

Nanotechnologie in Focus

Zoektocht naar maatschappelijk relevante toepassingen
van nanotechnologie op middellange termijn (tot 2015)

Verslag eerste fase project

Auteurs:

Drs. Christien Enzing
Ir. Joost van Kasteren

Rathenau Instituut
Den Haag

Februari 2006

Colofon

Titel:

Nanotechnologie in Focus.

Zoektocht naar maatschappelijk relevante toepassingen van nanotechnologie op middellange termijn (tot 2015).

Verslag eerste fase project.

Auteurs:

Drs. Christien Enzing

Ir. Joost van Kasteren

Projectleiding:

Rinie van Est

Ira van Keulen (tot 1 oktober 2005)

Bart Walhout (vanaf 1 oktober 2005)

© Rathenau Instituut, Den Haag, 2006

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: Rathenau Instituut
Maart 2006

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.

Samenvatting

Verschillende partijen – bedrijfsleven, ngo's, wetenschap, politiek – vinden een discussie over de kansen en risico's van nanotechnologie wenselijk of noodzakelijk. Discussie voeren aan de hand van concrete toepassingen heeft daarbij de voorkeur.

Het project Nanotechnologie in Focus probeert aan deze wens te voldoen. Dit rapport doet verslag van de eerste fase van dit project, waarin drie toepassingen van nanotechnologie zijn geselecteerd die in een tweede fase verder in kaart en waar mogelijk in discussie worden gebracht. Dit rapport licht toe hoe dit selectieproces tot stand is gekomen.

Door middel van deskresearch en interviews met experts op het gebied van nanotechnologie is eerst een groslijst met toepassingen samengesteld. Daaruit is door het projectteam een selectie gemaakt van zestien toepassingen die volgens de inschatting van de experts vóór 2015 op de markt zullen verschijnen en maatschappelijk relevant zijn. Deze lijst van toepassingen is via een enquête voorgelegd aan de lezers van de Rathenau Nanotechnologie Nieuwsbrief met de vraag de drie maatschappelijk meest relevante toepassingen te kiezen. De respondenten hebben de toepassingsgebieden energie, water en *drug delivery* uitgekozen. De ontwikkelingen op deze gebieden zullen voor het zomerreces in de tweede fase van het project Nanotechnologie in Focus verder worden uitgediept.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Interviews en groslijst toepassingen	4
2.1	Deskresearch	4
2.2	Interviews met experts: eerste ronde.....	5
2.3	Interviews met experts: tweede ronde.....	8
3	Selectie van concrete nanotechnologietoepassingen	9
3.1	Selectiecriteria.....	9
3.2	Voorselectie van toepassingen.....	10
3.3	Overzicht van de geselecteerde toepassingen	17
4	Casebeschrijvingen en enquête	18
Bijlage A	Verslagen interviews eerste ronde	22
Bijlage B	Groslijst van nanotechnologietoepassingen.....	30
Bijlage C	Verslagen interviews tweede ronde	40
Bijlage D	Casebeschrijvingen in de informatiebrochure	61
(1)	Materialen.....	61
(2)	Energie en water	64
(3)	Elektronica.....	67
(4)	Gezondheid.....	70
(5)	Voedsel.....	77
(6)	Militair.....	80

1 Inleiding

Het Rathenau Instituut heeft vanaf 2003 activiteiten ontplooid om tijdig aandacht te vragen voor de mogelijke maatschappelijke implicaties van nanotechnologie en om daarover een publieke dialoog te stimuleren. Dit mondde onder andere uit in een publieke bijeenkomst 'Kleine technologie – Grote gevolgen' over kansen en risico's van nanotechnologie, die op 13 oktober 2004 in samenwerking met de Themacommissie Technologiebeleid van de Tweede Kamer is gehouden.

Uit deze bijeenkomst bleek dat verschillende partijen – bedrijfsleven, ngo's, wetenschap, politiek – verdere discussie over nanotechnologie wenselijk of noodzakelijk achten. Wel plaatsten de aanwezigen daarbij de volgende kanttekeningen:

- ***Bespreek concrete toepassingen***
Het is onmogelijk om een gestructureerde discussie te voeren over nanotechnologie in de brede zin van het woord omdat deze technologie zoveel verschillende toepassingsgebieden bestrijkt. Liever ziet men de discussie gevoerd aan de hand van concrete toepassingen.
- ***Organiseer kleinschalige discussievormen***
De discussie zou niet een breed en door de overheid georganiseerd publiek debat moeten zijn. Het is beter om via vroegtijdige en kleinschalige (maar niet per se besloten) vormen van discussie de samenleving te betrekken bij de ontwikkeling van nanotechnologie.
- ***Betrek maatschappelijke organisaties bij discussie***
Vooral de aanwezige politici maakten duidelijk dat ze meer betrokkenheid van maatschappelijke organisaties bij het onderwerp zouden willen, om zodoende eerder en beter zicht te krijgen op eventuele tegenstellingen en de kansen en risico's die meerdere partijen signaleren.

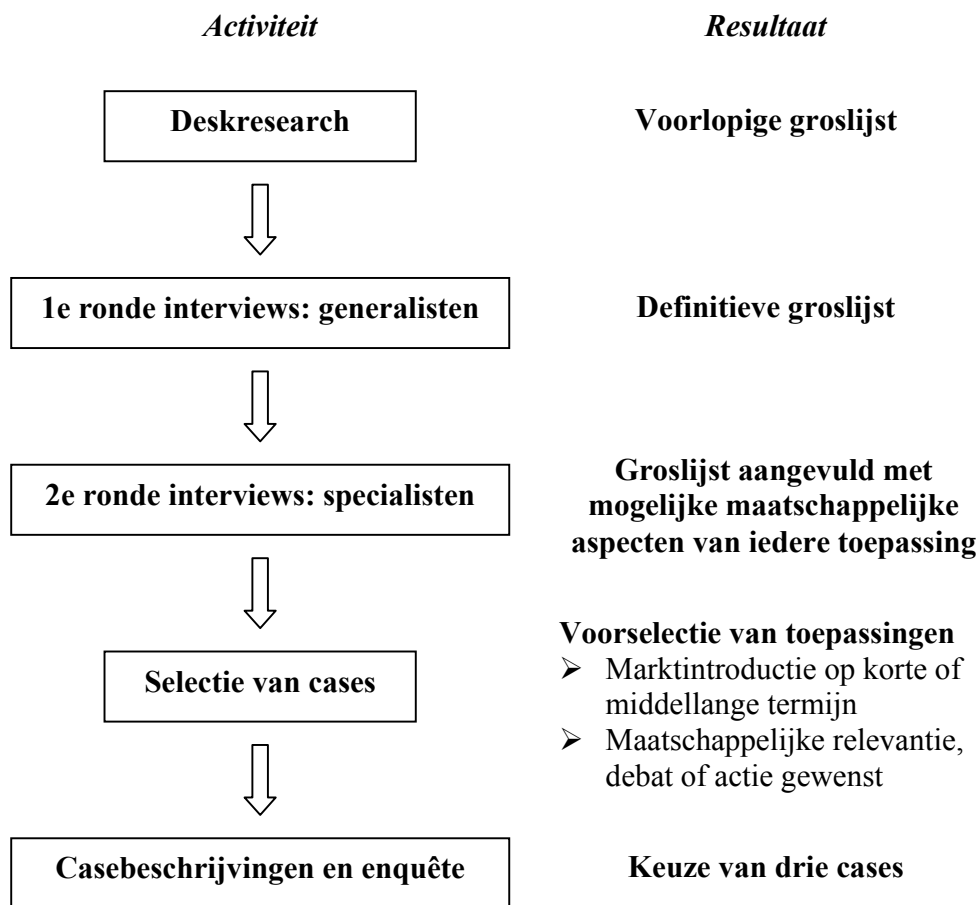
Nanotechnologie in Focus

Mede op basis van deze aanbevelingen startte het Rathenau Instituut begin 2005 met het project Nanotechnologie in Focus. De doelstellingen van dit project hangen sterk samen met de genoemde uitkomsten van de publieke bijeenkomst:

- I. De eerste fase richt zich op het in kaart brengen van mogelijke maatschappelijke en ethische (positieve en negatieve) kwesties rondom concrete toepassingen van nanotechnologie. Hieruit wordt een selectie gemaakt van maatschappelijk relevante toepassingen.
- II. Tijdens de tweede fase van het project zullen drie gekozen toepassingen verder worden uitgediept en waar mogelijk door middel van experts-stakeholders-workshops in debat worden gebracht.

Opzet eerste fase

Dit rapport beschrijft de werkzaamheden en de resultaten van de eerste fase van dit project. Eerst is op basis van interviews met specialisten uit binnen- en buitenland een lijst samengesteld van zestien toepassingen van nanotechnologie en de maatschappelijke, morele en politieke kwesties die daarmee kunnen samenhangen. De desbetreffende lijst is in oktober 2005 aan de lezers van de Rathenau Nanotechnologie Nieuwsbrief voorgelegd met de vraag welke drie toepassingen de meeste maatschappelijke en politieke aandacht vragen. In onderstaande figuur is dit proces schematisch weergegeven.



Dit rapport biedt inzicht in de keuzes die in bovenstaand proces zijn gemaakt en geeft de argumenten voor die keuzes. Hoofdstuk 2 beschrijft de manier waarop de groslijst met nanotechnologietoepassingen is samengesteld en besproken met binnenlandse en buitenlandse experts. Hoofdstuk 3 beschrijft de volgende stap in het proces: een verantwoorde selectie van toepassingen maken en ze in cases verwerken. Hoofdstuk 4 beschrijft hoe de zestien geselecteerde cases zijn verwerkt in de enquête. Uit de enquête zijn vervolgens drie toepassingen naar voren gekomen die in de volgende fase van het project worden uitgewerkt.

Projectteam

De eerste fase van het project Nanotechnologie in Focus is uitgevoerd door een projectteam bestaande uit: Rinie van Est (Rathenau Instituut, projectleider), Ira van Keulen (Rathenau Instituut, tot 1 oktober 2005), Bart Walhout (Rathenau Instituut, vanaf 1 oktober 2005), Joost van Kasteren (journalist), Christien Enzing (onderzoeker bij Innovation Policy Group, TNO).

De laatste twee waren verantwoordelijk voor de deskresearch, het opstellen van de groslijst met nanotech-toepassingen, de interviews met nationale en internationale experts, de beschrijving van de cases op de groslijst (zie bijlagen A, B, C en D) en de tekst van dit rapport.

2 Interviews en groslijst toepassingen

2.1 Deskresearch

Voor het samenstellen van de voorlopige groslijst met toepassingen van nanotechnologie zijn meerdere bronnen geraadpleegd. Dat zijn onder meer de rapporten en documenten die het Rathenau Instituut in 2004 over nanotechnologie heeft gepubliceerd. Om tot een eerste onderverdeling van toepassingen en toepassingsgebieden te komen heeft het Rathenau Instituut oriënterende gesprekken gevoerd met onder andere TA NanoNed¹. Daarnaast zijn rapporten gebruikt die zijn geschreven in opdracht van overheden binnen en buiten Europa met resultaten van inventarisaties en verkenningen van nanotechnologie, publicaties in internationale tijdschriften, websites, et cetera. Kader 1 bevat een overzicht van de belangrijkste rapporten.

Kader 1 Belangrijkste geraadpleegde rapporten voor de groslijst (exclusief de Rathenau-rapporten en workshopverslagen)

Arnall, A.H. (2003). *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A Technical, Political and Institutional Map of Emerging Technologies*. London: Greenpeace Environmental Trust.

Baker, S. & A. Aston (2005). 'The Business of Nanotech.' In: *Business Week*, 14 februari, pp. 38-44.

Loder, N. (2005). 'Small Wonders, a Survey of Nanotechnology.' In *The Economist*, 1 januari.

ETC (2003). *The Big Down. Atomtech – Technologies Converging at the Nanoscale*. Winnipeg, Canada: ETC-group.

KNAW (2004). *Hoe groot kan klein zijn?* Amsterdam: KNAW-werkgroep Gevolgen Nanotechnologie, november 2004.

Kampers, F.H.W. & E.J.R. Südholtzer (2004). *Potentiële risico's van bio-nanotechnologie voor mens en milieu*. Wageningen: COGEM.

Luther, W. (ed.) (2004). *Industrial Applications of Nanomaterials. Chances and Risks – Technology Analysis*. Düsseldorf: VDI Technologie Zentrum.

¹ TA NanoNed is onderdeel van het nationale nanotechnologieonderzoeksprogramma. In TA NanoNed wordt door middel van verschillende *technology assessment*-activiteiten getracht de wisselwerking tussen nanowetenschap en -technologie en samenleving te begrijpen en te verbeteren: zie verder <http://www.nanoned.nl/TA>.

Nanoforum (2004a). *Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of Nanotechnology*. Nanoforum: 4th Nano Report, juni (1e versie).

Nanoforum (2003). *Nanotechnology Helps Solve the World's Energy Problems*. Nanoforum Consortium: Nanoforum Energy Report, 18 augustus.

National Science and Technology Council (2003). *Nanotechnology Grand Challenge in the Environment; Research Planning Workshop Report – Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade*. Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, Verenigde Staten: Arlington, 8-9 mei 2003.

The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004). *Nanoscience and Technologies. Opportunities and Uncertainties*. London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.

Roco, M.C. (2003). 'Nanotechnology. Convergence with Modern Biology and Medicine.' In: *Current Opinion in Biotechnology* 14, pp. 337–346.

2.2 Interviews met experts: eerste ronde

Het overzicht van toepassingen is uitgewerkt door de toepassingen en mogelijke maatschappelijke, morele en politieke vragen die daarmee samenhangen te beschrijven. Vervolgens is dit overzicht besproken met drie internationale en twee nationale experts (zie tabel 2.1) op het gebied van nanotechnologie en/of de maatschappelijke, morele en politieke aspecten daarvan. Korte verslagen van deze interviews zijn in bijlage A opgenomen.

De gesprekken in de eerste ronde hadden als doel om tot een evenwichtige definitieve groslijst te komen. Tijdens de gesprekken kwamen de volgende vragen aan de orde:

- Is het overzicht van de toepassingen compleet? Welke toepassingen ontbreken nog?
- Welke maatschappelijke, morele en politieke aspecten van de toepassingen zijn door ons niet goed weergegeven, welke ontbreken nog?
- Voor welke toepassingen is debat of actie gewenst?
- Wat is het realiteitsgehalte van de toepassingen: zullen ze binnen nu en tien jaar op de markt zijn?
- Is er bij de toepassingen sprake van convergerende technologieën?
- Als u de keus zou moeten maken voor vijf cases die onderwerp worden van verder debat: welke vijf zou u kiezen?

Tabel 2.1: interviews eerste ronde

Geïnterviewde personen	Functie en organisatie
Alfred Nordmann	Hoogleraar aan het Institut für Philosophie, Technische Universiteit Darmstadt (Duitsland) en aan het Philosophy Department, Universiteit South Carolina (VS)
David Reinhoudt	Hoogleraar Universiteit Twente; wetenschappelijk directeur MESA+ instituut; voorzitter TA NanoNed
Arie Rip	Hoogleraar filosofie Universiteit Twente; directeur van het Centrum voor Wetenschap Techniek en Samenleving; lid van de KNAW-werkgroep Gevolgen Nanotechnologie; lid van de Stuurgroep ‘Converging Technologies and Innovation’ van STT en betrokken bij TA NanoNed
Mark Welland	Fellow of the Royal Society, hoogleraar aan het Nanoscience Centre, Cambridge
Kathy Jo Wetter	ETC Group, Canada

Naar aanleiding van de interviewresultaten is de voorlopige groslijst van toepassingen aangevuld en waar nodig aangepast. Tabel 2.2 geeft de toepassingsgebieden en bijbehorende toepassingen weer die in de definitieve groslijst worden besproken. Een inhoudelijke toelichting op deze toepassingen staat in bijlage B.

Tabel 2.2: toepassingsgebieden en toepassingen van nanotechnologie in de groslijst

Toepassingsgebied	Toepassingen
1. Materialen	Composieten (1 ^e generatie)
	Bottom-up gefabriceerde materialen
	Verzorgingsmiddelen
	Factory-on-a-chip
	Nanoschuim
	Kleding
2. Energie en water	Decentrale energievoorziening
	Mobiele energievoorziening
	Waterzuivering
	Kunstmatige fotosynthese
3. Elektronica	Kleinere, snellere computers
	'More than Moore'
	Flexibele displays
	Single molecule processor
	Quantumcomputer
4. Gezondheid	Lab-on-a-chip
	Moleculaire beeldvorming
	Implantaten
	Vaccin delivery
	Monitoren gezondheid
	Drug delivery
	Moleculaire therapie
	Spalken, medicatie via kleding
5. Agrofood	Intelligente verpakkingen
	Nanozeven
	Biosensoren
6. Militair	Sniffers
	Killer wasp
	Sensoren voor chemische wapens
	Sensoren voor biologische wapens

2.3 Interviews met experts: tweede ronde

De definitieve groslijst geeft een breed overzicht van relevante toepassingsgebieden en toepassingen van nanotechnologie. Een tweede ronde interviews werd gevoerd met een aantal Nederlandse vakspecialisten die actief zijn in de zes toepassingsgebieden die in de eerste ronde interviews naar voren kwamen (zie tabel 2.3). Het doel van deze interviews was beter inzicht te krijgen in de technologische ontwikkelingen op de diverse gebieden en het tijdstip waarop verschillende concrete toepassingen volgens verwachting op de markt zullen verschijnen. Ook werd tijdens de interviews gevraagd naar mogelijke maatschappelijke, morele en politieke aspecten die met verschillende toepassingen samenhangen. Ten slotte werd de experts gevraagd welke cases zij aan de lezers van de Rathenau Nanotechnologie Nieuwsbrief zouden willen voorleggen en waarom.

Over het maatschappelijke perspectief is nog extra gesproken met David Voyle, Maurice Wessling en Jürgen Altmann (zie tevens tabel 2.3). Ook van deze interviewronde zijn korte verslagen gemaakt (zie bijlage C).

Voor het toepassingsgebied Energie en water is gebruikgemaakt van interviews die voor het Rathenau Instituut zijn uitgewerkt in de paper *Duurzame energie dichterbij met nanotechnologie* (2004). Aanvullend is met Antoine Kemperman gesproken over de toepassing van nanotechnologie voor waterzuivering. Informeel is over dit onderwerp nog gesproken met Tim Harper. Van deze laatste gesprekken zijn geen gespreksverslagen beschikbaar.

Tabel 2.3: interviews tweede ronde

Toepassingsgebied	Geïnterviewde personen
1. Materialen	Hartmut Fischer (TNO Industrie en Techniek)
	Germ Visser (DSM Research)
2. Energie en water	Antoine Kemperman (Universiteit Twente)
	Tim Harper (Scientifica)
3. Elektronica	Reinder Coehoorn (Philips Research/TU Eindhoven)
	Bert Gyselinckx (IMEC Leuven)
	Maurice Wessling (Bits of Freedom)
4. Gezondheid	Hans Hofstraat (Philips Research)
	Hans Hektor (BiOMaDe)
5. Agrofood	Frans Kampers (WUR)
6. Militair	Rob van Heijster (TNO Defensie)
	Jürgen Altmann (Universität Dortmund/Bonn International Centre for Conversion)
Overig	David Voyle (NanoTsunami)

3 Selectie van concrete nanotechnologietoepassingen

3.1 Selectiecriteria

Op basis van de groslijst en de informatie uit de tweede interviewronde is een lijst met zestien toepassingen samengesteld, die aan de lezers van de Rathenau Nanotechnologie Nieuwsbrief is voorgelegd. De selectie van zestien cases is gebaseerd op twee criteria:

- De verwachte termijn waarop de toepassing op de markt komt: vóór 2015.
- De mate van maatschappelijke, politieke en morele relevantie.

Toepassing komt voor 2015 op de markt

Het Rathenau Instituut richt zich in het project Nanotechnologie in Focus specifiek op concrete toepassingen van nanotechnologie. De geselecteerde toepassingen zijn reeds op de markt of zullen volgens verwachting van de geïnterviewde experts op middellange termijn op de markt verschijnen. Onder middellange termijn verstaan we binnen nu en tien jaar (en dus voor 2015). Er wordt daarbij gelet op producten waarvan onderzoek of ontwikkeling deels in Nederland plaatsvindt.

Maatschappelijke, politieke en morele relevantie

Bij het criterium van maatschappelijke, politieke en morele relevantie kan het zowel over kansen als risico's gaan. Relevante vragen daarbij zijn:

“Gaaf het om een ontwrichtende toepassing (geheel nieuw of anders in vergelijking met de bestaande praktijk op het desbetreffende gebied)? Is er morele opwinding over een toepassing vanuit bepaalde groeperingen te verwachten? Komen groepen in de verdrukking of ontstaan er juist extra kansen? Worden risico's en verantwoordelijkheden onrechtvaardig verdeeld of – andersom – leidt de nieuwe ontwikkeling tot meer gelijkheid en betere toegankelijkheid? Worden zowel risico's als kansen voldoende en evenwichtig gepresenteerd? Welke betekenis heeft de toepassing voor de Nederlandse economie? Welke invloed heeft de toepassing op het dagelijks leven van mensen? Moet bestaande regelgeving worden aangepast of nieuwe regelgeving worden gemaakt? Is er aandacht vanuit de maatschappelijke organisaties, de sociale wetenschap, de verzekeringsmaatschappijen of de overheid? Is een politiek of maatschappelijk debat of actie nodig? Vindt er afstemming plaats tussen bedrijfsleven en overheid over de toepassing?”

Daarnaast is voor dit criterium gekeken of de toepassing verschillende wetenschaps- en/of technologiedisciplines bij elkaar brengt. Het kan bijvoorbeeld gaan om het samenkomen van nanotechnologie en nieuwe materialen, biotechnologie, informatietechnologie en/of neurowetenschappen. We spreken in dat geval van convergerende technologieën. Juist op die gebieden spelen niet zelden ethische vraagstukken een belangrijke rol.

3.2 Voorselectie van toepassingen

Aan de hand van de selectiecriteria zijn de zes toepassingsgebieden ingedeeld in een matrix met twee dimensies: horizontaal het tijdstip waarop de toepassing naar verwachting zal zijn gerealiseerd (vóór of na 2015) en verticaal de maatschappelijke relevantie (hoog en laag). In deze paragraaf volgt per toepassingsgebied de matrix, gevolgd door een korte beschrijving van de geselecteerde cases. Daarbij wordt opgemerkt dat de ene technologie voortbouwt op de andere. In de beschrijving zijn verschillende toepassingen daarom verder toegespitst of juist bij elkaar genomen. Zo zijn bijvoorbeeld de talloze nanomaterialen ingedeeld in nanomaterialen van de eerste, tweede en derde generatie (zie onder 3.2.1). Dit geeft inzicht in de dynamiek van nanomaterialen en de soort materialen die vóór (eerste generatie) en na (tweede en derde generatie) 2015 op de markt worden verwacht. Deze dynamiek wordt in de matrices aangegeven met een pijl.

3.2.1 Materialen

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Composieten (1 ^e generatie) Bottom-up gefabriceerde materialen Verzorgingsmiddelen	Composieten (2 ^e generatie) Factory-on-a-chip	HOOG
Nanoschuim Kleding		LAAG

Nanocomposieten en -coatings

Nanodeeltjes kunnen worden gebruikt om de eigenschappen van materialen te verbeteren. Een klassiek voorbeeld is inmiddels de toevoeging van roet aan rubber voor autobanden. Van recentere datum zijn tennisballen die beter stuiteren, dankzij nanodeeltjes klei die door het rubber zijn gemengd en tenniserackets die zijn verstevigd met koolstof nanobuisjes. Op middellange termijn spelen vooral de eerstegeneratie-nanomaterialen een rol.

Op de lange termijn (na 2015) wordt veel verwacht van zogenaamde tweede- en derdegeneratie-nanomaterialen. Bij de tweedegeneratie-materialen wordt aan de nanodeeltjes een speciale functionaliteit meegegeven. De derdegeneratie-materialen worden echt molecuul voor molecuul opgebouwd zodat stoffen met gehele nieuwe eigenschappen kunnen worden gemaakt.

Deze case is mede geselecteerd om de bijna alledaagse toepassing van nanotechnologie. De maatschappelijke vragen omtrent de eerstegeneratie-nanomaterialen hebben vooral betrekking op het vrijkomen van nanodeeltjes tijdens de productie of door slijtage. Over de schadelijkheid ervan voor gezondheid en milieu is nog weinig of niets bekend. Een

ander mogelijk nadeel is dat mengsels van materialen (rubber/klei) lastiger te recyclen zijn.

Bottom-up-materialen: nanodraden

Nanodraden, dat wil zeggen draden met een diameter van enkele nanometers, zijn een voorbeeld van moleculair lego en mogen alleen daarom al niet ontbreken in een discussie over toepassingen van nanotechnologie. Ze worden gemaakt door moleculen aan elkaar te rijgen, al dan niet met behulp van een blauwdruk. Dat kunnen gouddeeltjes zijn, maar ook koolstof nanobuisjes. Behalve voor verbindingen tussen nanostructuren op een chip kunnen de nanodraadjes ook worden gebruikt om bepaalde hersengebieden te stimuleren. Naast medische toepassingen, zoals het vertragen van de ziekte van Parkinson, zou je mensen daarmee tot hogere prestaties aan kunnen zetten, zowel lichamelijk als cognitief, dan wel genotscentra in de hersenen kunnen stimuleren.

Nanotechnologie in verzorgingsmiddelen: wasmiddelen en cosmetica

Nanodeeltjes zouden een beschermende dan wel desinfecterende werking hebben. Zo worden er T-shirts verkocht, die zijn voorzien van minuscule zilverdeeltjes om transpiratiegeur tegen te gaan, ook bij meerdaags gebruik. Sommige zonnebrandcrèmes worden voorzien van nanodeeltjes titaniumoxide en zinkoxide omdat ze ultraviolette straling absorberen en zo de huid beschermen tegen verbranding. Indien de laatstgenoemde deeltjes niet voldoende ingepakt zijn, kunnen ze radicalen vormen, waardoor mogelijk het DNA van huidcellen beschadigd kan worden. In zijn algemeenheid geldt dat er nog (te) weinig bekend is van gezondheids- en milieueffecten van nanodeeltjes.

3.2.2 Energie en water

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Decentrale energievoorziening Mobiele energievoorziening Waterzuivering		HOOG
	Kunstmatige fotosynthese	LAAG

Nanotechnologie in de decentrale energievoorziening

Met behulp van nanotechnologie lijkt het mogelijk goedkope zonnecellen te maken, die je bij wijze van spreken met een spuitbus op de muur kunt aanbrengen. De zonnecel als bulkproduct. Een andere mogelijke toepassing van nanotechnologie is de ontwikkeling van veilige opslagsystemen voor waterstof; in combinatie met elektriciteit waarschijnlijk de energiedrager van de toekomst. Nanostructuren bieden bovendien mogelijkheden voor het maken van accu's die niet alleen veel elektriciteit per kubieke centimeter kunnen opslaan, maar ook nog eens snel kunnen worden opgeladen. Zonnecellen, brandstofcellen, accu's en systemen voor de opslag van waterstof maken het mogelijk om decentrale systemen op te zetten voor het opwekken van elektriciteit. Het benutten van die mogelijkheden dwingt tot een vergaande verandering in de energievoorziening.

Nanotechnologie voor draagbare energie

Mobiele apparaten (telefoons, PDA's, laptops) die steeds meer functies bevatten, maken het noodzakelijk om draagbare energiesystemen te ontwikkelen die meer capaciteit hebben dan de bestaande accu's. Mobiele microcentrales zijn voor een deel gebaseerd op brandstofcellen die gebruikmaken van methanol. Nanotechnologie lijkt een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan de ontwikkeling van kleinere en efficiëntere brandstofcellen. Een andere optie is gebruikmaken van bewegingsenergie (wandelen, ademen) of van het verschil tussen de temperatuur van het lichaam en die van de omgeving. Een mogelijk nadeel is dat de beschikbaarheid van oneindige hoeveelheden mobiele energie mensen ertoe kan dwingen om altijd bereikbaar te (willen) zijn.

Waterzuivering door nanomembranen (nanozeven)

Nanotechnologie maakt het mogelijk om membranen te ontwikkelen die niet 99, maar 100 procent van alle micro-organismen wegvangen, waardoor zuiver drinkwater binnen ieders bereik kan komen. Naast micro-organismen kun je met membranen ook zeewater ontzouten of bronwater ontdoen van zware metalen of andere giftige stoffen, zoals arseenverbindingen. Daarmee zou een technische oplossing voor (drink)waterproblemen in vooral ontwikkelingslanden binnen handbereik zijn. De vraag is echter of er geen wetten of praktische bezwaren in de weg staan, zoals privatisering van de watervoorziening dan wel eventuele octrooien op nieuwe technieken voor waterzuivering.

3.2.3 Elektronica

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Kleinere, snellere computers 'More than Moore'	Single molecule processor Quantumcomputer	HOOG
Flexibele displays		LAAG

Nanotechnologie voor kleinere en snellere computers

Nanotechnologie maakt het mogelijk om nog kleinere structuren te bouwen in silicium. De verwachting is dat in 2007 met behulp van lithografie structuren worden gebouwd van 65 nanometer en voor 2015 wordt een nog verdere miniaturisering tot 32 nanometer verwacht. Formaat en prijs van chips maken dat ze kunnen doordringen in alle aspecten van het leven. Die alomtegenwoordigheid draagt een aantal risico's met zich mee; in de eerste plaats die van informatie-'overload'. Een ander risico is maatschappelijke versnippering doordat iedereen zijn eigen leefwereld kan scheppen. Verder blijven er risico's voor aantasting van privacy door koppeling van gegevensbestanden dan wel tekortschietende beveiliging. Hoewel miniaturisering een doorgaande ontwikkeling is, zijn de consequenties van nog kleinere en goedkopere chips van dien aard dat ze een maatschappelijke discussie rechtvaardigen.

'More than Moore': nanotechnologie voor intelligente producten

De Wet van Moore (elke achttien tot vierentwintig maanden een verdubbeling van het aantal transistors per vierkante millimeter) geldt al sinds zijn formulering in 1965 als een de facto *road map* voor technologie ontwikkeling. Daarnaast ontwikkelt zich een terrein dat omschreven wordt als 'More than Moore'. Het kenmerkt zich door de ontwikkeling van apparaten die meerdere functies in zich verenigen, bijvoorbeeld sensorische en mechanische functies. Voor het realiseren van dergelijke 'intelligent' opererende producten heb je niet genoeg aan steeds kleinere processoren, maar worden ook sensoren (elektronische zintuigen) geïntegreerd op multifunctionele chips. Ook hier speelt het probleem van privacybescherming, niet alleen tegen nieuwsgierige hackers, maar ook tegen bedrijven en instanties.

3.2.4 Gezondheid

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Lab-on-a-chip Moleculaire beeldvorming Implantaten Vaccin delivery Monitoren gezondheid Drug delivery	Moleculaire therapie	HOOG
	Spalken, medicatie via kleding	LAAG

In het toepassingsgebied gezondheid zijn vijf cases geselecteerd. Er zijn op het gebied van gezondheid veel ontwikkelingen gaande. Tegelijkertijd is het een gebied waarin verschillende ethische vragen een rol spelen en ook vragen met betrekking tot privacy aan de orde zijn.

Lab-on-a-chip/DNA-chip: nanotechnologie voor lab op postzegelformaat

Analyseapparatuur op nanoformaat zoals de lab-on-a-chip wordt veelvuldig in het forensisch onderzoek gebruikt voor het vaststellen van DNA-volgordes en daarmee het identificeren van personen. Een ander voorbeeld is de in Nederland ontwikkelde legionellachip, waarmee binnen enkele uren (in plaats van enkele weken) vastgesteld kan worden of er actieve legionellabacteriën in het water zitten. De reden om deze toepassing te selecteren is dat er veel verschillende interessante toepassingen van de lab-on-a-chip in de gezondheidssector zijn die al binnen tien jaar op de markt kunnen komen. De lab-on-a-chip komt tegemoet aan de groeiende behoefte van patiënten om steeds meer zelf te meten en te weten. Dit kan het proces van medicalisering in de hand werken: iemand heeft altijd wel wat onder de leden. Tegelijkertijd geldt dat met behulp van deze technieken ook bepaalde aandoeningen aan het licht kunnen komen waarvoor nog geen therapie bestaat. Dit roept de nodige vragen op over *informed consent* en het ‘recht om niet te weten’, maar ook over zeggenschap.

Moleculaire beeldvorming: nanotechnologie voor het opsporen van tumoren

Op korte termijn gaat het om het gebruik van nanodeeltjes om *in vitro* (in een laboratorium) snel en betrouwbaar in een vroeg stadium tumorcellen op te sporen. Voorbeelden zijn gouddeeltjes die zijn gekoppeld aan een eiwit of antilichaam dat zich specifiek hecht aan een stof die voorkomt op de celwand van tumorcellen. De gouddeeltjes flonkeren zodanig dat de kankercellen met moleculaire beeldvormingstechnieken in beeld kunnen worden gebracht. Op de wat langere termijn maakt *in vivo* (in het lichaam) moleculaire beeldvorming een nauwkeurigere en nagenoeg onmiddellijke diagnose en zelfs behandeling mogelijk. Dit *in vivo*-gebruik van nanodeeltjes zal, net als geneesmiddelen een goedkeuring- en registratieprocedure moeten ondergaan. Deze case is een goed voorbeeld van *converging technologies* omdat juist de combinatie van nanodeeltjes met nieuwe biomarkers en andere technieken het mogelijk maakt om steeds meer typen aandoeningen te detecteren en – dat zal pas na 2015 het geval zijn – te behandelen. Zo kunnen beeldvormingstechnieken de weg volgen

van een verpakt geneesmiddel gekoppeld aan een nanodeeltje en vervolgens met ultrageluid het geneesmiddel ‘vrij’ maken als dat zijn bestemming heeft bereikt (*targetted drug release systems: molecular therapy*). Een tweede reden voor de keuze van deze technieken betreffen de maatschappelijke vraagstukken van medicalisering en de veiligheid van de nanodeeltjes (metalen, *quantum dots*) die met de introductie van deze nieuwe technieken samenhangen.

Implantaten: nanotechnologie voor nieuwe implantaten

Het betreft hier nanomaterialen en -technieken waarmee zieke of versleten lichaamsonderdelen worden ondersteund of vervangen. Het gaat onder andere om koolstof nanobuizen die dienen als steigermateriaal voor het laten groeien van nieuw botweefsel, maar ook om het kweken van zenuwweefsel (neuronen) van ratten en muizen op nanogestructureerde oppervlakken. Dit gebeurt nu nog voor de bestudering van de werking van zenuwcellen, maar op de langere termijn kunnen die nanostructuren worden benut om, *in vivo*, neuronen te laten groeien of te herstellen, bijvoorbeeld in geval van multiple sclerose. Integratie van nanostructuren met elektronische componenten maakt het mogelijk om op de middellange termijn hulpmiddelen, zoals hoorapparaten en CCD's (de beeldvormende chip in digitale camera's) in te bouwen in het lichaam als ondersteuning of vervanging van respectievelijk het gehoor- en gezichtsorgaan. Behalve dat aan deze toepassing veiligheidsvraagstukken zitten (wat gebeurt er als zo'n implantaat van zijn plaats schiet?) zijn er ook ethische vragen aan de orde op het gebied van de maakbaarheid van de mens en – als de implantaten besturing van lichaamsfuncties mogelijk maken – zelfs op het gebied van mens-machine-interactie.

Drug delivery systems: nanotechnologie voor het gericht afleveren van medicijnen

Capsules op nanoschaal worden gebruikt om medicijnen of vaccins op de gewenste plek in het lichaam en in de gewenste hoeveelheid af te leveren. De komende tien jaar gaat het vooral om medicijnen verpakt in een gel. 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. Op de langere termijn (na 2015) gaat het om meer geavanceerde drug delivery-systemen; deze moeten net als de geneesmiddelen zelf door een registratieprocedure. Ook bij deze toepassingen zijn er vraagstukken op het gebied van veiligheidsaspecten en mogelijk misbruik van dergelijke methoden.

Biosensoren: nanotechnologie voor het monitoren van lichaamsfuncties

De laatste gezondheidstoepassing van nanotechnologie zijn de bionanosensoren. Door de integratie van bionanosensoren met elektronische meet- en weergavesystemen is het op niet al te lange termijn mogelijk – voor bijvoorbeeld bepaalde beroepsgroepen die aan bepaalde extreme omstandigheden blootstaan – continue kritische lichaamsfuncties te monitoren. Een dergelijk *body area network* is bijvoorbeeld van belang voor mensen die zich in gevaarlijke omstandigheden bewegen zoals duikers, brandweerlieden en militairen. Op korte termijn gaat het vooral nog om non-invasieve biosensoren, op de langere termijn zullen steeds meer biosensoren invasief worden toegepast onder andere in combinatie met moleculaire beeldvormingstechnieken (zie hierboven). Ook deze toepassing is geselecteerd vanwege de convergentie van bionanosensoren met een

intelligente ICT-omgeving. Verschillende maatschappelijke vraagstukken die ermee samenhangen zijn: decentralisering van de zorg en de veranderende rol van professionals, zeggenschap, privacy en medicalisering.

3.2.5 Agrofood

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Intelligente verpakkingen Nanozeven		HOOG
	Biosensoren	LAAG

In de groslijst staat een groot aantal genoemde toepassingen van nanotechnologie in de agrofoodsector genoemd. Toch verwachten meerdere geïnterviewde experts niet dat er op korte termijn veel van deze toepassingen worden gerealiseerd. Uiteindelijk zijn er twee typen toepassingen geselecteerd.

Nanotechnologie voor intelligente en actieve verpakkingen

Er zijn al verschillende nanotech-toepassingen in verpakkingen op de markt, zoals verpakkingen met zilverdeeltjes aan de binnenkant van de verpakking die een bacteriedodende werking hebben. Toepassingen op korte termijn zijn de steeds kleiner wordende microchips die de temperatuurhistorie van het verpakte product vastleggen en de RFID-tags die door nanotechnologie steeds kleiner worden. Door het gebruik van de tags op de verpakking kunnen de producten steeds makkelijker en goedkoper herleid worden tot de oorspronkelijke producent. Er zijn verschillende maatschappelijke vraagstukken met deze toepassingen verbonden, zoals de veiligheid voor mensen en milieu van deze nanodeeltjes, maar ook de privacy van producent én consument.

Nanozeven voor levensmiddelen

Het gebruik van nanozeven – zeven met gaatjes van nanogrootte – schept geheel nieuwe scheidingsmethoden, zoals de mogelijkheid om micro-organismen uit melk te halen zonder de smaak te beïnvloeden (zogenaamde koude sterilisatie). De nanozeven kunnen ook worden gebruikt om nieuwe typen emulsies te maken, bijvoorbeeld vetbolletjes met water erin, of met geur- en smaakstoffen. Deze toepassingen hangen samen met een diversiteit aan maatschappelijke vraagstukken, zoals globalisering en duurzame ontwikkeling, maar ook vervreemding van voedsel en voeding en gezondheid.

3.2.6 Militair

vóór 2015 (middellange termijn)	na 2015 (lange termijn)	
Sniffers Killer wasp		HOOG
Sensoren voor chemische wapens	Sensoren voor biologische wapens	LAAG

De militaire toepassingen zijn een geval apart. Nationale veiligheid is in de Verenigde Staten een sterke drijvende kracht achter heel veel ontwikkelingen op het gebied van de nanotechnologie. Zo worden bijvoorbeeld in het *Homeland Security*-project, een groot Amerikaans onderzoeksprogramma gericht op terrorismebestrijding, biosensoren ontwikkeld om giftige stoffen in lage concentraties te meten. Vele toepassingen van nanotechnologie kunnen voor militaire doeleinden worden gebruikt, alhoewel ze niet voor dat doel zijn ontwikkeld. Vanuit deze gedachte geredeneerd zouden veel toepassingen onder het kopje Militair passen. Hier kiezen we voor een aantal specifieke militaire toepassingen, zoals *sniffers*: biosensoren die zo gevoelig zijn dat ze stoffen in concentraties van enkele moleculen per kubieke meter kunnen meten. Een tweede interessante toepassing is de ontwikkeling van intelligente kleding die zich aanpast aan de omgeving, data opslaat, op commando bepaalde stoffen uitscheidt, enzovoort. De meest tot de verbeelding sprekende toepassing is de zogenaamde *killer wasp*: zeer kleine rondvliegende voertuigjes die verkenningen uitvoeren en zelfs de vijand zouden kunnen uitschakelen.

3.3 Overzicht van de geselecteerde toepassingen

Toepassingsgebied	Toepassingen (ingedeeld in cases)
1. Materialen	Composieten en coatings
	Nanodraden
	Verzorgingsmiddelen
2. Energie en water	Decentrale energievoorziening
	Draagbare energievoorziening
	Waterzuivering
3. Elektronica	Kleinere en snellere computers
	Intelligente producten
4. Gezondheid	Lab-on-a-chip'
	Moleculaire beeldvorming
	Implantaten
	Drugdelivery systems
	Biosensoren
5. Agrofood	Intelligente verpakkingen
	Nanozeven
6. Militair	Defensie en veiligheid

4 Casebeschrijvingen en enquête

Informatiebrochure

De laatste stap in deze fase van het project bestond uit het verwerken van de geselecteerde toepassingen in een overzichtelijke beschrijving van cases voor de online-enquête. In de enquête werd de mogelijkheid geboden om een informatiebrochure te downloaden met voor iedere case een beknopte beschrijving. De conceptteksten van de cases zijn voorgelegd aan de technische experts die in de tweede ronde zijn geïnterviewd. De definitieve versies van de beschrijvingen zijn opgenomen in bijlage D.

Van elke toepassing is een korte beschrijving gemaakt. Alle beschrijvingen zijn opgebouwd volgens eenzelfde stramien en bevatten drie onderdelen:

- **Achtergrond:** de belangrijkste drijvende krachten die tot de nanotechnologie-toepassing hebben geleid.
- **Verwachte technologische ontwikkelingen:** een uitleg van hoe de technologie precies werkt. Ook worden verschillende voorbeelden van toepassingen van de technologie besproken.
- **Mogelijke risico's:** een overzicht van de maatschappelijke, morele en/of politieke vraagstukken die met de toepassingen kunnen samenhangen. Per vraagstuk wordt een korte beschrijving gegeven.

Online-enquête

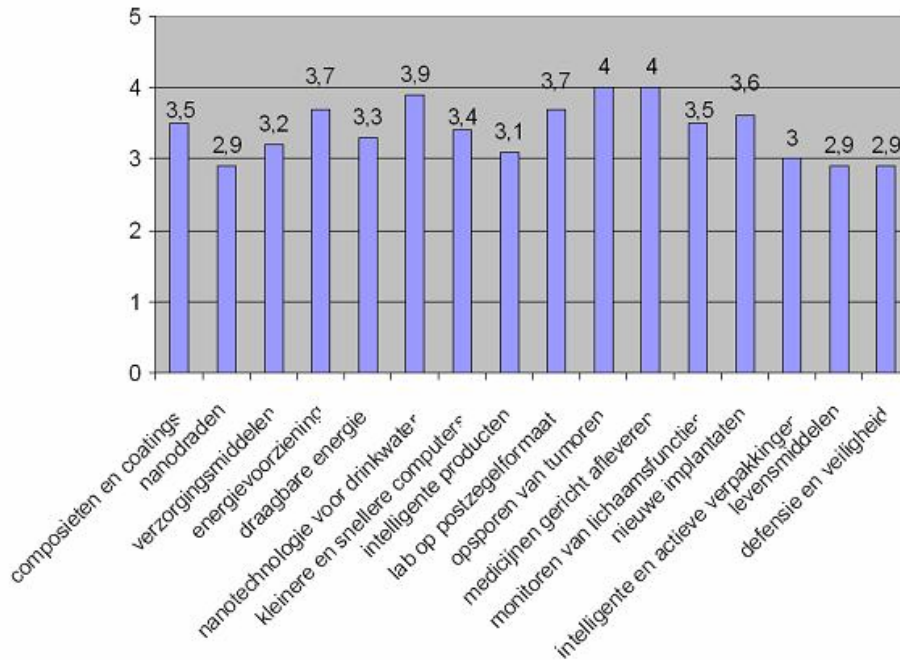
In oktober 2005 kregen de 314 lezers van de elektronische Rathenau Nanotechnologie Nieuwsbrief een uitnodiging om binnen drie weken mee te doen aan een enquête over nanotechnologie. Daarin werd de lezers gevraagd welke drie toepassingen van nanotechnologie volgens hen de meeste maatschappelijke en politieke aandacht verdienen. De lezers kregen tot en met 23 oktober 2005 de tijd om de enquête online in te vullen.

De lezers konden zelf de maatschappelijke relevantie van elke toepassing aangeven met een score op een vijfpuntsschaal. Aan het slot van de enquête moesten ze drie toepassingen selecteren die zij verder besproken wilden zien.

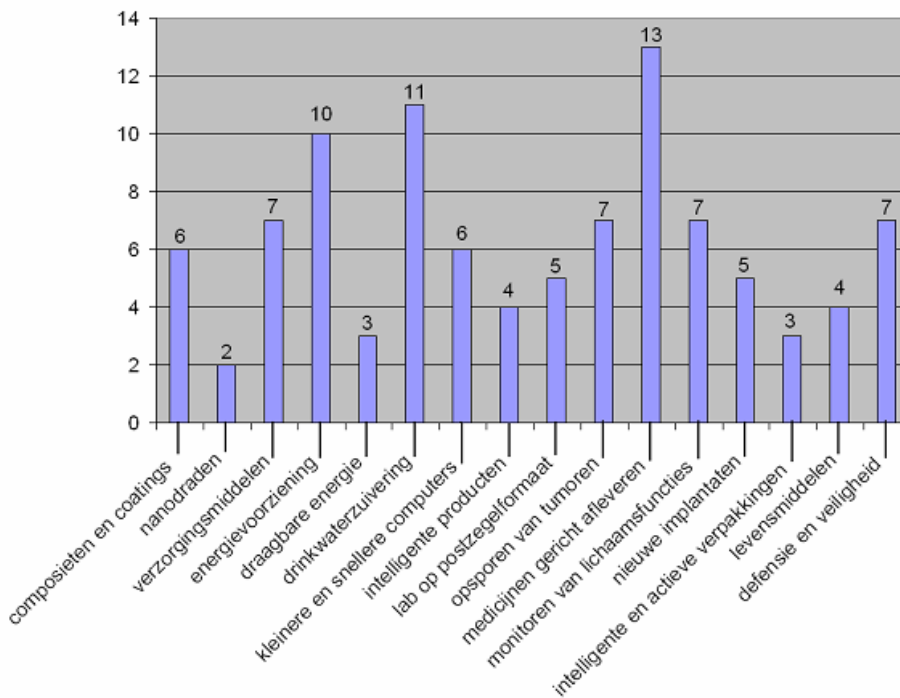
Tweeënzeventig lezers hebben deelgenomen aan de enquête. Dertig lezers hebben het evaluatieformulier ingevuld: de inhoud van de enquête werd gemiddeld gewaardeerd met een 7,9 en de gebruiksvriendelijkheid met een 7,3.

Resultaten van de enquête:

Relevantie (5-puntsscores)



Uitslag stembus (%)



De scores over de waardering van de maatschappelijke relevantie van de zestien cases tonen nauwelijks onderlinge verschillen. Tien van de zestien cases werden gemiddeld gewaardeerd, zes kregen een iets hogere waardering. De vraag naar welke drie cases men zou willen kiezen voor een publiek debat heeft wel een duidelijk resultaat opgeleverd:

1. drug delivery
2. drinkwater
3. energievoorziening.

De minste prioriteit kregen de toepassingen nanodraden, draagbare energie, intelligente electronicaproducten en implantaten. Tot de middengroep behoren composieten en coatings, verzorgingsmiddelen, kleinere en snellere computers, lab-on-a-chip, tumordetectie, monitoring en defensie.

Korte reflectie op de uitkomst

De toelichting die de geënquêteerden konden geven, gaf meer inzicht in de manier waarop zij tot hun keuze zijn gekomen. Zo hebben de lezers een afweging gemaakt tussen kansen en risico's die de toepassingen met zich meebrengen. Sommige geënquêteerden letten daarbij vooral op de kansen, anderen lieten juist risico's zwaarder wegen. Relatief vaak werd ingegaan op de veiligheidsrisico's van bepaalde toepassingen.

Toch zijn de cases waarin juist deze risico's meer aan de orde zijn dan in andere cases niet het meest gekozen. De drie cases zijn kennelijk voor een belangrijk deel gekozen vanwege de algemene problematiek waar ze mee samenhangen: de energie- en drinkwaterproblematiek en de problemen die samenhangen met de verouderende bevolking.

De uitkomst van de enquête sluit aan bij de toepassingsgebieden die burgers in het algemeen als meest kansrijk voor nanotechnologie beschouwen. Uit eerder onderzoek² blijkt dat, hoewel er nog maar weinig concrete toepassingen van nanotechnologie op de markt zijn, burgers verwachten dat nanotechnologie mogelijkheden zal bieden bij de bestrijding van ziekten, het schoonmaken van het milieu en de ontwikkeling van duurzame materialen. Zij hopen dat de technologie vooral voor deze doelen zal worden aangewend.

² Hanssen, L. & R. van Est (2004). 'De dubbele boodschap van nanotechnologie: een onderzoek naar opkomende publiekspercepties.' Den Haag, Rathenau Instituut.

Bijlagen

- Bijlage A: verslagen interviews eerste ronde.
- Bijlage B: groslijst van nanotechnologietoepassingen, inclusief reacties uit interviews eerste ronde.
- Bijlage C: verslagen interviews tweede ronde.
- Bijlage D: casebeschrijvingen.

Bijlage A Verslagen interviews eerste ronde

In de eerste interviewronde is de voorlopige groslijst besproken met onderstaande experts. In deze bijlage staan de verslagen van deze gesprekken

Geïnterviewde personen	Functie en organisatie
Alfred Nordmann	Hoogleraar aan het Institut für Philosophie, Technische Universiteit Darmstadt (Duitsland) en aan het Philosophy Department, Universiteit South Carolina (VS)
David Reinhoudt	Hoogleraar Universiteit Twente; wetenschappelijk directeur MESA+ instituut; voorzitter TA NanoNed
Arie Rip	Hoogleraar filosofie Universiteit Twente, directeur van het Centrum voor Wetenschap Techniek en Samenleving; lid van de KNAW-werkgroep Gevolgen Nanotechnologie, lid van de Stuurgroep 'Converging Technologies and Innovation' van STT en betrokken bij TA NanoNed
Mark Welland	Fellow of the Royal Society, hoogleraar aan het Nanoscience Centre, Cambridge
Kathy Jo Wetter	ETC Group, Canada

Alfred Nordmann (Technische Universiteit Darmstadt)

Dr. Nordmann was asked to give his comments on the list of nanotech applications and select the top 5 of nanotech applications that should be discussed in a public debate. The latter is presented in this short interview report.

Medical lab on chip, diagnostics

Due to this nanotech application people can do more health monitoring by themselves. This has advantages but could also have a number of negative side effects. For instance, these new diagnostics might lead to a reduction of public personalized health care; in its extreme form leading to hospitals that are only used for cancer and birth. A negative effect of this development involves the placebo effect: on the one hand, if you can constantly monitor more and more aspects of your health, there is either always something wrong (a hypochondrial effect) or there is nothing wrong even though one feels bad. Illness might be reduced to a physical problem and the psychological dimension of illness disappears: human health care goes 1-dimensional. On the other hand, therefore, the placebo effect of hospitals and medical interaction (one gets well because someone is treating you) might get lost.

Nano-electronics in military context

Nano-electronics will support the development in military and civil applications of intelligent environments that structure action and distributed human decision making.

Actions are structured by things we can not see. Human decision making may not be fast enough to keep up with increasingly accelerated automated processes. Human interference is then no longer possible and this could lead to automated killing.

New materials with nanosurfaces that do not preserve human traces

Materials assume a kind of finality. They appear to no longer participate in natural processes (that they degrade) or human interactions (wear and tear, scratches etc.). Some new nanomaterials are so unapproachable that we can not leave our traces upon them; we can not respond to them. They are immune to human reaction and because of that they assume some sort of anonymous power over us. He mentions as an example the Berlin Holocaust Memorial; it has a nanostructured surface so people can not write on it, cannot deface it. It changes the character of the monument because it makes antisemitic statements (part of political and social reality) invisible: it creates a sanitized image of German remembrance of the holocaust.

Environmental applications: economy of the rhetorics of promises.

The advocates of nanotech also mention the benefits of nanotechnology for the environment, such as energy saving. But are these benefits of environmental application actually pursued (how much money is invested in these research programs)? On the other hand, nanotechnology may propose technological solutions where social or political solutions are more appropriate.

The quality of the nanotech knowledge: how well do we understand nanoscale phenomena?

Scientists have to use simulation techniques to understand how systems behave and to illustrate how processes on the nano-level work. Is that a sufficient basis for technological applications? We use simulations for those natural processes that are too complex to model, explain, calculate, predict in traditional ways. Do we understand this complexity when we seem to manage it in simulations?

David Reinhoudt (NanoNed)

Volgens Reinhoudt is nanotechnologie geen revolutie, maar het logische eindpunt van een evolutionaire technologische ontwikkeling die is begonnen bij de hunebedden. In de afgelopen paar duizend jaar is de miniaturisering voortgeschreden en zijn de 'bouwstenen' waarmee we construeren steeds kleiner geworden. Veel kleiner dan nu (moleculen en atomen) kunnen ze overigens niet worden.

Waar zich wel een revolutie voordoet is in de opslagmedia. Momenteel bevinden die zich in het magnetische en optische domein, waarbij de opslag van data is gebaseerd op het feit dat de gebruikte materialen slechts twee toestanden kennen, 0 en 1. In de toekomst verwacht Reinhoudt veel van het gebruik van andere materialen die drie of meer toestanden kennen. Daardoor zal de opslagcapaciteit per vierkante millimeter exponentieel toenemen.

Tijdens het gesprek toont Reinhoudt zich enigszins beducht voor een al te snelle koppeling van biotechnologie met nanotechnologie. Hij benadrukt dat cellen en celorganellen buiten het onderzoeksdomein van nanotechnologie vallen, al was het alleen maar vanwege hun omvang die in micrometers wordt gemeten. Verder benadrukt hij dat nanotechnologie tot de abiotische wereld behoort, terwijl biotechnologie, dat wil zeggen genetische modificatie, ingrijpt op levende systemen: van cel tot ecosysteem.

Wat maatschappelijke aspecten betreft merkt hij op dat de discussie over de mogelijke gevolgen van nanotechnologie eerder plaatsvond dan de goedkeuring van het onderzoeksprogramma NanoNed. Volgens hem is dat tekenend voor onze houding tegenover nieuwe techniek: alles wat nieuw is, is potentieel gevaarlijk. Wat nanotechnologie betreft is dat niet terecht, meent hij. Juist doordat we meer weten van processen op moleculaire schaal worden ze steeds minder gevaarlijk.

Medisch

Holle vetbolletjes kunnen niet alleen worden gebruikt om voedingsmiddelen vetarm te maken, maar ook voor het gericht afleveren in het lichaam van medicijnen die geïnhaleerd moeten worden. Met nanodruppeltjes zou je bijvoorbeeld medicijnen tegen cystische fibrose (taaislijmziekte) diep in de longen kunnen brengen, waardoor ze een stuk effectiever worden dan nu. DNA-tags, die zijn gehecht aan ijzer- of gouddeeltjes van nanoformaat, kunnen helpen virussen en bacteriën op te sporen.

Lab-on-a-chip

Reinhoudt verwacht dat binnen nu en tien jaar de meeste chemische analyses zullen plaatsvinden op een chip. Micro- en nanofluidics zorgen volgens hem voor een revolutie in het chemisch onderzoek. Het *lab-on-a-chip* zal volgens Reinhoudt redelijk snel kunnen uitgroeien tot een *process-on-a-chip*, omdat dergelijke gestapelde nanoreactoren veel voordeel bieden voor energiebesparing en afvalreductie.

Materialen

Volgens Reinhoudt is veel van wat nu nanomateriaal wordt genoemd, bijvoorbeeld bumpers versterkt met koolstof nanobuisjes (CNT's, carbon nanotubes), in wezen gewoon scheikunde. Hetzelfde geldt voor de ontwikkelingen in zonnecellen.

Geavanceerde chemie, maar wel chemie en geen nanotechnologie.

Om begripsverwarring te vermijden, gebruikt hij de term nanotechnologie bij voorkeur voor constructies die deeltje voor deeltje of molecuul voor molecuul van de grond af zijn opgebouwd. De kern van nanotechnologie is nu juist dat je het bouwproces op moleculair niveau kunt sturen.

Arie Rip (TU Twente)

Volgens Rip liggen toepassingen van nanotechnologie nog tamelijk ver in de toekomst en is de maatschappelijke en ethische impact daardoor erg speculatief. Interessanter is het om na te gaan wat de dynamiek in en achter de ontwikkeling van toepassingen van nanotechnologie is en deze inzichtelijk te maken, zodat betere strategische keuzen (kunnen) worden gemaakt.

Een tweede algemene opmerking is dat de groslijst van toepassingen te weinig rekening houdt met de betekenis van nanotechnologie voor de 'vierde markt': de markt van miljarden individuen met een zeer bescheiden koopkracht. De *pull* van de vierde markt in combinatie met de *push* van nanotechnologie, die gedistribueerde productie mogelijk maakt, kan door de lage kosten op termijn leiden tot grote veranderingen in industriële netwerken en *business models*.

Nano-elektronica

De dynamiek van de technische, economische en sociale ontwikkelingen in de (nano-) elektronica laat zich niet beschrijven door de Wet van Moore (exponentiële toename in de capaciteit van chips). Er is, aldus Rip, *More than Moore*, waarbij *ambient intelligence* het beloftevolle perspectief is. Dat vraagt niet zozeer om voortdurend meer schakelingen per vierkante centimeter (Wet van Moore), maar om multifunctionele chips (*systems-in-a-package*) waarin uiteenlopende functies een plaats hebben gekregen. Systemen die niet alleen kunnen rekenen, maar ook beelden op kunnen slaan en afspelen, invloeden van de omgeving kunnen waarnemen (sensoren) en verwerken (actuatoren), en kunnen communiceren met andere systemen en – niet onbelangrijk – met de gebruiker.

RFID

Radio Frequency Identification beperkt zich niet tot het product zelf, maar strekt zich ook uit tot de producent. RFID-tags op medicijnen zijn bijvoorbeeld te gebruiken om bonafide en niet-bonafide producenten en handelaren van elkaar te onderscheiden. Niet alleen vanwege de bescherming van de consument/patiënt die hiermee wordt geboden, verdient deze controle de aandacht. Doorredenerend zouden we, aldus Rip, ook eens moeten kijken naar de combinatie van verschillende technologische ontwikkelingen. Via de mobiele telefoon kan worden nagegaan waar je bent (althans, als je je telefoon aan

hebt staan), RFID-poortjes laten zien wanneer je wat hebt aangeschaft en bij wie, enzovoort.

Medische toepassingen

Verwachtingen op dit gebied zijn volgens Rip soms nogal overtrokken, en houden te weinig rekening met lastige en langdurige registratieprocedures. Dat geldt voor implantaten, maar ook voor drug delivery-systemen. Bij laatstgenoemde systemen is de vraag wat er gebeurt na de aflevering van de drug. Zijn er restanten? Hoe zit het met combinaties van therapieën? Volgens Rip is er gezien deze vragen behoefte aan een discussie over drug delivery op systeemniveau.

Materialen

Volgens Rip is het verstandig om onderscheid te maken tussen technologische ontwikkelingen in het oppervlak en oppervlakte-effecten van materialen en ontwikkelingen die zich richten op de 'bulk' van het materiaal. Het onderscheid wordt ingegeven door het feit dat er veel mogelijkheden zijn voor het karakteriseren van oppervlakken en de processen die zich daarop afspelen, zoals *scanning tunneling* microscopie en andere *scanning probing* microscopische technieken om na te gaan wat zich afspeelt op het oppervlak. Deze mogelijkheden zijn er niet of nauwelijks voor de zelfgeorganiseerde eigenschappen van de bulk van het materiaal.

Nutsvoorzieningen

Wat de nutssector betreft zijn de beloften groot (bijvoorbeeld in de duurzame energievoorziening), maar is de realisatie ervan kwetsbaar. Belangrijk is om na te gaan waardoor ontwikkelingen worden gedreven (*technology push*, *market pull*, eventuele niches en *killer applications*). Toepassingen van nanotechnologie voor bijvoorbeeld drinkwater- en energievoorziening in de Derde Wereld komen dan in een wat ander licht te staan. Zo blijkt uit rapporten van het Amerikaanse Meridian Institute dat bij het doen van beloften onvoldoende rekening wordt gehouden met de concrete situatie. Ook wordt onderschat wat mogelijk is als wel rekening gehouden wordt met de situatie in ontwikkelingslanden.

Marc Welland (University of Cambridge)

According to Welland it is important to focus the discussion on nanotechnology on applications whereby nanotechnology really makes a difference. Otherwise the debate will be about almost everything, thus rendering it quite useless. Another general remark is that a debate about ethical, social and legal aspects is very important, not only in terms of public acceptance but also because it helps to shape future technologies.

Nano-electronics

The economic impact of nanotechnologies is largest in IT. So it is no surprise that the IT-industry is the main driving force behind nanotechnology development in their search for smaller and smaller devices and structures. The technology developed for IT-applications is also used in other sectors, like development of sensors and the development of the lab-on-a-chip.

Materials

The second largest economic impact is the use of nanotechnologies for coatings. A UK-based glass company is now making windows that are self-cleaning. Another example are coatings that are UV- and dirt resistant so that automobiles keep their showroom lustre.

Drinking water

More important than the economic impact of nanotechnologies on IT and materials is the social impact on the supply of drinking water, especially for 2 or 3 billion people in Third World countries. Nanotechnologies really can make a difference, according to Welland. Membranes offer a cheap and robust way for providing people with drinking water that is free of pathogens and poisons.

Energy

Another application that can have an enormous social impact is the development of cheap solar energy systems. A promising candidate is the 'organic' or Graetzel-cell based on organic dyes. Although the concept was developed already fifteen years ago its development is now accelerating thanks to new possibilities of producing nanostructured components. The organic solar cells could mean a revolution in electricity production, not only in the Third World but also in industrialized countries.

Other applications

Most applications of nanotechnology are the result of a step-wise technological development that already started in the sixties and seventies. Nanotechnology is more a matter of evolution than revolution, says Welland. Still nanotechnology forces the engineers back to their drawing boards (or rather computer screens) to re-design existing products.

Kathy Jo Wetter (ETC Group)

Dr. Wetter was asked to give her comments on the list of nanotech applications and select the top 5 nanotech applications that should be discussed in a public debate. The latter is presented in this short interview report.

Nano-materials

This is the most urgent area as there are already 400 products containing nanomaterials (NM) on the market. The impact of NM can be rather diverse. The most important aspect related to NM is toxicity; this has not yet been adequately investigated. The ambient NM are the most disturbing, but also those ‘fixed’ into materials, especially in disposal, should be considered. Secondly, NM are not yet addressed in regulation. Many toxic substances are subject to regulations only when a large amount is produced or when the substance makes up a large percentage of a total product, as in food. Weight and percentage-of-content thresholds are inadequate parameters for regulating NM, as the small size of NM does not necessarily correspond to the size of their effects. A third aspect deals with the fact that new NM could dramatically affect traditional commodity markets. For instance, NM such as carbon nanowires could replace copper wire in some electronics applications; this can have a negative impact on the export position of copper producing countries, most of which are developing countries. It is not the case that the status quo should be preserved, but that commodity-dependent countries are unprepared for the changes that nanotech may bring. A last aspect is related to the fact that, similar to the patenting of genes with the advent of biotechnology, through nanotech also, molecules and other more fundamental building blocks of nature will be patented.

Convergence of Biotech and Nanotech

Future applications of bio-nanotechnologies will have significant ethical implications. She expects that within 10 years self-replicating, biological molecules coupled with nanostructures will be on the market and perform all kinds of industrial functions. She mentions the example of a California-based research project in which a small piece of silicon is connected to the heart cells of a rat. The cells grow around the silicon “spine” and enable the device/organism to move around.

Converging technologies for improving human performance

Implants and prostheses using nanoscale technologies should not be considered simply as a further development of current prosthetic technologies, as they will be connected to other technologies and integrated into larger systems that will challenge our understanding of what it means to be human. This touches very much on notions such as the makeability of humans, but will also have an impact on the rights of the disabled. What happens to disabled persons when the standard of “normal functioning” shifts to an enhanced or “improved” standard? Will everyone who cannot or chooses not to be enhanced through these converging technologies be considered disabled? The new converging technologies will likely increase the gap between poor and rich.

Nanosensors

Sensors with nanoscale components are already on the market, and the sensors themselves will become smaller, perhaps invisibly small, as the technology advances. In the future, they will be used in more and more applications. ETC questions the impact of ubiquitous nanosensors on privacy and democracy.

Nanotech in public utility sector

It has become very popular to talk about the potential for nanotech to provide clean water and inexpensive energy, especially to the poor. These examples show that nanotech can be “good” for society. ETC questions the likelihood that nanotech will bring benefits to the poor and found out that the utility sector has a low priority relative to other sectors (such as pharmaceuticals and electronics) if the number of patents is taken into account. ETC found, in preliminary research, only 15 patents in the field of water filtration and 850 patents in the field of carbon nanotubes, for example. It is likely, though, that any nanotechnologies used in water filtration will be proprietary.

Bijlage B Groslijst van nanotechnologietoepassingen

Deze bijlage bevat de groslijst van nanotechnologietoepassingen die op basis van deskresearch zijn opgesteld. Zij bevat tevens aanvullende reacties van de groep experts die in de eerste ronde zijn geïnterviewd (Nordmann, Reinhoudt, Rip, Welland en Wetter) op de toepassingen. De bijlage is een Engelstalig document dat uit korte statements bestaat.

(1) Nanomaterials/Industrial production

New materials

Nanoparticles can be used to influence the design and composition of materials, to give them new properties. Examples include among others:

- Self-cleaning materials, whereby the surface is structured on a nanoscale and provided with ‘hairs’ (Lotus effect). It is still mainly hydrophobic, but in the near future it will also be ultrafobic (fat- and oil-repellent). Examples of applications include a self-cleaning dinner set, windows which no longer need to be cleaned and foul-resistant skin for ships. *Welland* adds a colourless paint for cars that prevents dirt collection and gives the ‘lush’ appearance of a new car.
- Materials with higher impact resistance through the addition of nanoparticles. Nanotubes for example are 30 times stronger than steel and lend themselves to strengthening synthetic materials. Additionally, nanoparticles can be used as filler (for example, soot in car tyres). Applications include ‘high impact’, lightweight tanks for gas and liquids, car bumpers and durable insulating material. *Welland*: carbon nanotubes (CNT) are added to plastic car parts to make them electrically conducting so less paint is needed to apply powder coating.

Reinhoudt does not think these new materials can be considered an application of nanotechnology (NT). He defines NT as building structures/appliances from building blocks of less than 100 nm in size. If you would build up a layer or bumper particle by particle it would be NT but if you just mix and/or spray, it should be considered as classical chemistry. By a strict definition he wants to sort out the existing confusion about what is nanotechnology.

New and/or more efficient processes

Analysis and design on nanoscale make it possible to rationally design catalysts (trade becomes science) which make existing processes run more efficiently. New processes are also coming into view. Applications not only lie in process installations, but also in cleaning up exhaust fumes of cars, aeroplanes.

New process techniques and controls

Miniature sensors (see also agro food) for online measuring and real-time controlling of processes in the chemical and food industry, which allows raw materials to be converted into semi-manufactured products and final products more efficiently.

- Lab-on-a-chip for a fast and cheap assessment of process parameters and/or contaminations. Also interesting for medical applications.
- Factory-on-a-chip. Not only for pharmaceuticals and specialties but possibly also for the production of bulk chemicals.

Nordmann: this is most controversial; no realistic application; the same for ‘molecular manufacturing’.

Reinhoudt disagrees. He thinks a process on a chip offers so much advantages in terms of energy and waste reduction that its development will gain speed in the near future.

ELSA³: spreading nanoparticles in the environment. Working conditions with production and processing. Problems with recycling of materials.

Nordmann: ELSA issues seem not to pop up very easy. A more subtle approach of ELSA could lead to discussion on the extension of the human species, work place implications (labour savings, cutting maintenance and workforce), notion that materials assume a kind of finality, that they are natural (that they degrade) and that humans can relate to them. However, some new materials are so unapproachable that we can not leave our traces upon them; we can not communicate/relate to them. They are immune to human reaction and because of that they get some sort of power over us (‘ethical flavour’). An example is the Berlin Holocaust Statue, which has a nanostructured surface so people can not write on it. It changes the character of the monument because it makes people who want to give their opinion by writing on it, invisible: politics of objects. Other issue is: degradation vs durable materials with a quality that is everlasting; this does not fit into the consumption society in which consumers want to buy new products all the time.

Nanoparticles and toxicity raise also ethical issues as traditionally risk assessments can only be made on the basis of evidence, exposure, statistical data, which are not available. This implies that we can not be as proactive as we want to be. We are forced to stay in the reactive mode.

Another ELSA issue is related to the quality of knowledge: how do we understand the technologies? As scientists have to use simulation techniques to understand how systems behave, is that a good basis for our knowledge? We simulate natural processes we can not see, so we use knowledge we do not understand.

Wetter: toxicity and disposal (of fixed nanoparticles) are the two most important ELSA-issues related to nanomaterials. NASA has given the RICE university a grant (11 mln \$) for a research project aiming to develop a carbon nanotube wire that can replace wire from copper. This can have negative effect on economies of those countries that export copper, especially those for which it is their only source of income.

³ Ethical, Legal and Social Aspects (ELSA)

(2) Nanotechnology in the public utilities sector (such as water and energy supply)

Utilizing solar energy

- Nanotechnology makes it possible to develop ultra low-cost solar cells on the basis of titanium oxide. These cells could so to speak be applied to a wall using a spray can.
Nordmann: solar cells integrated in material (as the energy extraction in medical application (see 2a); produce energy everywhere, all the time. Storing and transporting of energy will remain a problem.
- With the help of porphyrin nanotubes (= light-sensitive leaf green tissue) it could be possible to simulate photosynthesis and to directly convert sunlight into hydrogen.

Wetter: convergence of Bio and Nano. Another example she mentions is that of a DoE financed research project (12 mln \$) that has as its goal to develop a new organism that produces energy or that can attract the CO₂ from the environment. This looks like bio, but it is BioNanoICT as these developments in Bio/Nano/Materials will be combined with the making of small machines elsewhere.

Hydrogen as source of energy

- Storing hydrogen from biomass, natural gas or sunlight (see above) metal hydrides, i.e. network structures on a nanoscale, which allows you to store more hydrogen molecules per volume unit than when the hydrogen is liquid.
- Using hydrogen to generate electricity and heat (static) and traction (mobile fuel cell). Highly promising (but still very expensive) is the PEM fuel cell which is based on membrane technology. Thanks to nanotechnology (much) more efficient fuel cells are expected.

Energy-saving

- Thanks to nanotechnology the Light Emitting Diode (LED) is now so much better than five years ago that it can be applied in traffic lights and as alternative for street lighting. In the near future LEDs will replace light bulbs and fluorescent lighting.
- Nanotube displays give a clear and sharp picture and are even more economical than a flat screen based on liquid crystals (LCD).

ELSA: alleged and actual risks of hydrogen storage, both small- and large-scale, meaning in or near the home. Solar energy and fuel cell only interesting with decentralized

generation of electricity. Guaranteed supply via a kind of energy Internet. Huge consequences for electricity production and transport.

Nordmann: how big is the economy of the rhetorics of promises? If you promise the benefits of environmental application of nanotech, can you make that true? It is a technological solution for a problem that has much better solutions. Nanotechnology is often meant to maintain our life style; not to change it (in this respect: in terms of less energy consumption). Promises are important.

Improving the quality of drinking water

Membrane diffusion makes it possible to build compact (and mobile) purification installations, which use little or no chemicals. Also possibilities for purification of waste water.

ELSA: risks of improper use resulting in contamination. Energy consumption. Possibly decentralization of drinking water supply and/or waste water purification up to local level (in districts).

ELSA for all utilities:

Wetter: there is a lot of attention for these applications of nanotechnology, but will they really get that high priority as is mentioned? Counting the numbers of nanotech patents in the five sectors shows that nano-electronics has the most patents (~850), while utility only has a score of 15! What will happen in nanotech is very much depending on who is in control.

Welland: sees solar energy, water purification and soil decontamination as the most important applications of nanotechnology because of their potential social impact for developing countries.

Rip: these applications can easily remain 'an everlasting promise'.

General:

Wetter: comparable with the patenting of genes, in nanotech molecules and other 'more fundamental building blocks' will be patented.

Rip: applications do not come about because they are technically feasible but because someone sees a possibility to earn money and/or prestige. Instead of looking only at possible impacts you should look at possible scenarios for nanotech applications taking into account technology push and market pull, niche-markets and killer applications. In short the dynamics behind the development of nanotechnology and its applications.

(3) Nano-electronics (including intelligent clothing and military applications)

Information processing, storage and transport:

Nanotechnology is making the micro-processor ever faster (and cheaper). Moore's Law (double the number of transistors per square centimetre almost every two years) could still apply for another 20 years. According to *Welland*: in 2007 65 nm-technology will be used and for 2013 an even further miniaturization towards 32 nm-technology is expected. Pursuant to this the storage capacity of memory chips is also being hugely expanded, among others through the use of C-nanotubes. *Reinhoudt*: storage capacity will be enhanced further by using molecules that allow more 'states' than 0 and 1. *Rip*: by leaving the Intel road map you enter the area of More than Moore, where new design approaches are needed.

The format and price of chips make them omnipresent up to and including the tap in the bathroom. Expectations are that the resulting ambient intelligence will have a huge impact on our everyday lives. New storage media will allow us to record an entire life on audio or video (lifetime recording).

- Quantum computers and (tele)communication with the help of light particles and quantum entanglement. Death of distance, for example through the use of video conferencing with three-dimensional holographic imaging of the participants. Whether the latter will be feasible within ten years is doubtful. However, an enormous increase of the capacity of connections with new possibilities for the Semantic Web, mutual communication between computers (refrigerator - supermarket). *Nordmann*: this is very long term developments; an opinion that is supported by *Welland*.
- Radiofrequency identification (RFID), identity tags for goods, ranging from cars to underwear. Nanotechnology makes it possible to drastically miniaturize the tags and to make them so cheap that they even could be put on individual tomatoes.

ELSA: faster computers have outdated existing techniques for encrypting bank data for example. The other way around, quantum encryption is leading to, what in principle are, unbreakable codes. The omnipresent computer carries in it the risks of information overload and the opposite, full controllability with serious damage to privacy. 'How would you like it if you discovered that your underwear was reporting on your whereabouts', said Debra Bowen, Senator in California. Linking RFID and customer cards gives the shopkeeper information on what the customer is purchasing.

Rip: an RFID tag gives also information about where the product is coming from. This can be used to track 'irregular' products for which no license fee has been paid or medicines that have been imported via Internet.

Welland: developers will have to supply sensors collecting sensitive information, with encryption technologies to prevent unauthorised use of data.

(4) Medical nanotechnology

Diagnostics and monitoring

This includes a number of nanotechnologies:

- Nanobiosensors which – using different biomarkers that correspond with certain health parameters – measure the health of people, also invasive: embedded biosensors. Other forms of implantable health monitors can use nanomaterials to extract energy from the body (body heat).
- Medical imaging techniques, using nanoparticle probes/quantum dots/synthetic chromophores/miniature imaging devices attached to certain molecules (proteins for example). Optical techniques such as confocal microscopy and correlation imaging may directly measure biochemical processes in cells. *Nordmann*: this is long term development. *Reinhoudt* disagrees and mentions the use of magnetic particles for identifying certain proteins as developed by Chad Mirkin from Northwestern University).
- Array techniques: analysis on a nanoscale. Starting as DNA array this technique developed into a routine analysis technique for gene and protein analysis. Development to ever higher resolutions and smaller samples. Lab-on-a-chip technologies, currently still developing on the micrometer scale are edging towards nanoscale ; integration in nano-measurement systems.

ELSA: telecare, privacy, freedom of choice, cost-benefit analysis healthcare, depending on tech, man-machine interface, issues involving early diagnostics, convergence of nano/bio and ICT, etc.

Nordmann: because people can do more health monitoring by themselves due to new diagnostics etc, a reduction of public personalised health care could take place: automation and reduction of health care, hospitals only for cancer and birth. Placebo effect: if you can constantly monitor more and more aspects of your health, there is always something wrong. Only physical not psychological dimension; human health care goes 1-dimensional.

Wetter: ETC raises questions about impact of sensors for privacy and democracy.

Drug delivery systems

Nanoparticles which contain active medical agents (also for the transport of genes) for delivery to the right location. Encapsulation in nanoparticles improves transport and delivery of the drug; the nanomaterial can also serve as camouflage to avoid immune response or as substance which can react to certain molecules or can catalyse chemical conversions. Possibly linked with biosensor to the delivery systems to monitor it. Ultra precise nanoparticles which can kill cancer cells or torpedo blood vessels which feed the cancer cells.

In *Welland's* opinion it will not be possible in the next five or ten years to deliver drug on target by using a 'guided torpedo' because it will be too difficult to steer the nanovehicle. More is to be expected from a biochemical approach, whereby medicines are coupled to monoclonal antibodies or sugarchains.

Reinhoudt mentions the production of droplets of a specified (nano-)size as an inhaler for patients with cystic fibrosis.

ELSA: safety of the delivery systems, increase the efficiency of medicines, regulation issue, choice for certain diseases, cost/benefit issue. *Rip*: an important question is what happens with the nano-container after the drug has been delivered.

Implants and prostheses

- Use of nanomaterials for the recovery and replacement of damaged or sick tissue. Implant coatings of nanomaterials will increase adhesion, durability and period of use of implants. Frameworks for improved tissue regeneration, nanostructured scaffolds that are biocompatible and not rejected by the body.
- Research of neural processes using nano-electronic systems. Neurons of rodents have already been grown on nanofabricated surfaces to form elementary neural networks in which electrical signalling can be measured. By sending and receiving electrical impulses from the network, it might be possible to understand how neurons create memory by their responses to different patterns of stimuli.
- Implanting nanowires to monitor brain activities and possibly in the future stimulate harmful/sick neurons in people who suffer from Parkinson's disease. Another possibility is with the nanotubes to distribute hundreds of electrons in the brain. Doctors/researchers may use this to fine-tune the neural activities of the brain, and for example treat ailments like chronic pain.

Nordmann: nanotechniques that stimulate the pleasure and pain centres in the brain; this is technically speaking easy. Experiments are already being carried out with animals, especially mice; control the emotion of mice (remote control behaviour). Huge ethical questions related to this.

Wetter: convergence of Bio and Nano. An example she mentions of a researcher in California has linked a nano-sized piece of silicon with a heart cell of a rat. The cells grew and the heart moved around on the nanostructure. This looks like bio, but it is BioNanoICT as these developments in Bio/Nano/materials will be combined with the making of small machines elsewhere.

ELSA: ethical issues, man-machine interface, social-psychological questions concerning identity, the makeability of man, infringing brain-privacy.

(5) Nanotech in the agrofood sector

Agriculture and cattle breeding

- Sensors which are spread over the field, in the glasshouse for measuring different soil, air and plant parameters via remote sensing systems to irrigation, adding nutrients, etc. Part of precision farming.
- Use of lab-on-a-chip for guarding health parameters of food crops and of farm animals for swift, massive testing of chemical substances (agrochemicals) to use their biological activity to develop new agrochemicals and to define (un)desirable damage of used agrochemicals in biological agriculture for example.
- (Adhesive-specific) nanoparticles (organic polymers, inorganic particles) which irreversibly attach to specific pathogenic bacteria to prevent them from infecting animals.
- Preventive use. In development for application in poultry farming.

ELSA: these sensors can end up in food: health risks, cost/benefit analysis, in what types of agriculture do the sensors fit.

Wetter: ETC raises questions about impact of sensors for privacy and democracy.

Nutritional products which are tailor made to the specific taste of the consumer

For example: Kraft's first nano consumable may be a nano-capsule beverage.

Nanoparticles will encapsulate specific flavours, colours or nutritional elements that can be activated by zapping the solution with the appropriate radio frequency. Grocery stores and vending machines would sell a colourless, tasteless bottled fluid that customers could take home, zap, and transform into their beverage of choice. Microwave frequencies would activate the selected nano-capsules, effectively turning water into wine – or coffee – or single-malt scotch. Since the same mechanism could be used to release highly-concentrated drugs, the same bottled fluid might offer Alka-Seltzer chasers for the scotch. Smart hangovers! (ETC-group, 2003) *Nordmann*: is this realistic?

Other nutritional applications:

- Nanocapsules which function as delivery system for the transport and delivery of functional food biomolecules. Such nanocapsules (cochleates) deliver their content to the 'target' cell when the external layer of the cochleate fuses with the cell's membrane.
- Manipulation of material at the nanolevel contributes to improving the functionality of food molecules. This concerns starch-based nanoparticles which act as colloids in water solutions and can be used for nutritional purposes (mixing, emulsifying, giving it syrupy qualities, etc.).

Reinhoudt adds the possibility of replacing fats in food by water-filled fat droplets giving for instance ice cream the right taste and less than 10 per cent of the fat.

ELSA: is this still food? Dividing line between food/medicine, food/stimulants, elimination of 'agriculture' when the 'nanobox' preparation of food from recycled elements is economically viable. In other words: if a machine can be designed which can produce food from non-biological materials atom by atom (ETC, 2003, p. 52).

Wetter: regulation of NM in foods or whatever kind of products should be geared to the specific characteristics of the nanomaterials. Because they are so light in weight, regulations concerning labelling, has to be adapted. This is a general NM issue.

Developing smart and active packaging materials which contain

- sensors with which different health parameters of consumers can be measured (for example vitamin deficiency). This is subject of research of the NanoteK Consortium (ETC, 2003, p.53);
- sensors which recognise the food or health profile of consumers (allergies, abnormalities). In other words a diagnostic sensor is linked to the food product;
- sensors which catch and remove moulds and harmful bacteria (TNO's BioSwitch);
- colour changing substances which warn the consumer if the food is spoilt (ETC, 2003, p.53);
- sensors (electronic tongue technique) which detect certain chemicals, pathogenic micro-organisms and then warn the consumer (for example by changing colour).

ELSA: privacy, freedom of choice (e.g. telecare with relating aspects), danger of contents of BioSwitch ending up in the food, market access, prevention of bioterrorism (US fear mentioned by ETC), people no longer trust own sensed knowledge of the product.

Food safety

- Nanoparticles with specific form and chip-based sensors (micro arrays) which can be used to show contamination and pathogenic bacteria and moulds throughout the food production chain (biosensors).
- Nano-emulsion for effective cleaning of surface areas: small droplets of oil which can penetrate in membranes of pathogenics and destabilize them.
- Nanocapsules which function as delivery system for certain bioactive substances to prevent food-allergic reactions to the substances.
- Sensitive and sustainable optical sensors of silicon nanoparticles made from porous silicon and arrays that can detect chemicals and aromatic substances (in gas phase).
- Use of nanoparticle technology for disinfecting micro-organisms on dry surfaces.

(6) The Military field

Chemical/biological warfare

- Sensors for detecting nerve gases and biological weapons. Also for industrial purposes as alternative for the canary in the coal mine.
- Nanocapsules which enable longer preservation of viruses and bacteria, which makes them better useable as biological weapon.

Nordmann: automation of decision making (possibility theory, distributed decision making). Human decision making can not be fast enough to follow the increasingly faster automated processes. Automated killing machines. Systems work too fast and human interference is not possible.

ELSA: new forms of warfare, which can put considerable pressure on existing conventions. Risk proliferation. On the other hand more possibilities for peacekeeping, for instance by developing sensors that can ‘sniff’ mines or concealed weapons.

Infantryman as platform

- Intelligent clothing: by processing textile fibres into nanoparticles (bonding, wrapping) it will be possible to produce materials with new features, among which:
 - passive characteristics, such as (perspiration) humidity regulator, resistance to dirt and stains, higher impact resistance and
 - active properties, whereby pores in a combat suit close in the event of a chemical/biological attack or whereby the material contracts or hardens as a splint if the wearer is injured.
- Lightweight batteries/fuel cells for energy supply.

ELSA: arms race, compare tanks. Civil application of stain-resistant and humidity-regulating clothing to mark the end of the washing machine.

Nordmann: intelligent clothing of soldiers: exploding bombs absorb enormous blasts (see: use of intelligent clothes in Iraq). Impact on bodies is that they are not hurt in terms of broken bones and open wounds, but the body gets such a hard shock (similar to shaken brains) that you can conclude that the body is hurt but invisible. People might think that the clothing protects the body, which is not the case.

Bijlage C Verslagen interviews tweede ronde

Voor het toepassingsgebied Energie en water zijn geen verslagen opgenomen in deze bijlage.

Toepassingsgebied	Geïnterviewde personen
1. Materialen	Hartmut Fischer (TNO Industrie en Techniek)
	Germ Visser (DSM Research)
2. Energie en water	Antoine Kemperman (Universiteit Twente)
	Tim Harper (Scientifica)
3. Elektronica	Reinder Coehoorn (Philips Research/TU Eindhoven)
	Bert Gyselinckx (IMEC Leuven)
	Maurice Wessling (Bits of Freedom)
4. Gezondheid	Hans Hofstraat (Philips Research)
	Hans Hektor (BiOMaDe)
5. Agrofood	Frans Kampers (WUR)
6. Militair	Rob van Heijster (TNO Defensie)
	Jürgen Altmann (Universität Dortmund/Bonn International Centre for Conversion)
Overig	David Voyle (NanoTsunami)

(1) Materialen

Hartmut Fischer (TNO Industrie en Techniek)

Fischer is gevraagd om commentaar te geven op de lijst van nanotechnologietoepassingen in materialen.

Fischer wenst allereerst duidelijk te maken wat hij onder nanotechnologie verstaat; er is volgens hem nogal wat verwarring rond dit begrip. Volgens hem is de definitie/essentie van nanotechnologie: kunnen werken op de schaal van atomen, moleculen en supramoleculaire, individueel adresseerbare structuren (van 1 nm tot 100 nm), om daarmee grotere complex-functionele structuren met een fundamenteel nieuwe moleculaire organisatie te kunnen maken. Met nanotechnologie wordt het mogelijk materialen en systemen te ontwikkelen waarvan de componenten en structuren revolutionair nieuwe, fysische, chemische en biologische eigenschappen, verschijnselen en processen vertonen die samenhangen met de nano-afmetingen.

Nanotechnologie combineert, in één multidisciplinair veld, drie relevante technologische stromingen die alle drie het werkgebied tussen 1 en 100 nm bestrijken:

- de top-down technologie van de micro-elektronica en de microsysteemtechnologie,
- de bottom-up technologie via de chemie en zelforganisatie (supramoleculaire chemie) en fysica en
- de biotechnologie die zich bezighoudt met (eventueel gemanipuleerde) functionele moleculen uit de natuur.

Maar, zegt Fischer, om op nanoschaal te kunnen werken, moet je ook de mogelijkheid hebben om wat je doet op nanoschaal te kunnen meten en volgen. Nanotechnologie is pas mogelijk geworden door de *scanning probe*-microscopie. Dit is het hoofdinstrument (dat meet, maar dat ook in elkaar kan zetten en kan manipuleren op nanoschaal), waar nu vele variaties van zijn. NT is dus verbonden met de meetmogelijkheden op dit moment.

Toepassing van nanotech in materialen is op dit moment in de eerste plaats de ontwikkeling van nieuwe materialen door combinatie van bestaande materialen op nanoschaal. Dat levert de zogenoemde nanocomposieten op met nieuwe eigenschappen. Fischer noemt het voorbeeld van keramiek dat als gesinteld/gebakken materiaal, hard, bros en niet herbruikbaar is. Terwijl polymeren juist gemakkelijk te verwerken zijn en zacht materiaal opleveren dat wel opnieuw is te gebruiken. Met nanocomposieten samengesteld van polymeren en keramiek kan materiaal met nieuwe positieve eigenschappen worden gemaakt (hard & buigbaar). Maar macroscopisch en microscopisch levert dit niets op; pas op nanoscopische schaal heeft dit effect. Daarbij moet je eerst de deeltjes op nanoschaal in handen krijgen en op deze schaal met elkaar mengen en voor verdere industriële verwerking geschikt maken. Met de bouw van zo'n nanocomposiet wordt/worden in feite de natuur/bepaalde biologische processen nagebouwd. De mens is in feite ook een grote bionanocomposiet, als je het goed beschouwt, zegt Fischer. Dit zijn de eerste generatie nanocomposieten: stoffen op nanoschaal mengen en hopen dat ze goede eigenschappen hebben.

De tweedegeneratie-nanomaterialen zijn die waarbij het nanomateriaal een speciale functionaliteit wordt meegegeven, bijvoorbeeld een delivery system dat open en dicht gaat, dat van vorm verandert of dat een aangrijpingspunt heeft waar je een molecuul aan kunt hangen om gedetecteerd te worden.

De derde generatie is echt iets nieuws opbouwen uit nano-onderdelen; zoiets als van lego een huis bouwen in dimensies waar dat tot nu toe nog niet is gedaan. Hij doelt op de schaal van nanopartikels (die rond en egaal zijn aan de ene kant en die je aan de andere kant gemakkelijk een specifieke structuur kunt geven), die zijn opgebouwd uit meerdere soorten moleculen en meerdere moleculen van hetzelfde soort. Nanotechnologen kijken daarbij heel goed naar hoe de biologische wereld in elkaar zit, om die vervolgens te kopiëren.

Fischer vindt het zeer belangrijk dat er aandacht is voor de toxiciteit van nanodeeltjes; volgens hem wordt die meestal onderschat. De nanopartikels hebben namelijk dezelfde dimensie als die waarop de biologische systemen (van ons lichaam) zijn gebaseerd en dus is het erg gemakkelijk voor nanodeeltjes om met ons lichaam interacties aan te gaan. Je schrikt volgens Fischer van de toxiciteit van bijvoorbeeld gouddeeltjes (een goudpartikel

heeft 200-2000 atomen, een atoom heeft een dimensie van 2-4 nanometer). Ze gaan rechtstreeks door de celwand heen en verstoren het leven in de cel.

Op de vraag welke case op het gebied van nanomaterialen hij zou willen aanbevelen voor een stakeholdersmeeting, aarzelt hij. Hij vindt het erg moeilijk hier een concrete aanbeveling te doen. Er gebeurt wel veel op dit gebied, maar:

1. je hebt te maken met geheimhouding,
2. het pakt allemaal niet zo snel uit als de beloften suggereren,
3. het is ook de afstandelijkheid die belemmerend werkt,
4. en dan is er nog de economie: er hangt een prijskaartje aan omdat veel weten = veel meten, en dat kost geld. Daarom wordt nanomateriaal nu nog vooral toegepast op gebieden waar het niet anders kan, zoals kleefverbanden, schuimen, folie.

Tot slot pleit Fischer voor een Europees centrum op het gebied van nanotech; dat versnelt het proces en voorkomt dubbelingen.

Germ Visser (DSM)

Milieu en veiligheid

De manier waarop we omgaan met eventuele risico's voor gezondheid en milieu is bepalend voor de toekomst van nanotechnologie, stelt Visser. Het is hard nodig dat er goed gefundeerde methoden worden ontwikkeld én gevalideerd om eventuele schadelijke effecten te kunnen meten. Daarbij moet rekening worden gehouden met het gedrag van de deeltjes (treedt er wel of geen agglomeratie op) en de wijze van blootstelling. Belangrijk is ook dat je definieert om wat voor soort deeltjes het gaat. Je kunt ze niet allemaal over één kam scheren, omdat de reactiviteit enorm kan verschillen.

Hype en horror

Bij onderzoeksinstellingen en bedrijven bestaat enerzijds de neiging om de term 'nano' te mijden uit vrees voor een maatschappelijke discussie zoals die over gentechnologie is gevoerd. Anderzijds worden de betekenis en reikwijdte van nanotechnologie flink opgeklopt voor de fondsenwerving. In de maatschappelijke discussie over nanotechnologie legt de ene groep te snel nadruk op de positieve aspecten, de 'kansen', terwijl de andere groep vooral op de gevaren wijst. Daardoor dreigt een patstelling die alleen kan worden doorbroken door met de nodige nuchterheid vast te stellen wat we wel en vooral wat we niet weten over de potentie van nanotechnologie en de risico's van verschillende toepassingen.

Materialen

Wat materialen betreft, heeft DSM een coating voor beeldschermen ontwikkeld (Optoclear®), met een gecontroleerde oppervlaktestructuur op nanometerschaal om zowel de antireflectieve eigenschappen als de slijtvastheid te vergroten. Verder wordt

gekeken naar het gebruik van kunststoffen (in plaats van glas) voor het beschermen van organische LED's). Ook het succesvolle Dyneema® (vezel van polyetheen) is volgens Visser een voorbeeld van nanotechnologie, omdat het om een materiaal gaat dat op moleculair niveau wordt geordend. Met de ontwikkeling van dit materiaal is overigens al meer dan dertig jaar geleden begonnen. Gebruik van nanodeeltjes als toeslagmateriaal in kunststoffen en rubber (langer stuitende tennisballen, nano-verstevigde tennisrackets) heeft als nadeel dat recycling van de producten lastiger is (zoals dat overigens het geval is voor alle composietmaterialen). Visser vindt dan ook dat er goed moet worden gekeken naar de totale *life cycle* van nanomaterialen.

Energie

De ontwikkeling van zonnecellen gaat minder hard dan verwacht. Het rendement is nog altijd schrikbarend laag. DSM is nauw betrokken bij Nederlands onderzoek naar brandstofcellen, waarin Solupor® als scheidingsmembraan goede resultaten laat zien. Een andere toepassing van nanotechnologie is het toevoegen van nieuwe of verbeterde katalysatoren aan brandstof om de efficiency te verhogen en de uitstoot te verminderen. Een belangrijke drijfveer voor de verdere ontwikkeling hiervan vormen de hoge energieprijzen.

Sensoren

Dankzij nanotechnologie worden sensoren ontwikkeld die steeds gevoeliger en selectiever zijn. Zo gevoelig dat je de aanwezigheid van een enkel molecuul kunt vaststellen. Een schaduwkant van die ontwikkeling kan zijn dat de aanwezigheid van een enkel molecuul van een bepaalde stof in voedsel, water of andere producten als een bedreiging wordt gezien, terwijl er toxicologisch gezien helemaal niets aan de hand is.

(3) Elektronica

Reinder Coehoorn (Philips)

Processoren

De Wet van Moore, waarbij het aantal schakelingen per vierkante centimeter elke 18 tot 24 maanden verdubbelt, blijft volgens Coehoorn nog circa tien jaar geldig. De vraag is welke concepten zich daarna aandienen. *Single molecule electronics*, oftewel structuren molecuul voor molecuul opbouwen is een aardig idee, maar in dit stadium een puur academisch onderzoeksgebied. Om bruikbaar te zijn voor toepassingen moeten er nog veel fundamentele obstakels worden overwonnen.

Geheugens

Naarmate geheugenchips kleiner worden, worden ze thermisch instabieler. Dat vormt een belangrijke drijfveer voor de ontwikkeling van nieuwe oplossingsrichtingen, zoals opslag in moleculaire materialen (met als ultieme limiet single molecule-opslag). Basismateriaal daarvoor zijn moleculen die in twee (of meer) toestanden kunnen voorkomen, toestand 0 en 1. Door energie toe te voeren kan bijvoorbeeld de vorm van een molecuul veranderen.

Naast opslag op geheugenchips (*solid state*) worden gegevens ook opgeslagen op schijven (*disc storage*), hetzij optisch, hetzij magnetisch. Hoewel DVD en BD (Blu-ray Disc) zich in het submicrongebied bevinden (500 nm, geen nanotechnologie dus), is de nauwkeurigheid waarmee wordt geschreven veel groter, en wel omdat de afstanden tussen de putjes circa 25 nanometer bedragen. Voor de productie van de *master* betekent dat een schrijfnauwkeurigheid van minder dan 10 nm.

Displays

In Korea wordt gewerkt aan beeldschermen waarbij koolstof nanobuisjes fungeren als elektronenleverancier voor beeldvorming. Een eerste prototype is onlangs gepresenteerd. Het voordeel is een beter beeld tegen lagere stroomkosten. Philips doet onderzoek naar displays gebaseerd op E-ink-technologie. Strikt genomen behoort deze technologie tot het micrometerdomein, maar, aldus Coehoorn, de grens met het nanodomein is niet zo scherp te trekken. Zo is de laagdikte van de actieve halfgeleidende lagen in de polymere transistoren die Philips gebruikt om de pixels te schakelen ver beneden 100 nm. De E-ink-technologie kan worden gebruikt om elektronische boeken en tijdschriften te maken. Philips is bezig met de ontwikkeling van een oprolbaar beeldscherm op basis van deze E-ink-technologie.

LED's

Nanotechnologie geeft ook een forse impuls aan *solid state lighting*, gebaseerd op LED's (Light Emitting Diodes). Tot nu toe is de toepassing ervan relatief beperkt tot bijvoorbeeld fietsachterlichten en verkeerslichten. Maar naarmate de LED's zelf en de productie ervan steeds efficiënter worden, komen nieuwe markten in zicht, uiteindelijk ook grootschalige toepassingen zoals kantoor- en woonruimteverlichting. Ook geheel

nieuwe producten, waarin bijvoorbeeld LED's worden gecombineerd met textiel, worden nu ontwikkeld.

Zowel wat de beeldschermen als de LED's betreft, benadrukt Coehoorn het belang van iedere speler in de innovatieketen voor de ontwikkeling van deze en andere toepassingen van nanotechnologie. Er moet bijvoorbeeld iemand zijn die er brood in ziet om T-shirts met ingeweven LED's te gaan maken met steeds wisselende teksten of afbeeldingen. Omgekeerd moeten de toeleveranciers van de LED's of van andere elektronische componenten waarin nanotechnologie is gebruikt, in staat zijn om tegemoet te komen aan de eisen die het product stelt.

Materialen

Wat toxicologie betreft kan kennis van nanodeeltjes er volgens Coehoorn aan bijdragen dat we betere beschermingsmaatregelen kunnen nemen tegen het ultrafijne stof waaraan we nu al blootstaan. Nanowetenschap maakt het bijvoorbeeld mogelijk om onderscheid te maken tussen kwalijke en minder kwalijke, dan wel onschadelijke, deeltjes door te kijken naar oorsprong, grootte en samenstelling. Nu wordt alles beneden 10 micrometer nog over één kam geschoren en zijn de maatregelen die worden genomen, zacht gezegd, niet optimaal.

Bert Gyselinckx (IMEC)

Nano-elektronica

De capaciteit van microprocessors neemt snel toe. Bij IMEC werkt men nu al in het 32 nm-gebied en lager. Toch komt er op een gegeven moment een eind aan de ontwikkeling van steeds kleinere processors met behulp van deze technologie. Flessenhalzen die zich aandienen, zijn naast warmteontwikkeling problemen met verbindingen met de buitenwereld, procesvariabiliteit en lekstromen.

Human++

In het IMEC-programma Human++ wordt onderzoek gedaan naar slimme technologie voor lichaam en geest. Een van de projecten is het ontwikkelen van een *body area*-netwerk (BAN), bestaand uit een groot aantal sensoren en actuatoren in combinatie met een Personal Digital Assistant. Sensoren meten bijvoorbeeld bij een hartpatiënt de hartslag, bloeddruk en ademhaling. De geaggregeerde gegevens worden doorgegeven aan de PDA (met GPS en UMTS) die – als een aantal signalen een kritische grens bereikt – kan besluiten om ze door te sturen naar een cardiologisch centrum.

Microcentrales

Om de sensoren van energie te voorzien ontwikkelt IMEC het concept van *micropower generation*. Daarbij wordt het temperatuurverschil tussen lichaam en omgeving gebruikt om elektriciteit op te wekken. Ze hebben een chip ontwikkeld die ongeveer 100 microwatt aan elektriciteit produceert en op de huid gedragen kan worden, bijvoorbeeld als horloge of sieraad. Daarnaast heeft IMEC ook een mechanische generator ontwikkeld

die – via het zogeheten piëzo-elektrisch effect – elektriciteit genereert uit de beweging van armen en/of benen.

Privacy

De vraag is wat mensen nog acceptabel vinden als het gaat om informatie die via een draadloos netwerk wordt verstuurd. Gyselinckx kan zich voorstellen dat veel mensen dat toch wel als privé-gegevens gaan beschouwen die niet openbaar mogen worden. Temeer als sensoren ook geïmplanteerd gaan worden en nog veel meer biologische functies worden gemonitord.

Medicalisering

Gyselinckx vraagt zich af of we ons wel gezonder zullen voelen door al die biologische monitoring. Vroeger was je of gezond of ziek. Was dat laatste het geval, dan bleef je een paar dagen in bed. En als het erg was, belde je de dokter. Tegenwoordig zijn we eigenlijk nooit meer gezond. Ook al voelen we ons goed, dan nog kunnen we de sluimerende dreiging ervaren van een hartaanval of een sluipende ziekte. Ook zelf een diagnose kunnen stellen heeft niet alleen maar voordelen. Op dit moment treedt de arts op als mentale counselor, die een eventuele slechte boodschap in perspectief zet, zowel medisch als psychologisch.

Autonomie

Decentralisatie van de energievoorziening (Energie-internet) roept bij Gyselinckx de vraag op of mensen bereid en in staat zijn om te gaan met meer autonomie. Dat geldt niet alleen voor energie, maar ook voor het eerder genoemde Body Area Netwerk en de bijbehorende mogelijkheden voor zelfdiagnose. Een antwoord heeft Gyselinckx niet, maar de opkomst van nanotechnologie en bijbehorende toepassingen noopt ons wel om ook hierover na te denken.

Maurice Wessling (Bits of Freedom)

Wessling is gevraagd commentaar te geven op de lijst met nanotechnologietoepassingen, vooral vanuit het perspectief van Bits of Freedom.

Wessling begint het gesprek met aan te geven dat Bits of Freedom een tweemansbedrijf is dat zich, omdat het zo klein is, noodgedwongen maar met enkele onderwerpen kan bezighouden; nanotechnologie hoort daar niet bij.

Het verbaast hem echter wel hoeveel aandacht er tegenwoordig is voor de maatschappelijke aspecten van nieuwe technologieën, zoals voor exotische onderwerpen als nanotechnologie, maar niet voor die rond RFID (Radio Frequency IDentification). Nederland is er laat bij als het om aandacht voor de maatschappelijke impact van RFID gaat. Dat komt nu pas op gang. De eerste pilots gaan de winkels in en de industrie zegt dat beperkingen hierop nadelig zouden zijn voor hun concurrentiepositie.

Wessling ziet een aantal trends in de nanotech [hij heeft het groslijstdocument diagonaal gelezen, red.] die direct aansluiten bij BoF's werkterrein. Net als bij RFID is het werkterrein van nanotechnologie erg klein, bij de laatste zelfs onzichtbaar. Voor beide technologieën geldt ook dat je er veel informatie mee kunt verzamelen en dat ze brede toepassingen kennen. Bijvoorbeeld: in de medische sector worden RFID-implantaten gebruikt om patiënten te identificeren om fouten in medicijngebruik – in verpleeg- en ziekenhuizen – te voorkomen. Een ander voorbeeld is een combinatie van RFID en sensoren om vitale levensfuncties te meten.

Maatschappelijke vraagstukken van deze toepassingen zijn volgens Wessling:

- Consumentenbescherming: op welke manieren/momenten krijgen consumenten met micro- of nano-identificatiesystemen te maken? Wat zijn de praktische en juridische mogelijkheden om het gebruik ervan onder controle te krijgen?
- Opsporings- en surveillancetoepassingen: afluister- en opsporingsapparatuur kan door nanotechnologie onzichtbaar worden. Mogelijkheden voor *tracking* en *tracing* van personen worden daardoor steeds groter. Na '9/11' is in het opsporingswereldje geen idee te wild of het wordt al toegepast. Het principe is nu: als het kan, laten we het dan doen, in plaats van: hebben we het wel nodig en onder welke voorwaarden? Deze ontwikkeling ziet Wessling terug in studies over forensisch onderzoek en nieuwe opsporingstechnologieën. RFID maakt het mogelijk om ieder product uniek te maken. Dus ook op de plaats van een misdaad zullen unieke voorwerpen te vinden zijn die naar de op te sporen dader? verwijzen. Nanotech zal dit soort technische systemen en systemen om te volgen, filmen of monitoren alleen maar efficiënter en goedkoper maken. Wessling noemt het voorbeeld van camera's die nu gekoppeld worden aan gezichtherkenningssystemen en straks misschien aan biometrische gegevens als het biometrisch paspoort is ingevoerd. De overheid kan deze informatie centraal opslaan. Onder de noemer 'misdadbestrijding' wordt veel privacy-aspecten geweld aangedaan.
- In recent consumentenbondoverleg kwam naar voren dat dit soort kleine technische systemen een vervreemdend effect heeft voor bepaalde groepen van de bevolking, zoals bijvoorbeeld ouderen. Ze begrijpen het niet, waardoor ze zich ervan afkeren. Het heeft een uitsluitingseffect.
- *Notification* is een basisprincipe in de privacy-wetgeving. Het betekent langzamerhand niet zoveel meer. De betekenis ervan erodeert, consumenten kunnen er niet meer zoveel mee. Stickers op producten die consumenten informeren over RFID/nanotech-elementen in het product zullen langzamerhand worden vervangen door bordjes aan het begin van de supermarkt, et cetera. Dit is een punt van aandacht.
- Voor nanotech zal, meer dan voor RFID, gelden dat de mogelijkheid om er al dan niet voor te kiezen kleiner wordt. Als je een product wilt zonder RFID-tag of nano-chip kun je deze dan verwijderen als ze zo klein zijn? Waarschijnlijk niet. Het wordt dan: *take it or leave it*.

Wessling heeft ten slotte een suggestie voor onderzoek naar privacy-aspecten van nanotechnologie. Dat zou moeten gaan om specifieke toetsing van wat toekomstige

toepassingen van nanotech voor de huidige privacywetgeving zullen betekenen? Is aanvullende wetgeving nodig? ECP.NL, een kennisplatform van het ministerie van Economische Zaken en VNO-NCW, heeft onderzoek hiernaar gedaan voor RFID.

(4) Gezondheid

Hans Hofstraat (Philips)

Hofstraat is gevraagd om commentaar te geven op de lijst van nanotechnologie-toepassingen in de gezondheidssector en specifiek de activiteiten van Philips Research op dit gebied.

De strategie van Philips is om in het gezondheidssegment meer omzet te realiseren. Op dit moment is het bedrijf vooral sterk in *imaging* (in vivo-toepassing in patiëntenonderzoek), gebruikmakend van de imaging-technieken die Philips heeft ontwikkeld om patiënten te scannen: MRI, nucleaire imaging (PET en SPECT), CT en ultrageluid. In de toekomst wil het bedrijf zich ook gaan toeleggen op in vitro-diagnostische applicaties (bijvoorbeeld bloedmonsters, buiten het lichaam van de patiënt). Recentelijk heeft Philips ook een bedrijf overgenomen dat actief is in patiënt-monitoringssystemen.

In het in vivo-onderzoek biedt nanotechnologie de mogelijkheid om gericht en specifiek ziekte te detecteren en te behandelen. Bijvoorbeeld: aan antilichamen die specifieke biomarkers in kankercellen herkennen, wordt een nanodeeltje (met magnetische of paramagnetische eigenschappen, of polymeren, dendrimeren met een afmeting van enkele tot tientallen nanometers) gekoppeld. Deze deeltjes kunnen met imaging-apparatuur zichtbaar worden gemaakt. Ook kan het antilichaam plus nanodeeltje een stralingsbron naar een kanker toebrengen en kan de kanker gericht worden behandeld.

Dit soort toepassingen is in ontwikkeling, maar nog niet op de markt. De verbinding (antilichaam plus nanodeeltje) moet dezelfde toelatingsprocedure, inclusief klinische studies, ondergaan als een geneesmiddel (oftewel bij de Amerikaanse en Europese toetsingscommissies, respectievelijk FDA, EMEA). Hofstraat verwacht dat deze toepassingen zeker binnen tien jaar op de markt zijn. Toepassingsgebieden zijn: cardiovasculaire en neurodegeneratieve aandoeningen en oncologie. Philips en vergelijkbare medisch-technologische bedrijven, ontwikkelen deze technieken meestal samen met medische academische centra en farmabedrijven.

De ontwikkelingen op het gebied van in vitro-technieken zullen sneller tot applicaties leiden. Er hoeven immers niet zo langdurige toelatingsprocedures gevolgd te worden als voor toepassingen, waarbij materiaal in het lichaam wordt gebracht. Nanodeeltjes die hier worden gebruikt, zijn quantum dots, anorganische deeltjes en polymeerdeeltjes. Toepassingsgebieden zijn dezelfde medische aandoeningen als hierboven, en infecties vroeg opsporen. Enkele applicaties hiervan zijn al gerealiseerd. Hofstraat noemt nanoporeuze substraten die door het bedrijf PamGene uit Den Bosch in een van zijn platformtechnologieën worden gebruikt. Philips ontwikkelt apparatuur voor de magnetische/optische detectie.

Op het gebied van drug delivery systems noemt Hofstraat de toepassing om met in vivo-imaging-technieken te onderzoeken of een therapie effect heeft. Ook wordt gedacht aan het gebruik van ultrasoon geluid om de drug (die op de een of andere manier is verpakt of inactief is gemaakt) 'vrij' te maken. En de combinatie van beide: met imaging-technieken de weg volgen van een verpakt drug+nanodeeltje en vervolgens met ultrageluid de drug als die zijn bestemming heeft bereikt 'vrij' maken (*targetted drug release systems*). Philips werkt hieraan met verschillende onderzoeksgroepen van over de hele wereld.

Op het gebied van de implantaten is het mogelijk om met steeds kleinere structuren in silicium te werken. Dit levert de mogelijkheid om kleine te implanteren *devices* te ontwikkelen om bijvoorbeeld de functie van organen die niet of niet goed werken te verbeteren; bijvoorbeeld zien, horen, enzovoort. Hofstraat noemt hier kleine structuren (zoals CCD's – *charge coupled devices* – in digitale camera's) die een link met zenuwen leggen en een beeld geven. Op dit terrein van de geïntegreerde geavanceerde hulpmiddelen (zoals retina-implantaten) is Philips niet actief.

Hofstraat ziet geen directe ethische, juridische of maatschappelijke vraagstukken naar aanleiding van bovengenoemde toepassingen van nanotechnologie met imaging-technieken. Ethische vraagstukken op medisch gebied zijn volgens Hofstraat wel aan de orde als het om genetische informatie gaat. Hij noemt de micro-arrays (DNA-chips, hogedichtheid-arrays van bijvoorbeeld Affymetrix) waarmee bijvoorbeeld de genetische predispositie van personen kan worden vastgesteld en daarmee de mogelijke risico's op de lange termijn op bepaalde aandoeningen. Moet je het de patiënt laten weten; hoe vertel je het, enzovoort. Andere ontwikkelingen die nadere overweging behoeven liggen op het gebied van de toepassing van regeneratieve geneeskunde; het toedienen van stamcellen. Er zijn snelle ontwikkelingen op dit gebied. Hij noemt koppeling met hardware, bijvoorbeeld door met imaging-technieken zichtbaar te maken waar de stamcel naartoe gaat en te volgen wat er gebeurt.

Hans Hektor (BiOMaDe)

Hektor is gevraagd om commentaar te geven op de lijst van nanotechnologietoepassingen in de gezondheidssector en specifiek de activiteiten van BiOMaDe op dit gebied. Welke toepassingen zijn binnen tien jaar te verwachten en welke sociale en ethische aspecten hangen ermee samen?

Drug delivery systems

BiOMaDe is vooral actief op het gebied van drug delivery systems. Hektor onderscheidt twee typen: de zogenoemde pro-drugs en *excipients*. Bij een pro-drug is het medicijn door het delivery-systeem inactief gemaakt. Pas nadat er een deel van de pro-drug is afgesplitst, wordt het medicijn actief. Bij de ontwikkeling van een dergelijk systeem moet ook de pro-drug volledig de klinische studies en registratie doorlopen, wat het tijdrovend en kostbaar maakt. Dit maakt dat de ontwikkeling van een dergelijk delivery-systeem van een specifiek medicijn al gauw tien jaar kost voor het verkocht kan worden.

Een excipient is een vehikel of toevoeging waarmee het medicijn kan worden toegediend en eventueel op de juiste plaats wordt afgeleverd. In tegenstelling tot de pro-drug vindt er in dit geval geen modificatie van het medicijn zelf plaats. Ook in dit geval moet worden getest of het product veilig is. Maar wanneer het vehikel veilig is bevonden, kan het sneller in combinatie met andere medicijnen worden toegepast. BiOMaDe ontwikkelt dit tweede type drug delivery-systemen. Hektor verwacht dat deze systemen binnen tien jaar beschikbaar zullen komen.

Gels en liposomen zijn voorbeelden van excipients waar BiOMaDe aan werkt. De gel-technologie wordt vooral gebruikt voor het verwerken van moeilijk oplosbare medicijnen. De gel bestaat uit een netwerk van vezels (enkele nanometers doorsnede) dat als een spons in staat is water vast te houden. Met behulp van deze gels kunnen moeilijk oplosbare medicijnen worden verwerkt, waarbij het medicijn als kleine partikels in het gel-netwerk verpakt zit. De afmetingen van die partikels variëren van enkele tientallen tot honderden nanometers. Door de kleine afmeting van de deeltjes zullen ze een relatief groot oppervlak hebben, waardoor het medicijn beter oplost en dat leidt weer tot een betere bio-beschikbaarheid. Dit proces is te vergelijken met het oplossen van suiker: kandijsuiker lost moeilijker op in de thee in vergelijking tot kristalsuiker of poedersuiker.

Liposomen zijn te beschouwen als holle vetbolletjes, die bij BiOMaDe worden gebruikt in combinatie met een eiwit. Dit eiwit kan stoffen uit het vetbolletje laten stromen. Door dit eiwit op commando zich te laten openen en sluiten, kan de inhoud, het medicijn, gereguleerd worden afgegeven. Zo zal de verlaagde zuurgraad (pH) in een tumor gebruikt kunnen worden als een signaal om te openen, wat resulteert in de afgifte van het medicijn (cytostaticum) in de tumor. Dit heeft dan tot gevolg dat een hogere specifieke dosis kan worden gegeven met minder negatieve bijwerkingen. Dergelijke liposomen worden in de pers wel beschreven als duikboten; het medicijn wordt in die beeldspraak als een torpedo op commando op het doel afgeschoten.

Vaccin delivery

Een derde voorbeeld is de ontwikkeling van nieuwe toedieningsmethodes voor vaccins. Farmaceutische bedrijven zijn op zoek naar methoden om medicijnen en vaccins zonder gebruik van injectienaalden toe te dienen. In deze zogeheten *needle-free*-trend past de ontwikkeling van een methode om vaccins via neussprays toe te dienen. Binnen BiOMaDe wordt gewerkt aan een dergelijk systeem gebaseerd op melkzuurbacteriën. Deze bacteriën zijn volledig veilig, we krijgen deze dagelijks binnen via melkproducten. BiOMaDe gebruikt ze als basis om antigenen op te plakken en te presenteren aan het immuunsysteem. Aan de buitenkant lijkt een dergelijk deeltje op een ziekteverwekker (pathogeen), en het kan daardoor als vaccin worden gebruikt. Toediening via neussprays heeft twee grote voordelen vergeleken met de klassieke vaccins: het vaccin bevat geen pathogeen én het hoeft niet via injectie te worden toegediend. De verwachting is dat dit type vaccin binnen acht jaar op de markt zal zijn. Hektor geeft aan dat dit enorme voordelen biedt voor vaccinatieprogramma's, met lage acceptatiegrenzen voor het aantal injecties.

Hektor is van mening dat er beperkt ethische of maatschappelijke vraagstukken aan drug delivery-systemen zijn verbonden. Die aspecten worden door BiOMaDe ook nauwkeurig meegenomen bij de selectie van projecten. Waar meer ethische aspecten aanzitten is *gen delivery*, ter ondersteuning van gentherapie. Op dat gebied wordt op dit moment alleen met in vitro-methoden gewerkt.

Andere ontwikkelingen op het gebied van de gezondheidssector zoals *personalized medicines* liggen wel ethisch gevoelig. Dat hangt samen met het feit dat eerst de genetische vatbaarheid moet worden gemeten om deze medicijnen toe te kunnen dienen. Dergelijke informatie is persoonsgebonden en kan ook voor andere doeleinden gebruikt worden.

(5) Agrofood

Frans Kampers (Wageningen Universiteit)

Kampers is gevraagd om commentaar te geven op de lijst van nanotechnologietoepassingen in de agrofoodsector.

Sensoren zijn de belangrijkste nanotech-toepassingen die op korte termijn al op de markt zullen zijn. Met sensoren is het mogelijk productieprocessen beter te controleren: dat bevordert duurzaamheid en kwaliteit. *Food safety* moet daarbij als de basis van productkwaliteit worden beschouwd. Een voorbeeld is de ontwikkeling van een elektronische neus die de eerste signalen van bederf ruikt. De Universiteit van Wageningen (WUR) gaat proberen om vijfhonderd verschillende sensoren die in de neus zitten (van mens, hond, enzovoort) op een drager te krijgen. Kampers ziet geen ethische, juridische of maatschappelijke vraagstukken die met deze ontwikkeling samenhangen. Er zijn ook maar beperkte veiligheidsrisico's aan verbonden, omdat sensoren gebonden nanosystemen zijn die niet in het lichaam terechtkomen.

In de tweede plaats noemt Kampers microsystemen in combinatie met nanotechnologie die leiden tot nieuwe productieprocessen. Met micro- en nanotechnologie zijn bijvoorbeeld emulsificatieprocessen beter onder controle te krijgen. Er zijn homogenerere emulsies mee te maken die ook stabiel zijn; ook kunnen nieuwe productconcepten worden gerealiseerd. Een tweede voorbeeld is gist uit bier filteren en bacteriën uit melk met microzeven (om de smaak te verbeteren). Dit laatste is in feite koude sterilisatie: de kwaliteit wordt beter, terwijl het proces duurzamer wordt. Het filter zelf is microtechnologie, maar oppervlaktemodificaties op nanoschaal kunnen de eigenschappen van het filter verder verbeteren. Kampers ziet weinig ethische of maatschappelijke aspecten aan deze toepassingen. Integendeel, iedereen zal de koude sterilisatie van melk, vanwege de verbeterde smaak en de energiewinst, juist toejuichen.

Door nieuwe productieprocessen en de ontwikkelingen in de nanotechnologie in aanpalende toepassingsgebieden zullen ook nieuwe producten met nanotechnologie op de markt verschijnen. Zo kunnen bepaalde nutriënten worden verpakt in nanodeeltjes die ervoor zorgen dat ze beter worden opgenomen of in het lichaam worden afgeleverd waar ze het meeste effect hebben. Kampers verwacht dat deze *nutrient delivery systems* binnen tien jaar op de markt zullen komen.

Een andere nanotechnologietoepassing is het verbeteren van de textuur, bijvoorbeeld door het gecontroleerd crosslinken van eiwitten (eiwitfibrillen/geleringseiwitten). Ze geven een textuur aan het voedingsmiddel die goed aansluit bij het mondgevoel. Nanotechnologie maakt het mogelijk de nanostructuur te modificeren, waardoor de textuur kan worden aangepast aan de eisen en wensen van bepaalde doelgroepen. Hoewel het in de meeste gevallen om nanostructuren van stoffen gaat die altijd al in voedsel aanwezig zijn geweest, zullen consumenten toch moeten wennen aan dit soort vernieuwingen. Milieutechnisch zijn er weinig problemen te verwachten van dit soort

producten. Vanwege hun aard betreft het goed afbreekbare of oplosbare stoffen die in het milieu geen lang leven beschoren is.

Aanvullend noemt Kampers het gebruik van nanotechnologie in verpakkingen met als voorbeeld de Chinese ontwikkeling van nanozilver dat een goede antibacteriële werking heeft. Hier kleven wel milieuvraagstukken aan. Wat betreft de toxiciteit van nanodeeltjes kun je de consumenten, volgens Kampers, niet voor de gek houden. Ze zijn goed in staat risico's af te wegen, zeker als ze goed inzicht hebben in de risico's (hij verwijst naar autorijden en roken). Volgens Kampers is het van sommige nanodeeltjes echt terecht dat ze ter discussie staan.

Een geheel ander type toepassing van nanotech in de agrofoodsector is die in diagnostica. De WUR ontwikkelt met partners, onder andere Unilever, een project dat uiteindelijk moet leiden tot een *device (personal digital assistant)* waarmee voedselmonsters snel, goedkoop en eenvoudig op schadelijke micro-organismen kunnen worden onderzocht. Er wordt gewerkt aan de combinaties kip/Campilobacter; groente/Salmonella en zuivel/Listeria. Het is een samengestelde meettechnologie die gebruikmaakt van *genomics* en micro- en nanotechnologiekennis. Het moeilijkste deel is het *sample treatment*-onderdeel, dat hoofdzakelijk microtechnologie zal zijn.

Het nano-aspect betreft technieken om de stoffen die het gen van de schadelijke micro-organismen herkennen op het oppervlakte van de chip te krijgen en het signaal te meten. Aan dit project zit volgens Kampers wel een interessant maatschappelijk aspect. De voedingsindustrie wil namelijk niet dat de consument zelf op veiligheid gaat testen (wat in principe ook kan met deze devices). De industrie wil dat de consument erop vertrouwt dat veilige producten op de markt verschijnen. Een van de redenen hiervoor is dat voedsel nooit honderd procent 'veilig' kan zijn, in de zin van dat het 'vrij van ziekteverwekkende/gevaarlijke' micro-organismen kan worden verklaard. Maar de consument denkt daar meestal anders over. Hier liggen vraagstukken zoals: wie controleert de voedselketen, wie is verantwoordelijkheid voor veilig voedsel, wat is veilig voedsel en hoe communiceer je dat met de consument in een tijdperk waarin steeds betere meetinstrumenten op de markt komen die bederf kunnen meten? Een juridisch aspect is dat dit soort nieuwe detectie-devices het ook mogelijk maakt om de regelgeving, de normstelling daarin, verder aan te scherpen. Die is op dit moment eigenlijk volledig gericht op tijdrovende en dure laboratoriumbepalingen, waarbij bijvoorbeeld is voorgeschreven dat 25 gram monster moet worden geanalyseerd. Dit soort eisen maakt toepassing van nieuwe methodes onmogelijk voor hoeveelheden op nanoschaal.

Kampers noemt ook het gebruik van nanotech in *tracking* en *tracing* (het volgen van producten) via printbare elektronica op verpakkingen die aangeven waar het product vandaan komt. De aanwezigheid van RFID en sensoren op verpakkingen die bewaarcondities aantonen zal nog wel even duren – die zijn nu nog te duur. In het LOFAR-project worden sensoren op de akker verspreid (in de toekomst: zaaibaar) die het microklimaat meten, zodat lokaal veel nauwkeuriger kan worden bepaald wanneer en waar moet worden gespoten. Het project richt zich nu op phytophthora (ziekte bij aardappelen). Een als laatste genoemde nanotech-toepassing in de agrofoodsector zijn

lichte kassen. Kasglas is vrij zwaar en vraagt dus ook veel van de draagconstructie. Door met nanoschuimen licht glas te maken dat ook betere eigenschappen heeft – zoals verbeterde lichtinval – kan zowel op constructiekosten als op energiegebruik worden bespaard.

(6) Militair

Rob van Heijster (TNO)

Vanuit zijn ervaring met microsysteemtechnologie constateert Van Heijster dat veel toepassingen op de longlist waarschijnlijk niet vóór 2015 gerealiseerd zullen worden. Niet alleen is de periode voor ontwikkeling rijkelijk optimistisch, bovendien is nog volstrekt niet te zeggen welke toepassingen het zullen halen en welke niet. Vaak zijn er praktische problemen die realisatie in de weg staan.

Geursensoren

Voor het opsporen van mijnen zijn geursensoren niet erg relevant. Voordat zo'n sensor op de markt is, zijn er al weer mijnen ontwikkeld die zodanig zijn geseald dat er geen molecuul uit kan ontsnappen. Of mijnen die zoveel moleculaire *decoys* produceren dat de sensor overvoerd raakt. Alleen indien mijnen uit bestaande voorraden worden gebruikt, kan de geursensor relevant zijn. Meer perspectief is er volgens Van Heijster voor dit soort geursensoren (kunstneuzen) in de chemische en voedingsmiddelenindustrie.

Textiel

Nanotechnologie kan een belangrijke bijdrage leveren aan het ontwikkelen van beschermende kleding. Op dit moment zijn kogel- en scherfwerende vesten nog redelijk zwaar en onhandelbaar in het gebruik. DuPont heeft een vezel (M5 Fiber) ontwikkeld, een trimeer, waarvan je kleding kunt maken die soepel valt, maar verstijft zodra een kogel of scherp erop inslaat. Intelligent textiel, waarbij vezels verkleuren onder invloed van een elektrisch veld, maakt actieve camouflage mogelijk. Een andere toepassing is kleding die op commando medicijnen, antibiotica of desinfectantia loslaat. Omgekeerd kun je ook denken aan kleding waarin vreemde stoffen zoals strijdgassen, maar ook lichaamsgeuren, katalytisch worden afgebroken.

Mobiele energie

Voor mobiele energievoorziening ligt de toekomst niet in waterstof als brandstof, maar in methanol of ethanol. De energie-inhoud van waterstof is te laag voor mobiele energievoorziening. Op de wat langere termijn verwacht Van Heijster dat ook energieopslag in condensators (capacitators) voor bepaalde applicaties perspectieven biedt. Misschien niet zozeer voor individuele toepassingen als wel voor energiebesparing, bijvoorbeeld door de opslag van remenergie van auto's.

Onbemande voertuigen

Dankzij nanotechnologie zullen UAV's (Unmanned Aerial Vehicles, oftewel onbemande vliegtuigjes) niet alleen veel kleiner, maar ook veel wendbaarder worden dankzij *vortex control* (de luchtstroom over de vleugel beïnvloeden). Een optie is ook de ontwikkeling van een kunstvlieg, uitgerust met vele sensoren en in de lucht gehouden door een *artificial muscle*, een kunststof spier. Die optie ligt echter nog behoorlijk ver in de toekomst, maar geeft wel de richting van de ontwikkelingen aan. Ontwikkelingen op dit vlak zijn gaande, de huidige prototypen zijn nog veel te groot.

Besluitvorming

Naast gedistribueerde waarneming op het slagveld, bijvoorbeeld met behulp van tientallen of honderden in het veld geplaatste sensoren, zal ook geautomatiseerde besluitvorming een hoge vlucht nemen. Als voorbeeld noemt Van Heijster een netwerk van sensoren in het veld die draadloos met elkaar verbonden zijn. Net als bij internet blijft zo'n netwerk functioneren als de helft is uitgeschakeld. Lokaal kan het netwerk autonome beslissingen nemen, bijvoorbeeld een signaal 'terugtrekken' afgeven als een strijdgas wordt waargenomen, of een vijandig voertuig uitschakelen op basis van een bepaald trillingspatroon. De vraag is of er een mens in de *decision loop* moet zitten. Volgens Van Heijster is dat ook nu al lang niet altijd het geval. Denk aan Patriot-raketten of de snelvuurkanonnen, zoals de *Goalkeeper*, op marineschepen die automatisch vijandelijke raketten uitschakelen.

Jürgen Altmann (Universiteit Dortmund)

General

Many applications mentioned in the long list will not be realised before 2015. In this respect the list is not very systematic, according to Altmann. Also a separate chapter on military applications is not very logical, because many of the applications mentioned can and will be used in a military context. Drug delivery systems for instance can also be used to attack specific groups based on a specific biochemical marker.

Nano-electronics

Not mentioned in the long list is the development of flexible displays. They will become so cheap that a whole range of new applications becomes feasible, for instance product information on packages or T-shirts with changing motives. RFID-tags on products are not only helpful for the shopkeeper but the information can also be used to evaluate shopping behaviour of customers both by retail organisations and/or government agencies. Measures are needed to protect the privacy. Another social aspect of nano-electronics is the loss of jobs in the service sector due to the availability of 'cheap intelligence' (sensors and processors).

Medical

Magnetic nano-particles are not only useful for 'imaging' (diagnosis) but have therapeutic value as well. By applying an electric field on a magnetic particle attached to a tumour cell the heat that is thus generated can destroy the cell. Nanotechnology will also enable the development of DNA-analysis in the sense that it becomes more specific and a lot faster. In general the use of nanotechnology in medicine might increase the gap between the haves and have-nots in healthcare.

Agrofood

A microwave producing wine from water with the help of microcapsules could be technically feasible, but 'who would want to drink that wine'. He also has his doubts about the taste of capsules replacing fat in food. In general taste and texture of food are enormously important and should not be underestimated in developing new food products.

Materials

The precautionary principle should be applied for developing regulation with regard to nano-particles and occupational, public and environmental health. A pro-active attitude is necessary because of the peculiar character of these particles, i.e. their higher reactivity and the possibility of skin passage.

Energy

Mobile energy is needed for both military and civil applications. The soldier as a platform needs lots of energy for sensors, processing and communication equipment and his/her weaponry. Apart from battery and fuel cells electricity can be generated by using the difference between body temperature and its surroundings and by converting movement into electric energy (piezo-electricity).

Water

Nanotechnology, i.e. membranes can help in providing clean water for billions of people, which is of the utmost importance. The application of membranes is hampered by the fact that energy is needed to bridge the pressure gap over the membrane.

Military applications

Some applications, for instance sensors for verification of chemical and biological weapons conventions have positive effects. Many applications raise serious concerns. Existing arms control conventions can be undermined, for instance the Biological Weapons Conventions by genetically selective agents. International law of warfare is at risk by autonomous fighting systems (killer robots) that do not reliably recognize non-combatants. Destabilization is probable with omnipresent sensors, micro-robots and autonomous weapons. These devices can fall into the hands of terrorists and criminals and thus threaten civil society. To prevent misuse international action is needed to limit the use of nanotechnology for military purposes and verify compliance.

Overig

David Voyle (Nano Tsunami)

Oprichter en eigenaar van de website Nano Tsunami Voyle was gevraagd commentaar te geven op de lijst met nanotechnologietoepassingen en aan te geven welke van deze toepassingen onderwerp zouden moeten zijn van een publiek debat.

Hij noemt als eerste de toxiciteit van *nanocarbon fibres* en *bucky balls* (nanogestructureerde moleculen). Hij refereert aan een rapport van een Zwitserse verzekeringsmaatschappij (Swiss Re, een van de grootste verzekeraars van de wereld) die zegt: “Pas op, als je niet uitkijkt, dan worden dit de *pistols* van de eenentwintigste eeuw, vergelijkbaar met het asbestprobleem van de vorige eeuw.” Volgens Voyle heeft in Nederland de bond van verzekeraars zich ook al met deze problematiek beziggehouden. Hoe zullen de verzekeraars hiermee omgaan? Gaat de consument betalen? Bij asbest en tabak is er achteraf betaald. Gaan ze nanobedrijven benaderen en alvast premie vragen, vooruitlopend op te verwachten claims? Volgens Voyle zouden in het geval van de zonnebrandcrèmes de verzekeraars al met BASF hierover hebben gebeld.

Voyle verwacht weinig nanotoepassingen in de agrofoodsector, maar zegt daar ook het minst van te weten. Hij verwijst hiervoor naar Wageningen, waar veel gebeurt op dit gebied. Wel verwacht Voyle toepassingen op het gebied van *smart packaging*, zoals slimme nanosensoren in een verpakking die met kleursignalering de veiligheid van het product aangeven, waardoor versproducten langer in het schap kunnen blijven liggen.

De toepassing van nanotech in de waterzuivering kan voor Nederland van grote betekenis zijn. Voyle verwijst naar de door het Nederlandse bedrijf Aquamarijn ontwikkelde MEMS-filtering die ook door bierbrouwer Heineken wordt gebruikt. De nanofilter vangt alles weg wat schadelijk is, maar wat gebeurt er met het filter?

Voyle vindt het debat over nanotech in de militaire sector in de VS erg opgeklopt, ook al plaatst hij dat wel in het licht van de strijd tegen het terrorisme aldaar. Nanotech ontwikkelingen in de militaire sector die hij verder noemt zijn *quiet nanoclothing* en *sensory clothing* (Levi Strauss en andere kledingfabrikanten zijn hierbij betrokken). China is erg actief op dit gebied. Voyle noemt het voorbeeld van zilverbolletjes die in textiel worden geweven waardoor het *stain proof* en kreukvrij is.

Het Nederlandse ministerie van Justitie zou zich onofficieel al aan het informeren zijn over nanotech, volgens Voyle. Het is geïnteresseerd in kleding met sensoren die bijvoorbeeld in rampensituaties snel kunnen aangeven waar de officieren en andere manschappen/hulptroepen zich bevinden: ‘*Als je radio het niet meer doet, doet je kleding het misschien nog wel*’. Ook de ontwikkeling van batterijen die lichter en langer bruikbaar zijn is interessant, want dan hoeven soldaten zo’n 15 à 18 kg minder gewicht mee te dragen. Deze ontwikkelingen vinden vooral in Amerika plaats, Nederland zal daarin volgen.

Op het gebied van de nanocoatings – Voyle verwijst naar gecoat glas van auto's en *ceramics* – vindt volgens hem een stille revolutie plaats: dit is niet sexy genoeg om in de schijnwerpers terecht te komen. Voyle noemt ook de *invisible products*, waarbij op een object coatings zijn aangebracht die het licht niet weerkaatsen.

Voyle sluit af met de opmerking dat hij verwacht dat vooral degenen die mogelijkheden op nanoschaal zien, de instrumentenmakers (Japanners en Duitsers) van de *nano rush* zullen profiteren, net als de instrumentenmakers die in het begin van de vorige eeuw het meest aan de *gold rush* verdienden: de emmers- en schoppenproducenten.

Bijlage D Casebeschrijvingen in de informatiebrochure

(1) Materialen

NANOCOMPOSITEN EN NANOCOATINGS

Bedrijven willen de prijs-kwaliteitverhouding van hun producten optimaliseren. De ontwikkeling van nieuwe materialen kan daar een belangrijke bijdrage aan leveren. Door nanodeeltjes toe te voegen aan kunststoffen kun je hun mechanische, elektrische en andere eigenschappen verbeteren. Belangrijke drijfveren zijn gewichtsvermindering (energiebesparing), vermindering van het aantal processtappen en vermindering van kosten over de levensduur, inclusief de afvalverwerking.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Bij **nanocomposieten** (samengestelde materialen) wordt onderscheid gemaakt tussen composieten van de eerste en tweede generatie. Een (bestaand) voorbeeld van eerstegeneratie-composieten wordt toegepast bij tennisballen. Tennisballen stuiten beter door nanodeeltjes klei door het rubber te mengen. Door kunststof en keramiek op nanoschaal te mengen is het binnen enkele jaren mogelijk materialen te ontwikkelen met nieuwe combinaties van eigenschappen (bijvoorbeeld hard én buigzaam).

Bij de zogeheten tweedegeneratie-composieten krijgt het materiaal specifieke functies mee, waardoor het reageert op impulsen van buitenaf. Een voorbeeld zijn kunststof bolletjes die onder invloed van een elektrisch veld hun inhoud lozen. Tweedegeneratie-composieten zullen waarschijnlijk pas na 2010 op de markt komen.

Nanocoatings worden onder meer gebruikt om het spiegelen effect van LCD-schermen tegen te gaan en gebitskronen te beschermen. Andere nanocoatings kun je gebruiken om ruiten, zo niet hele auto's vuilwerend te maken, zodat een regenbui voldoende is om ze te reinigen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van het zogeheten lotuseffect. De bladeren van de lotusbloem beschikken over uitstulpingen van nanoformaat waardoor de druppels van het blad rollen. Structuur en samenstelling maken het oppervlak vuilwerend. Binnen nu en tien jaar komen er nanocoatings op de markt die vuilaangroei op schepen weren. Het voordeel ten opzichte van huidige vuilafstotende verven is dat de coatings het water niet vervuilen. Dergelijke nanocoatings lijken ook geschikt om muren en monumenten graffiti-bestendig te maken.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: ingebed in een matrix van kunststof vormen nanodeeltjes geen gevaar voor gebruikers. Wel kunnen arbeiders er tijdens productie en verwerking aan worden blootgesteld. Over de effecten daarvan is weinig bekend. Inmiddels wordt erkend dat er behoefte is aan onderzoek op dit gebied. Ook zijn nieuwe blootstellingsnormen nodig. Het is niet alleen belangrijk dat daarbij rekening wordt gehouden met de grootte en de samenstelling, maar ook met het gedrag van de deeltjes en de specifieke wijze van blootstelling.

Afval: (nano-)composieten bestaan per definitie uit verschillende materialen, waardoor ze lastig te recyclen zijn.

NANODRADEN

Een belangrijke drijfveer achter de ontwikkeling van nanotechnologie is het streven om zo veel mogelijk transistors op een chip te persen. Om de schakelingen te verbinden zijn draden nodig met een doorsnede van één tot enkele nanometers.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Nanodraden worden op verschillende manieren gemaakt. Een van de technieken is om met AFM (Atomic Force Microscopy) moleculen van (half)geleidende kunststof aan elkaar te rijgen op het oppervlak van een microchip. Op die manier kun je verbindingen met een diameter van minder dan enkele tientallen nanometer op de microchip aanleggen. Ook wordt gebruikgemaakt van een ‘template’, een blauwdruk van bijvoorbeeld eiwitten die goud of platina kunnen binden. Op die manier kun je metaaldradjes maken met een diameter van minder dan tien nanometer.

Mogelijke risico's

Materialisme: de opeenvolging van gadgets prikkelt de koopdrift, waardoor een groeiende afvalberg van afgedankte elektronica dreigt te ontstaan.

Maakbaarheid: op de lange termijn kunnen nanodraadjes een belangrijk gereedschap worden voor wetenschappelijk onderzoek naar het functioneren van hersenen en zenuwstelsel. Omdat ze zo dun zijn, kunnen ze via de kleinste bloedvaten naar zenuw- of hersencellen worden geleid om daar de elektrische activiteit te meten. Op die manier zou je vast kunnen stellen wat voor schade een herseninfarct heeft aangericht. Omgekeerd maken de draadjes het mogelijk om bijvoorbeeld hersencellen van Parkinson-patiënten elektrisch te stimuleren en zo het ziekteverloop te vertragen. Hoewel een dergelijke toepassing niet voor 2015 te verwachten is, roept deze toepassing voor de lange termijn vragen rondom het thema maakbaarheid op. Het stimuleren van zenuw- en hersencellen hoeft niet beperkt te blijven tot therapeutische toepassingen, maar kan ook worden gebruikt om lichamelijke en cognitieve prestaties te verhogen.

NANOTECHNOLOGIE IN VERZORGINGSMIDDELEN

In de slag om de consument proberen fabrikanten van cosmetica of wasmiddelen hun producten voortdurend te verbeteren. Met nanodeeltjes kunnen ze nieuwe eigenschappen toevoegen aan cosmetica en wasmiddelen, zoals een beschermende en desinfecterende werking.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Twee werkzame stoffen van zonnebrandcrèmes zijn titaniumdioxide en zinkoxide. Deze absorberen ultraviolette straling. Om een wit waas op de huid te voorkomen, worden nanodeeltjes van deze metaaloxiden gebruikt. Die zijn namelijk doorzichtig.

Nanodeeltjes zilver werken desinfecterend en kunnen tijdens een wasbeurt van kleding worden toegevoegd. De aldus gewassen kleding is langer beschermd tegen een onaangename reuk. Dergelijke wasmiddelen kunnen vóór 2015 op de markt zijn.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: nanodeeltjes titanium- en zinkoxide in zonnebrandcrèmes zijn fotokatalytisch actief en kunnen mogelijk radicalen vormen die het DNA van huid- en onderliggende cellen beschadigen. Daarom worden dergelijke deeltjes gecoat. De coating van silicium- of aluminiumoxide lijkt niet altijd afdoende om de vorming van radicalen te voorkomen.

Milieu: nanodeeltjes van zilver verdwijnen in het riool. Hun antibacteriële eigenschappen kunnen de werking van de zuiveringsinstallatie verstoren. Die is immers gebaseerd op de inzet van micro-organismen. Of verdere verspreiding van nanodeeltjes zilver schadelijk is voor het milieu is niet bekend. Maar het is de vraag of het verspreiden van een kostbare grondstof zonder mogelijkheid van terugwinning duurzaam is.

(2) Energie en water

NANOTECHNOLOGIE IN DE ENERGIEVOORZIENING

Met duurzame energiebronnen als zon en wind kunnen industrielanden hun afhankelijkheid van fossiele energie verminderen. Motieven zijn onder meer het broeikaseffect 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 DRAAGBARE ENERGIE

Met dezelfde nanotechnieken die gebruikt worden om steeds meer transistors op een vierkante millimeter te persen, kunnen ook draagbare elektriciteitscentrales worden gemaakt. De behoefte aan mobiele microcentrales komt voort uit de groeiende energiebehoefte van mobiele telefoons, elektronische agenda's en foto- en videoalbums. Ook de militaire sector stimuleert deze ontwikkeling. De infanterist of vredeshandhaver heeft langdurig elektriciteit nodig voor communicatie in het veld, voor energievoorziening van wapens en voor detectie van explosieven en gifstoffen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Nagenoeg marktrijp zijn laptops die hun elektriciteit niet uit een accu halen, maar uit een brandstofcel (PEM, Proton Exchange Membrane). De brandstof is methanol. Nu levert een bierglas methanol nog vijf uur stroom. Maar over twee jaar verwacht men brandstofcellen die, dankzij toepassing van nanotechnologie, twee tot vijf keer efficiënter zijn.

Voor 2015 komen er systemen op de markt die elektriciteit maken op basis van lichaamstemperatuur en -beweging. Een thermo-elektrische generator op een 'chip' zet het verschil in temperatuur tussen ons lichaam en de omgeving om in elektriciteit. Ingebouwd in een armband levert een dergelijke 'centrale' nu al voldoende elektriciteit op voor een combinatie polshorloge/hartslagmeter. Nanotechnologie maakt de generator niet alleen efficiënter, maar ook – nog – kleiner, zodat je reeksen ervan kunt inweven in bijvoorbeeld een hemd of sjaal.

Lichamelijke activiteit, zoals wandelen, typen of zelfs alleen maar ademen, kan ook in elektriciteit worden omgezet. Met behulp van nanotechnologie is het nu al technisch mogelijk om een microscopische condensator te maken die trillingen omzet in elektrische lading (elektriseermachine). Een variant maakt gebruik van het piezo-elektrisch effect om beweging om te zetten in elektriciteit. Speciale kristallen kunnen onder druk elektrische spanning produceren. Een voorbeeld is de elektrische gasaansteker die een vonk produceert als je erop drukt. Met behulp van nanotechnologie zijn nieuwe soorten piezo-elektrische kristallen gemaakt, die efficiënter zijn en beter bestand tegen vocht en andere omgevingsinvloeden.

Mogelijke risico's

Stress: mobiele energie versterkt mogelijk de maatschappelijke druk om overal en altijd bereikbaar te zijn. Een bijkomend gevaar is dat informatie overal en altijd beschikbaar is, wat kan leiden tot *information overload* en de bijbehorende stress.

Veiligheid: opslag en gebruik van methanol leveren vanwege zijn brandbaarheid een veiligheidsrisico op. Ook verkeerd gemonteerde condensatoren kunnen brandgevaar opleveren.

Milieu: de beschikbaarheid van mobiele microcentrales stimuleert het energieverbruik. Omdat het voor een deel om zelf opgewekte bewegingsenergie gaat zijn de milieueffecten mogelijk beperkt. Een bijkomend effect is de groeiende afvalberg van afgedankte elektronica.

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 100 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 slurry 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.

(3) Elektronica

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 (microprocessoren) 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 verschillende 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 geëtte 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.

NANOTECHNOLOGIE VOOR INTELLIGENTE PRODUCTEN

We willen dat de technologie van mobiele telefoons, auto's, hartslagmeters en beveiligingscamera's steeds slimmer wordt, in de zin dat ze kunnen reageren op veranderingen in de omgeving of in de gemoedstoestand van de gebruiker. Dat vraagt om 'more than Moore', om méér dan zo veel mogelijk rekenkracht per vierkante millimeter. Intelligente producten hebben twee extra functies nodig: zintuigen (sensoren) om veranderingen te signaleren, en het equivalent van armen en benen (actuatoren) om actie te ondernemen. Het vermogen om structuren te bouwen op nanoschaal is een belangrijke voorwaarde voor het creëren van intelligente apparaten en een intelligente omgeving (ambient intelligence), die direct reageert op uiteenlopende behoeften en wensen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

De ontwikkeling van systemen die meerdere functies hebben, verloopt langs verschillende routes. De eerste route gaat uit van de klassieke microchip, waarin de processor wordt geïntegreerd met andere functies. Zo kun je een chip maken voor een mobiele telefoon, met een ingebakken zend- en ontvanginstallatie en zelfs een camera. In plaats van meerdere onderdelen apart te vervaardigen, worden alle functies ondergebracht in één slim ontworpen stukje silicium, ofwel *system-on-a-chip*. Deze systems-on-a-chip worden de komende jaren steeds veelzijdiger.

Het alternatief, *system-in-a-package*, zou je kunnen vergelijken met het aloude ‘printplaatje’, waarbij afzonderlijke onderdelen op een drager worden geplaatst en onderling verbonden. Een voorbeeld is het Philips-project SANDS (small, autonomous network devices): sensoren, signaalverwerking, data-opslag, krachtbron en zend- en ontvanginstallatie worden samengevoegd en verkleind tot het formaat van een zandkorrel. Of dat formaat voor 2015 wordt gerealiseerd is de vraag, maar dat systems-in-a-package veel kleiner worden is wel duidelijk.

Behalve tot de steeds veelzijdigere mobiele telefoons leiden genoemde technieken de komende jaren tot allerlei toepassingen. Een van de voorbeelden die voor 2015 kunnen worden gerealiseerd, is een creditcard die via een draadloze verbinding met de bank alle uren van de dag je saldo laat zien. Een ander voorbeeld is een micro-beamer, waarmee je vakantiefoto’s en video’s op een velletje papier kunt laten zien. Voor 2015 zullen waarschijnlijk ook overal beveiligingscamera’s hangen die automatisch verdacht gedrag signaleren.

Mogelijke risico’s

Privacy: om goed te kunnen functioneren, moeten intelligente apparaten en systemen veel weten van hun gebruiker. Dat kan uiteenlopen van de temperatuur van zijn badwater tot zijn nieuwsvoorkeur of rijstijl. De vraag is hoe je deze gegevens kunt beschermen; niet alleen tegen de nieuwsgierigheid van hackers, maar ook tegen al te nieuwsgierige bedrijven en instanties.

Afhankelijkheid: naarmate apparaten intelligenter zijn, worden we steeds afhankelijker van hun functioneren. Als je bijvoorbeeld gewend bent aan het rijden met ‘traction control’ (automatische stabiliteit), loop je meer kans uit de bocht te vliegen als deze een keer uitvalt.

Aansprakelijkheid: een toenemende intelligentie van apparaten werpt de veelal nog onbeantwoorde vraag op: wie is verantwoordelijk voor een door een machine genomen beslissing?

(4) Gezondheid

NANOTECHNOLOGIE VOOR LAB OP POSTZEGELFORMAAT

In de gezondheidszorg is behoefte aan apparatuur die direct of binnen een paar uur een diagnose kan stellen. Dit is een belangrijke drijfveer voor de ontwikkeling van een *lab-on-a-chip*, een laboratorium voor (bio-)chemische analyses. Nu hebben deze nog de grootte van een credit card, maar binnenkort van een vingernagel. Het Human Genome-project en het daaruit voortvloeiend onderzoek naar de functie van genen stimuleert de ontwikkeling van labs-on-a-chip. Een bijzondere variant daarvan is de DNA-chip, die ook kan worden gebruikt voor medische diagnose. Nanotechnologie, en dan vooral de lithografische technieken uit de chiptechnologie, maken het lab-on-a-chip kleiner, sneller, veelzijdiger en goedkoper.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Met een lab-on-a-chip is het mogelijk biochemische metingen uit te voeren, bijvoorbeeld voor een 'point of care'-diagnose: de verpleegkundige naast het bed of de dokter die in zijn spreekkamer snel een aantal bloedparameters meet, zoals het zuurstof-, ijzer- en glucosegehalte. Met een DNA-chip kun je bijvoorbeeld binnen enkele uren vaststellen of leidingwater actieve legionellabacteriën bevat of dat er miltvuurbacteriën in de postkamer aanwezig zijn. Dergelijke DNA-chips zijn nu nog experimenteel. Inmiddels is er wel een DNA-chip ontwikkeld waarmee je aan de hand van de ademlucht tuberculose kunt vaststellen.

DNA-chips of micro-arrays worden ook gebruikt voor genetisch onderzoek bij mensen. In Nederland is een chip ontwikkeld die uitsluitsel geeft over de vraag of chemotherapie al dan niet zinvol is bij het bestrijden van borstkanker. Op termijn (voor 2015) denkt men vast te kunnen stellen wat de meest geschikte chemotherapie is voor elk individu. DNA-chips moeten het mogelijk maken om iemands genetische predispositie te bepalen voor de effectiviteit van medicijnen of voor aandoeningen zoals hart- en vaatziekten, kanker of depressie.

Mogelijke risico's

Medicalisering: de mogelijkheid om thuis over apparatuur te beschikken die bloed en andere lichaamsvloeistoffen eenvoudig kan analyseren, versterkt wellicht de tendens tot medicalisering. Waar je je vroeger ziek of gezond voelde, geeft nu het apparaat aan of er iets mis is. De vraag is op welke wijze patiënten daar mee om zullen gaan.

Zeggenschap: (genetische) zelftesten lijken te leiden tot democratisering van het zorgproces en versterking van de autonomie van patiënten. Bezitten patiënten genoeg kennis om met dergelijke testen om te gaan zonder deskundig advies? Welke rol gaan dokters spelen in een dergelijke situatie?

NANOTECHNOLOGIE VOOR HET OPSPOREN VAN TUMOREN

Er is grote behoefte aan snelle en betrouwbare methoden om tumorcellen in een vroeg stadium op te sporen. Een combinatie van nanodeeltjes en beeldvormende technieken maakt het mogelijk om gericht en met grote gevoeligheid tumoren op te sporen. Het gaat zowel om het analyseren van weefselmonsters in laboratoria (in vitro), als om beeldvorming van tumoren in het lichaam (in vivo). Gericht opsporen is van belang om tumoren vroegtijdig te kunnen detecteren. Een grotere gevoeligheid is belangrijk om eventuele uitzaaiingen (metastasen) op te sporen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

In klinische laboratoria worden vele weefselmonsters, onder meer afkomstig van uitstrijkjes of verwijderde moedervlekken, onderzocht op de aanwezigheid van kankercellen. Als je die cellen selectief voorziet van een biomarker, kun je het zoeken automatiseren en zo tumorcellen sneller en nauwkeuriger opsporen. Een voorbeeld van zo'n biomarker is een nanodeeltje van goud, dat aan een eiwit is gekoppeld dat zich specifiek hecht aan een tumorcel. De gouddeeltjes flonkeren zodanig dat de kankercellen oplichten onder een gewone microscoop. Eventueel kan deze techniek ook in vivo worden gebruikt. Voor analyse van weefselmonsters kan de techniek binnen tien jaar bruikbaar zijn. Toepassingen in vivo zijn, mede door langdurige toelatingsprocedures, binnen tien jaar niet te verwachten.

Een ander voorbeeld zijn superparamagnetische nanodeeltjes op basis van ijzeroxide. Deze 'USPIO's' (ultrasmall superparamagnetic iron oxides) worden nu al klinisch onderzocht en zijn met succes toegepast voor de gevoelige detectie van metastasen bij patiënten met borstkanker. Het contrastmiddel Sinerem van de Franse leverancier Guerbet bestaat uit ijzeroxidedeeltjes van 20 nanometer met een mantel van dexraan, een polysaccharide. Het Amerikaanse bedrijf Advanced Magnetics heeft een vergelijkbaar product ontwikkeld onder de naam Combidex.

Hoge verwachtingen zijn er ook van zogeheten quantumdots. Dit zijn kristallen van halfgeleidermateriaal die nu al worden gemaakt. Ze zijn zo klein dat de optische, magnetische en elektrische eigenschappen worden bepaald door grootte en vorm. Een kristal van zes nanometer fluoresceert rood licht, terwijl een kristal van hetzelfde materiaal, maar dan drie nanometer in doorsnede, groen fluoresceert. Als je quantumdots hecht aan eiwitten of DNA, kun je processen in cellen en organen ongekend gedetailleerd zichtbaar maken. Vooralsnog blijft dat beperkt tot onderzoek in het laboratorium. Klinisch gebruik van nanodeeltjes om in een vroeg stadium in het lichaam tumoren op te sporen zal, door de langdurige toelatingsprocedures, nog wel meer dan tien jaar op zich laten wachten. Dat geldt zeker ook voor therapeutische toepassingen, zoals het verhitten van nanomagneetjes om tumorcellen te vernietigen.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: afgezien van genoemde nanodeeltjes ijzeroxide is over het gedrag van nanodeeltjes in het lichaam weinig bekend. Dat aspect is vooral relevant bij in vivo beeldvorming en zal in de toelatingsprocedure een belangrijk punt van aandacht zijn. Quantumdots worden vaak gemaakt van zware metalen zoals cadmium en lood, hoewel ook zink en silicium worden gebruikt.

Medicalisering: op dit moment is nog niet duidelijk of een opgespoorde afwijking met zekerheid zal leiden tot tumor. Het lichaam kan namelijk ook zelf de afwijking herstellen of neutraliseren. Hoe vroeger de diagnose, hoe onduidelijker de relatie tussen afwijking en gezondheidseffect. Zorgvuldige analyse van de klinische betekenis van de biomarker waarop de vroege diagnose plaatsvindt kan die onzekerheid verminderen, maar niet uitsluiten.

NANOTECHNOLOGIE VOOR 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.

NANOTECHNOLOGIE VOOR MONITOREN VAN LICHAAMSFUNCTIES

De vergrijzing van de samenleving en de wens van ouderen om zo lang mogelijk zelfstandig te blijven schept een markt om lichaamsfuncties te monitoren. Zowel voor de oudere zelf als voor zijn familie kan controle op de vaak fragiele gezondheid geruststellend werken. Overigens richt men zich in de gezondheidszorg ook bij jongere mensen steeds meer op preventie. Een andere belangrijke drijfveer is het waarborgen van de veiligheid van mensen die moeten overleven in een vijandige omgeving, zoals militairen, duikers en brandweerlieden. In dit soort beroepen mag veiligheid wat kosten. Hetzelfde geldt voor sporters, die bereid zijn om voor een seconde sneller, of een centimeter hoger, het uiterste van hun lichaam te eisen. Nanotechnologie maakt het mogelijk om biosensoren kleiner, goedkoper en veelzijdiger te maken, waardoor ze vaker kunnen worden ingezet voor het monitoren van lichaamsfuncties.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Biosensoren vormen een brug tussen biologische systemen zoals het menselijk lichaam en informatieverwerkende systemen. Een klassieke biosensor is de hartslagmonitor, in gebruik bij zowel hartpatiënten als duursporters. Nanotechnologie maakt het mogelijk om wat nu nog een band om je borstkas is – met batterijen – te verkleinen tot een plakkertje, dat zijn energie haalt uit de ademhalingsbeweging van je borstkas (zie Nanotechnologie voor draagbare energie). Binnen afzienbare tijd zijn er moleculaire biosensoren op de markt die de samenstelling van je ademlucht meten, evenals de hoeveelheid en samenstelling van transpiratievocht. Het gehalte aan stikstofmonoxide in ademlucht is een aanwijzing voor stress. Net als bij de DNA-chip gaat het hierbij om sensoren die zijn voorzien van biologisch materiaal, eiwitten bijvoorbeeld, waarmee een specifieke moleculaire binding tot stand wordt gebracht.

Een LifeShirt is een vest met klassieke biosensoren die hartslag, ademhaling en bloeddruk meten, desgewenst aangevuld met sensoren voor hoesten, hersenactiviteit en lichaamstemperatuur. Het LifeShirt is reeds in gebruik bij Amerikaanse ziekenhuizen. Dankzij nanotechnologie zal het formaat de komende jaren worden verkleind tot een (pols)-computer of misschien zelfs tot een pleister. De gegevens over de verschillende lichaamsfuncties worden draadloos doorgegeven aan een ziekenhuis of – in geval van sporters – aan de sportmedisch begeleider. Deze variant van een ‘body area network’ is ook van belang voor mensen die zich in gevaarlijke omstandigheden bewegen, zoals duikers, brandweerlieden en militairen. Zij kunnen tijdig worden teruggehaald, mochten een of meerdere parameters een kritische grens bereiken.

Mogelijke risico's

Privacy: alleen al het beschikbaar zijn van gegevens over lichaamsfuncties kan de privacy aantasten, bijvoorbeeld doordat een verzekeringsmaatschappij, het openbaar ministerie of een andere instantie dergelijke gegevens kan opeisen. Het al dan niet draadloos versturen van gegevens maakt het mogelijk om die gegevens te onderscheppen en eventueel te misbruiken.

Medicalisering: continue monitoring van lichaamsfuncties maakt de patiënt in toenemende mate afhankelijk van geavanceerde en daarmee kwetsbare infrastructuur. Wat zijn de consequenties en wie neemt die voor zijn rekening wanneer langdurig de stroom uitvalt? Daarnaast wordt gevreesd dat mensen het contact met hun lichaam zullen verliezen. Er zijn diabetespatiënten die heel goed hun eigen insulineniveau kunnen aanvoelen en op grond daarvan de juiste handelingen verrichten. Wanneer die controle wordt geëxternaliseerd door monitoring met sensoren zal die zelfkennis mogelijk verloren gaan.

Zeggenschap: biosensoren maken decentralisering van de gezondheidszorg mogelijk. De patiënt of burger krijgt meer technische middelen in handen om *zelf* zijn gezondheid in de gaten te houden en te ‘managen’. Dat bevordert de zelfstandigheid, mobiliteit en de (zelf)zorg-op-maat, met – vermoedelijk – een beperking van de kosten van de gezondheidszorg. Dit lijkt in een ontwikkeling te passen waarin er door professionals (huisartsen, wijkverpleegkundigen) steeds minder zorg wordt gegeven. De keerzijde ervan is dat de zorg van karakter zal veranderen, het menselijk contact gaat verloren en de rol van de huisarts als de mentale raadgever, die medische feiten in het juiste perspectief kan plaatsen, verdwijnt.

NANOTECHNOLOGIE VOOR NIEUWE IMPLANTATEN

De steeds ouder wordende bevolking in rijke landen langer ‘op de been’ houden is een belangrijke stimulans om technieken te ontwikkelen die versleten of kapotte lichaamsonderdelen kunnen vervangen of die functiebeperkingen kunnen compenseren. Nanomaterialen en technieken spelen een belangrijke rol bij de ontwikkeling van implantaten die zieke of versleten lichaamsonderdelen kunnen ondersteunen of vervangen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

De huidige heup- en knieprothesen bestaan uit metaal en kunststof en worden met botcement (tweecomponentenlijm) aan bot gehecht. Soms worden ze voorzien van een laagje hydroxy-apatiet, waar het bot in kan groeien. De levensduur van gewrichtsimplantaten is desondanks beperkt. Een alternatief materiaal dat waarschijnlijk binnen tien jaar op de markt is, is een nanocomposiet (zie ook Nanocomposieten) van keramiek en kunststof. Dit combineert hardheid met buigzaamheid. Je kunt daarmee bijvoorbeeld een kunstheup maken via *rapid prototyping*, een techniek waarbij een driedimensionaal computerbeeld rechtstreeks wordt omgezet in een driedimensionaal product.

Een andere mogelijkheid is om alleen een steiger te bouwen waarin nieuw bot- of kraakbeenweefsel kan groeien. Recentelijk is gebleken dat koolstofnanobuizen (moleculen die eruitzien als opgerold kippengaas en bestaan uit vele tientallen koolstofatomen) prima steiger materiaal zijn.

Behalve bot en kraakbeen is het ook mogelijk om zenuwweefsel (neuronen) van ratten en muizen te laten groeien op nanogestructureerde oppervlakken. In eerste instantie kan op die manier de werking van zenuwcellen worden bestudeerd. Op lange termijn, maar dat is pas na 2015, kan de techniek mogelijk worden benut om, in vivo, neuronen te laten groeien of te herstellen.

Implantaten kunnen ook worden gebruikt om fysiologische functies te ondersteunen of te vervangen. Een bekend voorbeeld is de pacemaker, die dankzij nanotechnologie steeds kleiner en intelligenter wordt. Naarmate elektronische componenten kleiner worden, zou je externe hulpmiddelen, zoals hoorapparaten en CCD's (de beeldvormende chip in digitale camera's) in het lichaam kunnen inbouwen.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: lichaamsvreemde stoffen inbrengen is niet zonder risico en is dan ook onderhevig aan strenge toelatingsprocedures. In het geval van nanomaterialen is nog weinig bekend over mogelijke toxische effecten, zeker als implantaten langere tijd in het lichaam aanwezig zijn.

Maakbaarheid: implantaten die menselijke functies geheel of gedeeltelijk kunnen overnemen, leiden tot vragen over maakbaarheid van het lichaam. Niet zozeer als ze worden toegepast om zieke of versleten lichaamsdelen te vervangen, wel als de implantaten worden gebruikt om prestaties (sport, slagveld) te verhogen.

(5) Voedsel

NANOTECHNOLOGIE VOOR INTELLIGENTE EN ACTIEVE VERPAKKINGEN

Zogeheten actieve verpakkingen houden producten langer houdbaar in de koelkast: ze gaan daardoor bederf tegen en bevorderen de smaak. Daarmee hebben ze een positieve invloed op de kwaliteit van verpakte levensmiddelen. De ontwikkeling van dergelijke verpakkingen wordt gedreven door de vraag naar verse en mild geconserveerde levensmiddelen. Nanotechnologie speelt een rol bij actieve en intelligente verpakkingen. Intelligente verpakkingen laten zien wie het product heeft gemaakt, maar geven ook een indicatie van wat er met het product is gebeurd op weg van producent naar klant. De ontwikkeling ervan vloeit voort uit de schaalvergroting in productie, verwerking en distributie van levensmiddelen. Door deze ontwikkeling wordt vertrouwen vervangen door (gecertificeerde) systemen die kwaliteit objectief toetsen en vastleggen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Een voorbeeld van een actieve verpakking is folie met aan de binnenzijde nanodeeltjes zilver. De nanodeeltjes remmen de groei van bacteriën en schimmels, waardoor bijvoorbeeld verse aardbeien langer houdbaar blijven. Deze actieve verpakking zou binnenkort op grote schaal kunnen worden toegepast. Behalve van zilverdeeltjes kun je de binnenzijde van de verpakking ook voorzien van conserveermiddelen. Verpakt in nanobolletjes zetmeel trekken zij micro-organismen aan en maken hen onschadelijk. Toepassing van dit soort verpakkingen is waarschijnlijk voor 2015 te verwachten, al moeten daarvoor nog wat wettelijke horden worden genomen. In het laboratorium is aangetoond dat je enzymen kunt toevoegen aan een verpakking om de smaak van bijvoorbeeld vruchtensappen te verbeteren. Ook deze toepassing kan binnen nu en tien jaar realiteit zijn.

Met een intelligente verpakking is het bijvoorbeeld mogelijk de temperatuurhistorie van een product aan te geven. Momenteel zijn er verpakkingen in omloop die dit doel met een andere (chemische) techniek bereiken, bijvoorbeeld voor vlees en groente, en voor vaccins. Dankzij nanotechnologie is het binnen nu en tien jaar mogelijk de temperatuurhistorie te registreren met eenmalige, goedkope sensoren. Ook andere parameters die de versheid van het product beïnvloeden, zoals bacteriegroei en ethyleenproductie (bij fruit) kunnen binnenkort op die manier worden vastgelegd.

RFID (Radio Frequency IDentification) wordt gebruikt in kleine elektronische labels (*tags*) die een unieke code combineren met een antenne en bijgevolg signalen kunnen ontvangen en terugsturen. Daardoor kunnen producten herleid worden tot de oorspronkelijke producent. Dankzij nanotechnologie worden RFID-tags nog kleiner en goedkoper, zodat – bij wijze van spreken – van elke tomaat kan worden nagegaan in welke kas hij is gekweekt en door wie hij is geplukt.

Mogelijke risico's

Toxiciteit: in principe hebben actieve en intelligente verpakkingen als doel de hygiëne in de levensmiddelenketen te verbeteren. Het risico op het consumeren van bedorven en microbiëel besmet voedsel wordt daardoor kleiner. Omgekeerd kunnen nanodeeltjes in of op de verpakkingfolie mogelijk ook terechtkomen in het voedsel zelf, met nog onbekende effecten voor de gezondheid. Naarmate RFID-tags kleiner worden, groeit de kans dat ze over het hoofd worden gezien en onbedoeld worden geconsumeerd.

Milieu: nanodeeltjes zilver of metaaloxiden in verpakkingen en RFID-tags kunnen na gebruik in het milieu terechtkomen. De aanwezigheid van deze nanodeeltjes kan hergebruik van verpakkingsafval bemoeilijken.

Privacy: RFID-tags maken het mogelijk de herkomst van een product te herleiden, maar eventueel ook degene die het heeft gekocht. Dat biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid klanten te waarschuwen voor eventuele gebreken of voortijdig bederf. De informatie kan ook worden gebruikt om het koopgedrag van individuele klanten in kaart te brengen.

Winkeliers kunnen deze gegevens bijvoorbeeld benutten voor gerichte promotie. Voor politie en justitie kan deze informatie bijvoorbeeld nuttig zijn om semilegale import van grondstoffen of andere goederen tegen te gaan.

Informatievoorziening: informatie op en over hightechverpakkingen kan botsen met de strategie van veel levensmiddelenproducenten om hun producten een natuurlijk en ambachtelijk imago mee te geven.

NANOZEVEN VOOR LEVENSMIDDELEN

Het maken van levensmiddelen bestaat voor een belangrijk deel uit het scheiden en weer mengen van ingrediënten. Gebruik van micro- en nanozeven maakt nieuwe vormen van zowel scheiden als mengen mogelijk. Deze ontwikkeling wordt gedreven door de behoefte aan compacte, energiezuinige en milieuvriendelijke procesttechnologie. Bovendien schept zij mogelijkheden in de voortdurende concurrentiestrijd van producenten om nieuwe producten te lanceren.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Klassieke membranen zijn relatief dik en niet erg poreus. Ook vertoont de grootte van de poriën een forse spreiding. Dankzij lithografische technieken die tevens worden gebruikt bij de fabricage van microchips is het mogelijk om micro- en nanozeven te maken die dun zijn, zeer poreus en voorzien van poriën die allemaal precies even groot zijn (zie ook Nanotechnologie voor drinkwater).

Momenteel worden microzeven gebruikt om gistcellen uit bier te zeven. Binnen nu en een paar jaar worden zeven op de markt verwacht die, in tegenstelling tot koude sterilisatie, micro-organismen uit melk en vruchtensappen kunnen halen zonder de smaak te beïnvloeden. Dergelijke zeven kunnen worden gebruikt om stabiele emulsies te maken van olie en water. Binnen enkele jaren is het mogelijk mayonaise en sladressings te maken die bestaan uit met water gevulde vetbolletjes in water. Ze smaken net zo lekker en voelen hetzelfde aan, maar ze bevatten veel minder calorieën. In plaats van met water kun je de vetbolletjes ook vullen met geur- en smaakstoffen. Je kunt daarmee een geconserveerd product laten smaken als een vers product. Tijdens het kauwen komen de ‘verse smaak’-stoffen vrij. Dergelijke smaakstoffen kunnen – afgezien van eventuele wettelijke belemmeringen – op korte termijn aan levensmiddelen worden toegevoegd.

Mogelijke risico's

Globalisering: koude sterilisatie maakt een product als melk langer houdbaar, zonder de smaak aan te tasten. Waar dagverse melk nu nog binnen de landsgrenzen wordt geproduceerd en geconsumeerd, kan dagverse melk binnenkort mogelijk uit Polen worden aangevoerd. In combinatie met het verdwijnen van quoteringsregels en subsidies zou dat kunnen leiden tot enorme geografische verschuivingen in de productie, verwerking en distributie van melk en melkproducten.

Vervreemding: naarmate ketens langer worden, groeit de vervreemding met de oorsprong van het product. Consumenten hebben vaak geen idee meer wat er in een product zit en waar het vandaan komt. Ook structuur en inhoud van voedingsmiddelen worden onzichtbaar, zodat de consument niet meer weet wat hij eet.

Gezondheid: het gebruik van vetvervangers is een gemakkelijke manier om overgewicht tegen te gaan, zonder een al te ingrijpende verandering van leefstijl en eetpatroon.

(6) Militair

NANOTECHNOLOGIE VOOR DEFENSIE EN VEILIGHEID

Vooraf sinds de terroristische aanslagen van '9/11' is binnenlandse veiligheid (*homeland security*) een belangrijke drijfveer om (bio-)sensoren te ontwikkelen die explosieven, zenuwgas en biologische wapens kunnen opsporen. Hetzelfde geldt voor de ontwikkeling van technieken om iemands identiteit vast te stellen. Eerder al zag de krijgsmacht mogelijkheden om met nanotechnologie soldaten op het slagveld te beschermen en nieuwe wapensystemen te ontwikkelen.

Verwachte technologische ontwikkelingen

Om aanslagen te voorkomen is er grote behoefte aan goedkope sensoren om snel grote stromen mensen en goederen te screenen op de aanwezigheid van verschillende soorten explosieven en zenuwgassen. Het gaat om *sniffers* die zo gevoelig zijn dat ze stoffen in concentraties van enkele moleculen per kubieke meter kunnen meten. Met de huidige generatie sensoren is dat (nog) niet mogelijk. Wel wordt gewerkt aan de ontwikkeling van geurreceptoren, bijvoorbeeld van insecten, gekoppeld aan een microchip voor signaalverwerking en alarmering. Of deze voor 2015 in gebruik zullen zijn, is niet te zeggen. Wat de opsporing van biowapens betreft (bacteriën, virussen) zouden DNA-chips (zie ook 'lab-on-a-chip') goede diensten kunnen bewijzen, omdat het gaat om organismen die DNA bevatten. Probleem is dat ze niet binnen één of enkele seconden uitsluitel geven. Of dat voor 2015 wel het geval zal zijn, is moeilijk te zeggen.

Zowel geursensoren als DNA-chips zijn in principe nuttig op het slagveld om soldaten te waarschuwen voor een aanval met chemische of biologische wapens. Sensoren kunnen ook worden gebruikt om op basis van ademlucht of transpiratievocht vast te stellen of soldaten nog (kunnen) functioneren. Naar verwachting zullen dergelijke sensoren voor 2015 beschikbaar zijn. Dat geldt ook voor speciale kleding, gemaakt van de M5-textielvezel, die door DuPont wordt ontwikkeld. Het bijzondere is dat deze kleding pas verstijft als een kogel of scherf inslaat, en zo de drager beschermt. Er is daardoor veel meer bewegingsvrijheid dan bij de huidige generatie scherfwerende vesten.

Een ander soort bescherming wordt geboden door kleding die zich actief aanpast aan de achtergrond (camouflage) en kleding die op commando medicijnen of ontsmettingsmiddelen loslaat. Die toepassingen worden waarschijnlijk pas na 2015 gerealiseerd. Kleding die data opslaat en uitwisselt zal waarschijnlijk wel voor die tijd beschikbaar zijn. In alle gevallen is ook op het slagveld grote behoefte aan draagbare energievoorziening (zie ook Nanotechnologie voor draagbare energie).

Nanotechnologie maakt het mogelijk om onbemande vliegtuigen vergaand te verkleinen. Deze vliegtuigen worden ingezet voor verkenningsvluchten, maar ook om tegenstanders uit te schakelen. Militair geïnspireerd onderzoek is erop gericht om deze UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) te verkleinen tot uiteindelijk het formaat van een insect. Naast verkenning kun je denken aan *killer wasps*, vliegende robots, die tegenstanders uitschakelen met – overigens illegale – chemische en biologische wapens. Van deze en

andere genoemde voorbeelden is niet duidelijk of, en zo ja wanneer, ze ooit werkelijkheid zullen worden.

Mogelijke risico's

Veiligheid: detectiesystemen om explosieven en chemische wapens op te sporen, kunnen een vals gevoel van veiligheid creëren. Potentiële aanslagplegers zullen namelijk op zoek gaan naar mogelijkheden om detectie te omzeilen. Dit kan bijvoorbeeld door het inzetten van moleculair vergelijkbare stoffen die de sensor overvoeren. Ook laksheid, bijvoorbeeld vanwege een te groot aantal vals-positieven, kan een veiligheid suggereren die er niet is.

Schending van internationale verdragen: de inzet van biologische en chemische wapens ondermijnt internationale verdragen. De 'killer robots' vormen een aantasting van het oorlogsrecht.

Destabilisatie: kleine, precisiegeleide wapens kunnen worden gebruikt om verwarring te zaaien in potentiële conflictgebieden en zo een oorlog uitlokken.

Criminaliteit: biologische en chemische stoffen, sensoren en robots kunnen in handen vallen van criminelen.

Nieuwe wapenwedloop: leiden grote investeringen in militaire nanotechnologie tot een nieuwe wapenwedloop?

Maakbaarheid van de mens: nanotechnologie wordt niet alleen ingezet om de veiligheid te vergroten, maar ook om prestaties van gevechtssoldaten te verhogen (*invincible warriors*). Dit zal ongetwijfeld ethische vragen over de relatie tussen mens en machine gaan oproepen.