te ontwikkelen. Door biologische principes toe te passen kan deze sector veel gericht, dat wil zeggen effectiever en efficiënter, werken aan nieuwe geneesmiddelen dan tot voor kort mogelijk was op basis van vooral chemische processen (waar de 'traditionele' farmaceutische multinationals mee groot zijn geworden). Biotechnologie is op dit moment de belangrijkste input voor de farmaceutische sector in zijn zoektocht naar nieuwe *blockbusters*.

In Nederland is het aantal biofarmaceutische ondernemingen sinds het begin van de jaren negentig sterk gegroeid: van minder dan twintig in 1994 tot ruim tachtig in 2002 (OECD 2006). Het zijn vaak kleinere, technologiegedreven ondernemingen die zich hebben gespecialiseerd in nichemarkten, bijvoorbeeld door zich te richten op bijzondere aandoeningen, specifieke onderdelen van het geneesmiddelenontwikkelingsproces, of specifieke technologieën. De totale Nederlandse biofarmaceutische sector haalde in 2001 een omzet van ruim € 123 miljoen, en investeerde € 73 miljoen in R&D. De sector beschikte over bijna 1800 werknemers, waarvan ongeveer 60 procent in R&D (OECD 2006). In Nederland zijn er maar heel weinig bedrijven die zich (grotendeels) richten op drug delivery: hooguit vijf tot tien.¹ Hiervan is Octoplus, dat gestart is in 1995 en onlangs een beursnotering heeft verworven, het grootst met bijna 130 werknemers. Alle andere ondernemingen zijn na 2000 opgericht en zijn typische *technostarters*.

Research en development

De farmaceutische industrie kent een sterke traditie op het gebied van research en development (R&D). Zo kwamen in 2003 de R&D-investeringen van de farmaceutische industrie in Nederland uit op bijna een € 0,5 miljard. Dit is weliswaar slechts 2,1 procent van de totale R&D-investeringen van de Europese farmaceutische industrie, maar tegelijkertijd ook meer dan 10 procent van de totale private R&D-investeringen in Nederland. Daarmee is de farmaceutische industrie een uiterst belangrijke sector voor de Nederlandse innovatiearena.

Tabel 1 Cijfers over de Nederlandse farmaceutische sector

| | Nederland (in €) | EU / EFPIA-leden (in €) |
|---|-------------------|-------------------------------------|
| Totale markt (sales at ex-factory prices) | 3,58 mld. | 120,1 mld. (454,9 mld. wereldmarkt) |
| Totale productie | 5,6 mld. | 160,8 mld. |
| Totale R&D-investeringen | 0,45 mld. | 21,1 mld. |
| Totale werkgelegenheid | 16.000 werknemers | 612.114 werknemers |

Bron: EFPIA 2006 en Nefarma 2005

¹ Naast Octoplus kunnen nog genoemd worden: Syntarga, Feyecon, Synvolux, Encapson, BiOrion Technologies, en C-Tres.

Een belangrijke ontwikkeling in de afgelopen tien tot twintig jaar is dat het zwaartepunt in de farmaceutische markt - inclusief innovatie - is verschoven naar de Verenigde Staten. Dit geldt niet alleen voor de Nederlandse, maar voor de hele Europese farmaceutische sector. Waar de markt in de VS over de periode 1994-2004 gemiddeld groeide met 12,5 procent per jaar, bleef heel Europa steken op iets meer dan 7 procent groei per jaar (EFPIA 2006). Inmiddels wordt in de VS 47 procent van de totale wereldomzet aan geneesmiddelen gerealiseerd, tegenover 30 procent in Europa (EFPIA, 2006). Bovendien wordt van de verkoop van medicijnen die sinds 2001 op de markt zijn gebracht, 66 procent gerealiseerd in de VS en slechts 24 procent in Europa (EFPIA 2006).

Ook voor de biofarmaceutische sector ligt het zwaartepunt in de Verenigde Staten: 75 procent van de wereldwijde omzet uit biofarmaceutische producten wordt in de Verenigde Staten gerealiseerd, en 75 procent van de wereldwijde R&D-investeringen in biofarmaceutisch onderzoek wordt in de Verenigde Staten gedaan (cijfers voor 2005; bron: EFPIA 2006). Hetzelfde geldt voor de op nanotechnologie gebaseerde drug-deliverysystemen. Door het eerder aangehaalde onderzoek van Wagner et al. (2006) zijn 38 nanomedicineproducten geïdentificeerd, waarvan 23 drug-deliveryproducten. Van deze 23 producten zijn er 20 door bedrijven uit de Verenigde Staten op de markt gebracht. Bovendien staat 54 procent van het wereldwijde totaal aantal patenten op nanomedicine op naam van Amerikaanse ondernemingen (Wagner et al. 2006). Dit illustreert de vooraanstaande positie van de VS bij de ontwikkeling en introductie van nieuwe geneesmiddelen en methoden: farmaceutische ondernemingen willen hun onderzoek naar nieuwe geneesmiddelen concentreren op de plaats waar de kans op commercieel succes van die geneesmiddelen het grootst is. Behalve van de VS heeft Europa, en dus ook Nederland, steeds meer te maken met de sterke internationale concurrentie vanuit opkomende landen als India en China.

Onderzoek

Het Nederlandse universitaire onderzoek vindt voor een groot deel plaats in onderzoeksscholen die gespecialiseerd zijn in geneesmiddelenonderzoek. Dit zijn bijvoorbeeld het Leiden/Amsterdam Center for Drug Research (LACDR), het Cardiovascular Research Institute Maastricht (CARIM), het Groningen University Institute for Drug Exploration (GUIDE) en het Utrecht Institute for Pharmaceutical Sciences. Behalve de universitaire groepen en instituten speelt ook een (semi)publieke speler als TNO een bepalende rol in de onderzoeksinfrastructuur. Verder wordt het Nederlandse geneesmiddelenonderzoek in belangrijke mate gekenmerkt door het relatief grote aantal bedrijven dat gespecialiseerd is in klinisch onderzoek voor derden ('clinical trial contract research organisations') en door het grote aantal patiëntenverenigingen.²

Ondanks de bescheiden omvang van de markt en industrie heeft Nederland traditioneel een goede naam waar het gaat om het farmaceutisch onderzoeksklimaat. Zo werd jaarlijks veel meer dan 2 procent van de wereldwijde (industriële) fase I tot en met IV (pre)klinische studies in Nederland verricht (website van Nefarma). De combinatie van een kwalitatief hoogstaande gezondheidszorg, de wetenschappelijke excellentie van universitaire groepen, snelle toestemmingsprocedures en een beperkte bureaucratie leverden een aantrekkelijk klimaat om tegen een laag kostenniveau onderzoek van hoge kwaliteit uit te (laten) voeren (nefarma.nl; TNO 2004). De afgelopen jaren is die aantrekkingskracht van het Nederlandse onderzoeksklimaat echter door verscheidene oorzaken steeds meer onder druk komen te staan. Een belangrijke factor daarbij is de sterk opkomende concurrentie voor (pre)klinisch onderzoek vanuit Oost-Europese landen, die kwalitatief goed onderzoek leveren tegen zeer concurrerende tarieven en met

² Zo schat TNO (2004) voor 2003 het aantal commerciële klinisch onderzoekorganisaties op circa 30 en het aantal patiëntenverenigingen op meer dan 400.

gemotiveerde proefpersonen. Doordat de wet- en regelgeving voor (pre)klinisch onderzoek is aangescherpt, is het niet langer mogelijk dergelijk onderzoek in Nederland sneller te starten dan in andere EU-lidstaten.

Wet- en regelgeving

Bij de ontwikkeling van nieuwe medicijnen wordt kennisintensief onderzoek gedaan, dat een lange ontwikkeltijd vraagt. Die wordt nog langer door de uitgebreide wet- en regelgeving op dit gebied. De farmaceutische sector staat bekend als een van de meest gereguleerde sectoren ter wereld. De uitvoerige vereisten rondom het preklinisch en klinisch onderzoek en de markttoelatingsprocedures zorgen ervoor dat de ontwikkeling en introductie van innovatieve geneesmiddelen al snel tien tot vijftien jaar in beslag nemen en meer dan € 900 miljoen kosten (EFPIA 2006). Hierbij speelt (inter)nationale wet- en regelgeving op het gebied van intellectueel eigendom een belangrijke rol, omdat die de innovatieve farmaceutische bedrijven gedurende een beperkte tijd een monopolie biedt om de ontwikkelde kennis te gebruiken en het farmaceutische product te exploiteren. Veranderingen in deze wet- en regelgeving of verschillen tussen de nationale rechtssystemen kunnen daarom grote gevolgen hebben voor innovatieprocessen en – strategieën.

Ten slotte dienen ook de gehanteerde vergoedingstelsels in de nationale zorgsystemen vermeld te worden. De kans dat een innovatief medicijn in aanmerking komt voor restitutie is een belangrijke factor in de keuze om het al dan niet te introduceren in een specifieke markt (= land). Met medicijnen die vergoed worden, wordt immers gemakkelijker omzet gerealiseerd dan met medicijnen die de patiënt helemaal zelf moet betalen. In Europa bestaat echter een lappendeken aan verschillende vergoedingstelsels en bijbehorende procedures en criteria. Dit betekent dat farmaceutische bedrijven in elk land aparte trajecten en onderhandelingen in moeten gaan.

2.2 Rol en mogelijke impact van nanotechnologie

De medische toepassing van nanotechnologie maakt het mogelijk nieuwe toepassingen te ontwikkelen voor de diagnose, preventie en behandeling van specifieke aandoeningen (European Science Foundation 2005). Dit gebeurt met behulp van nanomaterialen en – structuren, en moleculaire kennis van het menselijk lichaam. De algemene verwachting is dat nanotechnologie vooral zal leiden tot ontwikkelingen van enerzijds nieuwe analytische en beeldvormende (imaging) instrumenten en anderzijds nieuwe geneesmiddelen en manieren om deze in het lichaam af te leveren op de juiste plek en op het juiste tijdstip (drug delivery en targeting) (ESF 2004; RIVM 2005; Gezondheidsraad 2005).

Het hedendaagse drug-deliveryonderzoek kent drie centrale doelstellingen (ESF 2005):

- meer specifieke en nauwkeurige aflevering van geneesmiddelen;
- grotere veiligheid en biocompatibiliteit;
- een snellere ontwikkeling van nieuwe en veilige geneesmiddelen.

De verwachting is dat nanotechnologie een belangrijke bijdrage gaat leveren om elk van deze doelstellingen te bereiken. De meest revolutionaire eigenschap van nanodeeltjes voor de farmaceutische sector is de mogelijkheid om gebruik te maken van hun wisselwerking met proteïnen en peptiden, en ze van daaruit nauwkeurig te richten en te leiden naar de specifieke doelen in het menselijk lichaam (VDI/VDE 2005). Zo voorziet nanotechnologie, door de revolutionaire miniaturisering in fabricageroutes, in een verscheidenheid aan minuscule structuren (nanodeeltjes, 'nanocontainers') die klein genoeg zijn om in te brengen in een cel. Er bestaat inmiddels een grote variëteit aan omhulsels en capsules op nanometerschaal, die te gebruiken zijn om bepaalde medicijnen of levende cellen in op te

slaan. Ook materialen met nanoporiën of -gaatjes kunnen die opslagfunctie vervullen, waarbij de poriën reguleren hoe de stoffen in het lichaam worden uitgewisseld (Gezondheidsraad 2006). Verder zijn er tal van mogelijke medische toepassingen voor magnetische nanodeeltjes, bijvoorbeeld als vehikel om medicijnen gericht toe te dienen (cytostatica). Ook is het mogelijk nanodeeltjes in te zetten bij nieuwe bestrijdingsmethoden van tumoren zoals verhitting. In plaats van bestraling met schadelijke stralen kan dan 'huis-tuin-en-keuken' straling worden toegepast. Deze straling warmt de nanodeeltjes op, die zich in de tumor verzameld hebben, waarna de hoge temperatuur de aanwezige kankercellen vernietigt. Ook zouden magnetische deeltjes ingezet kunnen worden als contrastmiddel voor MRI-scans.

Innovatie in drug-deliverysystemen

De industrie en de wetenschap hebben grote belangstelling voor dit soort nieuwe toedienings- en afgiftemethoden. Door medicijnen in een tumor of in een specifiek orgaan toe te dienen, kunnen werkzame stoffen effectiever worden en kunnen bijwerkingen in de rest van het lichaam worden vermeden. Zelfs oudere of niet-goedgekeurde medicijnen kunnen in deze context alsnog op veilige wijze op de markt gebracht worden. De zoektocht richt zich sterk op *smart drug-deliverysystemen*, die ervoor zorgen dat:

- geneesmiddelen niet uit elkaar vallen tijdens het transport in het menselijk lichaam;
- geneesmiddelen zich opeenhopen in de *target tissue*;
- geneesmiddelen gecontroleerd worden vrijgegeven.

Hoewel er in 2004 al 23 op nanotechnologie gebaseerde drug-deliverysystemen op de markt waren (Wagner et al. 2006), lijken dit soort 'intelligente' afleversystemen toch nog beperkt beschikbaar. Zo was er volgens de European Science Foundation (2005) eind 2004 nog maar één beschikbaar: Abraxane (gericht op borstkanker). Verder zijn er wel diverse geneesmiddelen met meer complexe nanoafleversystemen die zich momenteel in een (pre)klinische onderzoeksfase bevinden (Gezondheidsraad 2006).

Hiermee wordt ook de stand van het innovatieproces weergegeven rondom de toepassing van nanotechnologie in drug-deliverysystemen. Dit bevindt zich nog in de fase van exploratie, van fundamenteel en toegepast onderzoek. Het streven is daarbij vooral om de basiseigenschappen van nanomaterialen beter te begrijpen (VDI/VDE 2005). De verwachting is dat rond 2015 de eerste toepassingen op kleine schaal hun weg naar de markt zullen vinden (VDI/VDE 2005). Maar het hangt van een aantal factoren en te nemen hordes af op welke termijn smart drug-deliverysystemen gebaseerd op nanotechnologie op grotere schaal verkrijgbaar zullen zijn, en echt impact zullen hebben (VDI/VDE 2005).

2.3 Mogelijke barrières

In recente rapporten (Wagner et al. 2006; Gezondheidsraad 2006; VDI/VDE 2005; European Science Foundation 2004) over de ontwikkeling van nanomedicine komen verscheidene factoren aan bod die van invloed zijn op de ontwikkeltermijn van drug-deliverysystemen die gebaseerd zijn op nanotechnologie, en vooral ook op de schaal waarop deze beschikbaar zullen komen. Daarbij spelen de volgende technologische barrières een rol.

▪ Gericht koppelen

Het zal onderzoekers waarschijnlijk meer inspanning kosten dan nu ingeschat wordt om de nanodeeltjes daadwerkelijk specifiek te kunnen koppelen aan richtmoleculen (targeting).

- **Beschikbaarheid geschikte nanodeeltjes**

Hoewel een groot aantal nanodeeltjes onderzocht wordt op hun geschiktheid om te dienen als afleversysteem, zijn er op dit moment te weinig beschikbaar om te kunnen voorzien in de huidige en diverse vraag naar therapeutische functies. Er zal een sterke behoefte ontstaan om een breder scala aan nanomaterialen te ontwikkelen met eigenschappen die ze geschikt maken voor drug delivery (Gezondheidsraad 2006).

- **Gebrek aan toxicologische kennis**

Door de onbekendheid met de basiseigenschappen van nanodeeltjes en –structuren in het menselijk lichaam en door het gebrek aan geschikte analytische instrumenten hebben onderzoekers onvoldoende houvast om toxicologische effecten vast te stellen. Het gevaar bestaat dat toepassing van nanodeeltjes in geneesmiddelen of in de methode van afgifte ernstige bijwerkingen oplevert die de werking van het geneesmiddel overstijgen. Dit wordt als een belangrijk knelpunt gezien. In het verlengde hiervan dient ook rekening te worden gehouden met mogelijk schadelijke effecten van nanodeeltjes op het milieu.

Naast deze grotendeels technologische aspecten worden in de genoemde rapporten nog een aantal andersoortige barrières geïdentificeerd:

- **Opschaling**

Kan de productie van nanomaterialen en –structuren op korte tot middellange termijn worden opgeschaald? De mogelijkheden daartoe worden betwijfeld. Dit is voor een deel toe te schrijven aan de onbekendheid met de basiseigenschappen van specifieke nanomaterialen. Het is bijvoorbeeld de vraag of de nanomaterialen die ontwikkeld zijn in een kleinschalige onderzoeksomgeving, ook zonder meer gereproduceerd of op grote schaal gefabriceerd kunnen worden. Deze vraag hangt samen met het ontbreken van (GMP-achtige³) productiestandaarden voor nanomaterialen en met de te verwachten hoge productiekosten.

- **Commercialisering**

Nanomedicine producten worden op dit moment vooral gecommmercialiseerd door innovatieve start-ups en bedrijven uit het midden- en kleinbedrijf (mkb). Gezien de torenhoge kosten voor ontwikkeling en commercialisering is de steun of betrokkenheid van grote farmaceutische bedrijven onontbeerlijk om van nanomedicine een commercieel succes te maken.

- **Coördinatie**

Het onderzoek naar nanomedicine is sterk multidisciplinair, internationaal en kostenintensief, en vraagt daarom om een efficiënte en effectieve organisatie. Dit wordt nog versterkt doordat de deelgebieden binnen nanomedicine zich in verschillende ontwikkelingsstadia bevinden. De huidige organisatie en financiering van het onderzoek in Europa en veel van haar lidstaten is sterk gefragmenteerd, en sectoraal en/of disciplinair verkokerd. Dit leidt tot overlap in onderzoek en een tekort aan kritische massa. Er is daarom dringend behoefte aan dat het nanomedicine onderzoek meer wordt gecoördineerd, dat organisaties en disciplines beter gaan communiceren, en dat internationale samenwerking op dit vlak wordt gestimuleerd.

- **Communicatie**

Voor het algemene publiek maar ook voor beleidsmakers zijn de (on)mogelijkheden en vereisten van nanotechnologie in het algemeen en van nanomedicine, in het bijzonder

³ Good Manufacturing Practice, internationale kwaliteitsstandaard ten aanzien van het productieproces van geneesmiddelen. Een variant hierop is GLP, Good Laboratory Practice.

moeilijk te bevatten. Daarom is er sterke behoefte aan dat zowel de wetenschap als het bedrijfsleven specifieke informatie verspreiden. Zeker bij de discussie rond potentiële risico's is een goede communicatie nodig.

- **Gevolgen voor klinisch onderzoek**

De basiseigenschappen van nanomaterialen en hun toxicologische effecten zijn relatief onbekend. Daarom is het denkbaar dat op termijn andere eisen gesteld gaan worden aan het (pre)klinisch onderzoek en aan de dossiers waarop het besluit gebaseerd wordt om geneesmiddelen al dan niet tot de markt toe te laten. Voor 'reguliere' nieuwe geneesmiddelen neemt het ontwikkeltraject, mede vanwege de stringente wet- en regelgeving, al gauw zo'n twaalf tot dertien jaar in beslag en kost het meer dan € 900 miljoen (EFPIA 2006). Als de eisen aan onderzoek naar veiligheid, kwaliteit en effectiviteit van de geneesmiddelen die gebruikmaken van nanomaterialen veranderen, dan kan dit van grote invloed zijn op die ontwikkelingstermijn en -kosten.

- **Onderzoeks- en innovatieklimaat**

Bij voorkeur wordt de ontwikkeling van innovatieve geneesmiddelen daar verricht waar ook de grootste kans bestaat op commercieel succes. Daardoor zijn de verschillen tussen de Verenigde Staten en Europa zo belangrijk, bijvoorbeeld de verschillen in ondernemingscultuur en in de beschikbaarheid van risicokapitaal. Verder zijn er verschillen in wet- en regelgeving. Hierbij is het voor het succes van medicijnen onder andere van belang hoe gemakkelijk het product wordt toegelaten op de markt en in hoeverre het vergoed wordt. De Europese markt is een lappendeken van verschillende regelingen en stelsels die de mate en de hoogte van geneesmiddelenvergoeding bepalen. Bovendien is de afgelopen jaren in de meeste landen - en zeker ook in Nederland - een toenemende nadruk komen te liggen op een verlaging van de kosten van de gezondheidszorg. Voor geneesmiddelen heeft dit zich erin vertaald dat het voorschrijven van goedkope (generieke) geneesmiddelen voortdurend wordt gestimuleerd, parallelimport ogluikend wordt toegestaan en de meerwaarde van dure innovatieve (en gepatenteerde) geneesmiddelen ter discussie gesteld wordt. Dit soort signalen vanuit de overheid zijn bedoeld om de kosten te beheersen in de gezondheidszorg, maar belemmeren tegelijk een gunstig onderzoeks- en innovatieklimaat.

2.4 Onderzoek en agendering

Farmaceutisch onderzoek

In Nederland, in het bijzonder bij de Nederlandse overheid, ontbreekt het aan een langetermijnstrategie voor de mogelijkheden van samenwerking tussen universiteit en industrie op het gebied van geneesmiddelenonderzoek. Althans, zo luidt een van de constatering op het symposium dat de Koninklijke Akademie van Wetenschappen (KNAW) in het najaar van 2004 organiseerde (KNAW 2005). Verder werd vastgesteld dat de publieke middelen voor het onderzoek steeds verder afnemen en dat in Nederland geen specifieke programma's of organisaties bestaan die stimuleren dat universiteiten of bedrijven geneesmiddelen ontwikkelen.

Dit beeld lijkt nog steeds actueel getuige de websites en jaarverslagen van organisaties als ZonMw, Technologiestichting STW, de overkoepelende Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), of het RegieOrgaan Genomics. Al deze organisaties dragen (mede)verantwoordelijkheid om (medisch) wetenschappelijk onderzoek in Nederland te coördineren en te financieren. Het huidige onderzoek op deze gebieden lijkt vooralsnog te worden gefinancierd vanuit breed opgezette of 'open' programma's

(bijvoorbeeld het Open Technologie Programma van Technologiestichting STW) of vanuit medisch georiënteerde programma's waar drug delivery een nevenaspect vormt (bijvoorbeeld het IOP Genomics). Vooral de onderzoekers zelf lijken de richting van dit onderzoek te bepalen, hoewel bij financiering door STW ook het bedrijfsleven tot op zekere hoogte betrokken is via gebruikerscommissies.

Biomade en NanoNed

Het beeld uit de vorige alinea vraagt echter enige nuancering. Zo worden vanuit de BSIK-gelden (gelden op basis van het Besluit subsidies investeringen kennisinfrastructuur) twee programma's (mede) gefinancierd die zich sterk richten op geneesmiddelenontwikkeling, inclusief afleversystemen. Daarnaast wordt bio- en nanotechnologie ingezet binnen het onderzoeksinstituut BioMade en het flagship BioNanoSystems van het onderzoeksconsortium NanoNed (acht onderzoeksinstituten en Philips). BioMade ontvangt voor de periode 2004-2008 een bedrag van € 7 miljoen en NanoNed in totaal € 95 miljoen voor de periode 2005-2010. Overigens maakt BioMade ook deel uit van het NanoNed consortium en is het bovendien de belangrijkste deelnemer van het BioNanoSystems-programma.

Binnen BioMade en NanoNed wordt fundamenteel onderzoek gedaan. Daarnaast is er plaats voor meer toegepast wetenschappelijk onderzoek waarbij de economische toegevoegde waarde daarvan een belangrijk uitgangspunt vormt. In dit kader wordt ook nauw samengewerkt met de farmaceutische industrie, waarbij NanoNed het STW-systeem van de gebruikerscommissies heeft overgenomen. NanoNed besteedt aandacht aan de maatschappelijke relevantie van het onderzoek en binnen het Technology Assessment (TA)-programma van NanoNed, dat gaat over ethische, wettelijke en sociale aspecten van (bio)nanotechnologie.

Pharma

Recentelijk is het Technologisch Top Instituut Pharma (TI Pharma) opgericht. Doel is om leiderschap te kweken in onderzoek en onderwijs op gebieden die vanuit het perspectief van internationaal concurrentievermogen belangrijk zijn voor de farmaceutische industrie in Nederland. Het instituut is, net als andere technologische topinstituten, een publiekprivate constructie waarin zowel de wetenschap als het bedrijfsleven deelneemt en dat door de rijksoverheid financieel wordt ondersteund met € 130 miljoen voor vier jaar. De bedoeling is dat de industrie en de wetenschap nauw met elkaar gaan samenwerken op het gebied van farmaceutisch onderzoek en onderwijs. Het onderzoeksprogramma van TI Pharma is nog in ontwikkeling, maar zal zich concentreren op vijf onderzoeksthema's, en de projecten zullen focussen op specifieke aandoeningen en mogelijke farmacotherapieën. Drug delivery komt expliciet aan bod als een van de zeven technologische disciplines die vereist zijn bij onderzoek naar geneesmiddelen, en de ontwikkeling ervan.

NWO

Ten slotte werkt de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) aan een langetermijnvisie en een nationaal multidisciplinair onderzoeksprogramma voor het domein van de nanowetenschappen en -technologie. Een studiegroep met vertegenwoordigers van vooraanstaande academische groepen in dit veld - ondersteund door STW en FOM - heeft in 2005 dit traject ingezet met het opstellen van een strategiedocument. Nanomedicine is een van de drie thema's die hierin zijn geïdentificeerd als gebieden waarop de Nederlandse wetenschap kan excelleren en die bovendien aansluiten bij toepassingen die de Nederlandse en Europese industrie op dit moment ontwikkelen (NWO 2005). Binnen dit thema worden nanomaterialen expliciet benoemd als aandachtsgebied voor onder andere de ontwikkeling van nieuwe drug-deliverysystemen.

De NWO-onderzoeksagenda is nog niet ver uitgewerkt, maar de strategienota behandelt een groot aantal van de eerder vermelde knelpunten. Deze nota heeft vanzelfsprekend veel aandacht voor technologische knelpunten, maar ook voor de noodzaak om de probleemstelling scherp te definiëren en voldoende massa te genereren. Daarnaast is men zich duidelijk bewust van het multidisciplinaire karakter van het onderzoek en van de noodzaak om daarin ook de maatschappelijke factoren en de omgevings- en gezondheidsaspecten van nanomaterialen te betrekken. De rol van de burgers (vertegenwoordigd door patiënten en patiëntenverenigingen) blijft bij de discussie rond een dergelijke onderzoeksagenda volledig onbesproken, laat staan dat deze belanghebbenden er een directe stem in hebben.

2.5 Conclusies

In dit hoofdstuk hebben we geschetst welke rol die nanotechnologie en nanowetenschappen kunnen spelen op het gebied van de gezondheidszorg, en in het bijzonder bij de ontwikkeling van drug-deliverysystemen. Hierbij is ook kort stil gestaan bij de structuur en dynamiek in het relevante innovatiesysteem. De belangrijkste bevindingen staan in tabel 2 hieronder.

Tabel 2 Samenvatting innovatiesysteem nanotechnologie voor drug delivery

| | |
|--|---|
| Kenmerken innovatiesysteem drug delivery | <ul style="list-style-type: none"> ▪ onderdeel van farmaceutisch innovatiesysteem ▪ sterk geïnternationaliseerd met dominantie VS ▪ (nano)drug delivery vooral aangelegenheid van start-ups en kleine mkb'ers ▪ nauwelijks drug-delivery-industrie in NL ▪ internationale concentratie van industrie ▪ kostenintensieve R&D ▪ innige samenwerking tussen industrie en wetenschap ▪ sterk afhankelijk van (inter)nationale wet- en regelgeving |
| Rol/impact nanotechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ beperkt op korte termijn ▪ geavanceerde drug-deliverysystemen op langere termijn (na 2015) |
| Belangrijkste spelers in onderzoek en innovatie in Nederland | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke kennisinfrastructuur en bedrijfsleven |
| Onderzoeksagendering | <ul style="list-style-type: none"> ▪ bedrijfsleven en publieke kennisinfrastructuur ▪ in NL tot voor kort beperkt en gefragmenteerd, maar krijgt in toenemende mate vorm ▪ drug delivery is onderdeel van grotere onderzoeksagenda's |
| Maatschappelijke vraagarticulatie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ d.m.v. focus op specifieke aandoeningen en belangenbehartiging door overheid ▪ mogelijke bijdrage van patiëntenverenigingen in onderzoeksagendering blijft sterk onderbelicht |
| Voornaamste hordes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ economisch ▪ technisch-wetenschappelijk |

Innovatie

Wereldwijd wordt steeds meer onderzoek gedaan naar nanomedicine, wat de hoge verwachtingen van mogelijke toepassingen weerspiegelt. Tegelijk wordt ook een aantal mogelijke knelpunten voorzien die van invloed zijn op de schaal en de termijn waarop deze toepassingen op de markt worden geïntroduceerd. Deze knelpunten zijn sterk technologisch van aard en hangen samen met de relatief prille fase waarin dit toepassingsgebied van nanotechnologie zich bevindt. Daarnaast zijn er enkele meer generieke knelpunten te voorzien zoals het waarborgen van het multidisciplinaire karakter van nanowetenschappen in de organisatie van de onderzoeksinfrastructuur en de tendens naar kostenverlaging binnen de stelsels voor geneesmiddelenvergoeding.

Momenteel zijn er al diverse 'eenvoudige' drug-deliverysystemen op de markt op basis van nanotechnologie. Vooral vanwege de technologische knelpunten en de lange ontwikkelingstermijnen in de farmaceutische sector is het echter de verwachting dat de smart drug-deliverysystemen nog wel even op zich zullen laten wachten. Er is dus aanleiding om te betwijfelen of dergelijke toepassingen op de korte termijn (voor 2015) grootschalig beschikbaar zullen komen. Met deze conclusie wordt ook het realiteitsgehalte ter discussie gesteld van de verwachtingen van drug delivery zoals die zijn vastgesteld in het eerste deel van het project Nanotechnologie in Focus.

Onderzoek

Nederland kan maar een betrekkelijk kleine rol spelen op het gebied van nanomedicine. Ons land vertegenwoordigt slechts een fractie van de wereldmarkt in geneesmiddelen. Bovendien is het aantal spelers in de geneesmiddelensector in Nederland relatief klein en bestaat het bovendien voor een groot deel uit vestigingen van buitenlandse bedrijven. Wel heeft Nederland van oudsher een sterke positie in wetenschappelijk-medisch en farmaceutisch onderzoek. Die is vooral toe te schrijven aan de onderzoekskwaliteit van enkele academische groepen en aan de hoogwaardige medische infrastructuur en voorzieningen. De agenda voor geneesmiddelenonderzoek, inclusief drug delivery, komt echter tot stand binnen een internationaal bepaalde dynamiek, waarbij vooral de Verenigde Staten een leidende rol hebben. In Nederland lijkt het vooralsnog te ontbreken aan een gecoördineerde en algemeen gedragen onderzoeksprogrammering.

Wel krijgen geneesmiddelenonderzoek en drug delivery aandacht in het onderzoek van NanoNed en Biomade en in het onderzoeksprogramma van het recent opgerichte TI Pharma. Verder ontwikkelt NWO een nationale langetermijnvisie en een langetermijnprogramma voor de nanowetenschappen in het algemeen, waarbinnen ook nanomedicine een plaats krijgt. De onderzoeksprogramma's zijn grotendeels tot stand gekomen op basis van gezamenlijke inspanningen door bedrijfsleven en wetenschap (met financiële steun van de overheid). Naast deze programma's zijn diverse meer open of generieke programma's zoals het Open Technologie Programma (OTP) van Technologiestichting STW, de afgelopen jaren belangrijker geweest dan de inhoud van de onderzoeksagenda.

Gezien de geïdentificeerde knelpunten kunnen we in algemene zin stellen dat de meeste programma's voor onderzoek zich richten op de technologische vraagstukken. Tot op zekere hoogte wordt daarbij ook rekening gehouden met de noodzaak van coördinatie en kritische massa in het onderzoek, maar dan voor de nanowetenschappen in zijn algemeenheid en met enige dominantie van nano-elektronica. De andere knelpunten lijken op de huidige onderzoeksagenda's nog nauwelijks aan bod te komen. Het nieuw op te zetten NWO-programma lijkt wel een wat breder spectrum van nanomedicine te gaan dekken, en vraagt aandacht voor een groot aantal vraagstukken of knelpunten, inclusief enkele die meer te maken hebben met de sociale en maatschappelijke aspecten van de technologie.

2.6 Referenties

- BCC Research (2006). *Advanced Drug Delivery Systems: New Developments, New Technologies*. Oktober 2006, Wellesley.
- EFPIA (2006). *The pharmaceutical industry in figures*. Brussel.
- European Science Foundation (2005). *An ESF – European Medical Research Councils (EMRC) Forward Look report on Nanomedicine*. Strasbourg.
- European Science Foundation (2005). *ESF Scientific Forward Look on Nanomedicine: Policy Briefing 23*.
- Gezondheidsraad (2006). *Betekenis van nanotechnologieën voor de gezondheid*. Den Haag.
- KNAW (2005). *Cooperation between universities and pharmaceutical industry; new opportunities in drug research?* KNAW, Amsterdam, november 2005.
- Lux Research (2006). *The Nanotech Report 4th edition*, Lux Research
- Nefarma (2006). *Jaarverslag 2005*. Den Haag.
- NWO (2005). *Towards a multidisciplinary national nanoscience programme. A NWO strategy document*. Den Haag.
- OECD (2006). *Innovation in pharmaceutical biotechnology. Comparing national innovation systems at the sectoral level*. Paris.
- RIVM (2005). *Nanotechnology in medical applications: state-of-the-art in materials and devices*. Bilthoven.
- TNO (2004). *OECD Case Study on Innovation. The Dutch pharmaceutical and food biotechnology innovation systems*. STB-04-12. Delft.
- VDI/VDE – IT (2005). *Nanotechnology in Health and Medical Systems – Roadmap on Drug Encapsulation/Delivery/Targeting*. Project in het kader van het EU-gefinancierde NanoRoadmap (FP6).
- Wagner, V. et al. (2006) 'The emerging nanomedicine landscape'. In: *Nature Biotechnology* 24, no.10.

www.nefarma.nl

www.esf.org

www.nanoroadmap.it

www.tipharma.nl

www.nanoned.nl

www.biomade.nl

www.efpia.org

www.cbs.nl

www.nwo.nl

3 Nanotechnologie en energievoorziening via zonnecellen

In dit hoofdstuk bespreken we de toepassing van nanotechnologie in zonnecellen. Zonnecellen kunnen naast bijvoorbeeld windturbines ingezet worden om onze energievoorziening minder afhankelijk te maken van fossiele brandstoffen. Dit verlangen naar onafhankelijkheid wordt voor een belangrijk deel ingegeven door factoren als klimaatverandering en de instabiele situatie in verscheidene olieproducerende landen. In dit hoofdstuk staan we stil bij het innovatiesysteem voor zonnecellen, bij de rol en mogelijke impact van nanotechnologie daarbij, bij de barrières die zich daarbij voordoen, en ten slotte ook bij de manier waarop het onderzoek naar (nano)zonnecellen is geagendeerd.

3.1 Schets van het innovatiesysteem

Grote internationale spelers

Het beeld van de sector die zich richt op energiewinning door zonnecellen wordt grotendeels bepaald door een beperkt aantal grote internationale spelers. Daarbij speelt Nederland nauwelijks een rol van betekenis. Bedrijven als BP Solar, Shell Solar, Kyocera en Sharp zijn 's werelds voornaamste ontwikkelaars en producenten van zonnecellen en zonnestroomsystemen. Zij zijn verantwoordelijk voor 50 procent van de wereldmarkt in zonnecellen (Institute of Nanotechnology 2006). Schattingen over de omvang van de wereldwijde markt voor zonnestroom lopen uiteen van \$ 3 tot 4 miljard (Institute of Nanotechnology 2006) tot \$ 10 miljard (Sinke et al. 2006). De markt voor zonnecellen groeit snel: 35 tot 40 procent over de afgelopen vijf jaar (Sinke et al. 2006), en vormt inmiddels circa 5 procent van de wereldenergiemarkt (Institute of Nanotechnology 2006).

De zonnecelindustrie in Nederland is beperkt: slechts enkele bedrijven ontwikkelen en produceren zonnecellen. Een voorbeeld hiervan is het jonge bedrijf Solland Solar, dat sinds 2005 een nieuw type zonnecel produceert met licenties op technologie van het Energy research Centre of the Netherlands (ECN-technologie). Een ander bedrijf is Scheuten Solar, dat zich gespecialiseerd heeft in coatings op glas en zonne-energiesystemen. Verder nemen in Nederland diverse bedrijven niet zozeer de ontwikkeling of productie van zonnecellen voor hun rekening, maar ontwikkelen en installeren ze complete zonnestroomsystemen (in combinatie met een groothandelsfunctie). Ten slotte heeft ook de elektrotechnische industrie, waaronder spelers als Philips en Stork, een belangrijk aandeel in de ontwikkeling, productie en levering van de onderdelen die nodig zijn om zonnecellen en zonnestroomsystemen toe te passen, bijvoorbeeld omvormers⁴ of monitoringsystemen. Door de hele sector heen zijn vooral ook buitenlandse ondernemingen te vinden die in Nederland verkoop- en adviesactiviteiten ondernemen, bijvoorbeeld BP Solar, Sharp, IBC Solar, Siemens, Shell Solar.

⁴ Deze zetten de door zonnepanelen geleverde gelijkstroom om in wisselstroom bij een spanning van 220V zodat de opgewekte elektriciteit direct kan worden gebruikt door wisselstroomapparatuur.

Overheidsbeleid duurzame energie

De energiesector is mede afhankelijk van overheidsregulering op het vlak van energie en van stimulering van alternatieve energiewinning. De opwekking van energie staat niet op zichzelf, maar maakt deel uit van de hele energieketen, zeker als de energie die door zonnecellen wordt opgewekt, wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. Daarmee raakt de sector aan kwesties die spelen ten aanzien van het elektriciteitsnet, zoals de instandhouding van de veiligheid en de kwaliteit daarvan (STT,1999). Hoewel zonnecellen worden ontwikkeld en geproduceerd op een internationale markt is de nationale context belangrijk voor de daadwerkelijke toepassing, ook omdat de elektriciteitsmarkten en – infrastructuur vooralsnog een sterk nationaal karakter hebben.

Onderzoek

Op het eerste gezicht vindt het onderzoek naar nieuwe toepassingen en technologieën voor energiewinning door zonnecellen in Nederland voor een belangrijk deel plaats binnen de publieke kennisinfrastructuur. Hierbij gaat het dan vooral om het Energie Centrum Nederland (ECN), TNO, de stichting FOM (Fundamenteel Onderzoek der Materie), de drie technische universiteiten en de universiteiten van Utrecht (Debye Instituut) en Amsterdam (VU en UvA). Een zonnecelindustrie is in Nederland zo goed als afwezig. Een recente rapportage over de octrooiactiviteiten op het gebied van fotovoltaïsche zonnecellen over de periode 1990-2003 nuanceert dit beeld echter enigszins (OCN 2005). Zo houden 65 aanvragers van octrooien op het gebied van fotovoltaïsche zonnecellen domicilie in Nederland.⁵

De 22 meest actieve organisaties zijn te vinden in tabel 3. Akzo Nobel blijkt koploper met 9 octrooien. Verder valt op dat de hierboven genoemde bedrijven maar beperkt in het overzicht terug te vinden zijn. Dit betekent dat kennisontwikkeling en innovatie op dit gebied ook nadrukkelijk plaatsvinden buiten de groep van *dedicated* ontwikkelaars van zonnecellen. Over het algemeen wordt de Nederlandse kennisbasis op het gebied van diverse conversietechnologieën als zeer goed bestempeld (Sinke et al. 2006).

Tabel 3 NL-aanvragers van octrooien op fotovoltaïsche zonnecellen

| Aanvrager | Aantal | Aanvrager | Aantal |
|---------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| Akzo Nobel NV | 9 | Dutch Space BV | 1 |
| Stichting Energie | 8 | Free Energy Europe | 1 |
| Scheuten Glasgroep | 7 | Jazo Zevenaar BV | 1 |
| Fokker Space BV | 3 | Mastervolt Solar BV | 1 |
| Ubbink Nederland | 3 | OTB Group | 1 |
| Econcern BV | 2 | Plantfeber Wilco Johan Thomas | 1 |
| Enthone Omi Benelux BV | 2 | R & S Renewable Energy Systems | 1 |
| Philips Electronics | 3 | Stork Infratechniek | 1 |
| Universiteit Utrecht | 3 | Stroomwerk Energy | 1 |
| Beheermij HD Groeneveld BV | 1 | Technische Universiteit Delft | 1 |
| Coöperatief Advies en Onderzoek | 1 | Universiteit Eindhoven | 1 |

Bron: Octrooiencentrum Nederland, 'Energie Onderzoek Subsidie; 11 octrooionderzoeken', 2005

⁵ Het kan hier gaan om bedrijven, kennisinstellingen en particulieren.

3.2 Rol en mogelijke impact van nanotechnologie

Duurzame energiebronnen zoals zon en wind kunnen onze energievoorziening minder afhankelijk maken van fossiele brandstoffen. Belangrijke drijfveren hierbij zijn de vermindering van milieubelasting en de verzekering van een stabiele energieproductie (voorzieningszekerheid). Nanotechnologie speelt in de duurzame energieproductie en –voorziening vooral een rol als elektriciteit wordt opgewekt uit zonlicht met behulp van zonnecellen.⁶ Bij andere methoden om duurzame energie te winnen op basis van waterkracht, wind en biomassa speelt nanotechnologie alleen een rol om energie op te slaan, bijvoorbeeld in accu's en batterijen.

Een fotovoltaïsche zonnecel zet energie van fotonen uit het zonlicht om in elektronen die elektrische energie kunnen leveren via metaalcontacten op de zonnecel (OCN 2005). Om zonnecellen te vervaardigen, wordt meestal silicium gebruikt. Er zijn drie soorten siliciumzonnecellen: monokristallijn siliciumzonnecellen, multikristallijn siliciumzonnecellen en dunne-laagzonnecellen. Toepassing van zuiver silicium als basismateriaal heeft als nadeel dat het zeer kostbaar is, ook in de bewerking, bijvoorbeeld vanwege de benodigde *clean rooms*. Dit maakt de productie van zonne-energiesystemen relatief duur ten opzichte van traditionele energiewinningsmethoden. Goedkopere zonnecellen kunnen weliswaar gemaakt worden van andere materialen zoals koperindiumdiselenide (CIS), andere soorten silicium en in de toekomst ook van organische materialen (plastics/polymeren). De energieopbrengst, en daarmee de efficiëntie, van deze alternatieven blijft echter met zo'n 6 procent vooralsnog sterk achter bij die van de 'conventionele' zonnecel, die een energieopbrengst heeft van 15 tot 20 procent.

Verhogen energieopbrengst

Nanotechnologie zou vooral een rol kunnen spelen om de energieopbrengst van zonnecellen te verhogen. Op zonnecellen worden extreem dunne laagjes aangebracht, die ervoor zorgen dat de door de zon vrijgemaakte elektronen niet verloren gaan, maar direct worden afgevoerd als elektriciteit. Door technieken uit de oppervlakte- en nanotechnologie in te zetten, is het mogelijk zeer dunne nanocomposieten te fabriceren. Daardoor kunnen elektronen beter vrijgemaakt en sneller afgevoerd worden. Het is bovendien de verwachting dat vanuit de nanotechnologie materialen met nieuwe geleidende eigenschappen beschikbaar komen, die vervolgens kunnen worden ingezet in de zonne-energiesystemen (Institute of Nanotechnology 2006). De ontwikkelingen in de nano-elektronica op het gebied van nieuwe, op nanotechnologie gebaseerde, halfgeleidermaterialen zullen hiervoor zeker belangrijk zijn (zie ook hoofdstuk 5 Nanotechnologie voor nieuwe computertechnologie).

Hoewel de eerste toepassingen voorzichtig tot ontwikkeling komen, bevindt nanotechnologie voor zonnecellen zich vooral nog in de fasen van fundamenteel en toegepast wetenschappelijk onderzoek (Institute of Nanotechnology 2006). Nanotechnologie zal dan ook zeker tot 2010 een heel kleine impact hebben op zonneceltechnologie. Slechts twee toepassingen zullen tegen 2015 de status van *mainstream application* hebben bereikt: 'thin films, layers and surfaces' en 'nanocrystalline materials' (Institute of Nanotechnology 2006).

⁶ Nanotechnologie speelt ook een rol bij de opwekking van energie met behulp van brandstofcellen. Dit wordt verder niet in dit rapport besproken.

3.3 Mogelijke barrières

Als nanotechnologie wordt toegepast in zonnecellen, dan liggen de twee belangrijkste uitdagingen in het technisch-wetenschappelijke veld. Daarbij gaat het er vooral om:

1. de kosten te verlagen en de opbrengst te verhogen van zowel het productieproces als het eindproduct;
2. de betrouwbaarheid en levensduur van de nieuwe zonnecellen te verbeteren.

Tegelijkertijd wordt een aantal mogelijke knelpunten voorzien die de daadwerkelijke ontwikkeling van deze technologie in Europa zullen beïnvloeden (Institute of Nanotechnology 2006). Voor een deel zijn deze direct af te leiden van de bovengenoemde twee technisch-wetenschappelijke uitdagingen. De vorderingen die op deze punten gemaakt worden, bepalen het concurrentievermogen van zonne-energie ten opzichte van traditionele methoden om energie te winnen. Het voornaamste knelpunt is echter het gebrek aan industriële activiteiten op dit terrein in Europa (Institute of Nanotechnology 2006), en wellicht nog meer in Nederland. De (industriële) toepassing van nanotechnologisch onderzoek in zonnecellen vindt grotendeels plaats in de Verenigde Staten en in Japan. Bovendien wordt in Europa innovatie op dit terrein vooral ingegeven door wetenschappelijk onderzoek en is er nauwelijks interactie tussen het bedrijfsleven en wetenschappelijke instellingen. Dit knelpunt ligt op het vlak van de organisatie en structuur van het Europese en nationale innovatiesysteem en is duidelijk niet technisch-wetenschappelijk van aard.

Daarnaast is er specifiek in Nederland een vooral in beleidsmatige zin eenzijdige aandacht voor onderzoek naar zonne-energie. Dit berust op de gedachte dat implementatie pas aan de orde komt wanneer de kosten voor zonne-energie gedaald zijn (Sinke et al. 2006). Het gebrek aan een duidelijke visie op implementatie en de daarbij horende beleidsmaatregelen kan een groot nadelig effect hebben op de ontwikkeling van de Nederlandse markt voor zonne-energie.

3.4 Onderzoek en agendering

De Nederlandse onderzoeksagenda op het gebied van energie volgt al enige jaren een transitietraject dat is ingezet naar duurzame energie. De verscheidene stakeholders zoals overheid, industrie en onderzoeksinstellingen, bepalen gezamenlijk welke (transitie)paden bewandeld moeten worden om daadwerkelijk te komen tot een duurzamere energiehuishouding. Dit heeft in 2005 verder vorm gekregen met de instelling van de Taskforce Energietransitie, die bestaat uit vertegenwoordigers van de overheid, industrie en wetenschap en verantwoordelijk is om een transitie-actieplan te formuleren.

EOS

De basis van de huidige onderzoeksagenda wordt gevormd door de nota Energie Onderzoek Strategie (EOS) uit 2001, van het ministerie van Economische Zaken (EZ). Met middelen van de ministeries van EZ, VROM, LNV en VenW beslaat EOS circa twee derde van het publieke energieonderzoek en daarmee is deze strategienota beeldbepalend (SenterNovem, 2004 en ECN, 2002) Volgens deze strategie richt het publiek gefinancierde onderzoek zich erop de bestaande onderzoeksmiddelen efficiënter te gebruiken en de internationale onderzoekssamenwerking te versterken *op een beperkt aantal onderzoeksgebieden* die aansluiten bij de gekozen transitiepaden. Hierbij gaat het dus primair om een combinatie van maatschappelijke, economische en wetenschappelijke drijfveren.

Ook onderzoek naar zonnecellen is aangeduid als een aandachtsgebied, waarbij EOS zich vooral richt op (multi)kristallijne siliciumzonneceltechnologie en op dunne-filmzonneceltechnologie. De aandachtspunten voor dit onderzoek liggen op het gebied van de eerdergenoemde technisch-wetenschappelijke uitdagingen zoals efficiency, kosten, betrouwbaarheid en levensduur. Om te voorkomen dat vooraf afgebakende onderzoeksgebieden het onderzoeksveld te veel beperken, is binnen EOS ook ruimte voor niet-conventioneel onderzoek onder de noemer NEO (Nieuw Energie Onderzoek). Juist hierbinnen is ruimte voor onderzoek naar zonne-energie in combinatie met nanotechnologie.

Transitieplatform

In het kader van de geïdentificeerde transitiepaden is recentelijk het Transitieplatform Duurzame Elektriciteitsvoorziening (TP-DEV) opgericht. Een werkgroep van TP-DEV heeft onlangs een strategienota opgesteld specifiek voor fotovoltaïsche zonne-energie (Sinke et al. 2006). In deze nota wordt vooral gewezen op de noodzaak meer evenwicht te brengen in de stimulering van onderzoek en ontwikkeling enerzijds en de stimulering van de markt anderzijds. Hiertoe moeten vooral volumeontwikkeling en marktontwikkeling meer (beleids)aandacht krijgen. Dit zou er bovendien toe kunnen leiden dat een sterke nationale zonnestroomsector wordt opgebouwd.

Universitair onderzoek

Behalve via EOS wordt het Nederlandse publieke energieonderzoek gefinancierd door de middelen die het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW) beschikbaar stelt aan de universiteiten en aan de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) (eerste- en tweedegeldstroom). Op dit niveau wordt de agenda ingevuld door onderzoeksgroepen aan de universiteiten of andere academische instellingen. Hierbij speelt vooral de wetenschappelijke excellentie als drijfveer een rol. De NWO-programma's worden echter wel afgestemd met de activiteiten van SenterNovem, doordat in 1999/2000 een gezamenlijk Stimuleringsprogramma voor energieonderzoek is opgesteld. Dit programma richt zich op hoogwaardig en vernieuwend onderzoek (sterk theoretisch en methodologisch), dat is toegespitst op toekomstige energievraagstukken en op het streven naar duurzaamheid. Binnen dit stimuleringsprogramma zijn tussen 1999 en het najaar van 2006 veertig projecten gefinancierd, waarvan er ongeveer vijf direct betrekking hadden op onderzoek naar zonnecellen.

3.5 Conclusies

In de context van de eindige en milieubelastende energiewinning uit fossiele brandstoffen staat de energiesector in toenemende mate onder druk om te kunnen voorzien in een stabiele energielevering en om de milieubelasting te beperken. Hierdoor krijgt onderzoek naar nieuwe methoden voor duurzame energiewinning en -levering, zoals zonnecellen, een belangrijke impuls. In de hiernavolgende tabel worden de resultaten uit dit hoofdstuk samengevat.

Tabel 4 Samenvatting nanotechnologie voor zonnecellen

| | |
|--|---|
| Kenmerken innovatiesysteem zonnecellen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ gedomineerd door kleine groep internationale spelers ▪ een zeer beperkte zonnecelindustrie in NL ▪ kostenintensieve R&D ▪ onderzoek/innovatie gedreven door wetenschappelijke ontwikkelingen ▪ zeer beperkte samenwerking tussen industrie en wetenschap in Europa ▪ disbalans tussen stimuleren onderzoek en stimuleren marktontwikkeling |
| Rol/impact nanotechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ nanotechnologie wordt al toegepast in het onderzoek, maar de impact op de korte termijn blijft beperkt ▪ belangrijkste toepassingen worden rond of na 2015 verwacht |
| Belangrijkste spelers in onderzoek en innovatie in Nederland | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke kennisinfrastructuur |
| Onderzoeksagendering | <ul style="list-style-type: none"> ▪ in het kader van bredere energieagenda en transitiediscussies is er expliciete aandacht voor zonne-energie ▪ sterke rol overheid, in samenspraak met wetenschap en de energiesector |
| Maatschappelijke vraagarticulatie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ d.m.v. expliciete aandacht voor voorzieningszekerheid en duurzame energiewinning |
| Voornaamste hordes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ economisch ▪ technisch |

Innovatie

In de ontwikkeling van zonnecellen is het niet langer de vraag of nanotechnologie ook daadwerkelijk toegepast gaat worden. Dit is al het geval, maar het punt is dat een groot deel van het onderzoek zich nog in de fasen van fundamenteel en toegepast wetenschappelijk onderzoek bevindt, en dat grootschalige toepassingen op zich laten wachten tot na 2015. Bovendien is zonneceltechnologie, naast windenergie, waterkracht en biomassa, maar een van de mogelijke technologieën die kunnen leiden naar einddoelen als voorzieningszekerheid en milieuvriendelijkheid. Een belangrijk nadelig gegeven hierbij is dat het onderzoek op het terrein van zonneceltechnologie vooral een aangelegenheid lijkt te zijn van de academische wereld, waardoor de vertaling naar de markt gehinderd wordt. Dit geldt zowel voor Nederland als voor heel Europa, en heeft voor een belangrijk deel te maken met het ontbreken van een significante industrietak op dit terrein.

Onderzoek

De Energie Onderzoek Strategie die door de overheid, energie-industrie en wetenschap is geformuleerd, bepaalt de onderzoeksagenda, al wordt deze momenteel ook sterk beïnvloed door het transitieactieplan van de Taskforce Energietransitie. Hierdoor is een energiebrede onderzoeksagenda ontstaan, waarbinnen zonnecelonderzoek een expliciete plek heeft gekregen. Door deze gezamenlijke opzet wordt de onderzoeksagenda bepaald door een combinatie van economische en wetenschappelijke drijfveren, waarbij maatschappelijke uitdagingen het uitgangspunt vormen. Dat er in Nederland geen brede innovatieve industrie is op het gebied van zonneceltechnologie is voor zover bekend geen aandachtspunt binnen de huidige onderzoeksagenda.

3.6 Referenties

- Arthur D. Little (1999) *Distributed Generation: System Interfaces*.
- CBS (2005) *Duurzame Energie in Nederland 2004* Voorburg/Heerlen.
- ECN (2002) *Energieverslag Nederland 2001* Petten.
- Octrooiencentrum Nederland (2005). *Energie onderzoek subsidie: 11 octrooionderzoeken*. Rijswijk.
- Institute of Nanotechnology (2006). *Roadmaps for nanotechnology in energy*. in het kader van het EU-gefinancierde NanoRoadmapproject (FP6).
- SenterNovem (2004) *EOS Long Term Energy Research Strategy* Utrecht.
- SenterNovem (2005) *Hydrogen and Fuel Cells in the Netherlands, Who is who* Utrecht.
- Sinke, W.T. et al. (2006). *PV-Notitie. Zonnestroom en de transitie naar een duurzame elektriciteitsvoorziening*. Werkgroep-PV in het kader van het Transitieplatform Duurzame Elektriciteitsvoorziening.
- STT (1999) *Stroomversnelling, de volgende elektrische innovatiegolf, STT 61*.

www.nanoroadmap.it

www.minez.nl

www.senternovem.nl (EOS)

www.ecn.nl

4 Nanotechnologie voor waterzuivering

Een derde toepassing van nanotechnologie is waterzuivering. Die zal naar verwachting een grote maatschappelijke impact hebben. Wereldwijd komt er steeds meer aandacht voor de beschikbaarheid van voldoende en veilig drinkwater. Bovendien hebben industrie en landbouw een sterk groeiende behoefte aan geschikt proces- en irrigatiewater. Nanotechnologie kan een belangrijke rol gaan spelen in de ontwikkeling van methoden om water te zuiveren. In dit hoofdstuk schetsen we kort de innovatieomgeving waarin zuiveringsmethoden worden gerealiseerd, die op nanotechnologie zijn gebaseerd. Ook staan we stil bij de plek die dit onderwerp inneemt op de onderzoeksagenda in Nederland.

4.1 Schets van het innovatiesysteem

De watersector bestaat uit vier componenten: 1) waterbouw en -beheer; 2) drinkwater; 3) afvalwater; en 4) water en groen (Stuurgroep Watertechnologie 2006; Dialogic/DHV 2005). Vooral binnen de subsectoren drinkwater en afvalwater is waterzuivering belangrijk, bijvoorbeeld om zeewater of brak water te ontzilten, en rioolwater en water afkomstig van industriële processen (proceswater) te reinigen. De internationale watermarkt wordt geschat op € 425 miljard (Stuurgroep Watertechnologie 2006). Hiervan wordt ruim € 290 miljard gerealiseerd in de drink- en industriewatervoorziening en de afvalwaterzuivering.

Internationale markt

Met een geschatte jaarlijkse groei van ten minste 11 procent in de komende tien jaar groeit de internationale watermarkt snel. De specifieke markt voor watertechnologie groeit zelfs met minimaal 15 procent per jaar (Stuurgroep Watertechnologie 2006). Die ontwikkeling wordt vooral bepaald door een aantal belangrijke internationale trends (Stuurgroep Watertechnologie 2006):

- de toenemende wereldbevolking en mondiale verstedelijking;
- de toenemende waterschaarste;
- de toenemende privatisering en liberalisering van de watersector;
- de groeiende vraag naar integrale oplossingen in internationale waterprojecten;
- nieuwe en strengere wet- en regelgeving en richtlijnen (Kaderrichtlijn Water, Millennium Development Goals);
- de toekomstige beschikbaarheid van nieuwe technologieën.

Publiek karakter

De Nederlandse markt voor (drink)watervoorziening en afvalwaterbehandeling wordt geschat op € 9,1 miljard⁷ (EIM 2005). Deze omzet wordt gerealiseerd door bijna 1500 bedrijven. De sector kent een belangrijk publiek karakter doordat er publieke bedrijven in zitten zoals de drinkwaterbedrijven en waterschappen. Samen zijn zij verantwoordelijk voor ongeveer een derde van de totaal gerealiseerde omzet. Ingenieurs- en adviesbureaus zijn verantwoordelijk voor 7 procent van de omzet en de overige circa 60 procent komt voor rekening van bedrijven en instellingen. Naast het publieke karakter van de sector

⁷ Dit is een schatting in termen van gerealiseerde omzet. Van de € 9,1 miljard wordt € 2,1 miljard in het buitenland gerealiseerd.

wordt de waterzuiveringsector gekenmerkt door het grote aantal kleine spelers: slechts 270 bedrijven hebben meer dan honderd werknemers in dienst.

Het publieke karakter van de sector en het innovatiesysteem wordt nog eens benadrukt door de grote rol die overheden spelen (Stuurgroep Watertechnologie 2006). Op EU-niveau wordt het overgrote deel van de regelgeving bepaald, die leidend is voor de Nederlandse wet- en regelgeving op dit terrein. Via de Waterleidingwet en het Waterleidingbesluit bepaalt de rijksoverheid aan welke voorwaarden de drinkwaterbedrijven moeten voldoen om goed drinkwater te leveren. Op regionaal niveau werken waterbedrijven nauw samen met de provinciale overheid, die onder andere de vergunningen verleent om water te onttrekken, en die verantwoordelijk is voor de uitvoering van het rijksbeleid. De waterschappen zijn verantwoordelijk voor de kwaliteit en kwantiteit van de regionale oppervlaktewateren, inclusief afvalwaterzuivering. En ten slotte zijn gemeenten verantwoordelijk voor de afvoer van afvalwater via het riool.

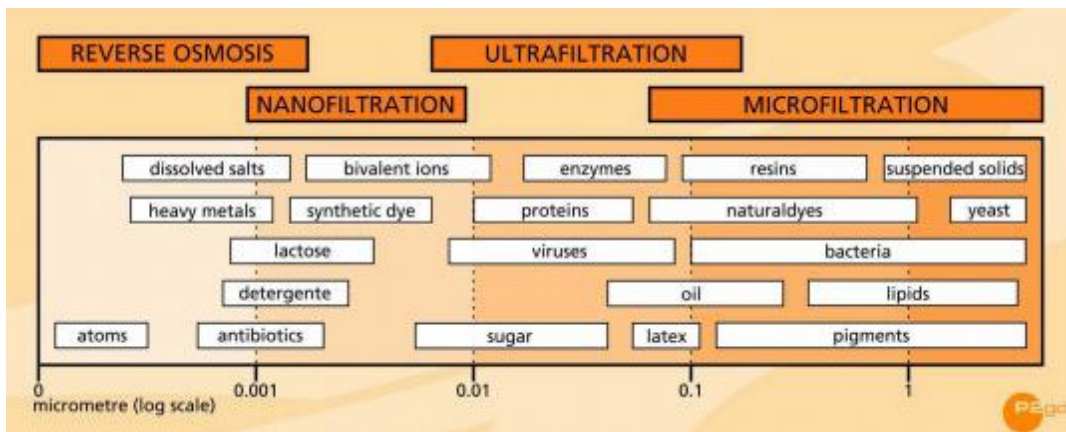
Technologie en innovatie

De waterzuiveringsector lijkt maar beperkt georiënteerd op research en development (R&D): slechts 222 van de 1453 bedrijven (15 procent) investeert in onderzoek en ontwikkeling van innovatieve apparatuur en systemen voor waterzuivering (EIM 2005). Ook blijft het aantal werknemers dat actief is in R&D-activiteiten in de waterzuiveringsector achter bij het gemiddelde. De Nederlandse publieke kennisinfrastructuur gericht op wateronderzoek heeft internationaal een hoog aanzien, die voor een groot deel wordt bepaald door de Nederlandse prestaties op het gebied van waterbouw en -beheer. Maar de Nederlandse kennisinfrastructuur richt zich ook op thema's als waterkwaliteit en waterzuivering. Enkele gespecialiseerde onderzoeks- en onderwijsinstellingen zijn Delft Hydraulics, UNESCO-IHE, KIWA Water Research, TNO Water, het RIVM, Alterra en de onderzoeksgroepen aan de technische universiteiten van Delft en Twente en aan de universiteiten van Wageningen, Utrecht en Amsterdam.

Ondanks de internationaal goede reputatie van de Nederlandse watersector en -wetenschap kwam het EIM (2005) onlangs tot de conclusie dat het Nederlandse waterzuiveringscluster voorsnog niet technologisch excellent is. Weliswaar zijn er enkele innovatieve spelers als Paques, Norit en DHV, en staan enkele instituten internationaal in hoog aanzien, maar de Nederlandse kennisbasis op dit terrein is te gefragmenteerd. Bedrijven en instellingen werken te weinig samen om innovaties te realiseren en de deelnemers in het waterzuiveringscluster zijn gemiddeld niet innovatiever dan de industrie in het algemeen.

4.2 Rol en mogelijke impact van nanotechnologie

Om water te behandelen en te zuiveren bestaat een aantal methoden, zoals bezinking, desinfectie door biocides of UV-straling, omzetting van verontreinigingen in onschadelijke stoffen met behulp van micro-organismen (meestal bacteriën), chemische methoden en fysische methoden zoals filtratie. Nanotechnologie heeft in toenemende mate impact op zuiveringstechnieken op basis van filtratie, in het bijzonder op membraanfiltratie. Door membranen in te zetten, kunnen vloeistoffen continu worden gezuiverd. Dit gebeurt door de vloeistoffen door de kleine openingen in het membraan te persen. Er bestaan verschillende membraantechnologieën en -systemen zoals microfiltratie, ultrafiltratie, nanofiltratie en hyperfiltratie (omgekeerde osmose).



(NMAB 1998)

Deze indeling is gebaseerd op de aard van de te verwijderen deeltjes. Zo kunnen met conventionele filtratie alle deeltjes worden verwijderd, die groter zijn dan een micron. Microfiltratie verwijdert deeltjes van 0,1 tot 1 micron (vrijwel alle bacteriën), en ultrafiltratie verwijdert deeltjes van 0,01 tot 0,1 micron (organische macromoleculen). In micro- en ultrafiltratie wordt veelal gebruikgemaakt van keramische membranen of polymeren. Omgekeerde osmose is gebaseerd op het principe dat bepaalde membranen wel water doorlaten, maar niet de daarin opgeloste stoffen zoals zouten. Nanofiltratie kan worden beschouwd als een vorm van omgekeerde osmose waarbij door middel van een drukgedreven proces microverontreinigingen of de ionen van verontreinigende stoffen van water worden gescheiden door het membraan. Voor zowel omgekeerde osmose als nanofiltratie worden dunne filmcomposieten en cellulose polymeren gebruikt als membraanmateriaal.

Verbetering van filtratie

De laatste jaren heeft membraantechnologie zich ontwikkeld tot een aantrekkelijk scheidingsproces om bijvoorbeeld drinkwater te produceren van goede kwaliteit en tegen aanvaardbare kosten (Ministerie van Economische Zaken, 2004). Deze technologie biedt de mogelijkheid om oppervlaktewater rechtstreeks te zuiveren tot drinkwater. Uitgangspunt bij de ontwikkeling en fabriceren van membraanelementen is om zo veel mogelijk oppervlak onder te brengen in een zo compact mogelijke ruimte, zonder hierbij het risico op vervuiling⁸ te vergroten. In de afgelopen jaren is het gebruik van nanofiltratiemembranen voor waterzuivering sterk toegenomen, bijvoorbeeld in de waterbereiding zoals ontharding, verwijdering van pesticiden uit grondwater, nitraatverwijdering, het ontkleuren van water en de verwijdering van zware metalen uit afvalstromen.⁹ Het nanotechnologieaspect heeft dus vooral betrekking op de afmetingen van de membraanporiën, en daarmee van de stoffen die afgescheiden kunnen worden. De relatief eenvoudige nanofiltratiesystemen kunnen naar verwachting verbeterd worden door nieuwe eigenschappen van nanomaterialen (Meridian Institute 2005). Zo wordt het mogelijk de capaciteit en selectiviteit van membranen te verbeteren en te voorkomen dat verontreinigde deeltjes zich eraan hechten.¹⁰ In het kader van deze rapportage hebben we echter geen visie gevonden op het ontwikkelingstraject voor deze toepassingen.

⁸ Het risico op vervuiling houdt in dat door opeenstapeling van deeltjes aan het membraanoppervlak de doorstroming wordt verhinderd.

⁹ Zie bijvoorbeeld www.watertechnowijzer.nl

¹⁰ Nu krijgen holtes van membranen bijvoorbeeld al speciale coatings mee om dit te bevorderen. Zie ook www.nanowater.org

4.3 Mogelijke barrières

In de literatuur en op internet is weinig te vinden over mogelijke barrières die kunnen optreden als nanomembraantechnologie op grote schaal verder wordt ontwikkeld en toegepast. Een logische verklaring hiervoor is dat water al enige tijd met succes wordt gefilterd op nanometerschaal. Als belangrijkste barrières voor toekomstige toepassing worden procesverstoringen genoemd zoals (bio)vervuiling en scaling¹¹, die op termijn de effectiviteit, betrouwbaarheid en daarmee ook de aantrekkelijkheid van membraanfilters ernstig aantasten. Onderzoek is nodig naar de aard van de vervuiling en de manieren waarop deze te voorkomen is. Hierbij is de nanometerschaal een complicerende factor. Tegelijkertijd biedt de nanotechnologie ook extra mogelijkheden voor nieuwe sensor- en detectietoepassingen. Andere mogelijke barrières waarover gesproken wordt zijn:

- **Betrouwbaarheid:** Onzekerheid over mogelijkheden om de betrouwbaarheid van membraantechnieken te vergroten, kan een barrière zijn bij de verdere 'vlucht' van nanomembraantechnologie. Dit heeft te maken met het voorkomen van fouling en scaling.
- **Integratie** van membraantechnologieën in (bestaande) zuiveringsystemen en –installaties.
- **Verbeteringen op andere gebieden:** Als bijvoorbeeld het ontwerp en het beheer van bestaande membraaninstallaties verbeteren, dan kan het daardoor minder urgent worden om te investeren in betere nanofiltratie.
- **Concurrentie van andere zuiveringstechnieken:** De nanomembraantechnologie kan bijvoorbeeld concurrentie krijgen van 'klassieke' filtratie door zandbedden, maar ook van nieuwe technieken zoals behandelingen met ultraviolet licht of de op biotechnologie gebaseerde zuiveringstechnieken (waarbij genetisch gemodificeerde micro-organismen worden ingezet). Deze technieken zijn eveneens in staat voor een hogere waterkwaliteit te zorgen en tegen acceptabele kosten. Overigens is het op basis van de toenemende convergentie tussen de levenswetenschappen en nanowetenschappen goed denkbaar dat deze concurrerende technieken juist ook een complementair effect hebben op de inzet van nanotechnologie in waterzuivering. Daarnaast ondervindt nanofiltratie concurrentie van onder meer micro- en ultrafiltratie waar het gaat om de hoeveelheid aan uiteindelijk restproduct (afval) die overblijft. Daarvan komt bij nanofiltratie 15 tot 25 procent vrij, terwijl dit percentage bij micro- en ultrafiltratie eerder 1 tot 10 is. Dit betekent dat met nanofiltratie per saldo kleinere hoeveelheden gezuiverd water overblijven.
- **Ontbreken mechanismen voor kennisoverdracht:** De nanotechnologiekennis voor waterzuivering op moleculaire schaal hoeft niet per se ontwikkeld te worden op het gebied van waterzuivering zelf. Die kennis zou ook heel goed afkomstig kunnen zijn uit de bionanotechnologie, de biotechnologie, de nano-elektronica en het polymeeronderzoek. Ontwikkelingen in andere sectoren kunnen zo juist een stimulans betekenen voor de filtratie en zuivering van water. Zo worden micro- en nanofilters in toenemende mate ontwikkeld en toegepast in de voedingsmiddelenindustrie (Prisma & Partner en MinacNEd 2006). Dwarsverbanden tussen de deelgebieden van nanowetenschappen, maar ook tussen de (economische) sectoren die deze kennis toepassen, ontbreken echter. Brede multidisciplinaire en sectoroverschrijdende onderzoeksprogramma's kunnen daarin een katalyserende rol spelen.

¹¹ Dit treedt op als de concentratie aan opgeloste stoffen (zouten) de verzadigingsconcentratie overschrijdt en deze vervolgens neerslaan op het membraanoppervlak.

4.4 Onderzoek en agendering

In Nederland is geen enkel onderzoeksprogramma volledig toegespitst op de inzet van nanotechnologie in waterzuivering. Nanotechnologie maakt vooral deel uit van het onderzoek op het gebied van waterzuivering in bredere zin. Tot voor kort werd dit onderzoek beperkt gecoördineerd op landelijke schaal. De bestaande onderzoeksprogramma's waren vooral de programma's van individuele organisaties zoals de universitaire groepen, TNO, KIWA Water Research, Delft Hydraulics, bedrijven en ingenieursbureaus. Weliswaar streven organisaties zoals de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA)¹², wel coördinatie en afstemming na tussen vraag en aanbod (van kennis). Door hun beperkte omvang hebben deze organisaties echter nog weinig invloed op het onderzoekssysteem.

Delft Cluster

In 2001 heeft een zestal organisaties¹³ het initiatief genomen tot Delft Cluster, een samenwerkingsverband dat tot doel heeft interdisciplinaire kennis te ontwikkelen en te verspreiden voor de grond-, weg- en waterbouwsector. Het onderwerp van waterzuivering is daarbij geen apart thema, maar maakt deel uit van het thema 'Stedelijk waterbeheer', een van de huidige zes onderzoeksthema's. Voor de periode 2004-2009 is Delft Cluster vanuit het Besluit subsidies investeringen kennisinfrastructuur (BSIK) overheidssteun toegezegd voor € 22 miljoen. Het totale budget bedraagt ongeveer € 44 miljoen, waarvan € 19 miljoen uit eigen middelen en € 4 miljoen uit het bedrijfsleven.

Wetsus

In 2003 is het onderzoeksinstituut Wetsus opgericht. Wetsus ontwikkelt nieuwe technologieën voor 'duurzaam water', waarbij gewerkt wordt op het raakvlak van scheidingstechnologie en biotechnologie (Wetsus website). In Wetsus werken twintig tot dertig bedrijven samen met de Universiteit Twente, de Technische Universiteit Delft, en Wageningen Universiteit en het Research Center. Het bedrijfsleven dat zich als participant heeft verbonden aan dit onderzoeksinstituut, bepaalt het promotieonderzoek dat universitaire groepen uitvoeren. De bedoeling is dat het onderzoek niet alleen wetenschappelijke excellent, maar ook commercieel relevant is. Het onderzoeksprogramma kent zes thema's (Wetsus website):

1. zout in/uit water (bioconversie, ontwikkeling van selectieve membranen om specifieke componenten te scheiden, et cetera);
2. decentrale bereiding van proces- en drinkwater en zuivering van afvalwater (remote monitoring, ontwikkeling van efficiënte en goedkope *point of use en point of availability* technologieën, hergebruik van licht vervuild huishoudelijk water, et cetera);
3. membraan bioreactoren (vermindering van de energieflex, verhoging van de capaciteit door vervuiling te voorkomen, ontwikkeling van nieuwe toepassingen);
4. biofouling van membranen die drink- en proceswater bereiden (ontwikkelen nieuwe behandeling en ontwerpregels);
5. energie uit water (hergebruik van vervuiling uit water in de vorm van energie, directe waterstof of elektriciteitsproductie);
6. sensing (ontwikkeling van waterkwaliteit sensoren: online detectie van bacteriën, *finger-printing*, toxiciteit sensoren).

¹² STOWA kent bijvoorbeeld vier themagebieden (waarvan 'afvalwatersystemen' er een is) waar zuiveringstechnologieën deel van uitmaken.

¹³ Universiteit Delft, TNO, KIWA, GeoDelft, Delft Hydraulics en UNESCO-IHE

Het Wetsus-onderzoek vormt het voornaamste (gecoördineerde) platform in Nederland voor onderzoek naar waterzuivering waarbij nanotechnologie expliciet een rol speelt.

Delta-instituut

In 2004 heeft het Innovatieplatform het thema 'water' benoemd als een van de sleutelgebieden waarin Nederland op relatief korte termijn kan excelleren. Als gevolg hiervan is een aantal zaken in de watersector in gang gezet of versneld. Zo is verder onderzocht of een Delta-instituut gevormd kan worden om de Nederlandse kennisinfrastructuur op het gebied van waterbouw en -beheer te versterken. In februari 2006 heeft de ministerraad officieel ingestemd met de oprichting van het Delta-instituut, dat naar verwachting in 2007 operationeel is.

Verder heeft de overheid de watersector opgeroepen om te komen tot een innovatieprogramma dat door zowel het bedrijfsleven als de wetenschap wordt opgesteld en gedragen. Dit heeft in april 2006 geleid tot het Innovatieprogramma Watertechnologie 'Een wereld om water' (Stuurgroep Watertechnologie 2006). Hierin worden de achtergrond, visie, ambities en de strategie voor onderzoek en innovatie beschreven op het gebied van water(zuiverings)technologie. Volgens de stuurgroep zijn de belangrijkste uitdagingen om focus en massa in het onderzoek aan te brengen (zowel publiek als privaat), en om deze kennis te vertalen naar economisch en maatschappelijk relevante innovaties.

Hiermee lijkt tegemoet gekomen te worden aan de innovatieknelpunten die het EIM eerder constateerde. Bij de bepaling van de onderzoeksagenda en de uit te voeren projecten zullen de marktkansen richtinggevend zijn. Zonder dat dit expliciet in de (voorlopige) plannen is vermeld, zal watertechnologie waarbij nanotechnologie wordt ingezet, een (impliciete) plek op de onderzoeksagenda krijgen, bijvoorbeeld in het geval van membraantechnologie voor waterzuivering. Een specifiek onderdeel van het Innovatieprogramma Watertechnologie is de oprichting van een Technologisch Top Instituut Watertechnologie (TTIW). Daarbinnen zullen bedrijfsleven en de wetenschap gezamenlijk onderzoek doen op het gebied van onder andere drink- en industriewater en afvalwaterzuivering. In september 2006 heeft de overheid bekendgemaakt de oprichting van het TTIW goed te keuren en te steunen met € 7 miljoen per jaar voor de periode 2007-2011. Het TTIW gaat in 2007 van start en wordt gecoördineerd door Wetsus.

4.5 Conclusies

De Nederlandse watersector, inclusief het deel dat zich richt op waterzuivering, is sterk nationaal georiënteerd en heeft een uiterst sterk publiek karakter doordat er (semi)publieke organisaties deel van uitmaken, en door de invloed van (inter)nationale wet- en regelgeving. De sector heeft internationaal een goed imago door de prestaties van enkele innovatieve bedrijven en onderzoeksinstellingen. Er is echter te veel fragmentatie, te weinig samenwerking en een te bescheiden R&D-intensiteit om te kunnen spreken van een technologisch excellente cluster. De belangrijkste bevindingen zijn weergegeven in de tabel hierna.

Tabel 5 Samenvatting nanotechnologie voor waterzuivering

| | |
|--|---|
| Kenmerken innovatiesysteem waterzuivering | <ul style="list-style-type: none"> ▪ relatief sterke nationale oriëntatie ▪ veel publieke spelers ▪ grote invloed van internationale wet- en regelgeving ▪ goed ontwikkelde kennisbasis maar achterblijvende R&D-intensiteit ▪ fragmentatie en gebrek aan samenwerking ▪ recente oprichting Technologisch Top Instituut Water |
| Rol/impact nanotechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ wordt reeds toegepast in membranen voor nanofiltratie ▪ rol/impact kan zeker nog toenemen |
| Belangrijkste spelers in onderzoek en innovatie in Nederland | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke kennisinfrastructuur |
| Onderzoeksagendering | <ul style="list-style-type: none"> ▪ sterke rol wetenschap en publieke kennisinstellingen ▪ toenemende gezamenlijke agendering met industrie en overheid ▪ overwegend nationaal bepaald, eigen lijn van Nederland |
| Maatschappelijke vraagarticulatie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ impliciet aanwezig (doel van beschikbaarheid voldoende en schoon water wordt niet bediscussieerd maar is alom aangenomen als maatschappelijke vraag) ▪ deels geborgd in internationale wet- en regelgeving |
| Voornaamste hordes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ economisch |

Innovatie

De vraag of op nanotechnologie gebaseerde toepassingen in het veld van waterzuivering op korte termijn hun weg naar de markt zullen vinden, is achterhaald.

Nanofiltratiemembranen worden al sinds enkele jaren en in toenemende mate toegepast in zowel drinkwaterzuivering als in industriële zuiveringsprocessen. Hierbij gaat het vooral om membranen die nanoporiën bevatten en zo bestanddelen van nanometeromvang kunnen scheiden. Nanotechnologie op termijn zal naar verwachting ook worden ingezet op het terrein van waterzuivering om betere filtratietechnieken te ontwikkelen door de inzet van nano-instrumentarium en nanomaterialen. Dit is vooralsnog niet terug te vinden in onderzoeksvoorstellen.

Onderzoek

De onderzoeksagenda's op dit terrein en de manier waarop die tot stand zijn gekomen, werden tot voor kort vooral bepaald op het niveau van individuele onderzoeksgroepen, kennisinstellingen en een beperkt aantal bedrijven. De belangrijkste drijfveren hierbij zijn wetenschappelijke excellentie en commercieel succes. Dit speelt tegen de achtergrond van enkele zeer belangrijke internationaal bepaalde trends die de (maatschappelijke) vraag naar schoner water bestendigen zoals:

- toenemende bevolking en waterschaarste;
- Europese wet- en regelgeving;
- richtlijnen van de Verenigde Naties.

De maatschappelijke vraag is als *driver* voor het onderzoek geïnternaliseerd in het hele onderzoekssysteem, en staat eigenlijk niet ter discussie. De onderzoeksagenda's richten zich doorgaans sterk op de technisch-wetenschappelijke en economische aspecten van de technologie. Pas met de oprichting van Wetsus is er aandacht gekomen voor focus en massa in het onderzoek, en voor de onderzoeksprogrammering naar waterzuivering. Ook vult Wetsus het multidisciplinaire karakter van waterzuiveringsonderzoek verder in, waarmee ook nanotechnologie in dit domein een impuls krijgt. Vooral het recente Innovatieprogramma Watertechnologie, inclusief het Technologisch Top Instituut Watertechnologie (TTIW), zal in de nabije toekomst moeten zorgen dat er meer focus en massa komt in het onderzoek naar watertechnologie en dat die wordt vertaald naar maatschappelijk en economisch relevante toepassingen.

4.6 Referenties

- CUR/NWP (2005). *Een wereld om water: naar een nieuwe aanpak voor de Nederlandse watersector*. Gouda/Delft.
- DHV/Dialogic (2005). *Speldenprik of Speerpunt. Kennis en innovatie in de sectoren van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat*. Amersfoort/Utrecht.
- Meridian Institute (2005). *Nanotechnology, water, & development*.
<http://www.merid.org/nano/waterpaper>
- Ministerie van Economische Zaken (2004) *Let's Separate Together Innovation Roadmap* Den Haag.
- MNAB (1998) *Separation Technologies for Industries of the Future* NAP, Washington DC.
- Muizer, A. en A. Leusink (2005). *Economische betekenis van waterzuiveringstechnologie*. Zoetermeer: EIM.
- Stuurgroep Waternanotechnologie (2006). *Een wereld om water: Innovatieprogramma Waternanotechnologie*. Delft.

www.delftcluster.nl

www.nanowater.org

www.nwp.nl

www.watertechnowijzer.nl

www.wetsus.nl

5 Nanotechnologie voor nieuwe computertechnologie

In dit hoofdstuk bespreken we de inzet van nanotechnologie om nieuwe computertechnologie te ontwikkelen en te produceren. In de enquête Nanotechnologie in Focus kwam dit toepassingsgebied niet als een van de belangrijkste naar voren. Nano-elektronica is echter wel het domein waarin de ontwikkeling en de toepassing van nanotechnologie het verst zijn gevorderd. Dit is ook het domein waar tot op heden de grootste (onderzoeks)inspanning wordt verricht. Daarmee speelt het een belangrijke leidende functie ten opzichte van andere nanowetenschappen. Om de innovatiedynamiek voor de gekozen toepassingen goed te kunnen vergelijken, hebben we ook dit toepassingsgebied op eenzelfde manier onderzocht. In dit hoofdstuk staan we vooral stil bij de rol die nanotechnologie speelt in de ontwikkeling van innovatieve chiptechnologie.

5.1 Schets van het innovatiesysteem

De halfgeleidersector is een relatief jonge sector die pas in de tweede helft van de vorige eeuw is ontstaan, maar zich sindsdien heeft ontwikkeld in een duizelingwekkend tempo. Zo wordt de wereldwijde omzet van halfgeleiderproducten voor 2004 geschat op ruim \$ 213 miljard (SIA 2006). Een andere schatting geeft voor de wereldmarkt van halfgeleiders, inclusief de productie van materialen en apparatuur, zelfs een omzet van € 290 miljard per jaar (PdC Orange Book 2006). Bedrijven uit de Verenigde Staten realiseren hiervan het grootste deel (bijna 47 procent), terwijl Europese bedrijven verantwoordelijk zijn voor minder dan een kwart (SIA 2006). De sector is sterk internationaal gestructureerd en gespecialiseerd. Het komt nagenoeg nooit voor dat alle fasen van het halfgeleiderproductieproces in hetzelfde land worden uitgevoerd (Boulahrir 2006). Omdat de ontwikkeling en productie zo kostenintensief zijn, wordt bovendien verwacht dat de halfgeleidermarkt zich steeds verder zal consolideren en concentreren. Daarin zullen ook opkomende landen als China en India een grote rol gaan spelen (EU 2004).

Sterke Nederlandse positie

In deze sterk internationaal gestructureerde markt speelt Nederland geen onverdienstelijke rol. Multinationals als Philips, ASML en ASMI horen tot de absolute voorhoede in deze sector. Verder heeft Nederland een groot aantal jonge en middelgrote bedrijven die sterk gespecialiseerd zijn in toepassingen van micro- en nano-elektronica, en die veelal optreden als toeleverancier van de grote multinationals. In vergelijking met andere Europese landen is Nederland zelfs als een dominante speler te beschouwen, doordat het grootschalige industriële activiteiten kent in gebieden zoals micro-elektronica, hightechsystemen en consumentenelektronica (PdC Orange Book 2006). Op het specifieke gebied van nano-elektronica en *embedded systems* heeft Nederland in Europa samen met de clusters rond Crolles (Frankrijk) en Dresden (Duitsland) zelfs een absoluut leidende rol (PdC Orange Book 2006). In Nederland gaat het dan vooral om de regio's Zuidoost-Brabant en Oost-Nederland. Daarmee zijn we - naast de Verenigde Staten en Japan - het enige Europese land dat alle sleuteltechnologieën bezit voor zowel het ontwerp en productie van halfgeleiders als voor de hoogwaardige apparatuur die hier voor nodig is (PdC Orange Book 2006).

Behalve een relatief sterke industriële positie heeft Nederland ook in wetenschappelijke zin een gunstige uitgangspositie. Zowel op het gebied van micro-elektronica als op dat van nano-elektronica hebben we academische instituten die nationaal en internationaal excelleren (NWO 2005). Aan zeker acht van de Nederlandse universiteiten wordt onderzoek gedaan naar nano-elektronica. Specifieke academische consortia of groepen die een belangrijke bijdrage leveren aan de Nederlandse kennisbasis op dit gebied zijn onder andere:

- Centrum voor Nanofotonica (AMOLF)
- Kavli Instituut voor Nanowetenschappen (TUD)
- Debye Instituut (UU)
- Centrum voor Nanomaterialen (TU/e)
- MESA+ (UT)
- Instituut voor Moleculen en Materialen (RU)
- Leiden Institute for Physics Research (LU)

Bovendien wordt sinds enkele jaren de noodzakelijke onderzoeksinfrastructuur in Delft, Enschede en Groningen structureel ontwikkeld en uitgebreid. Ook TNO voert aanzienlijke onderzoeksactiviteiten uit op het gebied van halfgeleiders en de inzet van micro- en nanotechnologie.

NanoNed

Een belangrijke ontwikkeling voor de Nederlandse kennisinfrastructuur op het gebied van de micro- en nanowetenschappen is het initiatief geweest dat uiteindelijk heeft geleid tot NanoNed. Met het oog op de grootschalige en snelle ontwikkelingen in het buitenland en de gebrekkige samenhang en beperkte omvang van het Nederlandse onderzoek, heeft een kleine groep van hoogleraren aan het begin van deze eeuw gewezen op de noodzaak om focus en massa te realiseren op relatief korte termijn. Naar aanleiding hiervan hebben verscheidene universitaire groepen samen met TNO, FOM en Philips het NanoNedconsortium gevormd. NanoNed wordt door de overheid gefinancierd uit de BSIK-gelden en heeft, samen met de eigen bijdragen van de deelnemende partijen, een totaalbudget van € 235 miljoen voor de periode 2005-2009. Dit is goed voor in totaal ongeveer tweehonderd onderzoeksprojecten.

5.2 Rol en mogelijke impact van nanotechnologie

Top-down

Nanotechnologie speelt in de ICT-sector zowel *top-down* als *bottom-up* een belangrijke rol. In het eerste geval gaat het om nanotechnologie die wordt ingezet in het 'traditionele' innovatiepad voor computer- en chipprocesstechnologie (CMOS-technologie¹⁴). Dit innovatiepad laat zich het best als volgt omschrijven:

- De fysieke afmetingen van componenten op computerchips worden steeds kleiner.
- De capaciteit van computerchips wordt steeds groter.
- Computerchips worden steeds goedkoper.

Computerchips bestaan feitelijk uit een bouwwerk van transistoren, en hoe meer transistoren, des te sneller de chip. Door de continue miniaturisering kon de industrie steeds kleinere transistoren ontwikkelen. Was een enkele transistor eind jaren veertig van de vorige eeuw nog ongeveer anderhalve centimeter groot, nu passen er 140 miljoen op minder dan een vierkante centimeter. Het tempo waarmee deze miniaturisering zich in de afgelopen decennia voltrok, wordt beschreven in de Wet van Moore, die stelt dat de

14 Complementary metal-oxide semiconductor

rekenkracht per oppervlakte-eenheid van computerchips elke achttien maanden verdubbelt.

De nano-elektronica speelt momenteel al een grote rol in het verdere proces van miniaturisering, doordat zij zowel onderdelen als instrumentatie voor onderzoek en productie op nanometerschaal mogelijk maakt. De verwachting is dat deze rol alleen maar zal toenemen ('More Moore'). Er wordt verder veel onderzoek gedaan naar geavanceerde optische lithografietechnieken, zoals extreem-ultraviolet (EUV) lithografie. Die technieken maken het mogelijk om met behulp van exotische lichtbronnen het circuitpatroon op nog kleinere schaal aan te brengen.

Toch zal de route van voortdurende miniaturisering binnen een periode van circa tien tot vijftien jaar doodlopen (NWO 2005; IMEC 2006). De kleinst mogelijke afbeelding die met licht op een siliciumwafer gemaakt kan worden, is bijna bereikt. Ook worden de fabricagemethoden steeds duurder als gevolg van de benodigde R&D-inspanningen, waardoor het punt in zicht komt dat een dergelijke ontwikkelings- en productiewijze economisch niet meer rendabel is. Ten slotte zal men tegen de fysieke grenzen aanlopen van de CMOS-gebaseerde transistoren. Dit gebeurt als kritieke atomaire grenzen worden gepasseerd waarbij essentiële transistor eigenschappen als geleiding en isolatie verloren gaan. Zo bevat de transistor een laagje isolerend materiaal (silicide) dat niet ongelimiteerd dunner gemaakt kan worden.

Bottom-up

Dergelijke grenzen op het innovatiepad van de traditionele CMOS-technologie leiden ons tot de tweede onderzoekslijn waarop nanotechnologie een rol speelt: nanotechnologie voor post-CMOS, op basis van een *bottom-up* benadering. In plaats van nanotechnologie te gebruiken in het miniaturiseringsproces, wordt deze aangewend om nieuwe materialen op nanometerschaal te ontwikkelen en toe te passen, en om nieuwe concepten te maken voor de opslag en verwerking van digitale informatie ('More than Moore' en 'Beyond Moore'). Hierbij valt te denken aan toepassing van koolstof nanobuisjes. Die kunnen als transistoren dienen op chips, maar zijn aanzienlijk kleiner. Ook is het mogelijk de transistor te vervangen door andere componenten, bijvoorbeeld door moleculaire elektronica te gebruiken, waarbij geavanceerde moleculen (twee tot drie nm dik) via elektriciteit of magnetisme kunnen worden aangestuurd en (uit)gelezen. Ook het onderzoeksgebied van de 'spintronica' is veelbelovend. Bij spintronica wordt niet alleen gebruikgemaakt van de lading van elektronen om informatie op te slaan en te transporteren, maar ook van hun 'spin', de richting waarin elektronen om hun eigen as draaien.

5.3 Mogelijke barrières

Nanotechnologie en -wetenschappen worden al in belangrijke mate ingezet om nieuwe halfgeleiderproducten en -materialen te ontwikkelen en te produceren op nanometerschaal. Dat gebeurt zowel top-down (via miniaturisering) als bottom-up. Op beide onderzoekspaden kunnen onderzoekers in de komende tien jaar belangrijke technologische en economische knelpunten tegenkomen. Binnen de top-down benadering vormen vooral de fysische grenzen van de halfgeleiders en de onderdelen ervan een onoverkomelijke barrière. Daarbij kan nanotechnologie wel ingezet worden om de levensduur van de bestaande technieken te verlengen, maar biedt deze geen duurzame oplossing. Tegelijkertijd zou een verdere verlenging van het CMOS-tijdperk (More Moore) er wellicht toe kunnen leiden dat post-CMOS-technologieën zich trager ontwikkelen, doordat de urgentie afneemt en concrete toepassingen langer op zich laten wachten.

Grote investeringen

Hiernaast geldt voor zowel de CMOS-technologie als de post-CMOS-technologieën dat enorme investeringen nodig zijn in onderzoek en ontwikkeling. Nu al investeert de Europese halfgeleiderindustrie ruim 40 procent van de jaarlijkse omzet in R&D en in de verbetering van productietechnieken. De verwachting is dat dit met de nog relatief jonge nanowetenschappen voorlopig niet minder zal worden (EU 2004). Daardoor komt nog meer nadruk te liggen op consolidatie/concentratie en op de noodzaak voor het bedrijfsleven, de wetenschappelijke instellingen en overheden om hun krachten te bundelen. In het algemeen zijn het echter kleine, flexibele en kennisintensieve bedrijven die voor een belangrijk deel bijdragen aan de creativiteit en diversiteit in innovatie. Een van de risico's van verdere concentratie is dat een deel van de creativiteit verloren gaat als kleine spelers worden buitengesloten en innovatie vooral een zaak wordt van onderzoeksconsortia rondom grote multinationale ondernemingen en onderzoeksinstellingen.

Ontbreken standaarden

Een ander potentieel techno-economisch knelpunt is dat standaarden ontbreken. Zo worden verschillende technologische en fundamentele oplossingen voor kleinere halfgeleiders verkend. Het is echter nog lang niet duidelijk hoeveel mogelijke types zullen ontstaan en of er een *dominant design* (een allesoverheersend type chip) zal komen.

Afstemming

Naast de zojuist genoemde eis (en mogelijk knelpunt) van krachtenbundeling en concentratie (het creëren van kritische massa) is het ook zaak om fragmentatie en overlap in het onderzoeksveld te vermijden. Veel landen hebben in de afgelopen jaren onderzoeksprogramma's gestart op het gebied van de nanowetenschappen en voor een belangrijk deel ook in de nano-elektronica. De vereiste schaal van onderzoek en de verdeling van de beschikbare middelen vragen erom al deze initiatieven en programma's goed op elkaar af te stemmen.

5.4 Onderzoek en agendering

NanoImpuls

Feitelijk heeft het tot 2003 geduurd voordat Nederland een min of meer 'nationaal' programma kreeg voor nanotechnologie c.q. nano-elektronica. In dat jaar startte het ministerie van Economische Zaken met het NanoImpuls-initiatief, een nationaal programma om meer focus en massa in het onderzoek te realiseren. NanoImpuls heeft een looptijd van vier jaar, en is een eerste strategische impuls om de Nederlandse kennispositie op het gebied van nanotechnologie verder te ontwikkelen. Het richt zich op vier themagebieden of *flagships*: nanofluidics, nanospintronics, nanoinstrumentation en nanofabrication. Daarnaast is NanoImpuls erop gericht de vereiste onderzoeksinfrastructuur binnen NanoLab te ontwikkelen en beschikbaar te stellen. Voor NanoImpuls is een subsidiebedrag beschikbaar gesteld van in totaal € 18 miljoen.

NanoNed

In 2005 betekende de komst van NanoNed, een consortium van zes universitaire instituten, TNO en Philips, een volgende stap. NanoNed stelt zich, evenals NanoImpuls, ten doel de wetenschappelijke en industriële kennispositie van Nederland te verbeteren. Hierbij gaat het om zowel de traditionele top-downbenadering (miniaturisering) als om de bottom-upbenadering (nieuwe structuren opbouwen, uitgaande van nanocomponenten). NanoNed heeft een totaalbudget van € 235 miljoen voor de periode 2005-2010, waarvan de overheid € 95 miljoen beschikbaar stelt in het kader van de BSIK-regeling en de rest wordt 'gematcht' door de partners. Naast de voortzetting van NanoLab met zijn vier

themapgebieden kent NanoNed nog zeven andere themagebieden.¹⁵ Het onderzoek wordt zo veel mogelijk uitgevoerd door meer partners, en op dit moment lopen meer dan tweehonderd onderzoeksprojecten (SenterNovem, factsheet NanoNed).

Point-One

Verder is in de zomer van 2006 Point-One van start gegaan, een programma geënt op het Franse idee van de *pôles de compétitivité*, dat er helemaal op gericht is het Nederlandse innovatiecluster op het gebied van de nano-elektronica en *embedded systems* verder te ontwikkelen. Point-One is geïnitieerd door de Nederlandse industrie, maar is een coproductie van bedrijven, kennisinstellingen en de rijksoverheid. Inmiddels zijn circa dertig partijen betrokken. Het ministerie van Economische Zaken heeft € 50 miljoen gereserveerd voor het programma in het kader van het thematische innovatiebeleid van de overheid, in het bijzonder voor het sleutelgebied 'Hightechsystemen en -materialen'. De Point-One-activiteiten, die momenteel worden opgestart, kennen vier hoofdlijnen:

- technologieontwikkeling door strategisch en gezamenlijk onderzoek;
- ontwikkeling van open-innovatiekennisinstututen zoals het Embedded Systems Institute (ESI) en het Holst Center;
- bevordering van kennisuitwisseling tussen de academische instellingen en het bedrijfsleven met een nadruk op 'human capital' dat wordt ontwikkeld en aangetrokken;
- vergroting van de rol en concurrentiepositie van bestaande start-ups op dit gebied.

De activiteiten van Point-One vallen binnen een kader van vier prioriteitsgebieden:

1. prioriteiten met betrekking tot maatschappelijke behoeften;¹⁶
2. de toepassingscontext (industriële of 'private spaces');
3. systeemontwerp;
4. specifieke technologiegebieden (waarbij 'More than Moore' een belangrijk thema is).

De activiteiten van Point-One zijn verder sterk verbonden aan Europese onderzoeksprogramma's zoals ITEA2 en MEDEA+.¹⁷ ITEA2 is de opvolger van het ITEA-programma, dat zich richt op vooruitstrevende en precompetitieve R&D op het gebied van software voor software-intensieve systemen (embedded systems). In ITEA2 participeren meer dan vijfhonderd bedrijven en instellingen uit vijfentwintig landen. MEDEA+ richt zich op 'systeeminnovaties op silicium voor de e-economie', waarbij micro-elektronica en halfgeleidertechnologie een centrale rol spelen. In MEDEA+ participeren bijna vierhonderd partners uit tweeëntwintig landen. Verder wil Point-One er door deze krachtenbundeling een belangrijke bijdrage aan leveren dat de Europese onderzoeksagenda's van de Europese Technology Platforms ENIAC (nano-elektronica) en ARTEMIS (embedded systems) verder worden ontwikkeld.

NWO

Ten slotte moet opnieuw het huidige NWO-initiatief genoemd worden om te komen tot één brede visie en agenda voor het nationale nanotechnologisch onderzoek. Hoewel de NWO-strategie voor nanowetenschappen momenteel vorm krijgt, en er dus ook geen definitieve besluiten kenbaar zijn gemaakt over de inhoud, noemt de NWO-strategie nadrukkelijk

15 Advanced Nano Probing, Bio Nano Systems, Bottom Nano Electronics, Chemistry and Physics of Individual Molecules, Nano Electronic Materials, NanoFabrication, NanoFluidics, NanoInstrumentation, NanoPhotonics, NanoSpintronics, en Quantum Computing. Het betreft dus meer dan alleen meer onderzoek op het gebied van nano-elektronica.

16 Health, Security & Safety, Communications, Mobility & Transport, Education & Entertainment.

17 Beide maken deel uit van het Europese EUREKA-programma.

'Beyond Moore' als een van de strategische thema's waarop het Nederlandse onderzoek zich in de komende jaren moet richten.¹⁸

Internationale roadmaps

Wat de CMOS-technologie en de 'More Moore'-onderzoekslijn betreft, spelen vooral grote internationale roadmappingactiviteiten zoals die van de ITRS¹⁹ een grote rol. Tot op zekere hoogte hebben deze ook een inbreng voor de bovenstaande programma's, al zijn de eerdergenoemde Europese onderzoeksagenda's ENIAC en ARTEMIS wellicht nog belangrijker. Feitelijk worden de onderzoeksagenda's van de bovenstaande Nederlandse programma's grotendeels bepaald in samenspel met de wetenschappelijke wereld en het bedrijfsleven. De rijksoverheid heeft hierin een faciliterende rol, onder andere door financiële middelen beschikbaar te stellen. De onderzoeksagenda richt zich vooral op de technologische uitdagingen van nano-elektronica, waarbij de industriële toepassing en de bijdrage aan de Nederlandse concurrentiepositie belangrijke uitgangspunten vormen. Bovendien streeft elk van deze programma's er ook naar om meer focus en massa te ontwikkelen en te waarborgen dat het Nederlandse nano-elektronicaonderzoek multidisciplinair wordt uitgevoerd. Maatschappelijke aspecten komen aan bod in zowel NanoNed (aan de hand van technology-assessmentonderzoek) als in Point-One (door maatschappelijk relevante toepassingsgebieden te hanteren). Tot dusverre speelt 'de' maatschappij hierin echter alleen bij NanoNed een enigszins actieve rol in de onderzoeksagendering (door workshops en consultatie).

5.5 Conclusies

De nanotechnologie betekent een belangrijke impuls voor de halfgeleiderindustrie, die zich in relatief korte tijd ontwikkeld heeft tot een R&D-intensieve sector van wereldformaat, en die onderwerp is van toenemende internationalisering, concentratie en consolidatie. Nanotechnologie zal het enerzijds mogelijk maken om het miniaturiseringproces te vervolgen (top-down). Anderzijds kan ook een nieuw innovatietraject worden ingeslagen, waarbij compleet nieuwe chipconcepten worden ontwikkeld en samengesteld op basis van nanomaterialen, nanosystemen en nano-instrumentarium (bottom-up). De aandacht zal vooral uit moeten gaan naar het bottom-upperspectief, omdat de mogelijkheden om verder te innoveren volgens de top-downbenadering over tien tot vijftien jaar uitgeput zullen zijn.

Tabel 6 Samenvatting nano-elektronica

| | |
|--|--|
| Kenmerken innovatiesysteem chiptechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ relatief jonge sector met razendsnelle ontwikkeling ▪ zeer sterk geïnternationaliseerd ▪ uiterst R&D-intensief ▪ mondiaal proces van toenemende concentratie, consolidatie en concurrentie ▪ NL industrie en kennisbasis behoren tot internationale top ▪ 'traditionele' drijfveren van innovatie: miniaturisering en capaciteitsvergroting |
| Rol/impact nanotechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ reeds uiterst belangrijk voor More-Mooretoepassingen (verdere miniaturisering) ▪ sterk toenemende rol in <i>Beyond Moore</i> |

¹⁸ Binnen dit thema worden drie aandachtsgebieden genoemd: (1) *Nano-scale photonic/electronic phenomena with applications in lighting, displays, storage, lithography, sensors and actuators*, (2) *From organics to bio-electronics: novel molecular scale devices and IC-concepts*, (3) *GHz/THz electron and spin dynamics*.

¹⁹ International Technology Roadmap for Semiconductors, www.itrs.net

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>time-to-market</i> van Beyond-Mooretoepassingen is mede afhankelijk van extensie levenscyclus van More-Mooretoepassingen |
| Belangrijkste spelers in onderzoek en innovatie in Nederland | <ul style="list-style-type: none"> ▪ industrie en de publieke kennisinfrastructuur ▪ overheid vervult grote rol als financier |
| Onderzoeksagendering | <ul style="list-style-type: none"> ▪ sterk internationaal bepaald, onder andere door diverse roadmappingactiviteiten van industrie in samenwerking met wetenschap ▪ nanotechnologie prominent aanwezig ▪ NL-agenda vooral binnen NanoNed en sinds kort ook Point-One (industrie en wetenschap) |
| Maatschappelijke vraagarticulatie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ nauwelijks aanwezig ▪ wel aandacht voor technology assessment en publieke 'voorlichting' m.b.t. nanotechnologie in NanoNed |
| Voornaamste hordes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ economisch ▪ technisch-wetenschappelijk |

Innovatie

De vraag of er vóór 2015 daadwerkelijk toepassingen zullen komen die gebruikmaken van nanotechnologie, is feitelijk overbodig. De CMOS-technologie heeft immers al enige tijd de nanometerschaal bereikt. Wel lijkt de vraag gerechtvaardigd op welke termijn er daadwerkelijk op grotere schaal toepassingen worden geïntroduceerd die gebaseerd zijn op post-CMOS-technologie. Hoe veelbelovend dat onderzoeksgebied ook is, het is nog relatief jong en ziet zich geconfronteerd met diverse technische en economische uitdagingen. Hierbij is het vooral belangrijk om te zien in welke mate de levenscyclus van de 'traditionele' CMOS-technologie met behulp van onder meer nanotechnologie te verlengen valt, en hoe lang deze in economisch opzicht concurrerend zal blijven ten opzichte van alternatieve technologieën.

Onderzoek

De onderzoeksagenda kent een sterke internationale invloed met roadmapping en visievormingsactiviteiten in onder andere ITRS, ENIAC, en ARTEMIS. De internationale agenda wordt sterk bepaald door industriële en wetenschappelijke partijen, waarin Nederland geen onverdienstelijke rol speelt met bedrijven als ASML, Philips en ASMI en enkele vooraanstaande instituten. Fundamenteel en toegepast wetenschappelijk onderzoek op het gebied van nano-elektronica is in Nederland goed ingebed in programma's als NanoNed (maar ook MicroNed) en het zojuist opgerichte Point-One. Ook het NWO-programma-in- wording zal zich hierop richten. In al deze programma's krijgt de bottom-up of 'More than Moore'-benadering de meeste aandacht als hét onderzoeksgebied voor de toekomst. De belangrijkste aandachtspunten van de programma's zijn de technisch-wetenschappelijke uitdagingen en in zekere zin ook de economische vertaling ervan (bijvoorbeeld productie). Ook de vereisten van focus, massa en interdisciplinariteit komen in de meeste programma's aan bod. Aan de maatschappelijke aspecten van nanotechnologie wordt vooralsnog beperkt aandacht besteed. NanoNed heeft de maatschappelijke kant van nanotechnologie expliciet meegenomen door te reflecteren op maatschappelijke gevolgen van de technologie en door gerichte voorlichtingsactiviteiten te organiseren voor burgers/consumenten. Point-One daarentegen kent geen expliciete maatschappelijke activiteiten, maar zal zijn activiteiten sterk toespitsen op enkele maatschappelijk relevante sectoren zoals gezondheid en mobiliteit.

5.6 Referenties

- 'Dutch Pôle de Compétitivité Nano-electronics and Embedded Systems', *Orange Book (Public Document) – version P1*, June 2006, Eindhoven.
- 'Dutch Pôle de Compétitivité Nano-electronics and Embedded Systems', *Strategic Research Agenda (Public Version)*. June 2006, Eindhoven.
- EU (2004). *Vision 2020 – Nanoelectronics at the centre of change. A far-sighted strategy for Europe*, report of the EU High Level Group. Luxembourg.
- ITRS (2005). *International Technology Roadmap for Semiconductors*.
- IMEC. *Jaarverslag 2005*. Leuven.

www.itrs.net

www.imec.nl

www.nanoned.nl

www.point-one.nl

www.tno.nl

www.sia-online.org

6 Conclusies en aanbevelingen

In de vorige hoofdstukken hebben we de resultaten weergegeven van vier korte studies naar toepassingsgebieden van nanotechnologie: drug delivery, zonnecellen, waterzuivering, en nano-elektronica. Deskundigen verwachten voor de eerste drie gebieden voor 2015 toepassingen op belangrijke maatschappelijke vraagstukken (zie hoofdstuk 1). De case over nano-elektronica is opgenomen ter vergelijking.

Voor elke case is antwoord gegeven op twee centrale vragen:

- **Innovatievraag:** Hoe realistisch is het om innovatieve toepassingen van nanowetenschappelijk en nanotechnologisch onderzoek te verwachten voor 2015?
- **Agenderingsvraag:** Op welke manier komt de onderzoeksagenda, al dan niet onder de noemer van nanotechnologie, tot stand?

Aan beide centrale vragen ligt de gedachte ten grondslag dat inzicht nodig is in de dynamiek van het innovatiesysteem op de verschillende toepassingsgebieden om tot een reëel verwachtingspatroon over toepassingen van nanotechnologie te komen. Niet om daarmee exact uitsluitsel te kunnen geven over wat de toekomst ons brengt, maar wel om het traject naar de toekomst toe zo zorgvuldig mogelijk vorm te geven. In dit hoofdstuk zetten we daarom per onderzoeksvraag de resultaten voor de verschillende toepassingen naast elkaar. In paragraaf 6.2 gaan we in op het totaalbeeld dat hieruit naar voren komt met betrekking tot het stimuleren van innovatie. In paragraaf 6.3 volgen conclusies over onderzoek en maatschappelijke agendering.

6.1 Innovatie: naar een visie met oog voor diversiteit én synergie

Om de eerste vraag te kunnen beantwoorden hebben we allereerst stilgestaan bij de relevante innovatiesystemen waarbinnen de toepassingen tot stand moeten komen. De structuur en de dynamiek van deze systemen hebben grote invloed op het tempo waarin de innovatieve toepassingen gerealiseerd zullen worden, en op de schaal waarop dit gebeurt. Ook is een beeld gegeven van de rol die nanotechnologie in het innovatiesysteem speelt of kan gaan spelen, en van de barrières die te verwachten zijn als deze op nanotechnologie gebaseerde toepassingen verder worden ontwikkeld. De belangrijkste kenmerken van de desbetreffende innovatiesystemen staan in tabel 7 naast elkaar.

Tabel 7 Samenvatting innovatievraag

| | Drug delivery | Zonnecellen | Waterzuivering | Nano-elektronica |
|---|---|--|---|--|
| Innovatie systeem | <ul style="list-style-type: none"> ▪ onderdeel van internationaal farma-systeem ▪ NL kleine speler ▪ leidende rol VS ▪ proces van concentratie en consolidatie ▪ R&D-intensief ▪ sterke kennisbasis NL ▪ grote invloed van wet- en regelgeving en zorgstelsels | <ul style="list-style-type: none"> ▪ onderdeel van bredere energiesector ▪ zonnecelindustrie in NL marginaal ▪ wereldmarkt gedomineerd door enkele grote internationale bedrijven ▪ beperkte invloed van wet- en regelgeving | <ul style="list-style-type: none"> ▪ sterk publiek karakter ▪ R&D en innovatie slechts door enkele industriële spelers ▪ achterblijvende R&D-intensiteit en samenwerking ▪ wel potentie van excellent technologisch cluster ▪ internationale wet- en regelgeving bepalen de norm | <ul style="list-style-type: none"> ▪ zeer sterk internationaal karakter ▪ R&D-intensief ▪ proces van concentratie en consolidatie ▪ NL industrie en kennisbasis behoren tot wereldtop ▪ nauwelijks rol voor wet- en regelgeving |
| Drijfveren | <ul style="list-style-type: none"> ▪ verhogen van effectiviteit en efficiency van geneesmiddelen ▪ beperken bijwerkingen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ verminderen afhankelijkheid van fossiele brandstoffen i.v.m. voorzieningen-zekerheid en milieu | <ul style="list-style-type: none"> ▪ beschikbaarheid van voldoende en schoon water | <ul style="list-style-type: none"> ▪ verkleinen van devices ▪ vergroten van rekenaarcapaciteit |
| Verwachte termijn impact nano technologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ vooral lange termijn (na 2015) ▪ 'smart' drug-deliverysystemen (nu ook aanwezig maar nog beperkt) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ vooral lange termijn | <ul style="list-style-type: none"> ▪ korte termijn: wordt reeds toegepast in nanofiltratie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ zowel korte als lange termijn ▪ grootste impact op lange termijn te verwachten (Beyond Moore) |
| Huidig ontwikkelings-stadium | <ul style="list-style-type: none"> ▪ overwegend stadium van onderzoek en technologie-ontwikkeling ▪ beperkt sprake van toepassing/productie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ overwegend stadium van onderzoek en technologie-ontwikkeling | <ul style="list-style-type: none"> ▪ overwegend stadium van technologie-ontwikkeling en productie/toepassing | <ul style="list-style-type: none"> ▪ overwegend stadium van onderzoek en technologie-ontwikkeling ▪ tot op zekere hoogte ook beperkte productie en toepassing |
| Belangrijkste spelers in onderzoek en innovatie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke KIS en industrie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke KIS | <ul style="list-style-type: none"> ▪ publieke KIS | <ul style="list-style-type: none"> ▪ industrie en publieke KIS |

Uit de casestudies in de vorige hoofdstukken blijkt dat het realistisch is om voor 2015 toepassingen van 'nano-based' drug-deliverysystemen, zonnecelsystemen, zuiveringsinstallaties en halfgeleiders op de markt te verwachten. De schaal waarop deze toepassingen zich zullen voltrekken en het daadwerkelijke 'nanogehalte' ervan blijven tot nu toe echter achter bij de grootse beloften die er vaak over worden gedaan. In het domein van de halfgeleiders is de ontwikkeling van nanotechnologie het verst. Ook voor medicijnen neemt de toepassing van nanotechnologie een grote vlucht. Maar de grote sprong voorwaarts laat in elk van de toepassingsgebieden nog op zich wachten.

Of de beloften vóór 2015 daadwerkelijk worden ingelost hangt voor een belangrijk deel af van de desbetreffende innovatiecontext. De vier cases laten duidelijk zien dat er niet één enkel innovatiesysteem bestaat voor nanotechnologie. Er zijn daarentegen vier totaal verschillende innovatiesystemen, elk met zijn eigen structuur, cultuur en dynamiek. Daarmee verschillen ook de drijfveren voor innovatie, de omvang en samenstelling van de (Nederlandse) industrie, de invloed van wet- en regelgeving en de mate van internationale coördinatie en oriëntatie. In veel gevallen zijn daarbij economische barrières te voorzien

die niet zozeer specifiek gelden voor de toepassing van nanotechnologie, maar karakteristiek zijn voor het desbetreffende innovatiesysteem.

Innovatie kan in de vier toepassingsgebieden dus niet met een standaardrecept worden gestimuleerd. Tegelijkertijd ligt de oplossing er ook niet in om een heel eigen beleid per toepassingsdomein te maken. De verschillende stromingen binnen de nanowetenschappen zijn namelijk sterk afhankelijk van elkaar en ook tussen de nanowetenschappen en overige wetenschappen bestaan veel raakvlakken (bijvoorbeeld tussen de biotechnologie of de procestechologie). Hoewel de verschillende toepassingsgebieden hun eigen dynamiek kennen, putten ze de noodzakelijke basiskennis ook uit nabijgelegen wetenschappelijke gebieden. Voor een relatief jong wetenschappelijk vakgebied als nanotechnologie is het dan ook heel belangrijk om mechanismen in het onderzoek in te bouwen die voor wederzijdse kruisbestuiving zorgen. Ook als de onderzoeksagenda wordt bepaald, dient rekening gehouden te worden met zowel diversiteit als met de mogelijkheden voor synergie. Dit om de kansen optimaal te benutten.

6.2 Onderzoek en maatschappelijke agendering

In dit rapport hebben we een antwoord gezocht op de vraag hoe de onderzoeksagenda – al dan niet onder de noemer van nanotechnologie – tot stand komt. Daartoe zijn we nagegaan in hoeverre de vier toepassingen ook daadwerkelijk onderwerp zijn van de (Nederlandse) onderzoeksagenda's. Als dat niet het geval is, mogen we veronderstellen dat de toepassing langer op zich zal laten wachten of zich grotendeels zal voltrekken buiten de invloed van Nederland. In tabel 8 zijn de belangrijkste kenmerken naast elkaar gezet.

Tabel 8 Samenvatting agenderingsvraag

| | Drug delivery | Zonnecellen | Waterzuivering | Nano-elektronica |
|--|--|---|--|---|
| Onderzoeks-agenda en de rol voor nanotechnologie | <ul style="list-style-type: none"> ▪ sterk internationaal bepaald door industrie en wetenschap; in NL vooral door academische groepen ▪ bredere agenda in Nederland pas sinds kort in wording (o.a. TTI Pharma) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ agenda wordt tamelijk nationaal bepaald in kader van energiebrede onderzoeks-agenda ▪ bepalende spelers zijn rijksoverheid, energiesector en wetenschap ▪ nano beperkt aanwezig | <ul style="list-style-type: none"> ▪ agenda wordt tamelijk nationaal bepaald ▪ in toenemende mate is er gezamenlijke 'science-industry'agenda (Wetsus, TI Water) ▪ internationale wet- en regelgeving zijn normbepalend | <ul style="list-style-type: none"> ▪ sterk internationaal gecoördineerd, met dominante rol industrie ▪ in NL is agenda al enige tijd aanwezig (o.a. NanoNed, Point-One) ▪ nano-elektronica vormt dominante stroming in hele nano-onderzoeks-agenda |
| Maatschappelijke betrokkenheid | <ul style="list-style-type: none"> ▪ beperkt aanwezig ▪ toepassingen met hoge maatschappelijke impact hebben ook economische potentie ▪ in formulering agenda neemt maatschappij zeer beperkt deel, vooral d.m.v. patiëntenverenigingen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ expliciet aanwezig, als onderdeel van de transitiediscussies | <ul style="list-style-type: none"> ▪ impliciet aanwezig (doel van schoner water wordt alom aangenomen als maatschappelijke vraag) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ nauwelijks aanwezig ▪ beperkt aandacht d.m.v. technology assessment activiteiten en workshops (NanoNed) |

Nederland is erin geslaagd om in alle onderzochte toepassingsgebieden de benodigde kennisbasis voor innovatie te ontwikkelen. Bovendien werken de verschillende partijen in alle vier de toepassingsgebieden duidelijk samen om onderzoeklijnen te agenderen. De vier cases laten echter zien dat de huidige onderzoeksagenda's tamelijk verschillend tot stand komen. Voor chiptechnologie en drug-deliverysystemen (en voor farmacie in het algemeen) wordt de rol van nanotechnologie in brede zin onderkend en krijgt deze uitgebreid aandacht in (eigen) onderzoeksprogramma's. Binnen de andere twee toepassingen maakt nanotechnologie een bescheiden deel uit van veel bredere onderzoeksagenda's. Ook is het per case verschillend wie het voortouw neemt als de agenda wordt opgesteld. Zo speelt in de nano-elektronica en chiptechnologie de industrie duidelijk een vooraanstaande rol, maar is dat in de energiesector juist de overheid. Verder lopen de cases nadrukkelijk uiteen wat de internationale invloed op de nationale onderzoeksagenda betreft. Voor nanomedicine en vooral chiptechnologie geldt dat de omvang en de koers van het onderzoek grotendeels in een internationaal krachtenveld worden bepaald, waarbij Nederland een relatief bescheiden rol inneemt. In het geval van waterzuivering en zonnestroom kan Nederland veel meer een eigen koers lopen.

Drug delivery, zonnecellen en waterzuivering zijn drie toepassingsgebieden die aansluiten bij een duidelijke maatschappelijke vraag. Deze gebieden zijn ook zodanig gestructureerd dat maatschappelijke betrokkenheid vorm kan krijgen bij de verdere ontwikkeling van nieuwe technologie. Op het gebied van nano-elektronica vormen maatschappelijke vraagstukken geen directe drijfveer voor innovatie, maar wordt innovatie vooral vanuit economisch oogpunt gestuurd. Het is echter wel belangrijk dat maatschappelijke betrokkenheid ook in dit gebied vorm krijgt. Nu wordt op dit gebied alleen binnen NanoNed aandacht besteed aan de maatschappelijke impact van nanotechnologie. Op de lange termijn zal nano-elektronica echter bijdragen aan de ontwikkeling van allerlei intelligente producten. Deze toepassingen raken niet vanzelf maatschappelijk ingebed.

Nawoord: lessen uit het project

Sinds 2003 stimuleert het Rathenau Instituut het maatschappelijk debat over nanotechnologie. In oktober 2004 was er een publieke bijeenkomst in samenwerking met de themacommissie Technologiebeleid van de Tweede Kamer. Daar is de conclusie getrokken dat een discussie over de maatschappelijke impact van een breed veld als nanotechnologie, moet worden gevoerd per toepassingsgebied. Tegelijkertijd spraken de aanwezige politici de wens uit om meerdere maatschappelijke organisaties bij de discussie te betrekken. Vanuit de gedachte dat een discussie over concrete toepassingen maatschappelijke partijen zou kunnen verleiden om aan de discussie over nanotechnologie mee te doen is het project *Nanotechnologie in Focus* opgestart.

Dit project bestond uit twee fasen. In de eerste fase werden toepassingsgebieden met grote maatschappelijke impact (zowel kansen als risico's) binnen tien jaar geïdentificeerd. Dit gebeurde door middel van een enquête onder de lezers van de Rathenau nieuwsbrief Nanotechnologie. In de tweede fase zou een selectie van deze toepassingen verder in kaart worden gebracht. De verwachtingen van experts voor verschillende toepassingsgebieden vormden daarvoor het uitgangspunt.

De drie gekozen toepassingen – drug-delivery, zonnecellen en waterzuivering – bleken echter weinig stof voor kritische reflectie over maatschappelijke risico's te geven. Ze lokken dan ook weinig maatschappelijke betrokkenheid uit. Immers, voor deze drie toepassingen is niet zozeer de discussie over risico's interessant, maar meer of kansen worden benut en in hoeverre dit vanuit maatschappelijk perspectief wordt geagendeerd. De maatschappelijke wenselijkheid van bovengenoemde toepassingen lijkt dan ook de reden voor de keuze van de lezers van de Rathenau nieuwsbrief.

Dit besef heeft tot een andere opzet van de tweede fase van het project Nanotechnologie in Focus geleid. Het oorspronkelijke plan om maatschappelijke actoren bij de discussie over concrete toepassingen te betrekken werd verlaten. Daarvoor in de plaats kwam de vraag in hoeverre de verwachtingen van de geïnterviewde experts daadwerkelijk waargemaakt zullen worden. Anders gezegd; sluiten verwachtingen over wetenschappelijke en technologische vooruitgang aan bij de actuele innovatiedynamiek in de gekozen toepassingsgebieden? Deze vragen maken ook onderdeel uit van het werk van de afdeling Science System Assessment in het Rathenau Instituut die het functioneren van het wetenschapssysteem bestudeert. Deze afdeling heeft dan ook logischerwijze een rol gespeeld bij de opzet en uitvoering van het onderzoek in de tweede fase.

Uit de ervaringen in het project Nanotechnologie in Focus mag niet de conclusie getrokken worden dat er weinig aanleiding is tot discussie rondom nanotechnologie. Zo is de laatste drie jaar internationaal een discussie onder beleidsmakers en maatschappelijke organisaties op gang gekomen over de mogelijke risico's van synthetische nanodeeltjes. Het Rathenau Instituut volgt en stimuleert dit debat al enige jaren. Dat doen we ook bij andere thema's die nauw aansluiten bij de ontwikkelingen binnen nanotechnologie, zoals RFID en human enhancement.

Wel kan worden opgemerkt dat het op dit moment in het debat over nanotechnologie niet alleen schort aan kritische maatschappelijke betrokkenheid. Ook aan positieve betrokkenheid die wordt gemotiveerd vanuit wenselijk geachte ontwikkelingen is behoefte. Deze constatering vraagt zeker om strategische reflectie op de organisatie van publiek debat. De centrale vraag daarbij is dus niet alleen hoe risico's kunnen worden geminimaliseerd, maar tevens hoe gewenste ontwikkelingen kunnen worden onderkend en gestimuleerd.

Rinie van Est
Bart Walhout

Bijlagen: Caseteksten enquête²⁰

Nanotechnologie in Focus

NANOTECHNOLOGIE VOOR HET GERICHT AFLEVEREN VAN MEDICIJNEN

Om de werking te verbeteren en bijwerkingen tegen te gaan, is het van belang om medicijnen zo gericht mogelijk op de bestemde plek te brengen. Dat kan door medicijnen te 'verpakken' in nanovehikels, eventueel voorzien van een 'postcode' om het pakketje bij de juiste cel af te leveren. Een andere toepassing van nanotechnologie is het verpakken van vaccins, waardoor het mogelijk wordt om ze zonder injectie toe te dienen. Daardoor kunnen extra vaccinaties worden uitgevoerd, zonder het toch al overvolle vaccinatieprogramma extra te belasten.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Medicijnen worden al vaak verpakt in capsules van gelatine of soortgelijke materialen om ze beter oplosbaar te maken dan wel te beschermen tegen maagzuur. Dergelijke capsules kunnen ook op nanoschaal worden gemaakt door het medicijn in een gel te verpakken met bepaalde moleculen. Afhankelijk van het soort gel opent de verpakking zich onder invloed van temperatuur, zuurgraad of blootstelling aan bepaalde stoffen die aanwezig zijn op de plek in het lichaam waar het medicijn zijn werk moet doen.

Een volgende stap is de nanoverpakking die zich aan de wand van bijvoorbeeld een tumorcel hecht. De capsule, bestaande uit een of meer liposomen, wordt aan de buitenzijde voorzien van eiwitten die zich specifiek aan een tumorcel hechten. Als er ook nog gouddeeltjes aan de capsule worden toegevoegd, kan het medicijn worden 'uitgepakt' op elk gewenst moment, bijvoorbeeld door gerichte verhitting met een laserstraal. Voor actieve stoffen gelden uitgebreide registratieprocedures. Het is daarom niet zeker of deze techniek al binnen tien jaar toegepast zal worden in de kliniek.

Vóór 2015 wordt wél de toepassing van naaldloze vaccins verwacht, die bijvoorbeeld via de neus kunnen worden toegediend. Een dergelijk vaccin bestaat uit een voor de mens veilige bacterie, waaraan via een speciaal ankermolecuul eiwitten van een ziekteverwekkend virus zijn bevestigd. Het geheel kan via het slijmvlies in de neus worden opgenomen.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: over het gedrag van nanoverpakkingen in het lichaam en de delen waarin ze uiteenvallen is nog weinig bekend. De eventuele risico's van nanoverpakte medicijnen worden in de toelatingsprocedure afgewogen tegen de voordelen van gerichte toediening, zoals bij alle medicijnen.

²⁰ Voor een uitgebreid overzicht van de eerste fase in het project Nanotechnologie in Focus: zie Enzing, C. en J. van Kasteren (2006). Nanotechnologie in Focus: zoektocht naar maatschappelijk relevante oplossingen op korte termijn (2015). Den Haag: Rathenau Instituut

NANOTECHNOLOGIE IN DE ENERGIEVOORZIENING

Met duurzame energiebronnen als zon en wind kunnen industrielanden hun afhankelijkheid van fossiele energie verminderen. Motieven zijn onder meer het broeikas-effect en de onzekere politieke situatie in de meeste olieproducerende landen (voorzieningszekerheid). Voor ontwikkelingslanden komt daar nog bij dat het aanleggen van een elektriciteitsnetwerk duur is. Daardoor is decentrale opwekking vaak de enige manier om de bevolking op korte termijn van elektriciteit te voorzien. Dankzij nanotechnologie kan de efficiency van zonnecellen worden verbeterd, zodat de kosten van een kilowattuur elektriciteit uit zonlicht een factor twee tot vijf lager worden. Nanostructuren verbeteren bovendien de 'opslag' van elektriciteit in accu's en condensatoren en in de vorm van waterstof.

Verwachte technologische ontwikkelingen

De zonnecellen die voor 2015 op de markt komen hebben weliswaar een bescheiden energetisch rendement. Maar ze zijn zo goedkoop dat de prijs per kilowattuur elektriciteit in de buurt komt van de huidige elektriciteitsprijs (0,06 €/kWh, kale prijs). Het gaat om 'organische' zonnecellen (de Graetzelcel en varianten daarop), waarbij moleculen titaandioxide en organische kleurstof met nanoprecisie worden gegroepeerd om zonlicht in elektriciteit om te zetten. Een ander type bestaat uit halfgeleidende kunststof, waaraan fullerenen (bolvormige moleculen bestaande uit zestig of meer koolstofatomen) zijn toegevoegd.

Duurzame energie toepassen is alleen mogelijk als je elektriciteit goedkoop en snel kunt opslaan. Accu's gemaakt van nanogestructureerde materialen kunnen per volume-eenheid meer elektriciteit opslaan. Dat maakt ze goedkoper en robuuster dan bestaande accu's. Condensatoren van nanogestructureerd materiaal maken het mogelijk om (tijdelijk) meer elektriciteit op te slaan dan gewone condensatoren. Elektriciteit kan ook worden omgezet in waterstof, dat we binnen nu en tien jaar veilig en efficiënt kunnen opslaan in nanogestructureerde materialen.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: titaandioxide in organische zonnecellen is fotokatalytisch en kan bij blootstelling schadelijk zijn. De nanopoeiers en -composieten van toekomstige accu's kunnen giftig zijn.

Transitie: om het fluctuerende aanbod van elektriciteit uit duurzame bronnen op grote schaal te kunnen inzetten, lijkt op langere termijn een andere opzet van het elektriciteitsnet vereist. De meest vergaande optie is een Energie-internet, dat bestaat uit zelfstandige eenheden die zowel elektriciteit opwekken als consumeren. Een dergelijke technische transitie zou tevens grote sociale en institutionele aanpassingen vereisen.

NANOTECHNOLOGIE VOOR DRINKWATER

Ruim een derde van de wereldbevolking (2,5 miljard mensen) beschikt niet over veilig drinkwater. Daarnaast kampen ontwikkelings- en industrielanden met grote tekorten aan drink- en proceswater en aan irrigatiewater voor de landbouw. Nanotechnologie kan die tekorten verminderen door (vervuild) oppervlaktewater, zeewater en afvalwater om te zetten in water van de gewenste kwaliteit.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Bij het maken van drinkwater worden hier en daar membranen gebruikt om de ruwe grondstof (meestal oppervlaktewater) te ontdoen van zwevend stof, micro-organismen en organisch materiaal. In het algemeen gaat het om deeltjes die groter zijn dan 15 nanometer. Nog fijnere membranen worden gebruikt om zeewater te ontzouten, bijvoorbeeld aan boord van schepen. Dat is allemaal bestaande technologie.

Dankzij nanotechnologie is het nu al mogelijk om membranen te maken waarvan de poriën precies even groot zijn, zodat niet 99 maar honderd procent van alle micro-organismen wordt afgestopt. Dat bespaart een extra behandeling met een desinfecterend middel. Met nanoprecisie kun je bovendien membranen maken met meer poriën per vierkante centimeter. Daardoor kun je meer water per vierkante meter membraan zuiveren. Ook is minder energie nodig om zeewater te ontzouten.

Op termijn kan de beschikbaarheid van betrouwbare membraanzuivering leiden tot decentrale vormen van drinkwatervoorziening en rioolwaterzuivering, bijvoorbeeld zuivering aan huis.

Ten slotte kun je dankzij nanotechnologie membranen maken die beter bestand zijn tegen het 'omkeren' van de waterstroom. Dat is nodig om de membranen schoon te spoelen, maar veroorzaakt ook een behoorlijke aanslag op de ultradunne membranen. Stevigere membranen zorgen voor een langere levensduur en minder kosten.

Mogelijke risico's

Milieu: het gebruik van membranen voor de zuivering van water kost niet alleen energie, maar levert bovendien afvalstoffen op in de vorm van 'brijn', de slurrige die achterblijft als het water door het membraan is gegaan.

Gezondheid: bij beschadiging van het membraan bestaat het risico dat het water besmet wordt met schadelijke micro-organismen.

Zeggenschap: ondanks de goede bedoelingen blijft de vraag of vooral de armen in de wereld daadwerkelijk zullen profiteren van deze nieuwe technologie, zeker in het licht van de wereldwijde privatisering van nutsbedrijven.

NANOTECHNOLOGIE VOOR KLEINERE EN SNELLERE COMPUTERS

Sinds 1965 is het aantal schakelingen op een microchip elke 18 tot 24 maanden verdubbeld (Wet van Moore). Hierdoor zijn computers steeds sneller en goedkoper geworden. Als gevolg daarvan beschikken we nu over meerdere computers voor werk (laptop, agenda, mobiele telefoon), ontspanning (camera's en dvd-spelers) en vervoer (een auto telt inmiddels meerdere computers). De komende tien jaar zet deze ontwikkeling door. Nanotechnologie kan hieraan een cruciale bijdrage leveren.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Chips (microprocessors) maak je door met ultraviolet licht patronen te projecteren op een schijfje silicium. Die patronen worden weggeëtst en vervangen door metalen (verbindingen) of halfgeleidende materialen (transistors). Met deze lithografische methode kun je structuren maken van 90 nanometer breed. De nieuwe Pentiumchip van Intel heeft inmiddels al structuren van 65 nanometer; in het lab zijn al structuren gemaakt van 32 nanometer groot. Deze chips komen vóór 2010 op de markt.

Bij miniaturisering doen zich twee belangrijke problemen voor. Eén is de temperatuur. Hoe hoger de snelheid van de chip, hoe meer warmte deze ontwikkelt. Door meer koeling of via een andere architectuur kan de temperatuur binnen de perken worden gehouden. Tweede probleem is het 'tunnelen' van elektronen. Ze lekken als het ware door het silicium heen, waardoor het verschil tussen de aan- en uitstand van de transistor vervaagt. Een meer praktisch probleem is dat de investering in productiemachines omgekeerd evenredig is met de schaal waarop je werkt: hoe kleiner, hoe duurder.

Vanwege deze problemen zoekt men naar andere wegen om zo veel mogelijk schakelingen op een vierkante millimeter te persen. In plaats van top-down (de huidige methode) probeert men schakelingen nu molecuul voor molecuul, van onderaf (bottom-up) op te bouwen (zie ook Nanodraden).

Hoewel verscheidene moleculen bruikbaar lijken als transistor, verwacht men niet dat er vóór 2015 zogeheten 'single molecule' computers op de markt komen. Het is nog niet met zekerheid te zeggen of dat anders ligt voor opslag van gegevens op een geheugenchip. 'Single molecule' geheugenchips maken gebruik van moleculen die twee toestanden (0 en 1) kennen, een gegeven dat je kunt gebruiken voor de opslag van data. De kunst is om de moleculen te rangschikken, bijvoorbeeld langs lithografisch geëtste nanolijntjes op een oppervlak, en om ze aan en uit te zetten.

Nanotechnologie maakt het verder mogelijk om de opslagcapaciteit van optische en magnetische schijven met een factor drie tot vijf te vergroten. Waar de huidige DVD-schijf 4,7 gigabyte (Gb) aan informatie bevat, kunnen zijn opvolgers (HD-DVD, Blu-ray Disc) 15 tot 30 Gb aan. De holografische schijf, die ook voor 2015 wordt verwacht, kan zelfs 200 tot 1000 Gb bevatten. Hoewel de structuren groter zijn dan 100 nanometer en dus strikt genomen geen nanotechnologie zijn, zijn de afstanden daartussen 25 nanometer of minder. Die nauwkeurigheid maakt dat ook de ontwikkeling van opslagmedia tot de nanotechnologie wordt gerekend.

Mogelijke risico's

Intellectueel eigendom en auteursrecht: de technische mogelijkheid om met een druk op de knop boeken, muziek en films zonder kwaliteitsverlies te kopiëren, zet het huidige auteursrecht sterk onder druk. Dit kan grote gevolgen hebben voor makers, producenten en uitgevers.

Groeiende afhankelijkheid: de steeds kleinere, snellere en goedkopere computers maken mensen nog afhankelijker van de techniek. Als de stroom uitvalt, zakt het sociale en economische leven ineen.

Privacy: hoe meer computers in het dagelijks leven geïntegreerd zijn, hoe meer elektronische 'sporen' mensen achterlaten. Het is lang niet altijd even duidelijk wat er met die gegevens verder gebeurt.

