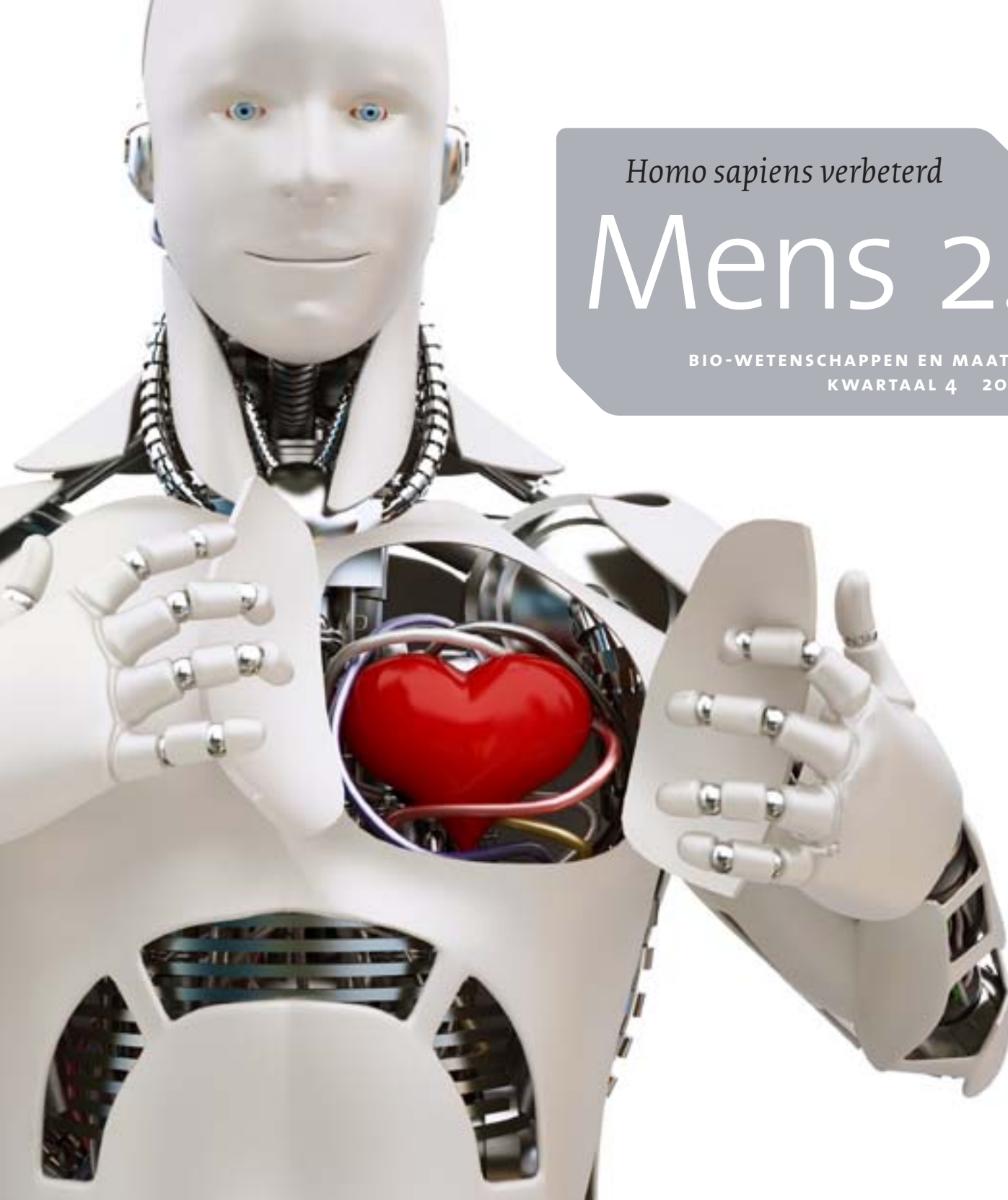




Homo sapiens verbeterd

Mens 2.0

BIO-WETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ
KWARTAAL 4 2011 € 6,-

Mens 2.0

Het cahier is een uitgave van Stichting Bio-Wetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt vier maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij de Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).

BESTUUR

Prof. dr. E. Schroten (voorzitter), J.F.B.C.D. van Oranje M.Sc. MBA (vicevoorzitter), dr. J.J.E. van Everdingen (penningmeester), dr. A. van der Auweraert, prof. dr. J.M. van den Broek, prof. dr. J.T. van Dissel, prof. dr. W.P.M. Hoekstra, prof. dr. J.A. Knottnerus, prof. dr. N.M. van Straalen

RAAD VAN ADVIES

Prof. dr. P. van Aken, prof. dr. D. van Bekkum, prof. dr. J.P.M. Geraedts, prof. dr. J. Osse

REDACTIE

Dr. A. van der Auweraert, prof. dr. J.M. van den Broek, prof. dr. W.P.M. Hoekstra, ir. Rob Buiters (eindredacteur)

BUREAU

Drs. Saskia van Driel

BEELDEDIRECTIE

B en U international picture service, Diemen

VORMGEVING

Studio Bassa, Culemborg

DRUK

Drukkerij Tesink, Zutphen

INFORMATIE EN

BESTELLINGEN

Stichting Bio-Wetenschappen en Maatschappij
Postbus 93402
2509 AK Den Haag
telefoon: 070 – 34 40 792
e-mail: bwm@nwo.nl
www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM

ISBN/EAN 978-90-73196-64-3

Stichting BWM heeft zich ingespannen om alle recht-hebbenden van de illustraties in deze uitgave te achterhalen. Mocht u desondanks menen rechten te kunnen laten gelden, dan verzoeken wij u vriendelijk om contact met ons op te nemen.



Bio-Wetenschappen
en Maatschappij

Inhoud

Voorwoord 2

Inleiding 4

1 Nooit meer leren 7

Geen feitjes, wel context 8

Associëren kun je leren 10

De evolutie van creatieve computers 14

2 Nooit meer werken 23

Robots naar model van de mens 24

Waarnemen-denken-doen 26

Lerende robots 30

Van het lab naar het huishouden 32

3 Nooit meer ziek 41

Vroege signalen van borstkanker 42

Klein nanomedicijn, groot spoorzoeker 47

A phonecall a day keeps the doctor away 51

4 Nooit meer oorlog 59

Dromen en nachtmerries van een autonome militaire robot 60

Grenzen aan de autonomie 63

Meer informatie 72

Auteurs 74

Illustratieverantwoording 75

Voorwoord

WAT IS technologie? Een van mijn favoriete definities is: alles wat na je geboorte is uitgevonden. Inderdaad heb ik zelf, afkomstig van jaargang 1960, nooit de telefoon, de radio of de televisie als technologie gezien. Ze waren er gewoon. Mijn kinderen vinden op dezelfde wijze de computer, de mobiele telefoon of het internet vanzelfsprekend. Maar wat zullen mijn kleinkinderen natuurlijk vinden? Het is in ieder geval opvallend hoe gemakkelijk we vertrouwd raken met nieuwe apparaten.

Een andere definitie van technologie is: alles wat niet werkt. Bij vernieuwing hoort namelijk onzekerheid. Technologie ontwikkelt zich met vallen en opstaan. Juist aan het begin gaat het razendsnel. Soms lijkt het alsof de belangrijkste ontdekkingen al gedaan zijn. Er is een bekende cartoon waar twee oermensen tegen de wand van hun grot leunen. De ene verzucht: "Og ontdekte het vuur en Thorak het wiel. Er blijft voor ons niets over." Niets is minder waar. Er zijn nog oneindig veel nieuwe dingen te ontdekken en uit te vinden.

Een derde definitie van technologie is: de stille kracht die onze natuur en cultuur vormt. Het is moeilijk te geloven, maar in de laatste driehonderd jaar is de levensverwachting bij geboorte van de Nederlander verdrievoudigd, met name door de enorme vermindering van kindersterfte. Nieuwe medische kennis is daarvoor verantwoordelijk, variërend van hoog geavanceerde medicijnen tot eenvoudige ingrepen als persoonlijke hygiëne. Daarmee zijn wetenschap en technologie hoofdrolspelers van de geschiedenis. Ze vallen

gemakkelijk weg tussen de koningen, oorlogen en ontdekkingsreizen, maar bijna ongemerkt veranderen ze ingrijpend het persoonlijk leven en de maatschappij.

We staan aan de vooravond van een periode waarin nieuwe technologie wel erg dichtbij zal komen en letterlijk in ons zal gaan zitten. We zien de versmelting van twee werelden, die van de (nano)technologie en die van de biologie. De mens is in staat om materie atoom voor atoom naar zijn hand te zetten. Nieuwe 'designermaterialen' worden ontworpen om alle denkbare eigenschappen te hebben. Tegelijkertijd begrijpen we steeds beter de moleculaire basis van het leven en de complexe chemie binnen een cel. Op het moment dat deze twee werelden volledig versmelten zal de wetenschap niet alleen in staat zijn onze leefomgeving ingrijpend te veranderen, maar ook ons zelf. Het is wel denkbaar dat we in de toekomst allerlei technologische toevoegingen op en in ons lichaam dragen, die ons helpen beter te functioneren. Omgekeerd kunnen apparaten en robots steeds slimmer worden en vele taken van ons overnemen. Daarmee vervaagt de grens tussen de mens en de technologie.

Dergelijke ontwikkelingen roepen vele vragen op. Zoals altijd, zijn er twee kanten aan technologie, een verlichte en een donkere kant. Nieuwe kennis kan zowel ten goede als ten kwade worden gebruikt. Het is daarom van het allergrootste belang dat de burger goed wordt voorgelicht over de stand van zaken en de mogelijke toekomstige ontwikkelingen, inclusief alle uitdagingen en risico's. Maar dat de wereld en ook de mens gaat



veranderen is duidelijk. Al meer dan vier miljard jaar evolueert het leven op aarde. Het heeft deze planeet onherkenbaar veranderd. De mens heeft dit proces alleen maar versneld. Versie 2.0 van de mens mag binnenkort verschijnen, niemand kan nog bijhouden welke versie van het leven we hebben.

Robbert Dijkgraaf
President van de Koninklijke Nederlandse
Akademie van Wetenschappen

Inleiding

WIE DROOMT soms niet van een 'brave new world'? Een wereld waarin de mens afrekent met ziektes, waar het saaie en smerige werk door machines wordt gedaan en waar oorlogen niet meer bestaan. Een wereld ook waarin de woorden van de dichter Hiëronymus van Alphen (1746-1803) eindelijk waar worden: "Mijn leren is spelen, mijn spelen is leren, en waarom zou mij dan het leren vervelen".

Zo'n wereld van nooit meer leren, nooit meer werken, nooit meer ziek en nooit meer oorlog zal er niet komen. Maar met de technologieën die overal opduiken kunnen we ons leven wel op een nieuwe wijze vormen. Het fascinerende van de nieuwe technologieën is dat ze ons in staat stellen dieper door te dringen in ons lichaam en haar onderdelen zoals het brein, de tumorcel en het DNA, en dat tot op moleculaire schaal. Door bundeling van nieuwe technologieën kunnen we, tot op zekere hoogte nu al, functies van het menselijk lichaam gericht sturen en overnemen. De luchtmacht van de Verenigde Staten leidt bijvoorbeeld nu al meer robots op voor gevechtsacties dan piloten.

Convergerende technologieën

De basis van dit cahier is gelegen in wat met een modieuze term meestal converging technologies worden genoemd. Convergerende, dus samenkommende technologieën die als combinatie meer worden dan de som der delen. Mensverbeteringstechnologie is bij uitstek zo'n product van convergerende technologieën. In de antwoorden op de

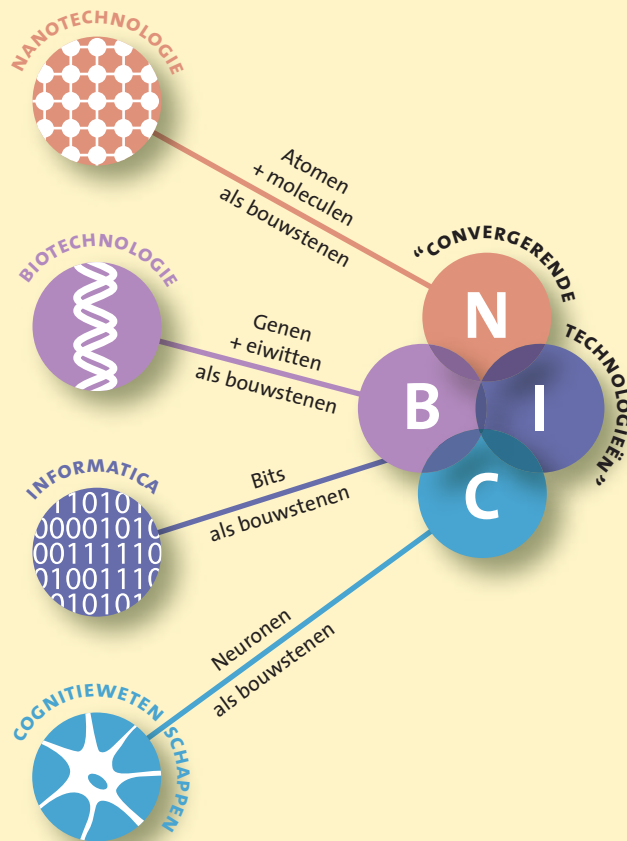
vraag hoe de mens door technologie verbeterd kan worden komen informatietechnologie, nanotechnologie, biotechnologie en cognitiewetenschappen samen.

Door dat samengaan van verschillende disciplines worden de implicaties van de mensverbeteringstechnologie ook minder grijpbaar. Hebben we een goed idee over de reikwijdte van de zich snel ontwikkelende informatietechnologie en de invloed daarvan op ons leven? Gaan gevoelige sensoren gebaseerd op nieuwe fysische en fysiologische technologieën onze gezondheid bewaken? Komt er een nieuwe gezondheidszorg gebaseerd op personalized medicine? Gaan de baby's anno 2050 hun leven in met een genenpaspoort als richtsnoer voor hun leven?

Met dit cahier willen we een aantal van de perspectieven schetsen. Leidraad daarbij is de reële technologie van vandaag, niet de science fiction zoals die misschien morgen te zien zal zijn. Al permitteren we ons aan het begin van ieder hoofdstuk wel een vergezicht zoals dat misschien achter de horizon schuilt. Het is duidelijk dat de toepassingen van technologieën die de mens als individu en onderdeel van de samenleving beïnvloeden, indringende maatschappelijke en ethische vragen oproepen. Bij elk onderwerp in dit cahier zijn daarom maatschappelijke vragen en ethische reflecties geplaatst.

Who cares?

Een expert op het gebied van nieuwe ontwikkelingen in oorlogsvoering, P. Singer, hield onlangs in het Pentagon een voordracht over de politieke,



juridische en ethische aspecten van het toene-
mende gebruik van robots in het leger. Een van
de leidende officieren vroeg hem na afloop "Who
cares? Wie bekommert zich over deze zaken?" Sin-
ger antwoordde hem: "Iedereen gaat er vanuit dat
u dat doet." Het is gelukkig niet zo dat de mensen
die aan de knoppen van de nieuwe technologieën
zitten zich niet bij tijd en wijle beraden over de
implicaties van wat ze doen. Het kan echter geen
kwaad dat ze indringend bevraagd worden door
de samenleving. Gelukkig is het ook niet zo dat de
mensen die worstelen met ethische en maatschap-

pelijke vragen over de invloed van nieuwe tech-
nologieën geen notie hebben van de aard van die
technologieën en hun ontwikkeling. Rimpelloos
is het allemaal echter niet, soms is er een pijnlijk
gebrek aan wederzijdse kennis en inzicht.

De redactie beoogt met dit cahier de lezer te
informereren over bepaalde nieuwe technologieën
en hem of haar te helpen bij het vinden van eigen
antwoorden op de vragen die het perspectief van
Mens 2.0 oproept.

Leeswijzer

De vier hoofdstukken van dit cahier openen met
een fantasie van de redactie, de een wat wilder, de
ander milder. Aan het eind van ieder hoofdstuk
hebben we enkele deskundige ethici gevraagd
praktische kanttekeningen te plaatsen bij de
technologie zoals die in de hoofdstukken zelf is
beschreven. Zoals gebruikelijk voegen we bij ieder
hoofdstuk ook enkele vragen die stimuleren tot
'doordenken'. Hopelijk zal dit cahier mede dank-
zij die vragen zijn weg naar het onderwijs weer
vinden.

Nieuw in dit cahier zijn enkele zogeheten
QR-codes. Wanneer die worden gescand met een
'QR-reader' op de smartphone, geven ze direct
toegang tot de filmpjes die in de betreffende link
staan. De redactie en stichting Bio-Wetenschap-
pen en Maatschappij houden zich nadrukkelijk
aanbevolen voor reacties en suggesties ten aanzien
van het cahier in het algemeen en het gebruik van
deze nieuwe media in het bijzonder.



Waarom zou je nog iets leren, dankzij internet kunnen we alles wat we willen weten toch razendsnel opzoeken? Feitjes wel, maar voor de context heb je voorlopig toch echt je eigen hersens nodig, zeggen professor Catholijn Jonker en dr. Pascal Wiggers.

■ PROF. DR. CATHOLIJN JONKER

■ DR. PASCAL WIGGERS

ir. rob buiter

SPIEKEN TOEGESTAAN

Voor mijn kleindochter beginnen vandaag de eindexamens op de **High School**. Met enige weemoed denk ik terug aan mijn eigen eindexamen op het VWO, in 1984, toen de universiteiten, laat staan de middelbare scholen zich nog niet hadden bekeerd tot het Amerikaanse onderwijssysteem. Een rekenmachine mochten we meenemen in de gymzaal, en een groen boekje met tabellen uit de natuur- en scheikunde. Om te voorkomen dat je daar spiekbriefjes in zou schrijven werden al die binasboeken op een grote hoop gegooid en kreeg je een exemplaar van iemand anders voor gebruik tijdens het examen. ■ Hoe anders gaat dat nu, in 2044. Toen twintig jaar terug alle brillen aan de binnenzijde werden voorzien van een transparante monitor die 24/7 online werd verbonden met internet was er definitief geen houden meer aan. Alle denkbare feiten werden via de sensor op je wijsvinger met een tikje toegankelijk gemaakt. 'Spieken' was vanaf toen een ouderwets woord. De wereld achter de feitjes werd de norm. ■ Natuurlijk, met een mobiele **distorder** zou de school al het draadloze dataverkeer in de gymzaal onmogelijk kunnen maken. Maar waarom zouden ze? Het eindexamen moet toch niet te ver van de dagelijkse realiteit komen te staan? Een ding hebben de onderwijsinspecteurs wel verplicht gesteld. Met intelligente **firewalls** op de brillen is onmogelijk gemaakt dat de kandidaten tijdens het examen online contact met elkaar zoeken, om elkaar de juiste antwoorden door te geven. Daarmee zijn de zenuwen en de zweetaanvallen bij mijn kleinkind, zestig jaar na mijn eigen eindexamen niet veel anders geworden.

Geen feitjes, wel context

Mocht je je, om wat voor reden dan ook, ineens afvragen wie ook al weer De Ontdekking van de Hemel schreef, of wanneer Columbus Amerika ontdekte, dan ga je naar Wikipedia. Als het daar niet lukt, dan helpt Google je wel verder. Google kan je ook laten zien waar Tuitjenhorn eigenlijk ligt – en hoe je daar komt – en de zoekmachine kan ‘Ik lust geen slakken’ voor je naar het Frans vertalen. Kortom, al die dingen uit je hoofd leren is overbodig. Het enige wat je nodig hebt is een computer of smartphone met internet. Je kunt zelfs nog een stap verder gaan. Met behulp van de ingebouwde camera kun je diezelfde smartphone gebruiken om je belevenissen vast te leggen en naar believen terug te halen. De telefoon is zelfs een vervanging van je eigen geheugen!

Is het echt zo eenvoudig? Kunnen computers ons de moeite van het leren en onthouden besparen? In ieder geval niet helemaal. Je zult op z’n minst moeten weten wat je zoekt om het te kunnen vinden. Als je zoekt naar dat plaatsje dat ongeveer klinkt als ‘Tuiterhorn’ dan vindt de zoekmachine op internet niet wat je zoekt. Ook de foto van ‘die deejay op dat feestje’ is niet eenvoudig te vinden als je niet meer weet hoe je die foto hebt genoemd of waar je die hebt opgeslagen. Waarom eigenlijk niet? Is het niet een kwestie van tijd voordat computers dat wel kunnen? Het antwoord is geen eenvoudig ja of nee.

Feiten stapelen

Computers zijn goed in het opslaan van enorme hoeveelheden informatie, maar aan zo’n stapel feitjes op zich heb je niet zoveel. Het gaat om het juiste feitje op het juiste moment. Daar zijn computers minder goed in. Een computer kan alleen iets terugvinden als je precies de juiste zoektermen opgeeft. Deze zoektermen moet je samen met de informatie opslaan. Soms is het eenvoudig te

bepalen wat de juiste zoektermen zijn. Bij het zoeken van een telefoonnummer is de naam van de eigenaar van het nummer overduidelijk een goede zoekterm. Voor ander zaken is dat lastiger. Het hangt dan sterk van de situatie af welke informatie eigenlijk belangrijk is.

Verplaats je in de rol van een computer of zoekmachine. Stel dat iemand je vraagt om het adres en de openingstijden van de ‘Serengeti’. Een zoekmachine komt onder andere met een zonnebrillenmerk, een restaurant in London, een pretpark in Duitsland en een wildpark in Tanzania op de proppen. Je krijgt simpelweg alle opties terug.

Wat zou je moeten doen om specifiekere te kunnen zijn? Je zou de persoon moeten vragen waar hij naar op zoek is. Is hij op zoek naar een restaurant, een modeaccessoire, een pretpark of een wildpark? In welk land wil hij zoeken? Je moet dan wel weten dat dit de relevante informatie op de betreffende websites is. Voor mensen is dit vanzelfsprekend, voor computers niet. Voor een computer is een website niet veel meer dan een collectie woorden, of nog erger: een collectie symbolen. De computer heeft geen weet van de betekenis van deze symbolen en kan niet zelf bepalen welke symbolen belangrijk zijn, of dat ‘restaurant’ en ‘winkel’ beide de functie van een locatie omschrijven.

Toch is dit aan het veranderen. Onderzoekers in de kunstmatige intelligentie werken aan manieren om betekenis aan de informatie op websites en in documenten toe te voegen. Je zou kunnen zeggen dat deze nieuwe websites niet slechts informatie bevatten, maar kennis. Deze kennis heeft de vorm van eenduidig gedefinieerde labels die voor alle websites hetzelfde zijn. Zoals een tekst in een bepaald lettertype en een bepaalde kleur wordt weergegeven, zo kun je ook vastleggen dat een bepaald stukje tekst de naam van een locatie is.

Zo’n stelsel van extra informatie in de vorm van ‘labels’ onder de woorden is een zogenoemd



Welke Serengeti bedoelt u,
het wildpark, of...?



Semantic Web. De definities van de labels zijn vastgelegd in een voor de computer leesbare taal. Dit stelt de computer in staat om met deze kennis te redeneren. De eerder genoemde websites zouden bijvoorbeeld een label 'soort locatie' kunnen hebben met respectievelijk de waarden 'restaurant', 'pretpark' en 'wildpark'. De zoekmachine kan nu deze waarden vergelijken en constateren dat er verschillende typen locaties naar voren komen. De computer kan daarop om uitsluitel vragen: 'Wat voor locatie zoek je?'

Een zoekmachine kan om extra informatie vragen op basis van kennisregels. Als je de 'soort locatie' van het wildpark in Tanzania S1 noemt en de soort locatie van het pretpark in Duitsland S2, zou een kennisregel er als volgt uit kunnen zien: Als S1 niet gelijk is aan S2, vraag dan: 'Bent u op zoek naar een S1 of naar een S2?' Doordat in dit geval S1 de waarde 'wildpark' heeft en S2 de waarde 'pretpark', stelt de zoekmachine de vraag 'Bent u op zoek naar een wildpark of naar een pretpark?'

Domme computer wint slimme quiz

Het was dit soort kennisregels die het computerprogramma Watson van IBM in februari 2011 voor het eerst in staat stelden om de populaire Amerikaanse televisiequiz Jeopardy te winnen van echte menselijke tegenspelers. Maar al die kennis van Watson moest wel eerst door iemand van vlees en bloed in de computer worden gestopt. Watson is en blijft een 'domme computer'. De kunst bij het vulen van de computer is dat je van te voren al moet bedenken wat voor soort vragen mensen gaan stellen en welke kennis daarvoor van belang is.

Stel dat je aan alle documenten op internet voldoende kennis toevoegt en de zoekmachine met voldoende redeneerregels uitrust, betekent dit dan dat je al die kennis niet meer zelf hoeft te leren en te onthouden? Het voorbeeld van wildpark en pretpark Serengeti laat al zien dat dit niet het geval is. De computer kan je leven wel een stuk



In 2011 won de IBM-computer Watson de populaire televisiequiz Jeopardy.

makkelijker maken en snel de juiste informatie zoeken, maar om de enige echt juiste informatie te kunnen vinden moet de computer wel weten waar je naar op zoek bent.

Kennisregels stellen de zoekmachine wel in staat om aanvullende vragen te stellen. Misschien kan de computer, omdat die 'weet' dat de meeste mensen die Serengeti zoeken het wildpark bedoelen, zelfs wel een suggestie doen en de vraag stellen: 'Bent u op zoek naar het Serengeti wildpark in Tanzania?' Toch zul je zelf nog steeds het antwoord op die aanvullende vraag moeten weten. Enige basale kennis van topografie is dus wel vereist. Als je dat niet weet, dan zul je zowel je eigen locatie als Tanzania moeten opzoeken.

Zoals we al eerder zagen, moet deze kennis ook vrij precies zijn. Je moet de computer van alle benodigde informatie voorzien zodat deze verder kan. Als je de computer op dat punt vergelijkt met mensen is het contrast groot. Mensen hebben vaak aan een half woord genoeg. Met een onnauwkeurige vraag als 'Waar is dat ene park in Afrika waar laatst die documentaire over was?' hebben wij geen enkele moeite. Mens en computer gaan duidelijk anders om met kennis.

Associëren kun je leren

Computers lijken in een aantal opzichten op het menselijk geheugen. In beide gevallen is er sprake van een relatief klein kortetermijngeheugen of werkgeheugen dat gebruikt wordt om te redeneren en een groot langetermijngeheugen waarin alle kennis en informatie is opgeslagen. In het geval van de computer is dit langetermijngeheugen de harde schijf. Het menselijk langetermijngeheugen werkt heel anders dan dat van een computer. Het doorloopt niet telkens weer een lange lijst van feiten en kennisregels, maar associeert. Het ene feit doet ons denken aan een ander feitje en dat herinnert ons aan weer iets anders. Wij maken ook associaties tussen klanken en tussen letters, daardoor hoeft de informatie die wij krijgen niet volledig of compleet juist te zijn. Als iemand vraagt naar de 'Serendinges' dan is er een goede kans dat je snapt dat hij 'Serengeti' bedoelt.

Om feiten te onthouden van het type dat je ook makkelijk in een computer kunt opslaan – een lijstje Duitse *schwere Wörter*, topografie, noem maar op – moet je soms behoorlijk hard stampen. Veel andere dingen onthoud je zonder merkbare moeite. Dat verhaal van ome Piet, vorige week op die verjaardag, kun je bijna letterlijk herhalen terwijl je het maar één keer hebt gehoord. En ook weet je nog precies wat je twee jaar geleden tijdens de vakantie hebt gedaan. Het is voor ons duidelijk makkelijker om iets in een context te onthouden dan zonder.

Vaak weet je zelf niet eens wat je eigenlijk onthoudt. Hoe kan het bijvoorbeeld dat je deze woorden kunt lezen? Natuurlijk, op de basisschool leer je lezen, maar wat leer je dan eigenlijk? Niet de precieze vorm van de letters, we kunnen immers allerlei verschillende handschriften en lettertypes lezen. Volleerde lezers lezen trouwens te snel om naar iedere letter afzonderlijk te kunnen kijken. Ook hier geldt weer dat het helemaal niet erg is als

de informatie niet helemaal compleet of juist is. *Hte deot er ook neit teo in wekle vlogrode de ltteers in een wrood saasn, zolnag de eretse en laattse ltteer maar op de juitse palats saasn.* We kunnen deze tekst zonder problemen lezen omdat we geen afzonderlijke letters lezen, maar woorden als geheel.

Om je echt op het juiste moment van de juiste informatie te kunnen voorzien, zouden computers ook associaties moeten kunnen leggen, met onnauwkeurige gegevens om moeten kunnen gaan en zelf moeten kunnen bepalen wat eigenlijk de moeite van het onthouden waard is. Ook dit soort vraagstukken wordt in de kunstmatige intelligentie onderzocht. Onderzoekers gaan onder andere te rade bij de natuur.

Neurale netwerken

Al sinds de uitvinding van de eerste computer worden er vergelijkingen gemaakt tussen de menselijke hersenen en computers. Dit bracht onderzoekers in de jaren veertig van de vorige eeuw op het idee om de structuur van menselijke hersenen, voor zover die toen bekend was, te modelleren met behulp van wiskunde. Aan de ene kant zou dit meer inzicht kunnen verschaffen in de werking van de hersenen en aan de andere kant zou dit computers kunnen leveren die een aantal van de eigenschappen van de hersenen hebben.

Dit onderzoek heeft geresulteerd in zogenaamde neurale netwerken. De huidige neurale netwerken zijn gebaseerd op een sterk vereenvoudigd model van de hersenen. Ter vergelijking: als de hersenen een supersonisch vliegtuig zouden zijn, dan zijn neurale netwerken een papieren vliegtuigje. Toch hebben neurale netwerken een aantal interessante eigenschappen. Ze kunnen namelijk associaties maken, zelf leren en ze kunnen overweg met onnauwkeurige informatie.

Neurale netwerken zijn gebaseerd op de basale principes van hersencellen (zie kader). Zij bestaan uit kunstmatige neuronen die onderling verbonden

Hersenen

Om neurale netwerken te begrijpen moet je weten hoe de hersenen in grote lijnen functioneren. Onze hersenen bestaan uit miljarden zenuwcellen of neuronen. Die neuronen sturen met behulp van spanningsverschillen signalen naar elkaar. Ieder neuron heeft een lange uitgaande uitloper, het axon, waarover het signalen naar buiten stuurt. Het uiteinde van dit axon is verbonden met de ingaande verbindingen – dendrieten – van tal van andere neuronen.

Een neuron kan meerdere dendrieten hebben en dus signalen van meerdere neuronen ontvangen. Hoe sterker de signalen die binnen komen, hoe groter de kans dat het neuron zelf ook een signaal gaat versturen. De verbinding tussen het axon van het ene neuron en de dendriet van een andere neuron is niet rechtevreeks, maar gaat via chemische stofjes, neurotransmitters. Deze neurotransmitters kunnen een signaal afzwakken of versterken.

Onze hersenen bestaan uit miljarden neuronen.



den zijn en elkaar signalen sturen. De signalen zijn in dit geval getallen. Neurale netwerken gebruiken ook een soort neurotransmitters voor de signaaloverdracht. In dit geval zijn dat ook weer getallen, of beter gezegd: 'gewichten' die bij een verbinding tussen twee neuronen horen.

Mensen hebben aan een half woord genoeg

Dit gewicht wordt vermenigvuldigd met het signaal op die verbinding, dus als het gewicht hoog is wordt het signaal versterkt en een laag gewichtje verzwakt het signaal.

Ieder neuron voert een heel eenvoudige berekening uit. Het telt alle binnenkomende signalen bij elkaar op en als het resultaat groter is dan een drempelwaarde dan stuurt het neuron zelf een positief signaal uit, bijvoorbeeld een 1, en anders verstuurt het een negatief signaal, bijvoorbeeld -1.

Neuraal netwerk kan lezen

Zo eenvoudig als het principe klinkt, zo complex zijn de taken die neurale netwerken al kunnen uitvoeren. Zo kunnen ze bijvoorbeeld worden gebruikt om automatisch handschriften te herkennen. Ze moeten dan letterlijk leren lezen. Net als mensen leren neurale netwerken door naar heel veel voorbeelden van letters of woorden te kijken. Op den duur zijn ze in staat die letters ook te herkennen als ze in een ander handschrift of niet helemaal duidelijk geschreven worden.

Als mens leer je lezen op school, met de hulp van een leraar. Dat is voor neurale netwerken niet anders. De 'leraar' laat telkens een voorbeeld zien van een handgeschreven letter. Voor het neurale netwerk is zo'n plaatje niets anders dan een groot aantal getalletjes, waarbij ieder getal bijvoorbeeld aangeeft wat de kleur van een klein deel van het plaatje is. De neuronen in het netwerk voeren op deze getalletjes hun berekeningen uit en geven als

uitkomst aan welke letter dit is. Het netwerk in de figuur hiernaast heeft bijvoorbeeld 26 uitvoer neuronen. Als het netwerk vindt dat de letter een A is, dan geeft het bovenste neuron een 1 terug en alle andere een nul. Als het netwerk vindt dat de letter een B is dan geeft het tweede neuron een 1 terug en alle andere een nul, enzovoort. De leraar vergelijkt deze uitkomst met het correcte antwoord.

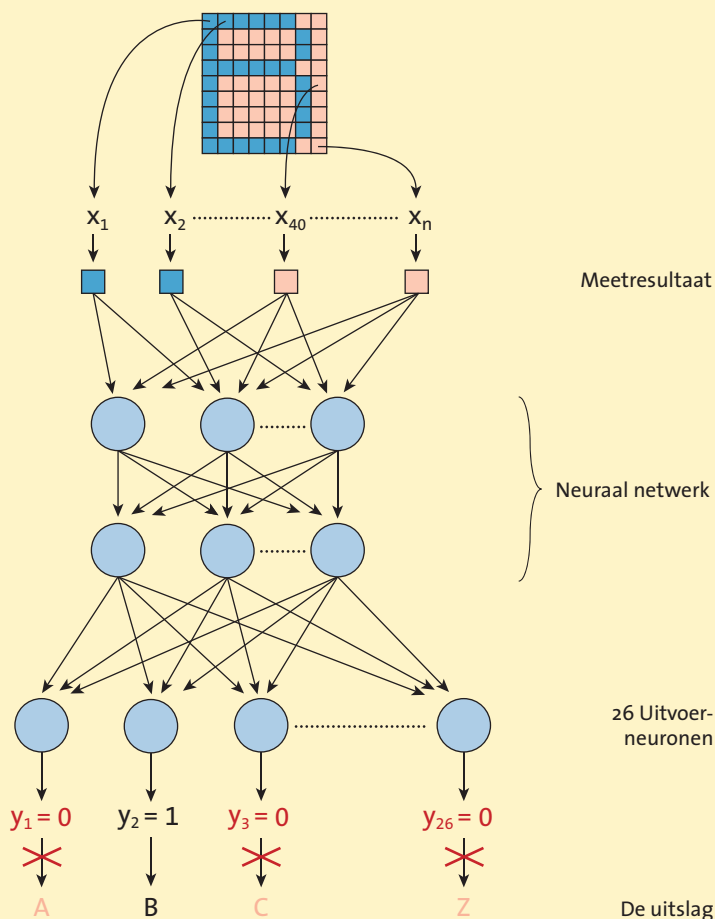
Aanvankelijk, als het netwerk nog weinig voorbeelden heeft gezien, is de kans groot dat het gegeven antwoord fout is. In dat geval worden de gewichten aan de verbindingen van het netwerk zo aangepast dat de gewichten die verantwoordelijk zijn voor het foute antwoord een beetje lager worden, zodat zij minder invloed krijgen. De invloed van de gewichten die verbonden zijn met het goede antwoord wordt juist verhoogd. De volgende keer dat het netwerk dit specifieke voorbeeld ziet gaat het een beetje beter. Als dit een groot aantal keer herhaald wordt voor voldoende verschillende voorbeelden, dan gaat het netwerk op den duur daadwerkelijk letters herkennen. Het kan dan zelfs handschriften herkennen die niet tussen de voorbeelden zaten, zolang die maar lijken op de handschriften die het netwerk tijdens het leren heeft gezien.

Handschriftherkenning is slechts één toepassing van neurale netwerken. Er bestaan ook neurale netwerken die associaties kunnen leren, bijvoorbeeld tussen de titel van een boek en de naam van de schrijver. Simpel gezegd wordt het gewicht tussen twee neuronen in zo'n netwerk groter en dus belangrijker als die twee neuronen veelvuldig tegelijk geactiveerd zijn en juist kleiner als een van beide neuronen geactiveerd is en de ander niet. Zulke netwerken kunnen overweg met een beperkt aantal fouten. Als je bijvoorbeeld 'De herkenning van de hemel' ingeeft als titel, dan kan het netwerk nog steeds 'Harry Mulisch' als schrijver teruggeven en je vervolgens vertellen dat in dat geval de titel 'De ontdekking van de

VRAAG 1

Er zijn verschillende vormen van leren: aan de hand van een leraar, door associatie of door uitproberen. Wat zijn nog andere vormen van leren die een computer zou kunnen gebruiken?

HOE HERKENT EEN NEURAAAL NETWERK DE LETTER B?



hemel' zou moeten zijn. Er is zelfs geëxperimenteerd met neurale netwerken die een auto leerden besturen.

Geen kunsthersenen maar wiskunde

Neurale netwerken hebben een groot nadeel: het is niet precies duidelijk wat ze leren. Alle informatie in het netwerk is opgeslagen in de vorm van getallen, de gewichten van de verbindingen tussen de neuronen en de drempelwaarden in

de neuronen. Het is niet zo dat een bepaald getal staat voor specifieke informatie, bijvoorbeeld de voornaam van een schrijver. Alle informatie zit als het ware uitgesmeerd over alle getallen. Je kunt aan een netwerk dus niet zonder meer zien of en wanneer het een correct antwoord gaat geven. En het gaat natuurlijk wel eens fout. Nu is dat misschien niet zo erg als een netwerk zo nu en dan een B voor D aanziet, maar je moet er niet aan denken dat het netwerk dat een auto bestuurt fouten gaat maken.

Onderzoekers van kunstmatige intelligentie hebben deze eigenschappen van neurale netwerken grondig bestudeerd. Dit heeft geleid tot nieuwe en betere methoden waarmee computers zelf van voorbeelden kunnen leren. Deze methoden zijn niet langer gebaseerd op een model van de menselijke hersenen, maar op wiskundige principes. Zo zijn er al computerprogramma's die automatisch spraak herkennen op basis van kansrekening.

Tot voor kort werd er vooral gekeken naar methoden die kunnen leren met behulp van een leraar. Dit is een arbeidsintensief proces omdat je heel veel voorbeelden moet verzamelen waarbij je steeds moet aangeven wat het juiste antwoord is dat een systeem moet geven. In het geval van spraakherkenning moet je een grote hoeveelheid spraak opnemen waarbij je eerst zelf moeten uittikken wat daar eigenlijk wordt gezegd. En wat als er een woord wordt gebruikt dat niet in de verzameling voorbeelden zat, of iemand heeft een heel afwijkend stemgeluid? Om dit soort situaties te ondervangen wordt er volop onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om systemen ook tijdens het gebruik zonder of met beperkte hulp van een leraar verder te laten leren.

Een ander probleem in de kunstmatige intelligentie is hoe een systeem kan weten wat belangrijk is. In de beginnende jaren van de neurale netwerken wilden onderzoekers een systeem ontwikkelen

Hoe ziet een neuraal netwerk het verschil tussen een tank in een bosrand en een blauwe lucht?



dat tanks kon herkennen. Het netwerk kreeg dus een groot aantal foto's te zien van een bosrand waarin soms een tank verstopt stond en soms niet. Vervolgens werd dit netwerk op een aantal nieuwe foto's getest. Het netwerk maakte de ene fout na de andere. Na een grondige inspectie van de data ontdekte men wat er fout ging. Alle voorbeeldfoto's waarop een tank stond waren genomen op een mooie zonnige dag waarop er geen wolkje aan de lucht was. Het netwerk had geleerd blauwe luchten in plaats van tanks te herkennen.

Context is dus ook hier het sleutelwoord. De afbeeldingen op de foto's hebben geen betekenis voor het neurale netwerk, het is slechts een verzameling beeldpunten en het netwerk weet niet wat het moet leren herkennen en waarom het dat moet herkennen. Net als bij de kennisregels is het de gebruiker, in dit geval de leraar die het systeem van de juiste kennis moet voorzien.

De evolutie van creatieve computers

Hoe leer je als kind fietsen, autorijden, koken, of wat voor vaardigheid ook? Dat is vooral een kwestie van oefenen. En oefenen impliceert fouten maken en iemand die je vertelt of je het goed of fout doet. In de kunstmatige intelligentie zijn verschillende methoden ontwikkeld die gebruik maken van dit principe.

In het dagelijks leven is losstaande informatie meestal niet belangrijk. Om nieuwe vragen of problemen te kunnen beantwoorden of in nieuwe situaties te kunnen handelen, moet je geleerde kennis combineren. Dit is het geval bij autorijden, maar bijvoorbeeld ook bij het oplossen van een wiskundig vraagstuk. Feitjes reproduceren helpt je hier niet, al is het wel handig als je soortgelijke vraagstukken of problemen al eens eerder hebt gezien. Je moet geleerde kennis combineren om dit

VRAAG 2

Wat zijn voorbeelden van zelflerende programma's, bijvoorbeeld op het internet?

nieuwe vraagstuk het hoofd te bieden. Je zou kunnen zeggen dat hier een zekere mate van creativiteit nodig is.

Op dit vlak ligt voor de kunstmatige intelligentie nog een enorme uitdaging. Net als bij neurale netwerken zou je menselijke strategieën als bron van inspiratie willen gebruiken. Helaas weten we niet precies hoe mensen in staat zijn verschillende ideeën en herinneringen te combineren om tot een nieuwe oplossing te komen. We kennen wel een ander natuurlijk verschijnsel dat ons verder kan helpen. Er is immers een theorie die ons vertelt hoe een soort als geheel, over generaties heen, kennis die het uit de omgeving heeft verzameld combineert om zich aan de veranderende wereld aan te passen: de evolutietheorie.

Het idee dat de evolutietheorie gebruikt kan worden om computers problemen op te laten lossen en te laten leren werd in de jaren zestig van de vorige eeuw ongeveer gelijktijdig bedacht door John Holland in Amerika en Ingo Rechenberg en

Hans-Paul Schwefel in Duitsland. De onderliggende gedachte is dat het eenvoudiger is om een bestaande, onjuiste oplossing aan te passen dan om iets heel nieuws te verzinnen. De manier waarop we die aanpassingen doen is afgekeken van de genetica.

De evolutie van een stofzuigrobot

Neem een stofzuigrobot. Als je wilt dat deze robot de kamer zo snel mogelijk en met een minimaal stroomverbruik zuigt, kun je hem systematisch verschillende oplossingen laten combineren en uitproberen. Net als in de 'echte' evolutie geldt dat oplossingen die beter aangepast zijn aan de omstandigheden, dat wil zeggen die sneller zijn en die minder stroom verbruiken, het meeste kans hebben om te 'overleven'.

De kamer bevat een aantal grote meubels waar de robot omheen moet bewegen. We gaan er voor het gemak vanuit dat deze meubels niet verplaatst worden. De robot maakt gebruik van een kaart.

Puntjes of objecten herkennen

Scan een tekst met een huis-tuin-en-keuken scanner en de letters en cijfers verschijnen beeldpunt voor beeldpunt op het beeldscherm. Met een digitaal gummetje uit het fotobewerkingsprogramma Photoshop kun je 'dichtgelopen letters' openmaken, vlekken verwijderen en een te donkere achtergrondkleur wat oplichten. Een professionele scan-

ner beschikt al over OCR: *optical character recognition*, waarin een rondje als een nul of een letter 'o' wordt herkend en een streepje als het cijfer één of de letter 'i'. Met Photoshop kun je daar niks mee doen maar met een tekstverwerker als Word des te meer. De volgende stap is beeldherkenningssoftware: die kan van pixels objecten maken, die je

vervolgens met 'object-based' programma's zoals Adobe Illustrator kunt bewerken. Waar een pixel-based programma elke punt van de cirkel met zijn x- en y-coördinaten moet beschrijven, is een cirkel voor een object-based programma wiskundig beschreven als de plaats van het middelpunt (x,y) in de ruimte, gekoppeld aan de straal r. Object-based

beeldherkenningsprogramma's zijn in die zin 'slimmer' dan een pixel-based programma. De evolutie heeft er gelukkig voor gezorgd dat wijzelf ook object-based werken. Het zou wat zijn als we het gezicht van onze vader, moeder of partner elke keer opnieuw punt voor punt zouden moeten inscannen.

Robot moet niet leren praten maar communiceren

In het onderzoek rond kunstmatige intelligentie gaat veel aandacht uit naar taal. Het is toch handig als een machine of een robot kan praten en het is nog handiger als je ook tegen die robot kunt vertellen wat je wilt dat hij of zij doet. “Maar daarbij moeten de onderzoekers zich niet blindstaren op de taal op zich”, waarschuwt dr. Roel Willems, psycholoog bij het Dondersinstituut voor Brein, Cognitie en Gedrag van

de Radbouduniversiteit in Nijmegen. “De grote waarde van onze communicatie zit niet in de taal alleen. Het gaat ook vooral om de intentie die achter het gesproken woord schuilt. Die intentie wordt in een heel ander deel van de hersenen verwerkt dan de taal op zich. Daarom kunnen mensen die na een hersenbloeding afasie hebben en dus niet meer kunnen spreken, in een onderzoekssetting nog wel bepaalde

communicatieopdrachten uitvoeren. En het is ook daarom dat we doorgaans zo’n moeite hebben met ernstige vormen van autisme. Deze mensen kunnen immers wel praten, maar de intentie van hun taal is vaak niet meer te begrijpen.” Willems heeft dan ook een duidelijk advies aan de onderzoekers op het gebied van de kunstmatige intelligentie. “Als je wilt dat een robot of een computer met jou communiceert, richt

je dan niet alleen op de taal. In de architectuur van het ‘brein’ van de machine zul je een aparte laag moeten bouwen die de intentie van het gesproken woord analyseert. Wat dat betreft kunnen we misschien nog het meest leren van baby’s. Die snappen gesproken taal nog niet of nauwelijks, maar zijn al wel heel goed in het herkennen van de intenties van een boodschapper.”

VRAAG 3

Als de computer echt een adviseur zou worden, zou hij dan niet meer moeten hebben dan feitenkennis alleen?

Op iedere positie in de kamer kan hij de volgende acties uitvoeren: vloer schoonmaken (S), naar links bewegen (L), naar rechts bewegen (R), vooruit bewegen (V), achteruit bewegen (A). De robot begint bij zijn oplaadstation en eindigt daar ook. We kunnen de route van de robot dus weergeven als een reeks acties: SVSRSLSLVSL, het ‘DNA’ van een route.

Aanvankelijk laat je de robot willekeurige acties uitvoeren, anders gezegd: je maakt willekeurige DNA-strengen. Dit is in evolutietermen de populatie. Deze volstrekt willekeurige routes zijn waarschijnlijk verre van optimaal. Ze kunnen allerlei onnodige handelingen bevatten zoals het meerdere keren zuigen van hetzelfde stukje vloer. Door naar de reeks van acties in een route te kijken kunnen we wel voor ieder route bepalen hoe goed deze is. Ten eerste moet de robot met een route de hele vloer schoonmaken. Voor de routes die aan deze eis voldoen geldt: hoe korter, hoe beter. Deze

informatie kunnen we gebruiken om beter routes te vinden.

Dit doen we door een nieuwe populatie van routes te maken. We selecteren telkens twee bestaande routes, daarbij hebben betere routes een hogere kans om geselecteerd te worden. De twee geselecteerde routes wisselen genetisch materiaal uit. Dit doen we door een willekeurig punt in de DNA-streng te kiezen, bijvoorbeeld na de tiende actie, en beide strengen op dit punt door te knippen. We plakken nu het voorste deel van de ene streng aan het achterste deel van de tweede streng en combineren op dezelfde manier de overgebleven twee stukken. De hoop is nu dat de nieuw gevormde routes goede eigenschappen van de oude routes combineren. En net als bij DNA kunnen er ook mutaties ontstaan. Dat wil zeggen dat met een kleine kans een actie in de DNA streng verandert in een van de andere toegestane acties,

een V verandert bijvoorbeeld in een R.

Als je dit proces van selectie, recombinitie en mutatie herhaalt tot de nieuwe populatie even groot is als de oorspronkelijke populatie, is er als het ware een nieuwe generatie ontstaan. Vervolgens herhaal je de stappen met deze nieuwe populatie. Omdat je bij de selectie voorkeur hebt voor betere routes, kun je met behulp van wiskundige formules aantonen dat dit op den duur steeds betere oplossingen levert. Sommige onderzoekers claimen zelfs dat deze methode computers in staat stelt tot creativiteit. Dit systeem levert immers oplossingen waar je als mens nooit op zou zijn gekomen.

De NASA heeft deze techniek gebruikt om een satellietantenne te ontwikkelen. De grillig gevormde antenne is slechts zo groot als een muntje en lijkt in niets op de antennes die we normaal tegenkomen. De ontvangst is echter vele malen beter dan die van een normale antenne.

Computer schept kunst

Ook kunstenaars als Karl Sims en Steven Rooks en onderzoeker Gusztai Eiben hebben de evolutionaire techniek van de computer heel letterlijk genomen. Zij hebben computers kunst laten maken. Hun werk laat ook meteen de beperkingen van de methode zien. Een aantal kleuren en vormen op papier of een beeldscherm zetten is één ding. Weten of zoiets de moeite waard is, dat is iets anders. Wie bepaalt wanneer iets een kunstwerk is? In dit geval waren dat de kunstenaars zelf. Zij lieten de computer tal van schilderijen genereren en gaven bij ieder van deze opties aan hoe mooi zij deze vonden. Deze informatie werd door de computer gebruikt om weer nieuwe, hopelijk betere, schilderijen te genereren. Hoewel de computer hier zelf bepaalt welke mutaties en recombinities worden uitgevoerd, is het uiteindelijk weer de gebruiker die betekenis toekent aan de informatie en die het geautomatiseerde proces sturing geeft.



Volgens sommigen kan een computer ook 'kunst' scheppen.

Meedenken is genoeg

Het zal voorlopig nog wel even zo blijven dat mensen van vlees en bloed duiding, sturing en context moeten leveren bij de 'gedachten' en de 'creativiteit' van intelligente computers. Computers kunnen nog lang niet tippen aan mensen als het gaat om het opnemen van informatie, het omgaan met onnauwkeurigheden en onzekerheden en vooral niet aan ons vermogen om de juiste informatie op het juiste moment te gebruiken. Kennis van de context blijft nodig. Hoeveel van die kennis je aan de computer mee kunt geven, of de computer zelf kunt laten leren is nog een onbeantwoorde vraag. Om echt te weten wat iemand over de Serengeti wil weten, moet je weten wat deze persoon daar wil doen. Als blijkt dat het om een vakantie gaat, moet je weten wat vakantie inhoudt om de juiste informatie te kunnen verstrekken. Maar misschien kun je pas echt begrijpen wat vakantie is

als je zelf op vakantie bent geweest.

Als we deze redenering doorzetten, dan moeten we concluderen dat een machine nooit helemaal in staat zal zijn om onze informatiebehoefte te begrijpen. Je kunt je afvragen of dit ook wel wenselijk of nodig is. Willen we echt nooit meer leren? Kunnen we dit wel? Mensen zijn van nature nieuwsgierig. Zonder al te veel inspanning nemen wij dagelijks enorme hoeveelheden informatie op. Waar de meesten van ons minder goed in zijn is het onthouden van losse en precieze feitjes zoals jaartallen en namen. Dit is precies waar computers wel goed in zijn. In die zin vullen zij onze menselijke vaardigheden uitstekend aan en daar worden ze steeds beter in. Dankzij de vooruitgang die de kunstmatige intelligentie boekt bij het modelleren van kennis en het ontwikkelen van zelflerende systemen zijn computers steeds beter in staat om met je mee te denken. Ze veranderen van passieve informatiebronnen naar actieve hulpjes die suggesties doen en waar nodig om informatie vragen. Denk bijvoorbeeld aan een e-mailprogramma dat aan hand van de teksten die jij schrijft op den duur leert wanneer het waarschijnlijk is dat je een bijlage bij de e-mail gaat voegen. Zo'n programma kan jou vragen of je de bijlage soms vergeten bent als je dit niet doet. Er zijn ook al websites die tips geven over boeken of films die jij waarschijnlijk leuk vindt.

De computer verandert gaandeweg in een adviseur. Net als bij menselijke adviseurs hoef je niet alles te weten wat zij weten. Je moet ze wel de juiste informatie geven waarmee zij tot een advies kunnen komen. En net als bij de menselijke adviseur is het wel zo handig om voldoende kennis te hebben om te weten wanneer je hun advies moet overnemen en wanneer je het beter kunt negeren. Om dit te kunnen weten zul je zelf toch ook nog de nodige feitjes moeten leren.

Software-agenten

Op het *Massachusetts Institute of Technology*, kortweg MIT, wordt 'de toekomst gemaakt', zo heet het. De geboren Belgische Pattie Maes kan erover meepraten. Ze is oprichter en directeur van de *Fluid Interfaces group* op het MIT. In 1990 bezorgde de toen nog piepjonge en veelbelovende Maes haar publiek rode oortjes met haar voorspellingen over *Intelligent Agents*, een term die in het Nederlands wel erg suf werd vertaald als 'softwareagenten'. Het zijn rationele, autonome en zelflerende computerprogramma's die 'de belangen van de gebrui-

ker behartigen'. Inmiddels weten we dat het geen grootspraak was van Maes dat intelligent agents voor ons de boel haarscherp in de gaten zouden gaan houden. Zo gaan ze in alle stilte verschillende websites af om de beste prijs en voorwaarden voor een bepaald artikel te vinden. Ze onderhandelen zelfs over de prijs! En je moet ook niet vreemd opkijken als straks websites als Amazon.com of Bol.com de inhoud van je audio- en bibliotheek beter kennen en analyseren dan jijzelf. Hoewel, straks?

De vloek van het internet

■ DR. GERT-JAN LOKHORST

BIJ 'NOOIT meer leren' denk je bijna automatisch aan het internet. Het is de plek waar veel van de feitjes die je niet meer wilt stampen worden verzameld. En inderdaad, het internet is een schijnbaar onuitputtelijke bron van informatie geworden. Maar is het daarmee een zegen, of toch ook een vloek?

In het voorgaande hoofdstuk geven de auteurs al enkele duidelijke beperkingen aan de kunstmatige intelligentie van het internet. De Serengeti

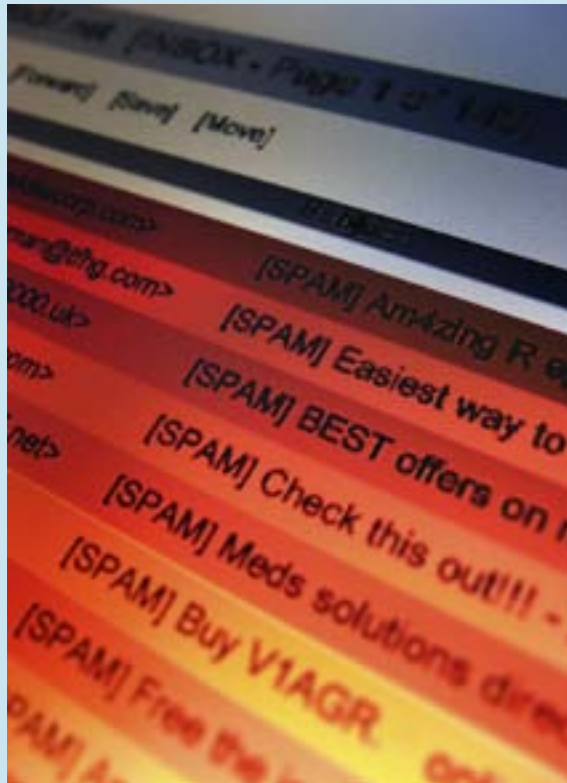
blijkt behalve een wildpark ook een restaurant in Londen en van 'Serendinges' heeft Google nog nooit gehoord. Maar het is nog erger. Als je een zoekterm intikt krijg je naast – hopelijk – de gevraagde informatie ook een hoop onnodige, onbetrouwbare en misleidende informatie en zelfs reclame en propaganda. Onbetrouwbare informatie kan levens kosten, bijvoorbeeld als het om verouderde of ondeskundige raad in verband met de gezondheid gaat. Zo zijn er nog veel sites die anorexie promoten.

Hoe maken we het onderscheid tussen zin en onzin? Dit is het eerste ethische probleem met het internet: het kan behoorlijk misleidend zijn. Het kaf is nauwelijks van het koren te scheiden. Goede raad is duur en computers kunnen dit probleem niet oplossen. Er is ook zoiets nodig als inzicht, gezond verstand en algemene achtergrondkennis om het aanbod op waarde te kunnen schatten.

Een tweede probleem is dat niet alle kennis feitenkennis is. Hoe hebben we leren fietsen? Een paar feitjes kwamen er wel aan te pas, maar daarmee hield het verhaal niet op: fietsen leer je al doende. Er is op het web vast een beschrijving te vinden over hoe fietsen in zijn werk gaat, maar echt fietsen leer je alleen door op te stappen. Filosofen noemen dit het verschil tussen *weten dat* (weten dat dit of dat feit het geval is) en *weten hoe* (weten hoe je dit of dat moet doen). Het laatste is niet te reduceren tot het eerste.

Een derde probleem is dat alle gegevens op het internet evenveel waard lijken te zijn. Wat is nu echt de moeite waard om te weten? Leiden al die feitjes en meningen niet alleen maar af van waar

Nieuwe media brengen ook ongemakken, zoals spam.



Tijdens de 'Arabische lente' speelden nieuwe media een hoofdrol.



het om gaat, van datgene wat echt de moeite waard en zinvol is? Het gevaar van het internet is dat ons hoofd vol komt te zitten met triviale feiten en dat we geen tijd meer overhouden om eens rustig tot inzicht te komen. Sommige mensen ontvangen wel twintig e-mails per uur, om vervolgens ook twintig keer per uur meteen een antwoord te versturen. Van echt werken komt het dan natuurlijk niet meer. Om nog maar te zwijgen van het getwitter of het ge-MSN. Ondertussen verschijnen er met de regelmaat van de klok berichtjes op het scherm dat er een update van dit of dat stuk software moet worden uitgevoerd.

Kakofonie van onzin

Hoe kun je je in zo'n kakofonie van onzin nog concentreren? Donald Knuth, een van de vaders van de computerwetenschap, schrijft het heel treffend op zijn website: 'Ik ben een gelukkig man sinds 1 januari 1990, toen ik niet langer een e-mailadres had.

Ik heb e-mail gebruikt sinds 1975. Ik vind vijftien jaar e-mail genoeg voor één leven. E-mail is mooi voor wie op de hoogte moet blijven, maar ik wil juist de diepte in gaan. Wat ik doe vereist lange uren van studie en ononderbroken concentratie; ik doe dat werk ten behoeve van degenen die daar geen tijd voor hebben.'

Er bestaan verscheidene schrijvers die hun computer bij het vuilnis hebben gezet om terug te keren naar de kroontjespen. Dat gaat langzamer en dus beter, en uiteindelijk vaak ook sneller omdat je eerder ophoudt met reviseren. Inzicht en wijsheid, goede smaak en een goed beoordelingsvermogen, beheersing en bezinning, dat zijn de zaken die de moeite waard zijn om te leren, en het internet is daarbij eerder een belemmering dan een hulp. Een vierde probleem van het internet is de privacy. Dankzij het internet kunnen we veel gemakkelijker dan vroeger een kijkje nemen in elkaars levens. Alles wat je er op je vijftiende in een onbezonnen bui uitflapte kan op je dertigste bij een

sollicitatiegesprek tegen je gebruikt worden. Niet voor niets staan er tegenwoordig adviezen in de kranten over hoe je jezelf kunt 'ontgooglen' en hoe moeilijk dat is.

Het fenomeen Google is een probleem op zichzelf geworden. Zoveel macht in handen van één commercieel bedrijf is een gevaarlijke zaak. Google is er onlangs toe overgegaan om alle boeken die ooit gedrukt zijn te digitaliseren. Ze hebben al 15 van de 130 miljoen boeken gedaan. Betekent dit het einde van de universiteitsbibliotheken? En wat als ze de kraan dichtdraaien, of een vergoeding gaan eisen? Of als een regering besluit dat het land een agrarische samenleving moet worden en alles verbiedt wat met intellectuele zaken te maken heeft, zoals nog niet al te lang geleden gebeurde in Cambodja? Als de universiteitsbibliotheken zijn vervangen door Google Books maken we het zo'n regering wel erg gemakkelijk. Het afsluiten van de toegang tot Google is makkelijker dan alle boeken verbranden.

Het is natuurlijk niet allemaal ellende wat het internet biedt. Bij de opstanden in de 'Arabishe Lente' hebben de toegenomen communicatiemogelijkheden bijvoorbeeld een belangrijke positieve rol gespeeld. De vraag of internet een vloek of een zegen is kan dus niet eenvoudig worden beantwoord. Maar de stelling dat internet

het leren overbodig maakt lijkt in ieder geval onjuist. Het gaat niet om de kennis van de feitjes, maar wat je met die kennis doet.



Er zijn al schrijvers die de computer weer verruilen voor de kroontjespen.

ANTWOORD 1

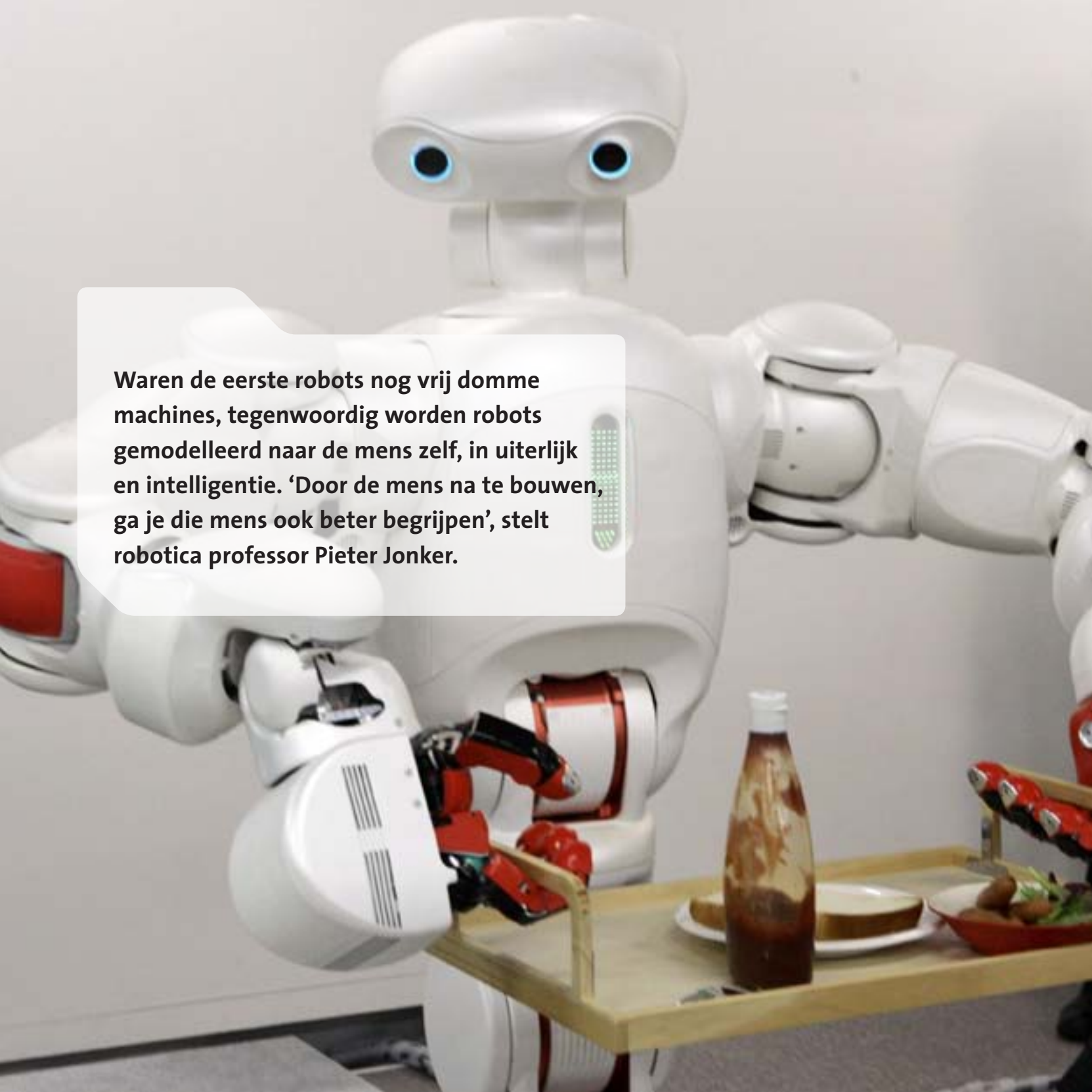
Soms is imitatie de snelste manier om te ontdekken hoe iets moet.

ANTWOORD 2

Een bekend voorbeeld is een spamfilter. Dat leert aan de hand van voorbeelden van spam welke woorden of woordcombinaties op spam wijzen en bouwt die kennis steeds verder uit.

ANTWOORD 3

Wil de computer echt op het juiste moment de juiste dingen kunnen adviseren, dan zou hij ook overweg moeten kunnen met non-verbale informatie van degene die om advies vraagt. Lichaamstaal en emotie bevatten ook veel informatie.

A white humanoid robot with blue eyes and red joints is shown from the waist up. It is holding a wooden tray with a bottle of brown liquid, a plate with bread, and a bowl of food. The robot has a friendly, human-like appearance with a rounded head and a small body.

Waren de eerste robots nog vrij domme machines, tegenwoordig worden robots gemodelleerd naar de mens zelf, in uiterlijk en intelligentie. 'Door de mens na te bouwen, ga je die mens ook beter begrijpen', stelt robotica professor Pieter Jonker.

2 Nooit meer werken

■ PROF. DR. PIETER JONKER

prof. dr. jos van den broek

WASSTRAAT VOOR YOKIO HONDA

Met zachte hand tilt de verpleegrobot de Japanner Yokio Honda uit zijn ziekenbed. Snel en efficiënt scant het apparaat de halfzijdig verlamde Honda, die vervolgens vakkundig wordt gewassen en afgedroogd en een schone pyjama krijgt aangetrokken. ■ Het was vijftientig jaar geleden dat de toenmalige directeur van het robotontwikkelcentrum van elektronicagigant Panasonic voor het laatst in het ziekenhuis had gelegen. Twee weken lang had die ziekenhuisopname geduurd. Het zinde hem niet dat zijn haar in die tijd slechts twee keer werd gewassen. Het bracht hem op het idee voor een harenwas-robot. Dit apparaat scande eerst de vorm van het hoofd van de gebruiker en wist daardoor precies waar de zestien vingertjes die de robot telde meer of minder druk konden uitoefenen. In drie minuten was de haarwasserette klaar. Een foto van de volautomatische harenwasser die de haren van een echt mensenhoofd aan het wassen was, haalde in oktober 2011 talloze kranten in de hele wereld. ■ Honda vond zijn robot destijds ideaal voor plaatsen waar de druk op verzorgenden zou toenemen vanwege de steeds ouder wordende bevolking: verzorgingstehuizen voor bejaarden en lichamelijk gehandicapten en ziekenhuizen. Hij kreeg gelijk: verpleegrobots werden in een paar decennia een miljardenmarkt waar zijn bedrijf Panasonic goed garen mee spon. ■ Nu, anno 2031, kan Yokio Honda niet anders dan met een glimlach terugdenken aan 'zijn' toch nog behoorlijk primitieve harenwas-robot van 2011. De robot die nu de lakens strak trekt ziet er oneindig veel aantrekkelijker uit. Ze glimlacht vriendelijk als ze Honda's gedachten leest.

Robots naar model van de mens

Het lichaam van de mens is een domme machine en de geest is de slimme besturingscomputer. Als de Franse filosoof René Descartes niet in de zeventiende, maar in de eenentwintigste eeuw had geleefd, dan was dat waarschijnlijk zijn manier geweest om de scheiding van lichaam en geest te omschrijven. Zo revolutionair als de filosofische scheiding van lichaam en geest door Descartes in 1637 was, zo achterhaald is die nu. Geen lichaam zonder geest, en geen geest zonder lichaam, dat is nu de filosofie, ook in het robotica-onderzoek.

Het weer verenigen van lichaam en geest is ook de reden dat in het onderzoek naar kunstmatige intelligentie niet alleen naar de informatietechnologie wordt gekeken. Er worden ook daadwerkelijk 'mensachtige' robots gebouwd. Want wat is kunstmatige intelligentie zonder een kunstmatig lichaam?

In het robotica-onderzoek is nog een andere goede reden om robots steeds meer als namaakmensen te ontwerpen. De eerste robots waren te vinden in fabrieken. Daar namen ze de zogenoemde 'DDD-klusjes' van mensen over: *Dull*, *Dirty* en *Dangerous*. De mens heeft inmiddels zijn hele omgeving naar zijn hand gezet. Zo'n beetje alles is aangepast aan de menselijke maat. Als je dus wilt dat robots in de toekomst nóg meer van die weinig populaire DDD-klusjes van ons gaan overnemen, dan moet je zorgen dat die robots ook van de menselijke maat zijn. Humanoïde robots dus.

Veel te slim

Je kunt het je bijna niet meer voorstellen, maar iets meer dan een halve eeuw terug hadden we een dagelijks leven zonder computers. Toen de firma IBM in de jaren vijftig van de vorige eeuw



Saaie, zware klussen zijn bij uitstek geschikt voor robots.

de eerste computers had gebouwd, gingen de directeurs van dat bedrijf ervan uit dat er op de hele wereld plaats zou zijn voor twee enorme bakbeesten van computers die voldoende rekentaken konden uitvoeren. Inmiddels weten we beter. In het eerste het beste huishoudelijke apparaat zit tegenwoordig een computertje met meer dan voldoende reken capaciteit om honderden wasma-

In 2050 moeten robots de wereldkampioen voetbal verslaan

chines, stofzuigers, telefoons of motoren tegelijk te besturen. Maar wat kan het schelen, al die over capaciteit? Chips kosten toch bijna niets meer, en als je overal een

vergelijkbare processor instopt, kan ook iedereen hem op een standaard manier programmeren. Beter wat over capaciteit dan tijd en geld verspillen aan maatwerk.

Mogelijk zal het in de robotica net zo gaan. Er zijn veel onderzoekers die verwachten dat er over een halve eeuw een paar modellen van mensachtige robots op de markt zullen rondlopen die voor van alles en nog wat kunnen worden ingezet. Zeker, ze zullen overcapaciteit hebben. Maar dat maakt ze wel flexibel inzetbaar.

Robot van Persie

Het maken van een robot die kan wedijveren met mensen is al lange tijd geen tekentafeltheorie meer. Er wordt sinds 1997 actief aan gewerkt. Sinds die tijd bestaat ook de internationale organisatie 'RoboCup'. Die streeft ernaar om in 2050 een team van elf robots op een voetbalveld te kunnen zetten dat in staat zal zijn om de FIFA-wereldkampioen te verslaan. Op dit moment zitten er wereldwijd al honderdvijftig teams in die competitie. Ze strijden in verschillende 'leagues', variërend van gesimuleerde voetballers op een 2- of 3D-computerscherm, via de bekende 'AIBO' robothondjes en middelgrote rijdende machines, tot een soort 'Robo Champions League': echte mensachtige voetbalrobots.

Voetbal is een aantrekkelijk en dynamisch teamspel met eenvoudige regels in de overzichtelijke omgeving van het voetbalveld. Voetbal is dan ook een mooi afgebakend thema om het robotonderzoek verder te helpen. Om een robotteam daadwerkelijk te laten voetballen moet er goed worden nagedacht over het ontwerp van de voetbalbenen en andere hardware. Het gaat ook om de 'zintuigen', of in robottermen: de sensor-datafusie. Een voetballende robot moet real-time kunnen redeneren ('als mijn sensoren zien dat de tegenstander de bal naar links schiet, moet ik daarheen rennen') en procedureel kunnen leren van het gedrag van zijn tegenstanders en medespelers ('als de tegenstander raar op zijn linker been huft, zou het zomaar kunnen dat hij eigenlijk een schijnbeweging naar rechts maakt!'). En niet in de laatste plaats moeten



robots leren samenwerken volgens een bepaalde strategie en spelconcepten.

Lopen als mensen

Aan de TU Delft wordt al een kleine tien jaar gewerkt aan robotvoetbal en aan dynamisch lopende robots. Dit zijn robots die lopen zoals mensen dat doen: ze laten hun zwaartepunt vóór hun voorste voet komen en lopen in eigenfrequentie, zoals de slinger van een penduleklok. Ze hebben net als lopende mensen een stabiel standbeen en een zwaaibeen. Dat is al een opmerkelijke vooruitgang ten opzichte van de eerdere *Zero Moment Point* robots. Die schuifelden als oude mensen. In de figuur op de volgende pagina staan de recente robots die het Bio-Robotics Lab van de TU Delft heeft ontwikkeld: Denise, Flame en Tulip. De laatste robot wordt door de samenwerkende Technische Universiteiten (3TU) gebruikt om in de Teen-size league van RoboCup mee te spelen.

De RoboCup is een internationale voetbalcompetitie voor robots.

VRAAG 1

Behalve de voetballende robots in de internationale RoboCup wordt op kleinere schaal ook een RoboChallenge georganiseerd. Wat is daarvan het doel?



Waarnemen-denken-doen

Om een intelligente humanoïde robot te kunnen bouwen moet je eerst weten hoe echte levende wezens functioneren. Van een eencellig pantoffeldiertje tot het meest intelligente levende wezen (de mens), allemaal gebruiken ze de basale routine waarnemen-denken-doen. Een pantoffeldiertje neemt waar dat ergens een bepaalde voedingsstof in het water zit, DNA of eiwitten in zijn ene cel reageren daar op en voor je het weet beweegt het diertje naar de bron van het voedsel toe. Zelfs planten hebben zo'n routine. Ze reageren op zwaartekracht, zonlicht, water of voedingsstoffen door hun bladeren te richten of door hun wortels te laten groeien.

De meest eenvoudige robots zou je kunnen

vergelijken met planten. Ze staan vast op één plek en zijn dus beperkt in hun actieradius en in hun acties. En net als planten die hun energie 'gratis' van de zon krijgen, hoeven eenvoudige robots ook niets te doen om gevoed te worden: ze hangen aan een stopcontact.

Het beroemde speelgoed robothondje Aibo is enigszins te vergelijken met het pantoffeldiertje. Het kan heel primitief reageren op wat er in zijn omgeving gebeurt en kan ook zelf een docking station opzoeken als de batterij leeg begint te raken. Ook de zogeheten Braitenberg vehicles zijn vergelijkbaar met eencellige diertjes: ze kunnen beide met simpele acties reageren op simpele signalen. Deze machientjes kunnen worden gebouwd door middelbare scholieren en worden onder andere gebruikt in de onderste divisies van de RoboCup.

De robots Denise, Flame en Tulip van de Technische Universiteit in Delft.

Slimmere robots...

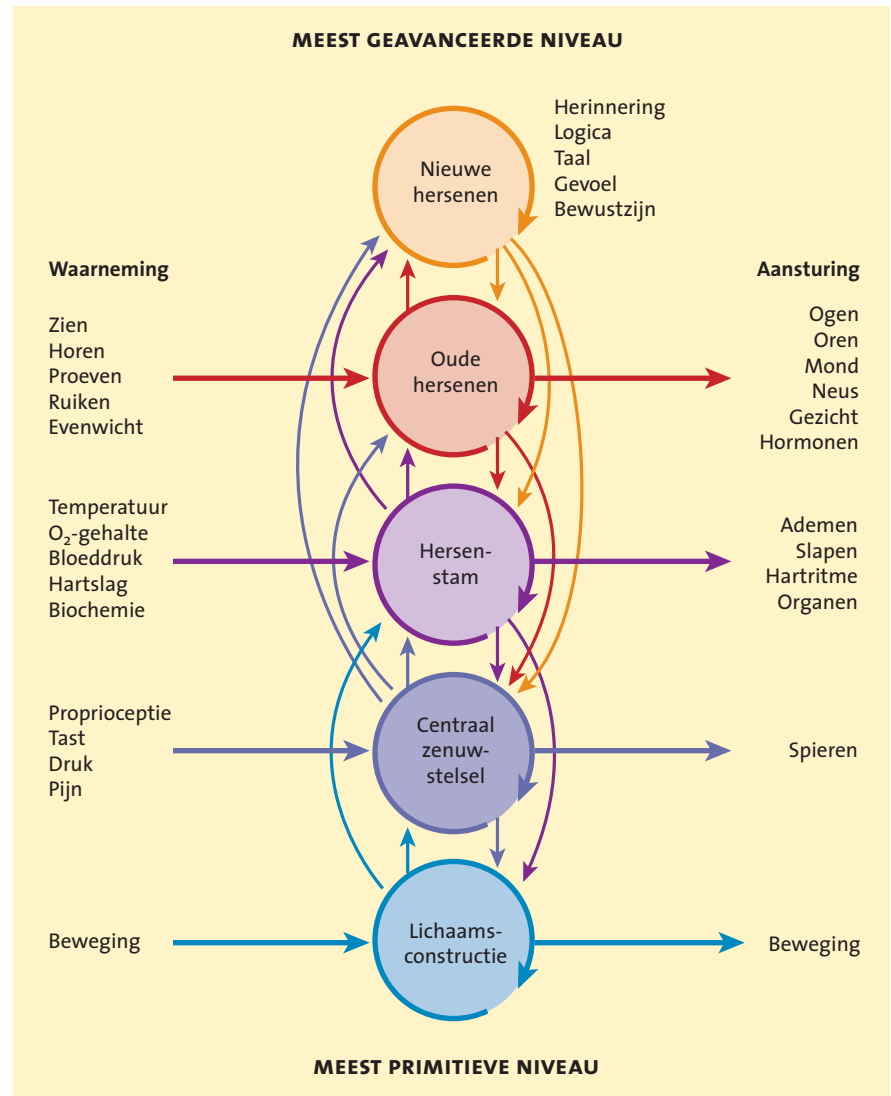
Een belangrijke stap in de ontwikkeling van meer cellige diertjes en ook van slimmere robots is een netwerk van 'zenuwcellen'. Waar hogere dieren een netwerk hebben van axonen (zenuwcellen), die signalen kunnen oppikken en weer doorgeven aan andere axonen of aan spieren, krijgen slimmere robots netwerken van elektrische pulsen die zelfs een soort 'kortetermijngeheugen' kunnen opbouwen. Hoe hoger de diersoort, hoe ingewikkelder ook zijn zenuwstelsel en hoe ingewikkelder zijn waarneem-denken-doe procedures.

In de figuur hiernaast staat beschreven hoe in hogere dieren op een steeds intelligentere manier waarneem-denken-doe routines worden uitgevoerd; van eenvoudige reflexen via de spieren – dus zonder tussenkomst van de hersenen! – tot weloverwogen beslissingen door een hogere diersoort, zoals de mens. De laagste niveaus van deze routines worden ook al in robots gekopieerd. De uitdaging zit in de hoogste niveaus.

... met een slim gebouwd lijf

Om de slimme waarnemen-denken-doen-routines van mensen en dieren te kopiëren zal het lichaam van een robot net zo slim moeten worden opgebouwd. In het dierenrijk is er een heel scala van slimme oplossingen om te kunnen lopen, rennen en springen. Spieren en pezen zijn, in robottermen, niet veel anders dan voorgespannen veren die een explosieve kracht kunnen vrijmaken en die bij een potentieel harde landing ook weer energie kunnen opslaan. Op diezelfde manier kent het dierenrijk ook contragewichten en quasi-statische veerbalansen. Kijk maar eens naar de nek van een bizon. Daar zit een enorme bult op, met daarin een nekwerfel waar extra grote spieren aan kunnen hechten. Die bult helpt dus om de zware kop van het dier omhoog te houden.

In het Delft Bio-Robotics Lab bestuderen onderzoekers het lopen van mensen om dat vervolgens



Het denken, in de routine waarnemen-denken-doen, kan op verschillende niveaus gebeuren.

te kopiëren in robots. Bij het lopen zijn vooral de heupgewrichten van belang. Bij robot Denise bijvoorbeeld, zijn de knieën passief en de voeten zijn afgeronde plateaus die met veren aan het onderbeen vastzitten. Daardoor krijgt de robot enigszins voorwaartse en zijwaartse stabiliteit. Bij 'menselijk lopen' heb je een standbeen en een zwaaibeen. Bij het standbeen van Denise zit de

Braitenberg voertuigjes
reageren met simpele acties
op simpele signalen.



Denise loopt.

knies vergrendeld en bij het zwaaibeen zit de knie los, zodat het onderbeen vrij kan zwaaien ten opzichte van het bovenbeen. Onder elke voet zit een schakelaar die de knie op slot zet als de voet contact maakt met de vloer. Het zwaaibeen kan vrij heen en weer zwaaien en zowel het bovenbeen als het onderbeen zijn te vergelijken met de slinger van een pendulelklok.

Als een mens geen knieën had, zou het zwaaibeen te lang zijn. De pendelende voet zou steeds door de grond moeten. De buigbare knie zorgt ervoor dat de pendel tijdelijk iets korter wordt. Mensen met een stijf been (een stijve knie) moeten om te kunnen lopen dan ook óf waggelen óf ze maken een zijwaartse omhaal met het stijve been.

Het standbeen kun je vergelijken met een 'balancing stick': een bezemsteel op je hand die je door bewegen in evenwicht houdt.

Robot Denise

loopt als volgt: ze houdt haar bovenlichaam mechanisch altijd in het midden van de hoek die de twee benen met elkaar maken, zoals bij een passer. Als een zwaaibeen de grond raakt wordt dat zwaaibeen standbeen en het standbeen wordt

zwaaibeen. De schakelaar in de voet zorgt er voor dat de knie van het zwaaibeen ontgrendeld wordt en dat zijn heupmotor wordt gestart. Het bovenbeen zal versnellen door de zwaartekracht en door de actie van de motor, en het onderbeen blijft door zijn inerte massa achter. Staat het bovenbeen loodrecht op het vloeroppervlak, dan zal het zijn voorwaartse beweging gaan vertragen, waardoor het onderbeen het bovenbeen kan inhalen en de kniegrendel uiteindelijk vast klikt. Doordat het bovenlichaam voorover valt zal kort na het vastklikken van de knie de voet van het zwaaibeen de grond raken, wordt zwaaibeen standbeen en begint de andere helft van de loopcyclus. Via de link met QR-code op deze pagina is een filmpje te vinden van een lopende Denise. (U kunt QR-codes scannen met uw smartphone.)

Deze manier van 'natuurlijk' lopen heet officieel dynamisch lopen. Het is iets heel anders dan wat de meeste huidige humanoïde robots nu nog doen. Die hebben een nauwkeurige positieregeling voor hun benen. Dat wil zeggen dat de complete trajecten die bovenbeen, onderbeen en voet maken voorprogrammeerd zijn. Dit leidt ook tot een soort bejaard geschuifel: altijd met kromme knieën lopen en je zwaartepunt altijd tussen je twee voeten laten vallen. Het gevolg is dat zo'n robot een stukje voorover zal vallen of te vroeg zal 'stuiken' als de vloer ineens wat hoger of lager is, waardoor de robot een aanzienlijke ruk krijgt. Dit kun je vergelijken met een mens die ten onrechte denkt dat er nog een traptree is bovenaan de trap, of die denkt dat hij al onderaan de trap is en er is nog een tree. Dynamisch lopen is dan ook een flinke stap voorwaarts in het lopen door robots.

De spierballen van de robot

Voor haar heupmotoren maakt robot Denise gebruik van een soort spieren die zich ook gedragen als voorgespannen veren. Het zijn zogeheten luchtspijeren of 'McGibben muscles'. Het

Robot Denise loopt al modern

zijn rubber luchtslangen in een omhulsel van kevlar gaas. Als je lucht in de slang perst zal die verdikken. Het gaas zorgt er vervolgens voor dat de slang verkort, net als een gewone spier dus. Op deze manier heeft Denise net als een mens agonisten (spieren die een gewricht buigen) en antagonisten (spieren die een gewricht kunnen strekken). Het voordeel van deze persluchtspiers is dat je niet echt slim hoeft te zijn om ermee te lopen. Denise heeft dan ook nauwelijks elektronica aan boord. Toch kan ze lopen zoals alle zoogdieren. Om haar 'leeghoofdigheid' te benadrukken hebben de bouwers Denise symbolisch een lege emmer als hoofd gegeven.

Het nadeel van deze door perslucht gedreven spieren is dat ze 'aan' of 'uit' staan. Daardoor kun je de stapgrootte niet subtiel variëren. Dat zou wel handig zijn om bijvoorbeeld oneffenheden in het vloeroppervlak op te vangen. Vandaar dat opvolgende robots zoals Flame en Tulip elektromotoren hebben als spieren, die met behulp van een computer geregeld worden.

Flame heeft ten opzichte van Denise nog twee extra vrijheidsgraden. Hij kan zijwaarts stappen. Dat maakt hem bestand tegen zijwaartse verstoringen van de beweging. Zijn opvolger Tulip kan ook zijn bovenbenen draaien waardoor hij ook bochten kan lopen. Wel zo handig als je bijvoorbeeld wilt voetballen in de RoboCup. Flame en Tulip hebben geen aparte buig- en strekspieren. Beide functies zitten in één motor met een mechanisme dat 'series elastic actuation' wordt genoemd. Op de assen van de gewrichten zit een snaarwiel waarover een stalen snaar loopt die ook over het snaarwiel van de motor loopt. De stalen snaar zit met boutjes vastgeklemd op beide snaarwielen zodat hij niet kan slippen. Tussen de twee snaarwielen zit ook een veer die klappen kan opvangen, bijvoorbeeld wanneer een voet de grond raakt.

Voeten lijken op het eerste gezicht misschien minder spannend voor een robot, maar net als een

mens kan een robot pas stabiel blijven staan als hij voeten heeft die bovendien op een aantal plaatsen onder de zool de druk kunnen meten. Onder de voetzool van Tulip zitten dan ook vier druksensoren die het mogelijk maken om Tulip stil te laten staan zonder dat hij valt. Dezelfde druksensoren worden gebruikt om te voelen of een voet de grond raakt bij het lopen. De onderbeenspieren worden gebuikt bij de voetafzet, voornamelijk tijdens rennen en springen.



Flame loopt.



Tulip uit evenwicht.

McGibben luchtspiers functioneren als echte spieren.



Robocup.



Robot of mens?

Bij de TU Delft is recent ook een rennende robot gebouwd. Door deze 'Phides' te laten rennen op een loopband doen ingenieurs onderzoek naar rennen en de efficiëntie daarvan. Energie wordt gebufferd in voorgespannen veren, analoog aan de spieren en pezen van mens en dier.

Een robot die zijn grenzen kent

De eerste industriële robots zijn eigenlijk lompe machines. Om een object op te tillen zetten ze hun maximale kracht in om dat object tegen de zwaartekracht in te verplaatsen. Als robots ooit moeten samenwerken met mensen is dat riskant. Zo'n robot duwt namelijk overal dwars doorheen. Het alternatief is een robot die zijn spieren gebruikt zoals mensen dat ook doen: als een evenwicht van verschillende veren. Een (echt) been of een arm wordt in een bepaalde positie gehouden door een strekker en een buiger die allebei onder spanning staan. Om de positie iets te verschuiven is maar een relatief klein beetje extra kracht nodig in een van de twee spieren. Datzelfde principe wordt ook gebruikt om robots te maken die potentieel met mensen kunnen samenwerken. Hun posities worden geregeld door veren. Een positieverandering vergt niet veel meer dan een klein motortje dat niet overal dwars doorheen ramt als er iets fout zou gaan. Volgens dat principe kun je dus ook robotarmen bouwen die in staat zijn om iets breekbaars als een ei voorzichtig op te pakken zonder dat het breekt.

Net als mensen moeten robots ook een goed evenwichtsorgaan hebben. De twee evenwichtsorganen van mensen (achter hun oren) zorgen ervoor dat we stabiel kunnen functioneren, bijvoorbeeld ook op schuine oppervlakken. In robots wordt die functie overgenomen door accelerometers die de versnelling in verschillende richtingen kunnen meten, gyroscopen die de hoekverandering meten en magnetometers die als een soort kompas de oriëntatie bepalen.

Lerende robots

Voor het team Clockwork Orange, van de Universiteit van Amsterdam en de TU Delft was 2004 een hard maar leerzaam jaar. Tegen het robocupteam van Singapore verloor het team met maar liefst 11-0! En het ergste was: de Nederlanders kregen elf identieke doelpunten om hun oren.

De wedstrijd was een goede illustratie van een bekend dilemma in de robotica: hoe zorg je dat een robot niet voor verrassingen komt te staan? Je kan wel proberen te bedenken in wat voor (spel) situaties een robot terecht zal komen, maar je kunt nooit alles programmeren. En denk je net een oplossing te hebben geprogrammeerd voor een lastige situatie, blijkt je een andere situatie juist weer nodeloos moeilijk te hebben gemaakt. Zou het niet handig zijn als een robot zou kunnen leren? Dan hadden de 'Clockwork robots' na het eerste doelpunt van Singapore kunnen bedenken: 'Dat gebeurt me niet nog tien keer!'

Om echt te kunnen leren heb je meer nodig dan een regelsysteem. Een regelsysteem houdt een parameter (bijvoorbeeld bloeddruk) op een ingestelde waarde, een adapterend regelsysteem past de instelling aan als de omstandigheden blijken te veranderen (hogere bloeddruk bij gevaar). Een lerend systeem kan zelfs onthouden hoe het systeem zich de vorige keer aan deze gewijzigde omstandigheden had aangepast (dreigend gevaar dus nu al druk omhoog). Hierdoor wordt onmiddellijk de juiste instelling gekozen zonder dat hij opnieuw hoeft te worden opgezocht, zoals bij een adapterend systeem. Bij robots wordt dit 'reinforcement learning' genoemd, analoog aan het conditioneren in de psychologie. Het is zoals je zelf leert lopen, fietsen, zwemmen of voetballen: je leert door het te doen en door fouten te maken. Daarbij is het niet nodig dat je weet hoe je het doet. Dát je het doet – met bijbehorende fouten – is belangrijk.

VRAAG 2

Zouden er, behalve alle goede eigenschappen van mensen ook nog eigenschappen zijn die de robot maar beter niet kan kopiëren?



Hoe werkt dat bij robots? Als eerste moet je een robot maken die je kunt 'belonen'. Een robot dus die ergens van houdt. Bij reinforcement learning ten behoeve van robots worden er punten gebruikt, zoals high scores bij flipperkasten en computer games. De robot wil zoveel mogelijk punten hebben, in software gerealiseerd door een tellertje. Daar waar een mens er bijvoorbeeld naar streeft om zo gelukkig mogelijk te zijn, streeft de robot naar een zo hoog mogelijke waarde van dat tellertje. Dan moet de robot nog beloond worden voor goed gedrag en eventueel gestraft voor slecht gedrag.

John Cleese uit Monty Python's Flying Circus demonstreert een 'silly walk'.

VRAAG 3

Robots beloon je met punten, mensen met enige vorm van gelukkig gevoel. Zou de betere robot ook geen betere beloning moeten krijgen dan slechts een '1' of een '0' op een simpel tellertje?

De robot die in Delft wordt gebruikt voor deze experimenten heet Leo. Hij is in feite niet veel meer dan een wandelend moederbord, dat rondjes loopt om een boom waar hij ook elektrische voeding kan krijgen. Door vallen en opstaan en door belonen en straffen leert Leo lopen en ook traplopen.

Straf voor robot Leo

In theorie is het makkelijk gezegd: je belooft een robot als hij goede stappen maakt en straft hem voor struikelpartijen. Maar hoe beloon en straf je een robot? In eerste instantie redeneerden de bedenkers van Leo dat hij straf moest krijgen (puntenaftrek) voor vallen, als een kind dat pijn heeft bij het vallen. Maar Leo reageerde daarop door op alle mogelijke manieren te voorkomen dat hij zou vallen. Hij legde zelfs zijn been in zijn nek, als hij maar niet zou vallen. Maar met een been in zijn nek leerde Leo dus niet lopen.

Net als in de moderne psychologie en ook in het trainen van dieren, bleek belonen voor goed loopgedrag beter te werken dan straf voor vallen. Datzelfde principe bleek ook te gelden voor voetballende robots. Als zij een toenemende straf kregen voor botsingen in het veld, vluchtten de robots op een gegeven moment letterlijk van het veld af om aan de steeds strengere straffen te ontkomen!

Als je eenmaal een goede manier van belonen hebt gevonden, blijken vergelijkbare robots heel verschillende manieren te kunnen ontwikkelen om te leren lopen. Van een kippenloopje tot een Russische soldatenpas, het hele scala van Monty Python's *Ministry of silly walks* komt voorbij. Het blijkt dat de kleinste verschillen in de uitgangssituatie een heel groot verschil kunnen veroorzaken in hoe de robot leert lopen. Pas op het moment dat je de robot ook gaat belonen voor zaken als energie-efficiëntie komt er een min of meer universele manier van lopen naar boven bij vergelijkbare robots.

Van het lab naar het huishouden

Wat is er voor nodig om de huidige 'onderzoeksrobots' van het laboratorium naar, zeg, de keuken te krijgen? Eigenlijk zijn veel componenten om een robot in het huishouden rond te laten lopen al in rudimentaire vorm aanwezig, maar het is bij lange na nog niet compleet. Erg robuust is het ook nog niet. En er moet nog enorm veel geprogrammeerd en uitgetest worden.

Voor de realisatie van robots zoals je die in films

als Starwars ziet, moet je denken in termen van de evolutie: van insectengedrag via knaagdieren- en primatengedrag naar menselijk gedrag. Insecten als een mug hebben enkele door evolutie ontstane reflexen en adapterende regelsystemen. Ze hebben nauwelijks geheugen en leervermogen, weinig tot geen gevoel en absoluut geen bewust gedrag of zelfbewustzijn. Knaagdieren als de muis hebben bovenop het 'insectengedrag' de mogelijkheid om door het aanleren van vaardigheden de kans op 'survival of the fittest' te vergroten. Ze herkennen vecht-of-vlucht-situaties, eten of gegeten worden. Het gevoelsleven van een knaagdier is ook groter

Pas als dit meisje door heeft dat ze zelf haar armen kan besturen, kan zij ook armbewegingen van anderen kopiëren.



omdat dit een rol speelt bij het aan- en afleren van gedrag.

Bij primatengedrag is het leren door uitproberen, straffen en belonen met een bijbehorend gevoelsleven tot grote hoogte gestegen. Bovendien hebben deze dieren allerlei oplossingen om het vinden van de eerste 'Eureka!-oplossing' te versnellen, anders dan door trial-and-error. Ze hebben ouders en andere leermeesters die het voordoen, afkijken en spiegelen. De voorwaarde daarbij is wel dat je moet weten dat bijvoorbeeld jouw arm hetzelfde is als de arm van een ander. Sommige dreumesen staan eerst verlegen te kijken bij het zingen en hiep-hiep-hoera roepen als de armen de lucht in gaan. Pas als je één keer de armpjes hebt beetgepakt, realiseren ze zich dat ze dat met hun eigen armen ook kunnen doen en dat dat hetzelfde is als de anderen doen.

Primaten zijn erg slim, ze hebben goed inzicht in situaties, ze kunnen practical jokes maken en er om lachen, ze kunnen verdrietige en vervelende situaties inzien. Het grote verschil met mensen zit hem in het gebruik van taal. Met spraak kunnen visuele zaken naar het auditieve domein worden gebracht. Omdat een beeld meer zegt dan duizend woorden, is omgekeerd een woord ook een verregaande abstractie van een beeld. Met het woord glas wordt in één klap een wereld aan bijvoorbeeld drinkglazen in een klank samen gevat. Er wordt afgezien van alle mogelijke details die er niet toe doen en daardoor kan er ook heel makkelijk op een hoog abstractieniveau mee geredeneerd worden en over worden gecommuniceerd met anderen.

Logisch redeneren zonder spraak is nauwelijks mogelijk. Hierdoor kunnen we ook zeer ingewikkelde, abstracte zaken – neem de klimaatdiscussie – in taal vatten. Doordat we de spraak ook weer op kunnen schrijven en kunnen lezen, kunnen de mondelinge overleveringen ook op schrift worden gesteld, weer in spraak worden omgezet en dus verbeeld worden. Door spraak, mondelinge

overlevering en debat wordt in vergelijking met primaten veel meer leerstof vastgelegd in een soort uitbreiding van ons eigen geheugen: een collectief geheugen over normen en waarden. Door het opschrijven wordt dit geheugen nog eens verder uitgebreid, omdat we hierdoor ook tot ons kunnen nemen wat onze voorvaders er over dachten en daar dan weer commentaar op kunnen leveren.

Koffiedik

Wat betekent dit allemaal voor de robotica? Als we uitgaan van een lopende robot zoals Tulip, hebben we nu al moeite om het insectengedrag te realiseren, maar basishandelingen zoals evenwicht bewaren, zitten, staan, lopen en traplopen zijn binnen vijf jaar waarschijnlijk zo ver dat robots dit redelijk robuust kunnen doen.

Met lopende robot Leo zijn we aan het begin van het knaagdierengedrag aangekomen, inclusief het leren van situaties. Dit staat pas aan het begin, maar ook hier zijn we in een jaar of tien al een aardig eind mee op weg bij robots van de complexiteit van Tulip. Hogere aangeleerde vaardigheden, het uitvoeren van eenvoudige taken zoals voetballen of de kamer opruimen zijn binnen vijftien jaar te verwachten. Een belangrijke 'graal' is de mogelijkheid van het herkennen en classificeren van de omgeving, objecten, mensen, emoties, gedrag, sprekers en spraak.

Hoewel het bewust analyseren van wat er aan de hand is in een scene (het primatenniveau) nu al volop onderwerp is van studie zal het nog zeker twintig jaar duren voordat dit succesvol samengevoegd kan worden met de aangeleerde hogere vaardigheden van het knaagdierenniveau. Het menselijke niveau, waarop met medemensen hoogwaardige discussies gevoerd kunnen worden over de toestand in de wereld, zeg het Starwars robotniveau, zal nog zeker vijftig jaar op zich laten wachten.

BEKNOPTE GESCHIEDENIS VAN DE BATTERIJ

1798	De Italiaanse fysicus Alessandro Volta de eerste batterij – de ‘Volta-cel’ – uit stapeltjes zink, met zuur bevochtigd karton en koper.
1836	De Engelse chemicus John F. Daniell verbetert de Volta-cel dusdanig dat corrosie kan worden voorkomen
1859	Gaston Plante vindt de loodzuuraccu uit, tot de dag van vandaag gebruikt in auto’s
1868	De Franse chemicus Georges Leclanche ontwerpt de eerste ‘natte-cel’-batterij, voorloper van de huidige ‘droge-cel’-batterij.
1888	De Duitse wetenschapper Carl Gassner vindt de ‘droge-cel’ uit. Zijn batterij is vergelijkbaar met de huidige kool-zink-batterij.
1896	Het bedrijf Columbia uit de VS maakt de eerste commercieel verkrijgbare batterij.
1898	Conrad Hubert maakt de eerste zaklamp, die hij “electrische handtoorts” noemt.
JAREN 1900	Thomas Alva Edison verbetert de loodzuur-accu. Zijn andere verbeteringen aan de batterij komen terecht in treinen en mijnen.
1956	Eveready Battery Company ontwikkelt de 9-voltsbatterij.
1959	Eveready Battery Company ontwikkelt een commercieel beschikbare alkaline batterij.
1960	Miniatuur zilveroxide batterijen of ‘knoopbatterijen’ worden voor hoortoestellen en horloges. De Zweed Waldmar Junger ontwikkelt het eerste heroplaadbare NiCd- batterijsysteem.
1992	De eerste Li-batterijen komen commercieel beschikbaar: de krachtigste AA-batterijen op de markt.
2000-HEDEN	Technologische innovaties leiden tot heroplaadbare Ni-metaalhydride batterijen, ‘high-performance’ Ti-batterijen, en batterijen die in 15 minuten kunnen worden heropgeladen.
TOEKOMST	De toekomst van batterijen lijkt veelbelovend. In Israël is een batterij ontwikkeld die op papier kan worden gedrukt, wat enorme mogelijkheden opent voor <i>hand-held devices</i> en andere persoonlijke electronica. Waarschijnlijk worden brandstofcellen op termijn de meest geschikte vorm van draagbare energie.

Heilige graal

Wat is nú de meest prangende vraag in het roboticaonderzoek? Dat is zonder twijfel de energievoorziening. Hoewel de accu’s steeds beter worden, is dat bij lange na niet genoeg om de robots langere tijd achter elkaar in de lucht te houden. Wellicht kan de ontwikkeling van elektrische auto’s bijdragen aan de ontwikkeling van accu’s en daarmee aan de toekomstige energievoorziening van robots.

Het tweede nijpende probleem is de reken-capaciteit van de huidige processoren. Als nano-computers doorbreken zal dit zeker helpen. Nog beter zal het worden als we gaan begrijpen hoe het menselijk brein in elkaar zit. De schors in de grote hersenen waarmee we redeneren, maar ook de structuren onder die schors, zoals de kleine hersenen, waarmee we bijvoorbeeld ons evenwicht bewaren, en de basale kernen waarin we bewegingsscripts opslaan... het zijn stuk voor stuk regelmatige structuren van identieke elementen die parallel aan elkaar dezelfde taken kunnen uitvoeren.

Eigenlijk zou je de intelligentie van onze robot in vergelijkbare structuren willen opslaan. Pas als we dit kunnen zijn we waarschijnlijk in staat om robots te bouwen die de mens kunnen benaderen in denkkraft. Gezien de huidige aandacht voor hersenonderzoek kan dit snel gaan, maar dan moeten er wel meer ingenieurs komen die de vertaalslag naar digitale elektronica, lerende systemen en robotica kunnen maken.

Robotica en het goede leven

■ DR. MARK COECKELBERGH

IN HET voorgaande hoofdstuk worden tussen de regels interessante wetenschappelijke en filosofische vragen gesteld. In het bijzonder daagt robotica ons feitelijk uit om na te denken over mensen en dieren. Wat is de relatie tussen lichaam en geest? Kan menselijke intelligentie nagebootst worden? Hoe beweegt een mens eigenlijk? Hoe leren we taal? Vooral humanoid robotics is een onderzoeksgebied dat deze vragen opwerpt. Zijn we in wezen een soort van robots? Wetenschappers in Nederland, Japan, en elders proberen meer te weten te komen over de natuur en de mens door te proberen robots te bouwen die op mensen lijken. Hiroshi Ishiguro maakt robots met een mensachtig gezicht en ook in Delft en Twente wordt aan humanoïde robots gewerkt.

Robotica is een breed onderzoeksgebied met veel praktische, ethische en sociale vragen: Wat zijn de (mogelijke) gevolgen van robots voor mens en maatschappij? Wat als we ouderen laten verzorgen door robots? Is het aanvaardbaar om jonge kinderen te laten opgroeien met robots? Worden onze auto's robots, en zo ja wat doet dat met ons? Vinden we het goed dat mensen seks hebben met robots of 'relaties' met ze aangaan? Deze vragen zijn minder ver van je bed dan je zou denken. Ze hebben te maken met hoe techniek ons leven beïnvloedt en wat voor leven we willen leiden. Kunnen robots bijdragen aan het verbeteren van mensenlevens?

Een kleine geschiedenis van de robot

Om ethische vragen rond robotica te kunnen beantwoorden moet je eerst iets begrijpen over de geschiedenis. Het woord 'robot' in zijn huidige

betekenis is relatief recent en betekent 'slaaf'. Het werd gepopulariseerd door de Tsjechische schrijver Karel Čapek in zijn toneelstuk *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*, 1920). Pas veel later werden onder invloed van de ontwikkeling van informatietechnologie de eerste min of meer intelligente robots gemaakt en gebruikt, in het bijzonder in industriële toepassingen.

De idee van een machine of artificiële entiteit die zelf kan bewegen is evenwel al veel ouder. Al in de Griekse mythologie bouwde de god van het vuur Hephaistos mechanische dienaars en in een oude Joodse legende wekt een rabbijn het kleifiguur Golem tot leven. Er zijn ook beschrijvingen van 'automaten' uit het China uit de derde eeuw voor Christus en in de Oude Wereld werden waterklokken gebouwd die de tijd automatiseerden. De eerste 'humanoïde robot' ontstond rond 1500 op de tekentafel van Leonardo da Vinci, al weten we niet of hij hem ook bouwde.

In de vroegmoderne tijd (vijftiende tot de negentiende eeuw) maakte men rekenmachines en mechanische beesten, zoals een mechanische eend. Vanaf de achttiende eeuw komt er ook automatisering om mensen te entertainen, onder andere in Japan. Tijdens de industriële revolutie in de achttiende en negentiende eeuw was er uiteraard vergaande automatisering, gevolgd door de 'informatierevolutie', waarvan we het verdere verloop en de maatschappelijke gevolgen nog steeds niet goed kennen.

Robots doen het beter en sneller

Vanaf de tweede helft van de twintigste eeuw

worden intelligente robots massaal gebruikt, vooral in de industrie. Als we nu denken over het verleden van de robotica zien we deze industriële robots vaak als de eerste 'echte' robots omdat ze niet slechts mechanisch zijn maar ook elektronisch en dus een zekere intelligentie bezitten. Zoals alle technische ontwikkelingen was deze inzet van intelligente industriële robots niet zonder gevolgen voor mens en maatschappij. De techniekfilosofie leert dat technieken niet 'neutraal' zijn maar iets doen met mensen, met de omgeving, en met de maatschappij.

Om te begrijpen welke invloed de eerste 'robots' hadden, moeten we weer even teruggaan in de tijd. De automatisering was enkel mogelijk dankzij ontwikkelingen als de mechanisering van de tijd en van de arbeid. In middeleeuwse kloosters hadden de monniken behoefte aan klokken om de tijd en activiteiten te kunnen structureren. In de moderne tijd worden allerlei meer ontwikkelde disciplineringsmethoden gebruikt. De Franse denker Michel Foucault heeft dat beschreven in zijn werk over moderne gevangenissen, ziekenhuizen, en andere instellingen (*Surveiller et punir*, 1975). In de industriële productie betekende dit dat de tijd en het werk vanaf toen werd opgedeeld in kleine, logische stukjes.

De keerzijde van die meer wetenschappelijke bedrijfsvoering, of Taylorisme, is onder andere beschreven door Marx: de arbeider vervreemdt van de productie en verliest ook de vaardigheden om het werk te doen dat nu door machines wordt overgenomen. Bovendien – en dit wordt vaak vergeten – betekent nieuwe techniek ook dat de omgeving moet

De eerste echte robot stamt uit het Tsjechische toneelstuk R.U.R. (1920).



worden aangepast: de productielijn komt centraal te staan en alle mensen, ruimtes en dingen worden aan de machines of robots uit die productielijn aangepast. Deze vervanging van arbeid door kapitaal betekent ook dat ongeschoolde arbeiders nog maar weinig kunnen bijdragen aan de productie. De robot doet het beter en sneller!

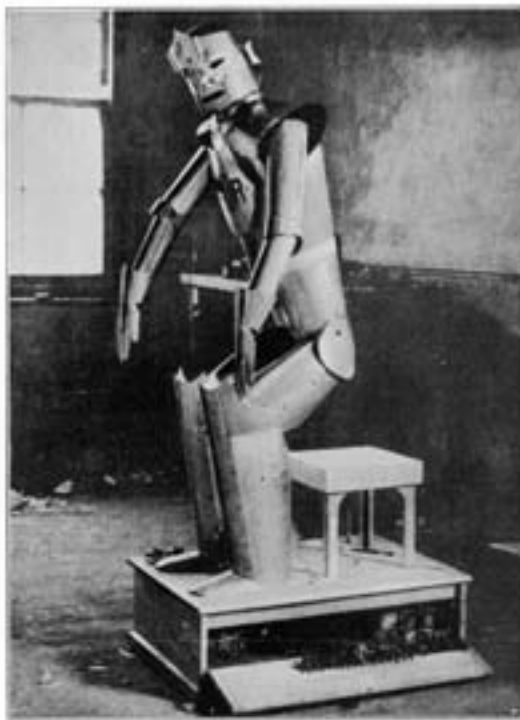
De sociale robot

Vandaag is er een nieuwe ontwikkeling in de robotica. Robots worden niet langer enkel ingezet in industriële processen, in de ruimtevaart of bij het opruimen van explosieven; stuk voor stuk terreinen waar je dingen op afstand moet kunnen doen

zonder mensen in gevaar te brengen. De huidige robots verlaten het laboratorium en de fabriek. Ze komen binnen in het dagelijks leven van mensen. Er worden 'persoonlijke' en 'sociale' robots ontwikkeld die interactie kunnen hebben op een haast 'menselijke' manier.

Neem een moderne auto, die zit vol elektronica. De nieuwste auto's zijn zelf al een beetje robots. Er zijn er die remmen zonder dat je erom vraagt, als een voorligger plotseling stopt, of die het stuur corrigeren als je per ongeluk doezelt en van je rijbaan dreigt af te wijken. Een belangrijk probleem bij die ontwikkelingen is dat eigenlijk ook de omgeving moet worden aangepast aan de autorobots.

Ondertussen hebben we ook in de oudere auto's al wel de navigatie uit handen gegeven. Je kunt je afvragen wie er tegenwoordig eigenlijk rijdt. De bestuurder volgt enkel nog zijn GPS. Auto, mens en GPS zijn samen een soort van robot geworden. Natuurlijk, we kunnen in principe ook een andere route volgen, maar mensen worden verslaafd aan deze manier van bewegen. Hoeveel mensen zijn er niet een tijdelijk afgesloten weg ingereden, alleen omdat hun navigatieapparaatje hen dat opdroeg? Er vindt ontegenzeggelijk een verlies van vaardigheid plaats. Steeds minder mensen kunnen nog navigeren met behulp van een kaart waarop we niet onze positie zien. Willen we dat wel, of is het niet zo'n probleem? Hoe willen we ons eigenlijk verplaatsen en wat doet een bepaalde manier van verplaatsen met ons?



L'uomo meccanico presentato a una riunione tenuta nella sala dell'Agrostological Hall di Londra.

Robonurse

Een steeds actueler voorbeeld van wat robots kunnen betekenen voor mens en samenleving zien we in plannen voor de gezondheids- en ouderenzorg. Er komen steeds meer ouderen en steeds minder jongeren die voor hen kunnen zorgen. Dat tekort aan verplegend en verzorgend personeel willen sommigen – echt niet alleen in Japan! – opvullen met robots. Maar waarvoor willen we die robots dan inzetten?

Er zijn al veel intelligente apparaten aan het werk in ziekenhuizen. Met bijvoorbeeld operatierobots lijken we geen probleem te hebben. De gedachte dat robots verpleegsters zouden kunnen vervangen ligt een stuk moeilijker. Het probleem zit dus niet zozeer in intelligente, 'robotische' hulpmiddelen die gebruikt worden



**Hoeveel mensen volgen
slaafs de GPS uit hun auto?**

bij operatie, revalidatie of in robots die iemand kunnen optillen. Dat zijn per slot van rekening lastige of zware klussen voor mensen in deze sector. Het probleem begint bij de zorgrobot; *robonurse* die je wast, helpt bij het naar de wc gaan, medicijnen geeft en een oogje in het zeil houdt. Moeten we dat soort taken wel aan robots overdragen, of zijn dat typisch menselijke taken die te maken hebben met emotioneel contact, met bezorgd zijn in plaats van met zorg verlenen als een dienst?

Sommige ontwerpers beweren dat ze robots kunstmatige emoties kunnen geven. Maar is dat dan wel echt? Zullen deze robots mensen niet voor

de gek houden? Of is het sociale leven misschien sowieso een kwestie van schijn? Ook vergt het gebruik van robots opnieuw een aanpassing van zorgomgevingen, van mensen, en uiteindelijk van de zorgpraktijk. Is dat de goede richting voor de toekomst?

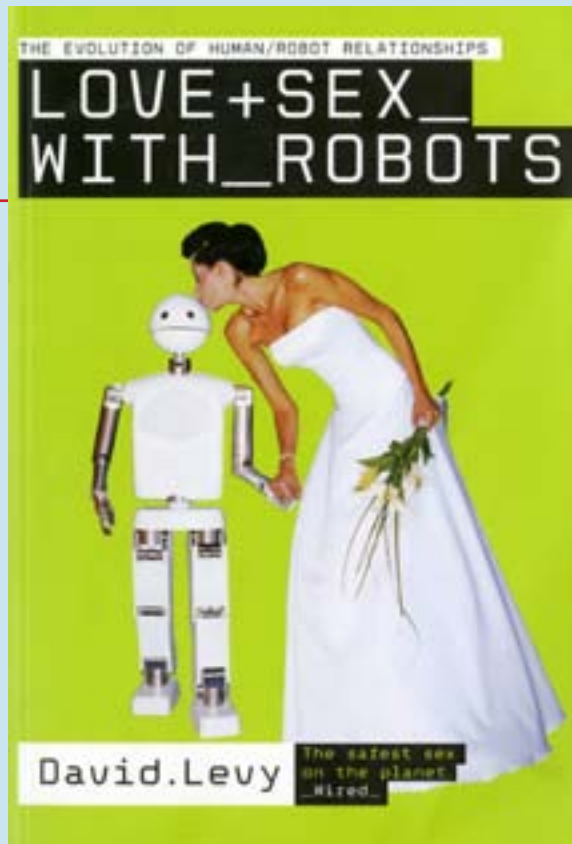
Robotseks

Een vergelijkbaar probleem dient zich aan met robots die gebruikt worden als sekspartner of als 'vriend' of 'vriendin' (meestal het laatste). Want zoals internet nieuwe mogelijkheden opende op dit gebied, zo betreden ook robots het domein van seks en 'relaties'. Het gebruik van seksrobots lijkt in de lijn te liggen van het gebruik van andere seksspeeltjes. Waarom zou een opblaaspop of een dildo geen probleem zijn en een seksrobot wel? Of, zoals de Maastrichtse onderzoeker David Levy schreef in *Love and sex with robots* (2007): hebben artificiële prostituees niet het voordeel dat er tenminste geen mens wordt misbruikt?

Tegelijk moet je je afvragen of een seksrobot of relatierobot wel een mens kan vervangen. Wie vindt van niet moet ook duidelijk maken waarom dat zo is. Seksrobots dwingen ons om verder na te denken over wat het is dat we zo aan mensen en menselijk contact waarderen, wat goede seks is, wat zo mooi is aan relaties.

Robotspeelgoed

Ook robotspeelgoed voor kinderen dwingt tot reflectie. Kinderen gebruiken altijd al knuffels en poppen. Waarom zou een geanimeerde, geautomatiseerde, of gerobotiseerde pop dan slecht zijn?



De Maastrichtse onderzoeker Levy promoveerde in 2007 op zijn onderzoek naar liefde en sex met robots.

vervangen? Is dit nu net geen gebied dat we helemaal menselijk moeten houden? Of kan een robot met artificiële intelligentie wel sommige taken overnemen?

Robotica is ethiek

Ontwikkelingen in de robotica dwingen ons om na te denken over onszelf. Hoe willen we met anderen omgaan? Hoe willen we onze seksualiteit beleven? Wat voor leven willen we leiden? Wat voor mens willen we worden? Hoe willen we dat onze kinderen opgroeien, onderwijs krijgen, werken? Hoe willen we zelf oud worden? Welke rol willen we dat techniek – niet alleen robotica – daarbij speelt? Robotica stelt ethische vragen. In het bijzonder stelt ze opnieuw de oud-Griekse vraag naar 'het goede leven'. We doen er goed aan deze vraag niet links te laten liggen. Anders geven de robots straks misschien wel een antwoord.

Is het omdat de robot de schijn wekt iets anders te zijn dan het is? En als dat zo is, hebben jonge kinderen daar dan last van? Ze leven toch sowieso gedeeltelijk in een fantasiewereld? Het toeschrijven van een ziel aan dingen, zoals kinderen dat zo makkelijk doen, is mogelijk een veel 'natuurlijker' en evolutionair ouder iets dan de kunstmatige, moderne scherpe scheiding tussen mensen en dingen. Dit wetenschappelijke denken, geworteld in het monotheïsme dat de wereld ontzield heeft, lijkt ook één van de oorzaken van de Westerse milieuproblematiek. Als we de wereld als zielloos zien kunnen we er immers mee doen wat we willen.

En op welke manier kunnen robots bijdragen aan onderwijs? Kunnen ze de 'echte' leraar wel

ANTWOORD 1

De RoboChallenge is een internationale wedstrijd voor robots in het zoeken en verzamelen van gekleurde balletjes. Het hogere doel is, net als in de Robocup: met een 'spel' het robotica-onderzoek verder helpen.)

ANTWOORD 2

In de menselijke psychologie schuilen eigenschappen als kuddegedrag. Dat lijkt in veel gevallen niet zo handig voor een robot; al zijn er zelfs nog wel robots te bedenken die ook baat kunnen hebben bij zulk gedrag.

ANTWOORD 3

De kwaliteit van de beloning zit hem in de aard van het tellertje. Een voetballende robot die je weet te belonen met een doelpunt wordt al een stuk beter dan een robot die je beloont met slechts het vinden van de bal.



Waar de huidige gezondheidszorg probeert in te grijpen wanneer iemand écht ziek is, mikt de zorg van de toekomst op het moment vóór het misgaat. Diverse auteurs beschrijven de opmaat naar die gezondheidszorg van de toekomst.

prof. dr. wiel hoekstra

TOPSPORT PROFITEERT VAN MEDISCH ONDERZOEK

W

e schrijven het jaar 2028. De 125ste editie van de Tour de France gaat in Rouen van start. De grote favoriet is de Zwitser Rens Starkebein uit het team dat wordt gesponsord door Bell Metabolic Laboratories, de grootmacht op het gebied van biosensoren. Bij Rens is onderhuids een Bell-chip geïmplantéerd die de toestand van zijn lichaam voortdurend registreert. Op grond van die registratie krijgt Rens tijdens de koers, via een elektronisch nieuwslint dat over zijn stuur loopt, aanwijzingen hoe hij zijn krachten moet verdelen. Zeker zo belangrijk is dat de mensen van de verzorgingspost doorkrijgen welke voedingsstoffen en regulatoren hij moet innemen. Vitaminen, mineralen, alle denkbare behoeften worden tot op de milligram doorgegeven aan de mannen die de bidons vullen. ■ Het liefst zagen zijn verzorgers dat de stoffen via een set injectoren op zijn lichaam rechtstreeks in de bloedbaan of het spierweefsel werden gebracht, maar dat mag niet. De Tour de France heeft in het verleden in haar reglementen afstand genomen van het spuiten. Spuiten wordt in de conservatieve wielwereld nog altijd geassocieerd met doping. Slikken van lichaamseigen producten mag wel. ■ Rens is een goede en intelligente coureur maar zijn suprematie in de wielwereld is toch vooral gebaseerd op de superieure sensortechnologie en fysiologische kennis van Bell Metabolic Laboratories. Twaalf etappes na de start, met de gevreesde Alpen achter de rug, rijdt Rens zoals verwacht in de gele trui. In de dertiende etappe maakt de Nederlander Leo van Damme in het peloton een stuurfout. Rens kan hem niet meer ontwijken, valt en breekt zijn sleutelbeen. De Tour is weer helemaal open.

Vroege signalen van borstkanker

■ DR. KURT BAETEN

■ LARS GRIETEN

■ PROF. DR. PATRICK WAGNER

Borstkanker is een serieuze ziekte en tegelijk de belangrijkste vorm van kanker bij vrouwen. De kans op genezing van borstkanker is het grootst als het gezwel in een zo vroeg mogelijk stadium wordt ontdekt. Vandaar dat vrouwen worden aangemoedigd regelmatig hun borsten te controleren en vanaf hun vijftigste jaar deel te nemen aan een screeningsprogramma met behulp van röntgen, de zogenoemde mammografie. Het blijkt evenwel dat, afhankelijk van het land, gemiddeld slechts 40 tot 80% van de vrouwen uit de doelgroep regelmatig naar de mammografie komt. Er zijn verschillende redenen voor die lage opkomst. Het onderzoek wordt door sommige vrouwen als onaangenaam ervaren, ze moeten vrij nemen van het werk, of schaamtegevoel kan hen thuis houden. Zou het dan ook niet mooi zijn als mammografie net zo eenvoudig zou zijn als om het even welk bloedtestje? Of nog beter: als je net als in het geval van bloedsuiker even een druppeltje prikt en zélf het resultaat kunt zien? Makkelijk zou dat zeker zijn. Of het ook beter is vanuit ethisch oogpunt, dat is een tweede. Want wil je echt thuis, zonder tussenkomst van een deskundige bepalen of je misschien kanker hebt?

De eerste bloedtests voor borstkanker: NMR

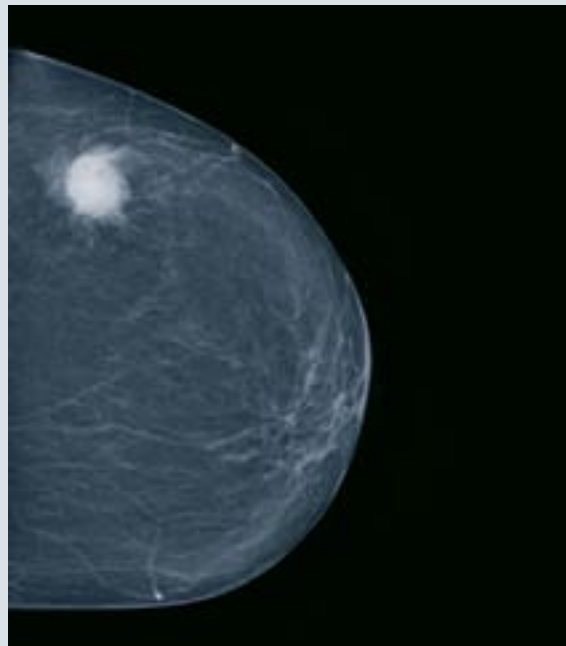
Er bestaat al een experimentele bloedtest voor borstkanker, waarvoor de eerste stappen werden gezet door de Universiteit Hasselt in een samenwerking tussen het Biomedisch Onderzoeksinstituut BIOMED en het Instituut voor Materiaalonderzoek IMO. Net als de meeste gangbare bloedtesten wordt daarvoor een beetje

Borstkanker

Elk jaar krijgen wereldwijd 200.000 mensen borstkanker; vooral vrouwen tussen 35 en 55 jaar oud. De precieze oorzaken zijn nog steeds onduidelijk, al blijkt de genetica in bepaalde gevallen wel invloed te hebben op de kans dat je borstkanker kunt krijgen. Behandeling bestaat uit operaties, bestralingen en agressieve medicijnen, de zogenoemde chemokuren. De kans dat de kanker binnen vijf jaar terugkomt varieert

van 16% bij de laagrisicogroep, tot wel 53% voor de groep met een hoog risico. Borstkanker is een heftige ziekte. Niet alleen zorgt de behandeling voor pijn en miselijkheid bij de patiënte zelf, ook de jaren daarna zijn zwaar, zowel voor de patiënte als voor familie en vrienden. De vraag of de kanker ooit weer terugkomt blijft vaak nog lang na de genezing rondzingen.

Röntgenbeeld van borst met tumor.

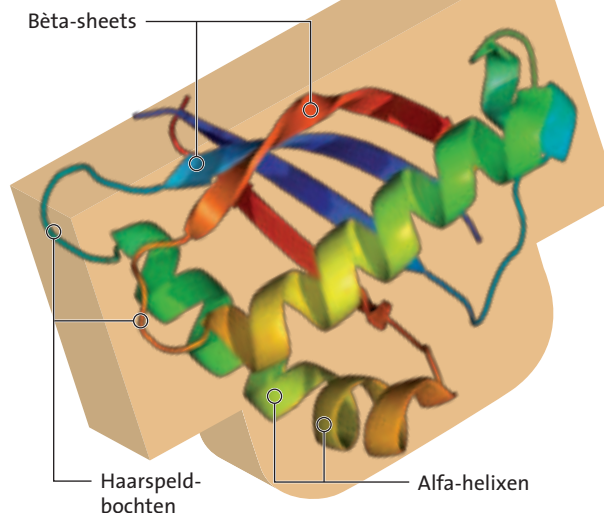


bloed afgenomen op een ‘prikpunt’ of bij de huisarts. Het bloed kan worden geanalyseerd in een gespecialiseerd centrum, waarna de uitslag weer via de huisarts teruggaat. De doelgroep voor deze nieuwe test zijn vrouwen van jonger dan 50 jaar, die doorgaans nog veel actief klierweefsel in hun borsten hebben. Daardoor is het erg moeilijk of zelfs onmogelijk om via mammografie een gezwel te vinden. De nieuw ontwikkelde bloedtest ondervindt geen hinder van dit klierweefsel en kan dus zonder probleem eventuele borstkanker bij vrouwen jonger dan 50 opsporen.

De Hasseltse onderzoekers hebben vastgesteld dat de concentratie van suikers, aminozuren en vetten – in jargon: de ‘metabole handtekening’ van het bloed – van borstkankerpatiënten verandert. Deze metabole handtekening kan worden vastgesteld met behulp van Nuclear Magnetic Resonance. NMR-spectroscopie maakt gebruik van een magneetveld voor het analyseren van (lichaams) vloeistoffen. Verschillende stoffen reageren op hun eigen wijze op een geïnduceerd magnetisch veld. Ze geven dus allemaal een apart piekje op de uitdraai van de NMR. De hoogte van die piekjes in het spectrum is een maat voor de hoeveelheid van die betreffende stof in het bloed. Op deze manier kun je op een snelle en accurate manier de concentratie van honderden verschillende stoffen in het bloed meten en kun je eventuele afwijkingen vaststellen.

Uit de eerste experimenten blijkt dat je met behulp van NMR met een specificiteit van meer dan 90% kunt zeggen of iemand al dan niet borstkanker heeft. Dit wil zeggen dat meer dan 90 van de 100 personen die volgens de test geen borstkanker hebben de ziekte ook écht niet hebben. Bovendien heeft deze test ook een sensitiviteit van meer dan 90%: van de 100 personen met borstkanker zal de test er meer dan 90 detecteren. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met de huidige mammografie voor 50-plussers. Ze zijn een stuk beter dan de

MERKERMOLECULE MUCIN-1 VOOR BORSTKANKER



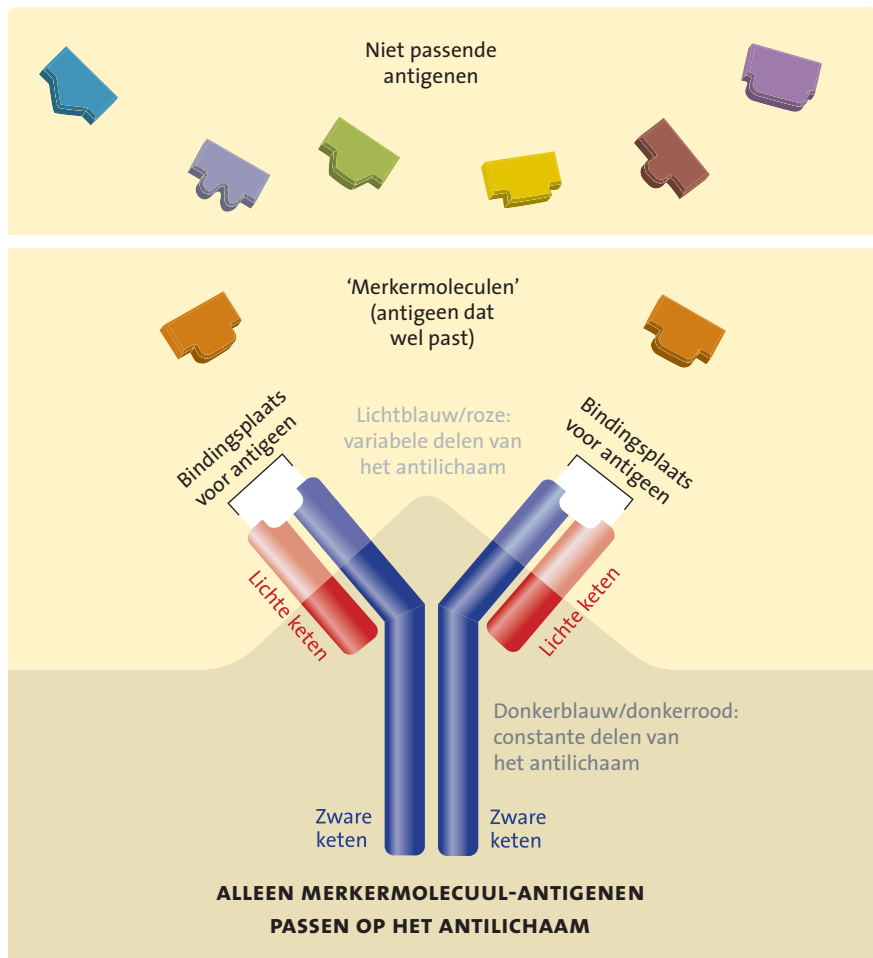
mammografie voor personen jonger dan 50 jaar. Daarmee kun je nu slechts 67 van de 100 personen met borstkanker herkennen. Het is dus vooral in deze jonge categorie dat deze nieuwe bloedtest in de toekomst een belangrijke toegevoegde waarde zou kunnen vormen.

Deze bloedtest voor borstkanker is nog niet vrij beschikbaar. Er wordt nog extra onderzoek gedaan om de test te perfectioneren voordat hij daadwerkelijk via de huisarts kan worden gebruikt. Tot deze test beschikbaar komt, is het bevolkingsonderzoek via de mammografie nog de aangewezen weg om het risico van borstkanker te verkleinen.

Het kan nog eenvoudiger

Inmiddels is ook een nog eenvoudiger test in ontwikkeling: een die specifieke merkmoleculen opspoot via zogenoemde biosensoren. Je zou dit kunnen vergelijken met de bekende glucosesen-

Het merkerproteïne 'Mucin-1'. Een verhoogde concentratie in het bloed geeft een aanwijzing voor de aanwezigheid van gezwellen.



Een antilichaam van het type 'immunoglobuline'. Dergelijke antilichamen zijn essentieel in ons immuunsysteem. In een biosensor kun je deze antilichamen gebruiken om merkmoleculen te herkennen en te binden.

sor, waarmee diabetici zelf hun bloedglucose kunnen bepalen. Deze (toekomstige) test meet uiteraard geen glucose, maar moleculen die alleen bij borstkanker voorkomen. Als deze experimenten slagen heb je geen analyse in een gespecialiseerd laboratorium meer nodig, maar kan de huisarts of gynaecoloog zelf een testje uitvoeren.

Zo'n toekomstige test voor de vroege diagnose van borstkanker via een simpele biosensor is wat je noemt een uitdaging. Daarom hebben de Nederlandse, Belgische en de Duitse overheid recent de handen in elkaar geslagen. Hun project

MicroBioMed (2011 – 2013) wordt door het Europese programma 'Interreg' gefinancierd. Binnen MicroBioMed werken verschillende medische en technologische instituten aan de universiteiten van Maastricht, Luik, Aken en Hasselt samen met het Interuniversitaire Micro-elektronica Centrum IMEC in Leuven.

De medische partners van het project zoeken in weefsel- en bloedmonsters van een hele reeks van borstkankerpatiënten naar specifieke eiwitten of zogenoemde metabolieten. Dat kunnen stoffen zijn die door het gezwel zelf worden geproduceerd, of stoffen die door het lichaam worden gemaakt om het gezwel te bestrijden, de zogenoemde anti-stoffen. Zodra je die merkmoleculen kent zou je receptormoleculen willen maken die weer specifiek op die betreffende merkers passen.

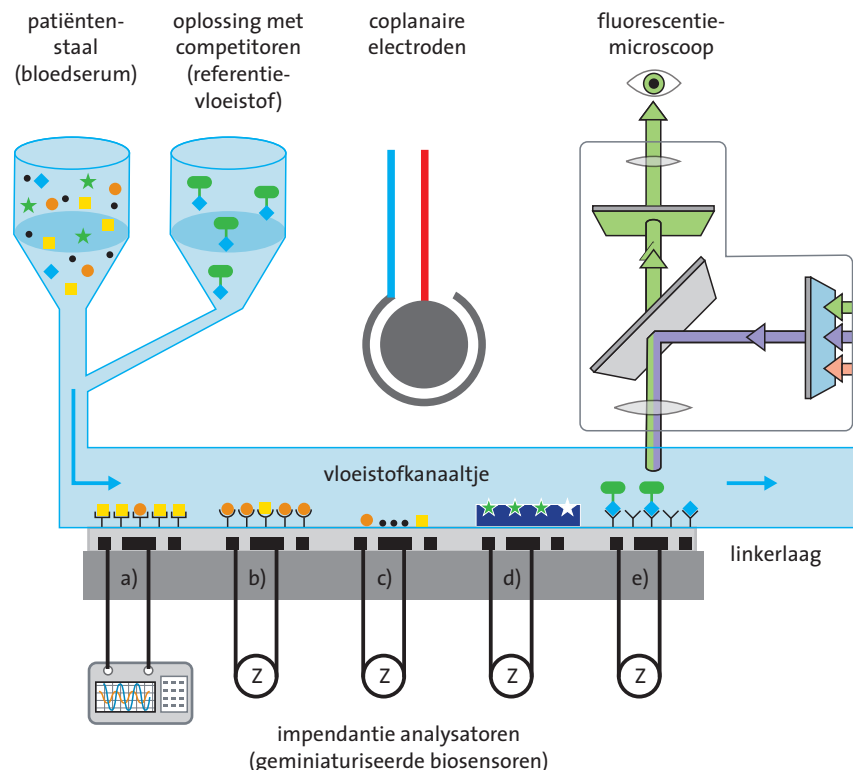
Een eerste geschikte kandidaat-merker is al gevonden: MUC-1, of Mucin-1. Ieder mens heeft dit eiwit in zijn of haar bloed, maar verhoogde concentraties blijken een serieuze alarmbel. Om een zeer betrouwbare test met hoge selectiviteit en sensitiviteit te maken zou dit Mucin-1 samen met nog andere merkers geanalyseerd kunnen worden.

Een speld in een hooiberg

Wat deze speurtocht moeilijk maakt zijn de lage concentraties van de verschillende merkers. Een aannemelijke concentratie van 1 nM (nanomolair) betekent dat er 10^{-9} Mol in een liter bloed (serum) zou zitten. Via het getal van Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23}$) kun je berekenen dat er dus een kleine 10^{15} moleculen per liter te vinden moeten zijn. Maar in dezelfde liter zitten ook meer dan 10^{25} water- en andere moleculen. Je moet 1 merkmolecule dus zien te vinden tussen ongeveer 10 miljard andere deeltjes. Dat is met recht een speld in een hooiberg!

De technische partners van MicroBioMed ontwikkelen ondertussen strategieën om de receptoren waarmee je de merkers herkent aan

- proteïne X
- proteïne Y
- ◆ proteïne Z
- ◆ Z-competitor met label
- ★ metaboliet
- ⊥ anti-X receptor
- ⊥ anti-Y receptor
- ⊥ anti-Z receptor
- 'andere proteïnen'
- mip receptor



Deze schematische weergave van een 'lab-on-chip' bestaat uit een vloeistofkanaaltje voor het bloedserum van een patiënt en een referentievloeistof. In het kanaaltje zijn vijf geminaturiseerde biosensoren ingewerkt. De sensorspotjes a) en b) binden proteïnen met behulp van antilichamen en worden elektrisch ('impedimetrisch') uitgelezen. Spotje c) dient als een referentie terwijl spotje d) bedekt is met een moleculair ingeprent polymeer (MIP) om metabolieten te herkennen. Het vijfde spotje toont een optisch uitlezingsprincipe waarbij men gebruik maakt van gekleurde 'competitor-moleculen'.

VRAAG 1

De futuristische 'lab-on-chip' maakt gebruik van een kleurreactie op de aan- of afwezigheid van een bepaalde stof. Hoezo futuristisch, dat principe kennen we toch al heel lang?!

het oppervlak van een sensor te koppelen, en wel op zo'n manier dat ze hun biologische functie nog wel behouden. Ze moeten de merker nog wel blijven herkennen. Vervolgens moeten ze ook nog een of ander meetbaar optisch of elektronisch signaal geven. Omdat het de bedoeling is tegelijkertijd verschillende eiwitten en metabolieten te screenen, zal een 'enkelvoudige' biosensor zoals de glucosemeter van de diabetespatiënten hier niet voldoen. Met verschillende analyses voor evenveel merkers uit één druppel bloed kun je gerust spreken van een 'pocket laboratorium', ofwel een 'lab-on-chip'.

Een lab in broekzakformaat

In de figuur hierboven staan X, Y en Z voor drie verschillende proteïnes die merkers zijn voor

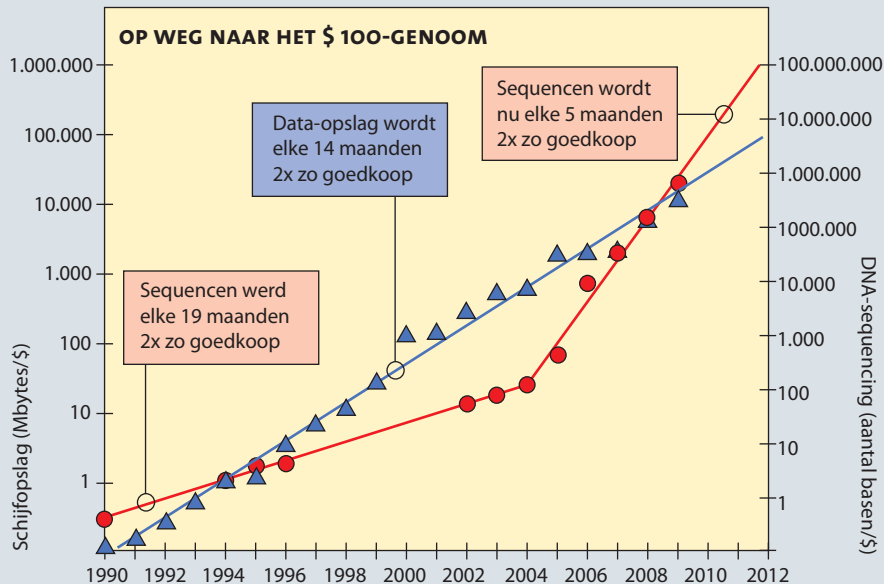
borstkanker. In een bloedmonster zijn natuurlijk nog tal van andere eiwitten aanwezig die niets met borstkanker te maken hebben. Die zijn weergegeven als kleine zwarte bolletjes. Er zitten ook potentieel interessante metabolieten in het bloed (afgeleiden van merkers).

Laat je een bloedmonster door dit prototype sensor met vijf gevoelige zones stromen, dan zal merker 'X' gebonden worden door de receptor 'anti-X'. De receptoren zitten op zo'n manier op elektrodes gebonden dat de weerstand tussen die elektrodes toeneemt wanneer aan die receptor een molecuul uit het bloed van een patiënte hecht. Hoe meer merkers, hoe hoger de weerstand. Op die manier kun je de concentratie van een stof dus vertalen in een elektrisch signaal.

De praktijk is doorgaans wat minder zuiver.

Het duizend dollar genoom

Binnen de vroege diagnostiek voor verschillende ziekten gaat veel aandacht naar de genetica. De eerste publicatie in 2001 van de complete sequentie van het humane genoom – het volledige DNA van de mens – had twintig jaar en een miljard dollar gekost. In 2020 kun je de drie miljard bouwstenen van het DNA van een man of vrouw vermoedelijk in één week voor het luttele bedrag van duizend dollar ontrafelen. Maar wat heb je er aan als in, zeg, 2050 van iedere baby bij de geboorte het genoom wordt geanalyseerd? Voor kinderen met een ernstige genetische stofwisselingsziekte zou je een aangepast dieet kunnen ontwerpen. Maar wat als er voor een genetische ziekte helemaal geen therapie of dieet bestaat? En wat heeft een kind of een



ouder aan de kennis dat het genetisch profiel een hoog risico geeft op borstkanker, dementie, of de ziekte van Parkinson? Alleen als een gewaarschuwd mens zijn risico's door een aangepaste levensstijl kan beperken telt hij voor twee. De kennis over het functioneren van genen neemt met de dag toe. Je mag dan ook aannemen dat de mogelijkheden voor

therapie zullen uitbreiden. Maar de gevestigde klinisch genetische orde laat vooralsnog waarschuwend geluiden horen. Misschien kun je straks voor duizend dollar of euro je genoom laten analyseren. Maar vergeet dan ook vooral geen geld te reserveren voor counseling. Wat betekent een bepaald genoom voor mij, voor mijn huidige kinderen, voor mijn toe-

komstige kinderen? Hoe moet ik met de kennis van mijn genoom mijn leven verder gestalten geven? En voordat we massaal aan het analyseren slaan: hoe gaan we om met een te verwachten maatschappelijke druk naar individuele genomanalyses? Of hoe is het met het recht op niet-weten?

Molecule Y zal ook wel eens aan receptor X blijven plakken. Voor dergelijke kruisreacties valt wetenschappelijk te corrigeren, net als voor de binding van stoffen die niets met kanker te maken hebben. Daarvoor dient het 'referentie spotje'.

Het is ook niet vanzelfsprekend dat voor alle merkmoleculen een goed antilichaam bestaat. Daarvoor wordt een alternatief gezocht in de vorm van zogenoemde moleculair ingeprinte polymeren, MIP's. Van de betreffende merkers kan een

afdruk worden gemaakt in een kunststof, zoals een voetafdruk in het zand. Als diezelfde merker uit het bloed later over de holle afdruk stroomt, zal die precies het kuiltje kunnen vullen. Het verschil tussen een lege of een gevulde afdruk kan vervolgens weer worden vertaald in een elektrisch signaal (sensorspotje d in het schema). Het concept klinkt wat avontuurlijk maar het werkt zeer doeltreffend. Het kan zelfs kleine moleculen in extreem lage concentraties (nanomolaire schaal) detecteren.

Omdat niet alle moleculen per se een verschil in elektrische weerstand veroorzaken wanneer ze aan de receptor binden, is er nog een tweede strategie bedacht: met behulp van lichtgevend moleculen die je aan de betreffende merkers hebt geplakt. Als je de eventuele merkers in een bloedmonster in sensorspotje laat concurreren met een bekende hoeveelheid 'verlichte merkers', dan zullen er minder van die verlichte merkers op de receptor plakken zodra er ook merkers in het bloedmonster zitten. Meer merkers in het bloed zorgen dus voor minder verlichte merkers die aan het spotje binden. En die verlichte merkers kun je optisch detecteren.

Niet alleen voor borstkanker

De hier beschreven tests zijn nog niet in de dagelijkse praktijk beschikbaar. Maar het onderzoek van de artsen, biologen, fysici, chemici en ingenieurs wordt ook vanuit andere disciplines dan het borstkankeronderzoek met belangstelling gevolgd. Want als je biomarkers in een druppeltje bloed eenmaal kunt meten, dan ligt de weg naar een eenvoudige test op, zeg, prostaatkanker bij mannen, of andere aandoeningen ook open.

Klein nanomedicijn, groot spoorzoeker

■ PROF. DR. GERT STORM

Bijna alle geneesmiddelen die we nu kennen zijn bedacht en ontwikkeld in de twintigste eeuw. Die eeuw ligt nog maar elf jaar achter ons, maar nu al voelt die periode, farmaceutisch gesproken, hopeloos 'gedateerd'. Met name door het in kaart brengen van het menselijk genoom is een ware revolutie in de geneesmiddelenontwikkeling in gang gezet. Binnen de geneeskunde, en zeker ook binnen het geneesmiddelenonderzoek wordt veel van die revolutie verwacht. Overal om ons heen – nationaal en internationaal – wordt geïnvesteerd in het onderzoek dat onder wetenschappers bekend staat als genomics en proteomics. Dat is onderzoek dat zich richt op het doorgronden van de functies van genen en eiwitten. Daarmee wordt ook de weg geopend voor het zoeken naar genen die bijdragen aan het ontstaan van ziekten. Bovendien zou je met die kennis nieuwe moleculen kunnen zoeken die als basis kunnen dienen voor nieuwe medicijnen.

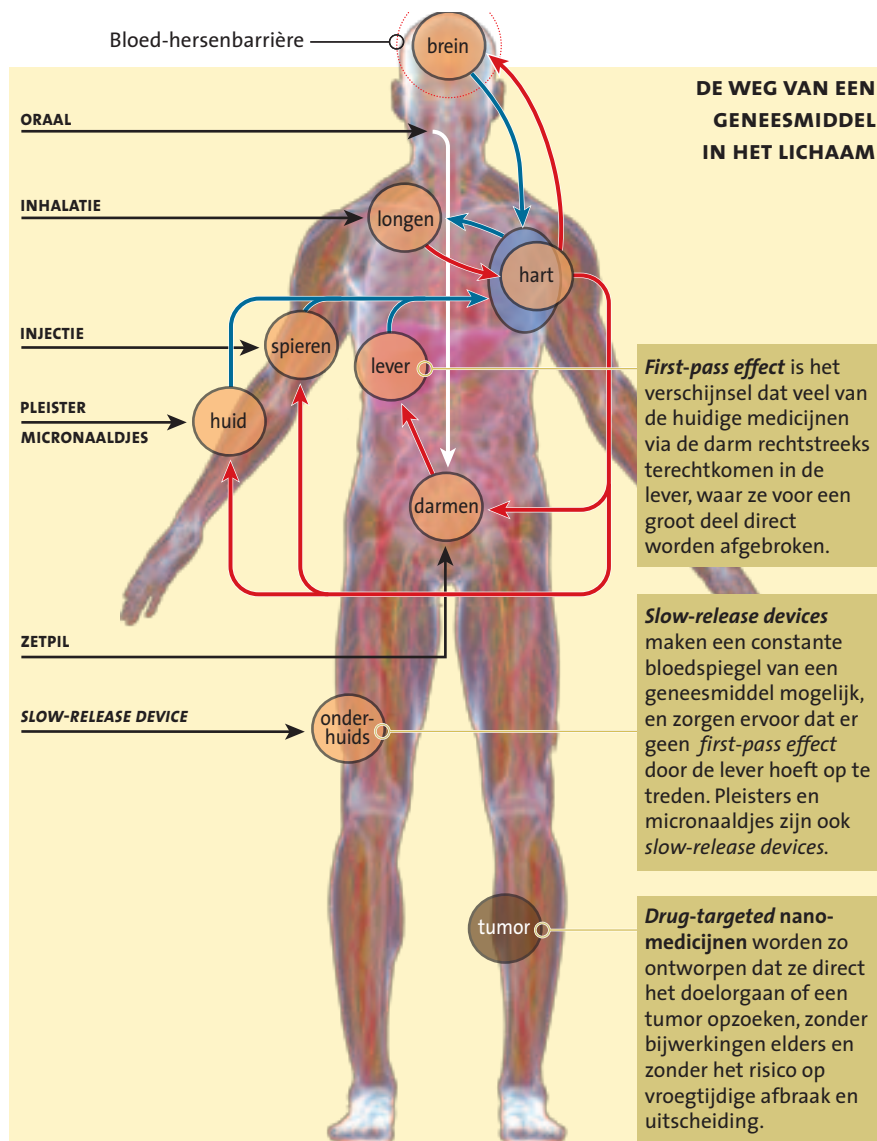
Het enthousiasme over de ontwikkeling van een nieuwe generatie geneesmiddelen is groot, zowel in de medische wereld als daarbuiten. Toch zitten er wel kanttekeningen aan. Veel van de nieuw ontwikkelde therapeutische moleculen zullen ook ongunstige eigenschappen hebben. Die zouden kunnen resulteren in bijwerkingen van de nieuwe medicijnen. Die ongunstige eigenschappen zouden er ook voor kunnen zorgen dat de toegediende moleculen niet, of niet in voldoende mate de juiste plek in het lichaam bereiken. Van het gewenste therapeutische effect komt dan uiteraard niets terecht. Met andere woorden: we hebben hier te maken met een 'Drug Targeting probleem'. Dat probleem is overigens niet iets specifiek voor de nieuwe moleculen die uit het genomics en proteo-

micsonderzoek komen. Ook heel wat van de ‘oude’ medicijnen zouden veel baat hebben kunnen vinden bij toediening via een zogenoemd Drug Targeting medicijn.

Het lijf zit vol barrières

Waarom is Drug Targeting vaak hard nodig? Het lichaam is anatomisch gezien niet één groot vat waarin moleculen vrijuit van de ene kant naar de andere kant kunnen bewegen. Het lichaam zit vol met verschillende compartimenten die dat voorkómen. Die opbouw is er niet voor niets. Die compartimenten zijn ervoor om zoveel mogelijk vreemde indringers – ziekteverwekkers zoals bacteriën, maar ook vreemde stoffen zoals onze medicijnen – buiten te houden of uit te schakelen. Er zijn verschillende anatomische en fysiologische barrières die dit mogelijk maken. Organen zijn bekleed met een cellaag die epitheel wordt genoemd, bloedvaten met endotheel en individuele cellen worden beschermd door een plasmamembraan. Zelfs binnen de cel worden de verschillende onderdelen (organellen) beschermd door membraanstructuren. Het zijn allemaal cellagen en membranen die barrières zijn voor geneeskrachtige stoffen op weg naar het juiste adres.

Normaal gesproken zal het lichaam zijn best doen om toegediende stoffen zo snel mogelijk ‘onschadelijk’ te maken. Ons lijf probeert ze te inactiveren en uit te scheiden via lever en nieren. Daarnaast maken ook de moleculaire eigenschappen van de potentieel geneeskrachtige stoffen zelf het ‘bezorgingsproces’ vaak moeilijk, zo niet onmogelijk. Grofweg kun je stellen: hoe groter, hoe beter de oplosbaarheid in water en hoe meer geladen een stof is, hoe moeilijker het ook wordt voor die stof om een membraan te passeren. Voor een toenemend aantal farmaca is dat een serieus probleem. Vooral nieuwe moleculen als peptiden, eiwitten, en nucleïnezuuren zoals DNA en RNA



kampen met dit probleem. Dergelijke nieuwe moleculen zijn moeilijker af te leveren op de plek waar ze hun medicinale werk zouden moeten doen. Toediening per injectie zal vaak de enige optie zijn.

Doelzoekend medicijn

Geneeskrachtige stoffen leggen normaal gesproken een lange weg af in het lichaam voordat zij hun doel bereiken. Omdat zo'n stof zich volgens de gebruikelijke fysische wetten meestal over het gehele lichaam verspreidt, zal uiteindelijk slechts een klein gedeelte op de plaats van bestemming aankomen. De toegediende dosis zal dus ook veel hoger moeten zijn dan strikt genomen noodzakelijk. Dit kan vervelende gevolgen hebben. Het betreffende farmacon zal overal in het lichaam terecht komen en er zullen bijwerkingen optreden. De heilige graal voor ontwikkelaars van geneesmiddelen is dan ook dat ze farmaca heel gericht naar hun plaats van bestemming kunnen sturen zonder dat die 'onderweg' bijwerkingen veroorzaken.

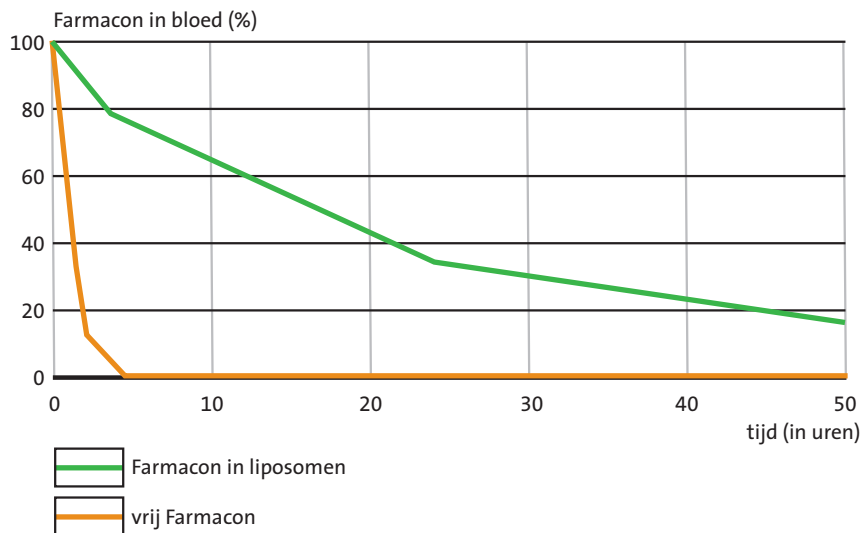
Drug targeting – dat wil zeggen: medicijnen die min of meer gericht de plek opzoeken waar ze hun werk moeten doen – zou een grote rol kunnen spelen bij de bestrijding van ziekten zoals kanker, hart- en vaatproblemen als atherosclerose, en chronische ontstekingsziekten zoals reumatoïde artritis, de ziekte van Crohn of multiple sclerose (MS). Met het huidige geneesmiddelenarsenaal zijn dat stuk voor stuk moeilijk te bestrijden ziekten. De nanotechnologie speelt in de ontwikkeling van deze 'DT-geneesmiddelen' een belangrijke rol. Want juist de toepassing van nanostructuren maakt het mogelijk dat geneesmiddelen gerichter en effectiever worden, en minder bijwerkingen veroorzaken. DT-geneesmiddelen worden dan targeted nanomedicines genoemd. Voorbeelden van dergelijke nanostructuren zijn nanodeeltjes zoals micellen, en macromoleculen zoals polymeren en antilichamen.

Wat de rol is van nanodeeltjes wordt duidelijk als je kijkt naar liposomen. Dat zijn minuscule kleine vetbolletjes met een doorsnede van 150 nanometer of minder. Let wel: een nanometer is slechts één miljoenste millimeter! Liposomen

zijn van binnen hol, met in die binnenste holte water. In die holte kun je ook geneeskrachtige stoffen stoppen. De figuur hiernaast laat zien wat er met die stoffen gebeurt wanneer je die gevulde liposomen in de bloedbaan injecteert. Op de y-as staat de hoeveelheid farmacon in het bloed. De x-as geeft de tijd weer na injectie. Veel farmaca worden na inspuiting in de bloedbaan heel snel weer uit het bloed verwijderd. Een flink deel van het medicijn krijgt dus niet eens de tijd om via het transportmiddel 'bloed' de plaats van bestemming te bereiken. Wanneer dergelijke farmaca worden toegediend in liposomen is er geen sprake meer van een snelle verdwijning uit het bloed. In dit specifieke voorbeeld zit er 4 uur na toediening nog 80% van de toegediende hoeveelheid in het bloed, en 48 uur na toediening nog zo'n 20%. Het inbouwen van farmaca in liposomen beschermt het farmacon dus tegen een snelle eliminatie uit en afbraak in het bloed. Dit heeft als grote voordeel dat het farmacon nu veel meer tijd krijgt om zijn doel op te zoeken.

De volgende stap is het uittreden uit de bloedbaan en het verzamelen op de plek van bestemming: extravasatie. Nanostructuren zoals liposomen mogen dan lang circuleren in de bloedbaan, dat garandeert zeker niet dat ze de bloedbaan uit kunnen om zich te verzamelen in het zieke orgaan. Bloedvaten hebben een wand van aaneengesloten endotheelcellen. Deze wand is ondoordringbaar voor nanodeeltjes. Maar door verbeterde inzichten in ziekteprocessen is duidelijk geworden dat de bloedvaten in zieke delen van het lichaam 'anders' zijn. Vaak hebben ze een wand die veel meer permeabel is dan die van normale bloedvaten. Deze verhoogde doorlaatbaarheid is een gevolg van het ziekteproces zelf. Alleen nanostructuren kunnen van deze verhoogde permeabiliteit gebruik maken om zich bij voorkeur op de zieke plek van bestemming op te hopen, vooral als ze lang circuleren in de

Farmaca in liposomen blijven langer circuleren in het bloed



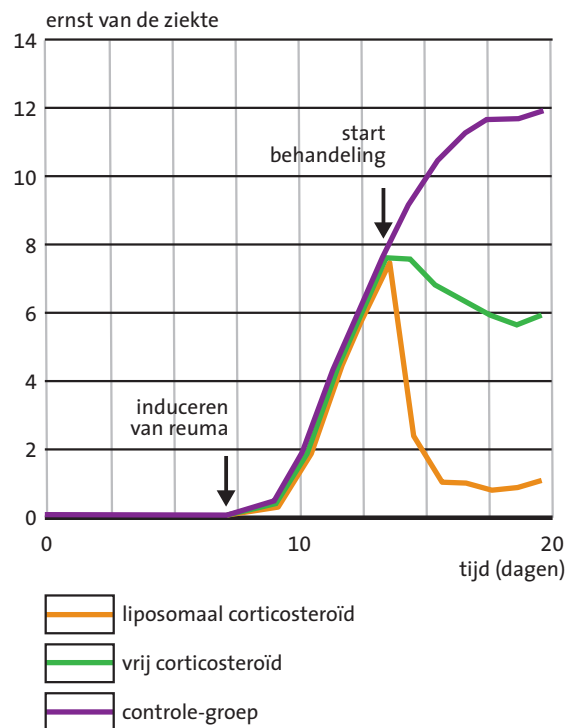
bloedbaan. Grotere structuren, zoals microdeeltjes kunnen dat niet.

Nanomedicijnen bestaan al

Er worden al diverse DT-nanomedicijnen in de praktijk gebruikt. Een bekend voorbeeld is het product Caelyx (Doxil in de VS). Het bevat een zogenoemd cytostaticum (een anti-kankermedicijn), doxorubicine, en is geregistreerd voor onder andere de behandeling van borstkanker. Een ander voorbeeld is Nanocort. Dat is een corticosteroïde, verpakt in lang-circulerende liposomen. Nanocort wordt ontwikkeld voor chronische ontstekingsziekten zoals reuma. De figuur hiernaast laat de resultaten van een dierproef zien, met de duidelijke voordelen van targeting. In de proef werden bij ratten reuma-achtige ontstekingen opgewekt. De figuur laat zien dat in de controle-ratten de ziekte opkomt en dat een enkele injectie van het corticosteroïde nanomedicijn een krachtig positief effect heeft. Dat effect blijkt zelfs voldoende te zijn om alle ontstekingshaarden in het dier voor een

Een verpakte ontstekingsremmer houdt geïnduceerde reuma bij ratten langer weg.

Reuma in ratten



langere periode uit te schakelen. Behandel je de ratten met een 'gewoon' corticosteroïd, niet verpakt in liposomen, dan blijkt een enkele injectie totaal niet werkzaam. Zelfs zeven injecties achter elkaar halen bijna niets uit. Ditzelfde nanomedicijn blijkt ook werkzaam bij de behandeling van tumoren in proefdieren.

Het onderzoek naar de werking en toepassing van doelzoekende nanomedicijnen is nog lang niet voltooid. Mogelijke keerzijden verdienen nog de volle aandacht. Door de toepassing van nanodeeltjes kunnen nieuwe bijwerkingen ontstaan. Zo bleken er bij gebruikers van Caelyx een soort blaren te ontstaan op handpalmen, voetzolen en schouders. Dat zijn allemaal drukplaatsen waar het endotheel ook permeabeler is. Het optreden van deze onverwachte huidschade heeft geleid tot

de aanpassing van de dosering van het medicijn.

Naast het ontwikkelen van nieuwe DT-nanomedicijnen, worden er ook pogingen gedaan om de huidige nanomedicijnen te verbeteren. Met bijvoorbeeld MRI-scanners wordt geprobeerd nanomedicijnen te volgen op hun tocht naar een ziektehaard, om zo de afgifte mogelijk verder te optimaliseren. Met technieken zoals ultrageluid wordt ook geprobeerd om de geneeskrachtige stof uit de nanodeeltjes versneld vrij te maken als ze op de plek van bestemming zijn aangekomen. DT-nanomedicijnen zijn dus inmiddels een klinische realiteit, en beloven nog veel meer voor de toekomst.

VRAAG 2

Welk type ziekten heeft het meest baat bij *Targeted Medicine*?

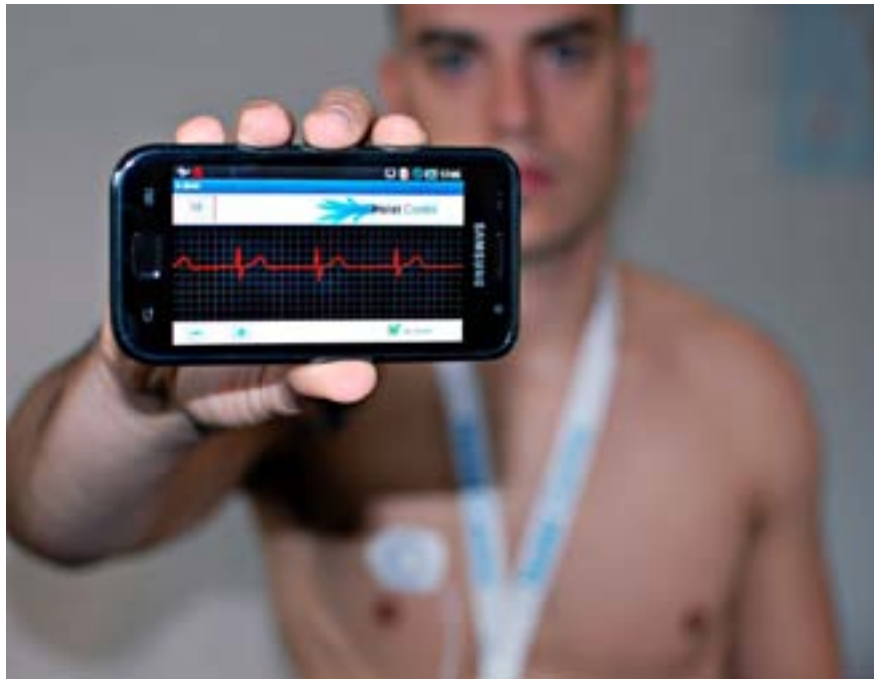
Via een draagbaar apparaatje kan eenvoudig een ECG worden afgenomen.

A phonecall a day keeps the doctor away

■ STEFFIE VAN DE VORSTENBOSCH

Voor de meeste moderne medische technologie heb je nog steeds een dokter nodig. Maar als iedereen in onze vergrijzende samenleving maar naar de dokter blijft lopen, rijzen de kosten de pan uit. Er is een alternatief: de dokter in je telefoon.

E-health technologie maakt het mogelijk om op afstand zorg te verlenen door gebruik te maken van een draadloos of mobiel telefoonnetwerk. Je kunt daarbij denken aan een arts die een diagnose stelt op basis van data die hem via dat draadloze netwerk worden toegestuurd. Het voordeel is dat de arts persoonlijke zorg kan verlenen zonder dat je daarvoor naar het ziekenhuis of de dokterspost moet. Dit betekent zowel voor de patiënt als de arts grote tijdwinst. Het systeem biedt voordelen voor



de Westerse wereld, waar dokters en ziekenhuizen de toestroom van patiënten steeds moeilijker de baas kunnen, maar ook voor gebieden waar niet op elke hoek van de straat een arts te vinden is.

Een belangrijk onderdeel van E-health is het *Wireless Body Area Network* (WBAN). Dit is een netwerk van kleine sensoren op het lichaam

die de gezondheid en lichaamsfuncties meten en hun gegevens draadloos doorsturen. Met deze sensoren kan bijvoorbeeld het hartritme worden gemeten. Hart- en vaatziekten zijn een belangrijke doodsoorzaak in de Westerse wereld. Op dit moment

wordt de diagnose voor hartritmestoornissen gesteld door het maken van een electrocardiogram (ECG) in het ziekenhuis of door gebruik van een draagbaar ECG-apparaat, de zogenoemde Holter. Beide methoden hebben een grote impact op de bewegingsvrijheid van de patiënt. Behandeling en preventie van veel hart- en vaatziekten zou dan ook gebaat zijn bij een draadloos ECG-systeem dat langdurig en constant kan meten in plaats van één, of hoogstens een paar metingen in het ziekenhuis.

Op dit moment werken medische technologen aan een dergelijk draadloos ECG-systeem dat je bijvoorbeeld als een ketting om je hals kunt dragen. Het systeem is klein, licht en draadloos. Het ziet er bescheiden uit, zeker in vergelijking met een traditionele monitor. Het is een hoogstandje van technologie en miniaturisatie. Op een oppervlakte van een paar vierkante centimeter zitten een draadloze radiochip (vergelijkbaar met een GSM), een computerchip om de signalen te ontvangen en te verwerken, en een batterij.

Als er een epilepsieaanval plaatsvindt wordt de verpleging automatisch gewaarschuwd

Altijd en overal meten

De 'mobiele ECG' maakt gebruik van een aantal slimme technieken. Zo gebruikt het apparaat nog minder stroom dan bijvoorbeeld een televisie in 'standby'. Dat is ook nodig als je een onopvallend systeem wil maken dat de gebruiker niet voortuwend lastig valt omdat de accu leeg is. Het uiteindelijke doel is zelfs om sensoren te maken die hun energie volledig uit de omgeving halen, bijvoorbeeld uit het temperatuursverschil met de huid, of uit een zonnecel. Dergelijke sensoren kunnen in principe altijd blijven functioneren, je hebt er geen omkijken meer naar.

Daarnaast worden de signalen op een slimme manier verwerkt. Bij een meting van de hartslag krijg je heel veel ruis, zeker als je probeert te meten in natuurlijke omstandigheden terwijl mensen praten of bewegen. Die storende signalen moet je op één of andere manier van het werkelijke signaal kunnen scheiden. Dat kan met een chip die speciaal is ontworpen voor het verwerken van biologische signalen. Dat heeft het extra voordeel dat er minder gegevens moeten worden verstuurd, wat weer positief werkt op de levensduur van de batterij.

De gegenereerde data worden direct door het systeem geanalyseerd. Als er sprake is van monitoring van een patiënt kan in een noodgeval door middel van een alarm een arts gewaarschuwd worden. De arts kan de data dan via een netwerk in real-time bekijken. In geval van het stellen van een diagnose kan de arts de data aan het einde van het onderzoek uitlezen en analyseren.

Op het moment wordt het ECG-systeem ook getest als detectiemiddel voor epileptische aanvallen. Epilepsie is een hersenaandoening met regelmatige aanvallen die een grote invloed hebben op de hartslag van de patiënt. Voor dit onderzoek is een ECG-apparaatje, gedragen om de arm, uitgerust met een algoritme dat aanvallen detecteert. Patiënten die vanwege epilepsie zijn opgenomen in een instelling dragen het apparaat 's nachts. Als

er een aanval plaatsvindt, wordt de verpleging met een alarm gewaarschuwd.

Hersengolven

Naast hartsignalen is het ook mogelijk andere lichaamsfuncties te meten. Je kunt daarbij denken aan de frequentie en de relatieve diepte van de ademhaling, de elektrische geleiding en de temperatuur van de huid, maar ook bijvoorbeeld hersenactiviteit (EEG). Het meten van hersenactiviteit gebeurt in principe op dezelfde manier als het meten van hartslag. Omdat hersenactiviteit uit meerdere, complexe signalen bestaat, heb je meer meetpunten nodig dan bij een ECG en ook complexere analysesoftware. Een uitdaging is dan ook om dit bij hetzelfde lage energieverbruik te doen. Ook het comfort van de patiënt kan hier nog sterk verbeterd worden.

Vooralsnog wordt bij dit onderzoek gebruikt gemaakt van zogenaamde ‘natte’ elektrodes, waarbij een gel wordt gebruikt om de geleiding van de signalen te bevorderen. Dit heeft als nadeel dat er nogal wat handelingen nodig zijn om een meting te verrichten, maar ook dat je haar vet wordt door het gebruik van de gel. Je kunt je voorstellen dat dit bij doorlopende monitoring zeer onprettig is voor de drager. Als alternatief hiervoor worden momenteel ‘droge’ elektrodes ontwikkeld waarbij geen vloeistof nodig is. De uitdaging hierbij is de verwerking van signalen met een mindere kwaliteit door slechtere geleiding. In de toekomst zou het bijvoorbeeld mogelijk moeten zijn de elektrodes te verwerken in een pet, zodat de patiënt constant in de gaten kan worden gehouden zonder dat hij in zijn functioneren wordt beperkt.

Emoties meten

De resultaten van metingen van lichaamsfuncties kunnen worden toegepast voor het meten van emoties. Als we emotioneel geprikkeld worden zorgt ons centraal zenuwstelsel ervoor dat we gaan



In deze pet zitten sensoren die de hersenactiviteit kunnen meten.

transpireren, dat onze bloeddruk stijgt en onze spieren zich aanspannen. We halen oppervlakkig en sneller adem, en onze hartslag stijgt. Deze reacties zijn allemaal meetbaar door middel van draadloze sensoren.

We herkennen allemaal emoties als we ze zien, maar hoe kan je door middel van het meten van lichaamsfuncties bepalen om welke emotie het gaat. Een emotie bestaat uit twee componenten, waarde en intensiteit. De uitdaging op medisch vlak is nu het definiëren van de biologie van een emotie. Met andere woorden: welke meetbare waarde hoort bij welke emotie. Vervolgens moet de techniek deze bevindingen vertalen in de juiste combinatie van lichaamssignalen waarmee verschillende emoties te meten zijn. En daarbij is het ook van belang dat deze metingen worden gedaan op een manier die zo min mogelijk hinder veroorzaakt bij de patiënt, zodat deze zijn dagelijkse routine kan volgen.

VRAAG 3

Het meten van lichaamsfuncties is niet alleen op het medische vlak interessant. Wat kun je er verder mee doen?

Het meten van emotionele prikkeling – van stress – kan zinvol zijn voor artsen. Juist in geval van stress is het aan te bevelen de lichamelijke reacties langere tijd en in verschillende situaties te meten. In de natuurlijke omgeving van de patiënt, thuis of op het werk, maar ook gedurende de dag en nacht. Ons stresssysteem heeft een dagritme. Dat begint 's ochtends en prikkelt ons om wakker te worden. Kort daarna – een half uur tot een uur na het ontwaken – komt er een piek om ons te activeren. Gedurende de dag en tegen de avond zwakt dit weer af. Een hypothese is dat bij mensen met een stressprobleem dit dagritme verstoord is. Ze zijn tijdens de nacht te gespannen en worden daardoor bijvoorbeeld midden in de nacht wakker. Ook gedurende de dag blijft de spanning hoog. Dit kan alleen gemeten worden als een patiënt voortdurend, enkele dagen lang kan worden gevolgd. Bovendien bestaat het vermoeden dat mensen al enige tijd voor ze ziek worden – een depressie of angststoornis – een verstoord, overgevoelig stresssysteem hebben, zelfs al zijn ze zich daar niet van bewust. En ook als ze genezen zijn zou het interessant kunnen zijn om hun stresssysteem nog een tijdje te kunnen volgen.

Aan het meten van emoties en het gebruik van de resultaten voor allerlei slimme toepassingen wordt al jarenlang door wetenschappers gewerkt. Dit domein heeft zelfs een naam gekregen: affective computing. Je kunt daarbij denken aan toepassingen voor smartphone applicaties, interactieve games, e-learning en gepersonaliseerde reclames. Het zal zeker nog een aantal jaren duren voordat we deze ontwikkelingen terug gaan vinden in de dagelijkse praktijk van de gezondheidszorg en in onze maatschappij. De eerste prototypes zijn echter al beschikbaar en het lijkt alleen nog een kwestie van tijd voordat we ons niet meer voor kunnen stellen hoe het leven er zonder E-health uit zou zien.

Braintyping

Onderzoekers van de KU Leuven hebben draadloze sensortechnologie toegepast om een computer aan te sturen. Door middel van je hersengolven kan je je naam typen of een spelletje spelen. Niet alleen leuk, maar vooral ook nuttig. Bijvoorbeeld voor mensen die door een handicap niet in staat zijn om een

toetsenbord of muis te bedienen. Ook elders op de wereld wordt hard gewerkt aan manieren om met je brein machines te besturen. In de herfst van 2011 haalden onderzoekers van de universiteit van Pittsburgh de wereldpers met beelden van een aapje dat met zijn 'gedachten' een robotarm kan besturen.



Resusaap bestuurt robotarm met zijn 'gedachten'.

Wat is gezondheid zonder ziekte?

■ DR. MARIANNE BOENINK

VAN DE trage geneeskunde die pas in actie komt als iemand ziek is, gaan we steeds meer naar voorspellende, preventieve en op het individu toegespitste geneeskunde; de zogenoemde *predictive, preventive, personalized (PPP) medicine*. Zijn die visioenen van een leven of een samenleving zonder ziekte wel zo wenselijk? Om te kunnen bepalen of je het wenselijk vindt om alle nieuwe biomedische technologie in je leven toe te laten, moet je eerst bedenken hoe die onze verhouding tot en verantwoordelijkheid voor ons eigen lichaam zou beïnvloeden. Wat betekent gezondheid nog wanneer ziekte afwezig zou zijn, voor jezelf en voor de samenleving?

Ziek zijn en ziek voelen

De ideeën over een *PPP medicine* zijn voor een groot deel ingegeven door ontwikkelingen in bijvoorbeeld genetische testen die voorspellen hoe groot je kans is om een bepaalde ziekte te krijgen. Er worden ook steeds meer biomarkertesten ontwikkeld die de aanwezigheid van een bepaald eiwit of de activiteit van je RNA onderzoeken. Die kunnen je iets vertellen over de aanwezigheid van ziekte, ook als je nog geen klachten ervaart.

Wat zou je eigen rol in dit geheel eigenlijk nog zijn? Als een toekomstig systeem direct medicijnen afgeeft, al dan niet na tussenkomst van een medisch professional, hoef je als zieke misschien niet zo veel meer te doen. De techniek doet het werk terwijl jij je met leukere zaken bezighoudt. Daarvoor moet je wel een flink deel van je autonomie opgeven. Tot nu toe hechten we doorgaans een groot belang aan onze 'lichamelijke integriteit':

anderen mogen niet zomaar aan ons lichaam zitten. Daarom zijn er in de medische wereld allerlei regels en procedures die zeker stellen dat iemand eerst toestemming moet geven voor een arts aan zijn of haar lichaam mag komen. Je beslist zelf mee of je een bepaald medicijn wilt, op basis van informatie over bijvoorbeeld de verwachte effecten, de toedieningsvorm en de mogelijke bijwerkingen. Een monitoringssysteem dat zelfstandig medicijnen kan afgeven, een zogenoemd *smart system*, vergt dus een flinke verandering van onze morele opvattingen.

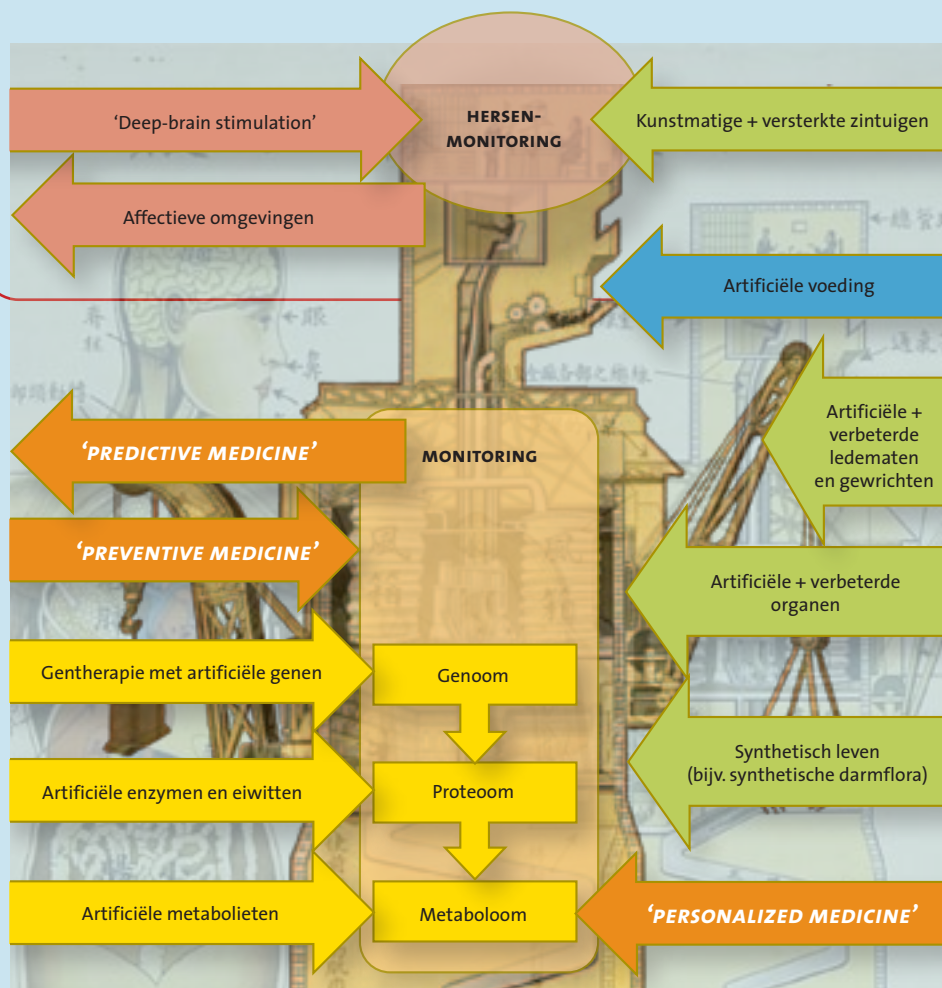
De vrijheid om zelf te bepalen wat je met de resultaten van de monitoring doet lijkt een stuk groter wanneer er geen directe interventie volgt. Een advies als 'ga meer bewegen', of 'ga naar de huisarts' kun je immers altijd in de wind slaan. Maar niets doen is dan een keuze, en keuzes komen altijd met verantwoordelijkheid. Denk maar aan zoiets alledaags als een mobieltje. Natuurlijk, je kunt hem uitzetten. Maar vervolgens moet je je regelmatig verantwoorden waarom je zo slecht bereikbaar bent. Evenzo heb je iets uit te leggen als je je gedrag niet aanpast aan wat de nieuwe medische technieken mogelijk maken.

Met de ontwikkelingen in de biomedische technologie geef je je eigen verantwoordelijkheid voor je gezondheid niet uit handen. Gezondheid wordt eerder een bron van voortdurende zorg. Je moet er rekening mee houden dat waarden als vrijheid en autonomie dan in de verdrukking kunnen komen.

Ziek zijn is ook nuttig

Ziekte lijkt boven alles een afwijking in het

'Der Mensch als Industriepalast', zo luidt de titel van een afbeelding uit 1926 van de Duitser Fritz Kahn (1888-1968), waarin het menselijk lichaam als een machine staat afgebeeld. Met een sciencefiction-bril op zou je de mens van de 21ste eeuw ook een beetje als een 'Industriepalast' kunnen beschouwen. Vandaar dat de illustratie van Fritz Kahn onder het voorlopig nog in belangrijke mate fictieve schema is gelegd. Door talloze kunstmatige ingrepen zijn we in staat het menselijk leven steeds verder op te rekken. Een van die ingrepen betreft zogenoemde PPP-medicine (Predictive, Preventive & Personalized Medicine). Dankzij monitoring van bijvoorbeeld genoom, proteoom en metabooloom zullen we steeds beter in staat zijn ziekten te voorspellen en preventief en per persoon op maat te behandelen.



lichaam die tot klachten leidt. Dat beeld van ziekte wordt door de wending naar het moleculaire niveau van het lichaam alleen maar versterkt. Maar ziekte is ook een sociaal fenomeen. De grens tussen ziek en gezond fungeert als een belangrijke sociale scheidslijn. Wie ziek is wordt vrijgesteld van allerlei sociale verplichtingen, zoals naar school gaan of werken. Daar wordt dan doorgaans wel de voorwaarde aan verbonden dat je je ook echt ziek gedraagt en je zo nodig onder behandeling stelt. Ziekte speelt ook een rol bij de prestaties die we van iemand verwachten. Als je gezondheid je parten speelt, kun je nu eenmaal niet optimaal functioneren. Voor zo iemand wordt aangepast

werk gezocht of worden de normen naar beneden bijgesteld.

Nieuwe biomedische technologieën kunnen nieuwe sociale groepen creëren. Ze verschuiven immers de grens tussen ziek en gezond. In het uiterste geval: wat zou er gebeuren als mensen dankzij biomedische technologie vrijwel nooit meer ziek worden? Op het eerste gezicht betekent dat simpelweg dat de specifieke rol van zieke en de daarbij behorende verwachtingen komen te vervallen. Maar het kan er ook toe leiden dat de sociale normen voor de prestaties die we van elkaar verwachten omhoog gaan. Er kan nog best een tandje bij op het werk of op school; de techno-

ANTWOORD 1

Jazeker! De zwangerschapstest doet in feite niet veel anders: blauw als het hormoon HCG in urine zit, niet blauw als het er niet in zit.

ANTWOORD 2

In principe: iedere ziekte die slechts een deel van het lichaam beroert. Dat kan dus gaan om hart- en vaatziekten (die vooral de bloedvaten aandoen) maar zeker ook verschillende kankers, waar je alleen de tumor wilt behandelen en niet het gezonde weefsel met chemotherapie wilt bombarderen.

ANTWOORD 3

Een ECG-meter zou bijvoorbeeld ook kunnen worden gebruikt bij het analyseren van iemands conditie tijdens een trainingsprogramma.

logie signaleert wel tijdig wie lichamelijk overbelast dreigt te worden en helpt die overbelasting te ondervangen. Tegelijkertijd zullen we nauwelijks nog de gelegenheid hebben even bij te tanken en ons te laten vertroetelen – ook dat is een functie van ziekte! Het is de vraag in hoeverre mensen zo'n zwaardere belasting aankunnen. Zelfs als we lichamelijk sterk genoeg zijn geworden, zou onze mentale draagkracht wel eens tekort kunnen schieten. Iedereen lichamelijk gezond, maar wel veel vaker overspannen.

Ziekte wordt niet alleen door lichamelijke gebreken veroorzaakt. Ook onze geestelijke conditie speelt een rol. Vaak worden mentale aandoeningen enigszins meewarig bekeken. Als nieuwe technologieën het lichaam zo ondersteunen dat het nooit meer ziek wordt, dan zal des te zichtbaarder zijn dat wie nu toch nog ziek wordt vooral een mentaal probleem heeft. Of ons oordeel over dergelijke zwakte dan milder wordt, valt nog maar te bezien. Iets dergelijks geldt voor wie door een ongeval gehandicapt raakt. Afwijkingen van wat 'normaal' is vallen meer op naarmate meer mensen aan de norm voldoen, en dat kan allerlei ongelijkheden met zich meebrengen.

Een laatste ongelijkheid is die tussen de 'have's' en de 'have nots': een nieuwe sociale scheidslijnen tussen degenen die over de gewenste technologie kunnen beschikken en zij die de boot missen. Vaak speelt daar een sociaal-economische ongelijkheid in mee – wie kan het betalen? – of een verschil in zorgsysteem – publieke of private verzekeringen. Ook hier geldt dat we er rekening mee moeten houden dat nieuwe biomedische

technologie bestaande waarden als gelijkheid en rechtvaardigheid onder druk zal zetten.

En dan, wat is gezondheid in dit lijf?

Stel dat je al die bezwaren en twijfels voor lief neemt, dan is een wereld zonder ziekte toch het mooist denkbare? Waarden zoals autonomie, gelijkheid en rechtvaardigheid zijn dan een bescheiden prijs. Maar wat houdt je nog over? De Franse filosoof en arts Canguilhem (1904-1995) stelde dat gezondheid eigenlijk alleen bestaat bij de gratie van de *afwijking* daarvan. Gezondheid valt niet op, we waarderen haar niet zonder meer. Alleen omdat we soms problemen met onze gezondheid ervaren, worden we ons bewust van wat we tot dan toe als 'normaal' ervoeren. De waarde van gezondheid berust dus voor een belangrijk deel op het bestaan en de ervaring van ziekte. Een samenleving die er in slaagt ziekte uit te bannen zou gezondheid dus, ironisch genoeg, minder op waarde weten te schatten.

Maar betekent dit alles dat je elke ontwikkeling van biomedische techniek maar moet tegenhouden? Nee. Je moet je wel realiseren dat het najagen van dat ultieme doel, nooit meer ziek, ten koste kan gaan van andere belangrijke waarden. En het kan ook minder aantrekkelijke effecten hebben op ons leven en de samenleving als geheel. We doen er dus goed aan zulke idealen met de nodige voorzichtigheid en een flinke dosis realisme tegemoet te treden.

A silver, humanoid robot (RoboCop) stands in a dark, industrial setting at night. The robot is holding a handgun in its right hand and is positioned in front of a damaged, dark-colored car. The scene is lit with a cool blue light, and there is a bright orange glow from a fire or explosion in the background. The robot's suit is highly detailed with various mechanical components and a helmet with a visor.

Een robotsoldaat kent geen wraakgevoelens en een politierobot discrimineert niet. Ideaal, zou je zeggen. ‘Maar wat als bewapende robots echt zélf beslissingen gaan nemen?’, vragen dr. Lambèr Royakkers en dr. Rinie van Est zich af.

4 Nooit meer oorlog

■ DR. IR. RINIE VAN EST

■ MR. DR. IR. LAMBÈR ROYAKKERS

prof. dr. jos van den broek

OORLOGJE SPELEN IN DE VIRTUELE WERELD

De deelnemers aan het The Hague Debating Tournament 2111 hebben smakelijk gelachen om die clip van een eeuw terug 'Doe eens effe normaal, man!'. De toenmalige minister-president Mark Rutte en zijn belangrijkste 'gedoger' Geert Wilders speelden verbaal oorlogje in de Tweede Kamer. Na afloop sloegen ze elkaar kameraadschappelijk op de schouder en schudden ze elkaar de hand. Het testosteron had zijn werk immers gedaan. ■ Het filmpje uit 2011 was een aangename afwisseling van de minder leuke beelden die de revue waren gepasseerd. Zo waren de debaters behoorlijk geschrokken van de filmpjes waarin supporters van Ajax en Feyenoord elkaar de koppen in sloegen. Om nog maar te zwijgen van fragmenten uit 1972 van de slachtpartij waarbij Tutsi's meer dan honderdduizend Hutu's in de pan hadden gehakt. Of die uit 1994, toen bij de tweede Rwandese genocide door Tutsi handen zo'n achthonderdduizend Hutu's omkwamen, waarbij burenen noch familieleden werden gespaard. ■ Achteraf waren de ietsje te ondeugende organisatoren behoorlijk geschrokken van de impact die de beelden-ter-leringhe-ende-vermaeck hadden gehad op hun deelnemers. 'Volgende keer iets subtieler!', fluisterden ze tijdens het gesnotter in de zaal tegen elkaar. Maar anno 2111 was de maatschappij ook niet echt veel meer gewend. Dankzij het samengaan van nano-, bio- en informatietechnologie en cognitiewetenschappen was geweld binnen enkele decennia verleden tijd geworden. Te hoge testosteronspiegels en gevaarlijke agressieniveaus konden dankzij biosensoren tijdig worden tegengegaan. Alleen bij het spelen van computerspelletjes - virtueel oorlogje voeren - was een licht verhoogde concentratie aan mannelijk hormoon in het bloed nog toegestaan, zorgvuldig gemonitord door het wereldnetwerk Your Little Brother. De techniek had voor een paradijs op aarde gezorgd. Slechts een enkele 150-plusser mopperde nog dat het toch wel erg saai was geworden.

Dromen en nachtmerries van een autonome militaire robot

Sinds het begin van deze eeuw is militaire robot-technologie in een stroomversnelling gekomen. Over de hele wereld worden militaire robots ontwikkeld en er zijn er al duizenden actief in echte militaire operaties. Veel geïndustrialiseerde landen hebben zich daarbij laten inspireren door Future Combat Systems. Dat is een Amerikaans programma voor toekomstige wapen- en communicatiesystemen – waaronder militaire robots – waar het Pentagon ruim tweehonderd miljard dollar in heeft gestopt. Ontwikkelingen op het gebied van militaire robots voeden in sterke mate ook de ontwikkeling van politierobots. Een robot voor militaire doeleinden is namelijk vaak ook geschikt voor politiewerk.

Wat is een militaire robot?

Een militaire robot of politierobot is een onbemand systeem voor militaire of politietaken. Het kent enige vorm van autonomie en is herbruikbaar. Torpedo's, slimme bommen en mijnen zijn maar één keer te gebruiken en zijn dus geen robots. Volledig op afstand bestuurbare speelgoed-auto's bevatten geen enkele vorm van autonomie en zijn dus ook geen robots.

Er zijn onbemande systemen die over een eigen voortbeweging beschikken (mobiele robots) en systemen die statisch taken verrichten (immobiele robots). Een voorbeeld van zo'n immobiel systeem is de SGR-A1, ontwikkeld door het bedrijf Samsung Techwin voor het bewaken van de vier kilometer brede gedemilitariseerde zone tussen Noord- en Zuid-Korea. Deze robots vervangen een groot deel van de honderdduizenden patrouillerende militairen. Ze kunnen autonoom – dus zonder menselijke tussenkomst – indringers neerschieten.

Technologische ontwikkeling is vaak gericht

op het versterken van de autonomie van de robot. De robot moet in staat zijn bepaalde gevaarlijke, saaie en smerige – dangerous, dull en dirty – taken van mensen over te nemen. Maar deze groeiende autonomie van de robots levert ook de meeste maatschappelijke vragen op.

Voor al uw gevaarlijke rotklusjes

Eigenlijk is het net als in de fabriek of in de keuken: onbewapende politie- en militaire robots hebben een toegevoegde waarde bij het effectief en efficiënt uitvoeren van dull, dangerous en dirty klusjes. Voorbeelden zijn de 24-uurs bewaking van legerkampen, het verbeteren van inzicht in specifieke gevaarlijke situaties, het opsporen en onschadelijk maken van explosieven, het verkennen van routes en objecten, het patrouilleren en het uitvoeren van gevaarlijke taken, zoals een inval in een gebouw waar een robot de deur forceert en verkent wie zich eventueel schuil houden. Dit soort taken komt veel voor in landen als Afghanistan. De verschillende legers hebben daar te maken met opstandelingen die berrbommen plaatsen en die zich al vechtend in de steden tussen de burgers begeven, het zogenoemde urban warfighting.

Vanwege het risico zelf beschoten te worden, lukt het bijvoorbeeld hospiks vaak niet binnen een half uur na een incident bij een gewonde te zijn. Dat is zeer vervelend omdat in dat eerste half uur negentig procent van de doden valt. Daarom worden er op dit moment ook onbemande voertuigen ontwikkeld die naar gewonden kunnen gaan om daar geheel autonoom een zuurstofmasker op de mond of een defibrillator op borst van de patiënt te leggen.

Het huidige assortiment

Het meest bekende onbemande grondvoertuig is SWORDS, het Special Weapons Observation Reconnaissance Detection System. De voorloper



van deze militaire robot was de onbewapende TALON. Die kon onbemande verkenningen uitvoeren en bormbommen opruimen. Daarvoor heeft deze robot camera's, een grijparm, communicatiemiddelen, afleidingsapparaten en diverse sensoren. De SWORDS is een op afstand bestuurbare robotsysteem dat is voorzien van machinegeweren. Na jaren van onderzoek zijn de SWORDS sinds 2007 echt op patrouille gestuurd in Irak. Ze voeren voornamelijk verkenningssmissies, straatsurveillances en andere opdrachten met een 'verhoogd risico' uit.

De opvolger van de SWORDS dient zich al aan:

Bij een oefening wordt een Amerikaanse soldate gesleept door een TALON.

de MAARS, het Modular Advances Armed Robotic System. Deze robot kan uitgerust worden met zwaardere machinegeweren en heeft een groter laadvermogen en grotere snelheid. Het totale systeem weegt zo'n 160 kilogram.

Ook in de lucht is er een gestage opmars van de onbemande bewapende robots: de zogenoemde Unmanned Combat Aerial Vehicles, UCAVs. Deze vliegtuigjes worden ook vaak drones genoemd. Een voorbeeld is de Predator, die Hellfire-raketten kan afvuren. Dat vliegtuigje is veel gebruikt in Afghanistan en Libië. Deze drones worden bestuurd vanuit kazernes in Nevada, duizenden kilometers verderop. Een opvolger, de Reaper, is in 2008 in Afghanistan opgedoken. Het toestel kan 5.000 pond raketten en lasergestuurde bommen meenemen. Het kan daarbij met dag- en nachtcamera's door een wolkendek heen kijken. In 2001 had de VS ongeveer tien drones in Afghanistan, in 2008 waren dat er al meer dan zeventuizend.

Robotverkenners

Robots worden vaak toegepast om informatie te verzamelen. Zo ontwikkelt het bedrijf BAE Systems voor de Amerikaanse krijgsmacht intelligente miniatuurrobots. Deze robotjes, bijvoorbeeld in de vorm van een spin, kunnen op plaatsen komen die voor mensen onbereikbaar of te gevaarlijk zijn.

Een belangrijke toepassing voor zowel militair als politiewerk is de inzet van op afstand bestuurbare kleine verkenningsvliegtuigen, de Micro Air Vehicles. Deze zijn slechts 15 tot 30 centimeter groot en wegen enkele tientallen tot hooguit een paar honderd gram. Ondanks hun beperkte omvang en gewicht hebben ze wel krachtige (infrarood) camera's aan boord voor autonome observatieopdrachten. De camerabeelden zijn zo scherp dat mensen die bompakketjes of bormbommen plaatsen op heterdaad kunnen worden betrapt en gevolgd, zodat lokale troepen of burgers

Kleine, onbemande 'vliegtuigjes' kunnen verkenningsvluchten uitvoeren.



kunnen worden gewaarschuwd. Ook kunnen de vliegtuigjes doelen zoeken en de positie van deze doelen doorgeven.

Robocops

Politierobots zijn voorlopig uitsluitend veiligheidsrobots die zijn ontwikkeld voor surveillancetaken. Ze kunnen kostbare grote helikopters vervangen die nu vaak deze taken uitvoeren. Zo'n politierobot kan ook worden ingezet om een wegversperring op een gevaarlijke plek aan te brengen of weg te halen. Bij een andere belangrijke bevoegdheid van de politie, het geweldsmonopolie, spelen politierobots nu nog geen rol. Ze beschikken namelijk niet over een wapen.

De Taskforce 'Aanpak georganiseerde hennep-teelt' van het Ministerie van Justitie heeft in 2009 een onbemande minihelikopter aangeschaft voor de politie. Deze Suave 7 is uitgerust met geur- en beelddetectietechnologie die vanuit de lucht hennepvelden kan traceren. Zo hoopt de politie

georganiseerde illegale hennep-teelt en -handel op te sporen.

De Japanse politierobot Reborg-Q signaleert onregelmatigheden en geeft service aan het publiek in winkelcentra, vlieghavens en hotels. Deze robots houden niet alleen mensen in de gaten, maar kunnen ook worden geraadpleegd door ouders om bijvoorbeeld te weten waar hun kinderen uithangen in het winkelcentrum. Het is een kolos van 100 kilo en 1,50 meter lang, voorzien van camera's, een touchscreen en een kunstmatige stem. Reborg-Q kan in zijn rondgang gezichten herkennen en kan daarop reageren door de menselijke bewakers te waarschuwen.

In de straten van de Amerikaanse staat Virginia zijn V-A1 robots actief. Deze robots worden op afstand bediend en zijn uitgerust met camera's, chemische detectieapparatuur en een arm om objecten te grijpen. Deze robots worden gebruikt door agenten die gevaarlijke situaties willen beoordelen zonder daarbij zelf risico te lopen.

VRAAG 1

Militaire robots worden steeds autonomer. Wat zijn de voordelen en bezwaren van autonome militaire robots die het recht krijgen zonder menselijke tussenkomst iemand aan te vallen of te doden?

Grenzen aan de autonomie

De robotisering van het leger is in Amerika bij wet geregeld. Zo is vastgelegd dat het leger in 2006 tenminste 4.000 onbemande grondvoertuigen operationeel in gebruik moest hebben, en dat in 2010 een derde van alle operationele vliegtuigen voor lange afstandsvluchten onbemand moest zijn, net als een derde van alle strijdvoertuigen op de grond in 2015. Op basis van deze doelstellingen, die overigens allemaal min of meer gehaald zijn, heeft het Amerikaanse militaire Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA, een studie gestart om de toekomstige wapen- en communicatiesystemen voor de Amerikaanse krijgsmacht vast te stellen. Met een budget van 230 miljard dollar is dat Future Combat System programma het duurste defensieprogramma aller tijden. Autonome militaire robots spelen een hoofdrol.

Autonome militaire robots staan hoog op de agenda omdat op afstand bestuurbare, of telegeleide robots duurder zijn in aanschaf en bediening. Eén van de hoofddoelen van het Future Combat System programma is dat één persoon een groot-schalige aanval met meerdere militaire robots in werking kan stellen. Om het onderzoek naar autonome robottechnologie te stimuleren, organiseert DARPA sinds 2002 jaarlijks een wedstrijd voor autonome robots, de DARPA Grand Challenge. Europa kent een eigen, kleinschaliger versie: de European Land Robotic Trial (ELROB).

Het publiek wil robots

Naast die investeringen in de ontwikkeling van militaire robots (push) is er vanuit de Amerikaanse maatschappij een groeiende vraag naar de inzet van militaire robots (pull). Die samenleving is vooral het hoge aantal gesneuvelde Amerikaanse militairen zat. Veertig procent van de Amerikaanse militairen die in Irak en Afghani-

stan sneuvelden stierven door berm bommen die door opstandelingen werden gemaakt. Daardoor verminderde het draagvlak voor de oorlog en werd de inzet van militaire robots gevraagd. Eind 2008 waren er alleen al in Irak twaalfduizend grondrobots actief waarmee vooral berm bommen onschadelijk werden gemaakt. Er vlogen toen zeventien drones rond.

Ook andere landen investeren inmiddels in militaire robottechnologie. Daaronder zijn landen in Europa, maar ook Canada, Zuid-Afrika, Singapore en Israël. China, Rusland en India zijn begonnen met de ontwikkeling van onbemande autonome gevechtsvliegtuigen. De VS spant nog steeds de kroon met een begroting van 4,5 miljard dollar in 2010. Op het gebied van militaire robottechnologie is de VS dan ook de onbetwiste koploper.

De Amerikaanse visie gaat uit van een toenemende 'robotisering': de autonomie van een onbemand voertuig wordt gaandeweg verruimd van de beperkte autonomie van afstandsbediening naar volledig zelfstandig functionerende systemen. In de toekomst moeten er zelfs zelflerende militaire systemen komen. De Amerikaanse luchtmacht gaat ervan uit dat rond het jaar 2050 de eerste autonome bewapende vliegtuigen kunnen worden ingezet. Dat zijn robots die zelfstandig gevechtshandelingen kunnen uitvoeren, en zelfstandig – dus zonder tussenkomst van de mens – kunnen beslissen over leven en dood.

De ethisch begrensde robot

Kan een autonome militaire robot wel onderscheid maken tussen vriend en vijand, tussen een strijder en een burger? In hoeverre is het technisch mogelijk en maatschappelijk wenselijk om robots autonoom te laten functioneren? Zowel de politieagenten als militairen hebben de wettelijke bevoegdheid om geweld te gebruiken bij de uitvoering van haar taken. Door de inzet van bewapende robots worden de mogelijkheden van militairen



De European Robot Trial, ELROB.

In 2008 hadden de Amerikanen al 7.000 onbemande drones in de lucht boven Afghanistan.



VRAAG 2

Moeten we zelflerende militaire robots – dat wil zeggen: robots die zelf van situaties of ‘fouten’ leren, en dus zichzelf blijven ontwikkelen – toestaan op het slagveld?

en politieagenten substantieel uitgebreid. Robots stellen agent en soldaat in staat om op meer locaties te komen en zij verruimen zo ook de mogelijkheden voor het inzetten van geweld.

Sommige wetenschappers suggereren dat autonome bewapende robots in de toekomst rationelere en betere ethische beslissingen kunnen nemen dan militairen en politieagenten. Militairen en politieagenten worden tijdens hun werk immers blootgesteld aan enorme stress met alle gevolgen van dien. Dit blijkt onder andere uit een rapport van de US Army Surgeon General's Office uit 2006, over de moraal van militairen tijdens de militaire operatie Iraqi Freedom. Volgens dat rapport geeft 10% van de soldaten aan Irakese burgers te hebben mishandeld en vindt 12% dat Irakese burgers als opstandelingen kunnen worden beschouwd. Minder dan de helft van de militairen zou een collega aangeven voor onethisch gedrag. Slechts 10% van de militairen zou naar hun

superieuren stappen als hun eenheid zich niet aan gevechtsoorders zou houden. Dit laat zien dat in oorlogssituaties emoties het morele oordeel kunnen vertroebelen. Het blijkt zelfs dat na het verlies van een medesoldaat, militairen vanwege kwaadheid en wraakgevoelens twee keer zo vaak burgers mishandelen.

De Amerikaanse robottechnoloog Ronald Arkin stelde in een interview met *De Ingenieur* (2008) dan ook dat in de toekomst de robots de menselijke militair zullen overtreffen, omdat ze geen angst en wraakgevoelens kennen en zichzelf niet hoeven te beschermen. Ook kunnen ze zichzelf opofferen voor het leven van een burger. Tegenwoordig wordt er onderzoek gedaan naar de invoering van een adequaat artificieel ethisch geweten voor de bewapende robot. Daarbij probeert men bijvoorbeeld het humanitair oorlogsrecht of de politiewet in de robot te programmeren. Deze wettelijke kaders zouden de ethische grenzen moeten

bieden waarbinnen een militaire of politierobot kan handelen. Dit zijn dan ook een soort 'ethische begrenzers'.

Dergelijke semi-autonome robots – autonome robots die door de programmeur ethisch zijn begrensd – kunnen in de nabije toekomst de operator bijstaan in het nemen van beslissingen. Robots kunnen operators zicht bieden op mogelijke overtredingen en misstanden in een logboek rapporteren. Bewapende militaire robots zouden bijvoorbeeld kunnen aangeven welke munitie wordt gebruikt om een bepaald doel te raken en welke nevenschade dat oplevert. Als de operator een type munitie kiest dat volgens de robot te veel nevenschade oplevert, kan de begrenzer een waarschuwing geven of zelfs de bommenwerper blokkeren. De operator kan die beslissing van de robot natuurlijk negeren, maar hij weet dan wel dat er een grote kans bestaat dat hij het internationaal humanitair oorlogsrecht overtreedt en daarvoor berecht kan worden.

Proportionaliteit en onderscheid

Om autonome bewapende robots in te kunnen zetten moeten ze minimaal voldoen aan twee beginselen uit het internationaal humanitair oorlogsrecht. Het beginsel van proportionaliteit stelt dat het uitgeoefende geweld in verhouding moet staan tot het bereikte voordeel. Het discriminatiebeginsel houdt in dat bij de keuze van het doelwit onderscheid moet kunnen worden gemaakt tussen strijders en burgers en tussen militaire doelen en civiele objecten als ziekenhuizen en kerken.

Omdat het lastig kan zijn een strijder van een burger te onderscheiden, zeggen sommige wetenschappers dat autonome en zelflerende bewapende militaire robots in een krijgsmacht helemaal niet zijn toegestaan. Er is (nog) geen robot met de noodzakelijke vaardigheden om dit onderscheid zelfstandig te kunnen maken. De sensoren, zoals camera's, sonars, lasers en temperatuursensoren,

kunnen aangeven dat iets een mens is, maar meer ook niet. Het onderscheid tussen een burger en een strijder kan niet worden gemaakt. Dit vereist immers inzicht in de specifieke context en het inlevingsvermogen in een ander mens. Dat vraagt begrip van en voor iemands intenties en het vermogen in te schatten wat iemand in een bepaalde situatie waarschijnlijk zal gaan doen. Dit is des te meer van belang bij een conventioneel, goed georganiseerd leger met moderne technologie tegen weinig gedisciplineerde opstandelingen onder leiding van warlords. Zulke asymmetrische oorlogsvoering met bermbommen en andere primitieve krijgsmiddelen voldoet niet aan de regels van humanitair oorlogsrecht waarmee je een robot wellicht zou kunnen programmeren.

Het maken van het onderscheid tussen burgers en militairen is dus erg afhankelijk van de context. Een persoon die herkend wordt door een militaire robot als strijder mag geen doelwit meer zijn als deze de intentie heeft om zich over te geven, of als hij zwaargewond is. Tenzij er zeer opmerkelijke doorbraken komen in het kunstmatig intelligentieonderzoek gaan veel wetenschappers er dan ook van uit dat menselijke tussenkomst noodzakelijk zal blijven om aan het discriminatiebeginsel te voldoen. Hetzelfde geldt voor het proportionaliteitsbeginsel. Er bestaat (nog) geen computerprogramma of algoritme om te bepalen of de aangerichte schade in verhouding staat tot het bereikte voordeel. Ook dit vereist situational awareness en menselijke oordeelsvorming volgens deze wetenschappers.

De robot die nooit burgers doodt

Een oplossing voor de problemen van autonome bewapende robots is het uitsluiten van de mogelijkheid dat ze burgers kunnen aanvallen. Je zou ze bijvoorbeeld alleen kunnen laten patrouilleren in een bepaald oorlogsgebied dat duidelijk fysiek is afgeschermd van burgers, de 'kill boxes' in militair



Hoe was het gesteld met de ethiek van de soldaten in de operatie Iraqi Freedom?

VRAAG 3

De inzet van robots in leger en politie gaat uit van de veronderstelling dat je de typisch menselijke 'agressie' en 'conflict' vermijdt. Maar dient agressie niet ook een zinnig doel?

jargon. Een voorbeeld is de al eerder genoemde gedemilitariseerde zone tussen Noord- en Zuid-Korea, waar robots zonder pardon indringers kunnen neerschieten. Daarmee wordt het gebruik van bewapende robots wel heel beperkt, om over politierobots maar te zwijgen. Als ze niet in de buurt mogen komen van burgers is het gebruik van bewapende politierobots bij voorbaat uitgesloten.

Een andere oplossing is een robot die geen mensen maar wel wapensystemen aanvalt. In veel omstandigheden kan dit toch tot problemen leiden. Lokale stamleden in Afghanistan dragen bijvoorbeeld vaak een wapen en zijn daardoor in de praktijk moeilijk te onderscheiden van vijandige opstandelingen. Daarbij kan een aanval op een vijandig wapensysteem disproportioneel zijn door bijkomende burgerslachtoffers.

Dat autonome bewapende robots niet perfect kunnen opereren volgens het discriminatiebegin-sel en proportionaliteitsbeginsel hoeft volgens Arkin nog geen reden te zijn om het inzetten van robots te verbieden. Ook mensen maken fouten bij militaire en politieoperaties, zeker als ze worden blootgesteld aan enorme stress. Arkin ziet in de verre toekomst wel degelijk mogelijkheden voor autonome robots. Met betere doelherkenningsalgoritmen zouden ze voldoende betrouwbaar worden om burgers van strijders te onderscheiden. Misschien kan door kunstmatige intelligentieonderzoek in de toekomst de militaire robot en de politierobot de menselijke militair en politieagent overtreffen bij het nemen van (morele) beslissingen en dus minder fouten maken. De vraag blijft of dat een afdoende reden is om autonome bewapende robots in te zetten bij operaties.

De robot die altijd raak schiet

■ MR. DR. IR. LAMBÈR ROYAKKERS

Militaire robots en politierobots zijn nu nog vooral onbewapende uitvoerders van saaie, gevaarlijke en smerige taken. Ze vergroten op die manier de veiligheid van militairen, politieagenten en burgers. Maar met de komst van bewapende robots kan een nieuwe wapenwedloop op gang komen. Er spelen dus nogal wat serieuze maatschappelijke en ethische kwesties rond militaire en politierobots.

Surveillancerobots tussen veiligheid en privacy

Robotica biedt nieuwe mogelijkheden om informatie over mensen te verzamelen. Leger en politie kunnen robots inzetten als verkeners, toezichthouders of opsporingsambtenaren. Dergelijke surveillancerobots kunnen beeld- en geluidsopnames maken op plaatsen waar mensen zelf moeilijk toegang toe hebben. In het maatschappelijk debat over opsporingsbevoegdheden gaat het vaak om de tegenstelling tussen veiligheid en privacy van burgers. Na de terreuraanslagen aan het begin van de eenentwintigste eeuw heeft de overheid steeds verder gaande maatregelen genomen op het gebied van veiligheid, zoals de inzet van camera's op straat, automatische nummerbordherkenning, het biometrisch paspoort en het veelvuldig af luisteren van telefoongesprekken. Pas de laatste tijd lijkt de privacy van burgers weer wat meer gewicht in de schaal te leggen. Mensen durven nu openlijk te twijfelen aan de effectiviteit van verschillende drastische controlemiddelen. De Adviescommissie Veiligheid en Persoonlijke Levenssfeer stelde in 2009:

'Verzamel niet meer informatie dan je op basis van een risicoanalyse nodig hebt (proportionaliteit) en gebruik de gegevens alleen voor het doel waarvoor toestemming is gegeven (doelbinding)'. Dit advies geldt ook voor surveillancerobots. Alleen op deze manier kun je ervoor waken dat 'Big Brother' onze veiligheid en onze privacy teveel aantast.

De bewapende robot weet het beter

Er zijn genoeg voordelen te bedenken van bewapende robots. Onbemande bewapende vliegtuigen kunnen de plaats van een doelwit met behulp van geavanceerde sensoren en camera's zeer nauwkeurig bepalen. Door deze precisie kan bijkomende schade – de beruchte *collateral damage* – worden beperkt. Robots beperken ook de vaak onherstelbare trauma's die soldaten op het slagveld oplopen. De stress van het slagveld beïnvloedt het beoordelingsvermogen van soldaten en ook van agenten vaak negatief. Wellicht zouden autonome bewapende robots in dergelijke spannende situaties in de toekomst rationelere en daarmee ethisch betere beslissingen kunnen nemen dan mensen.

Hoe autonomer, hoe lastiger

Op afstand controleerbare of telegeleide robots zijn geprogrammeerd om op basis van de input van hun sensoren bepaalde activiteiten wel of niet uit te voeren. De mens verricht daarbij in meerdere of mindere mate de commando- en sturingsactiviteiten. De beslissing over het al dan niet vernietigen van doelen wordt dus pas na menselijke tussenkomst genomen.

Wanneer een bewapende robot volledig zelfstandig, dus zonder tussenkomst van de mens, taken uitvoert en beslissingen neemt over het al dan niet vernietigen van beoogde doelen, spreken we van een *autonoom systeem*. Autonome systemen hebben een expliciete taakprogrammering, en handelen volgens een bepaald vast algoritme. Dit houdt in dat de handelingen van de robot voorspelbaar zijn en achteraf zijn te herleiden.

In de toekomst komen er vermoedelijk ook zelflerende bewapende robots. Die zullen in staat zijn taken te leren zonder expliciete taakprogrammering. Dergelijke robots bouwen zelf een taakmodel door automatisch kennis af te leiden uit voorbeelden waar ze in de praktijk tegenaan lopen. Die robots zullen dus per definitie onvoorspelbaar zijn en ook controle achteraf wordt lastig.

Je kunt ontwerpers en bouwers van een robot aansprakelijk stellen voor fouten in een systeem. Maar wat doe je met een robot die zelf een fout heeft aangeleerd met fatale gevolgen? Omdat de makers per definitie geen controle hebben over zelflerende robots zou de internationale gemeenschap de inzet van deze robots moeten verbieden. Een schrale troost: het zal nog jaren van onderzoek vergen voordat deze autonome robots hun intrede zouden kunnen doen.

Goedkope robot, eerder oorlog

Bewapende robots zouden een vermindering van het aantal slachtoffers onder militairen en politieagenten teweeg kunnen brengen. In de toekomst zullen ze ook steeds goedkoper worden. Als gevolg daarvan verwachten sommigen dat bewapende



Is Big Brother watching us?

robots op den duur een drempelverlagend effect zullen hebben op het aanwenden van gewapend geweld. Maar is dat overtuigend? De inzet van robots heeft geen direct effect op de criteria voor het aanwenden van gewapend geweld. Voor militair ingrijpen blijft een resolutie van de Veiligheidsraad van de VN nodig. De rechtmatigheid van geweld door de politie blijft bepaald door de politiewet.

De inzet van bewapende militaire robots zou omgekeerd juist een verdere verfijning kunnen opleveren van de vereisten voor een rechtvaardige oorlog. Ze zouden dus kunnen leiden tot een meer

ethische overweging om geweld uit te oefenen. Lidstaten van de Verenigde Naties worden geacht op te treden in het internationale belang. Toch spelen nationale belangen doorgaans een grotere rol bij de overweging om bijvoorbeeld deel te nemen aan een vredesmissie. Als er geen vitale belangen voor een land op het spel staan is de bereidheid om veel slachtoffers te aanvaarden voor een individueel land klein. Militaire robots zouden dit 'eigen belang' kunnen doorbreken omdat ze de risico's voor de eigen militairen en de vijandelijke burgerbevolking beperken. Volgens dat scenario zou de slagkracht van de Verenigde Naties en Veiligheidsraad met behulp van robots dus juist worden vergroot.

Internationaal verbod op autonome bewapende robots

Om geweld proportioneel te laten zijn en niet onbedoeld burgers te raken in plaats van strijders is inlevingsvermogen en gezond verstand nodig. Een robot kan een operator hierbij behulpzaam zijn met bijvoorbeeld zeer geavanceerde camera's en sensoren. Het lijkt evenwel onhaalbaar dat een robot binnen, zeg, de komende tien jaar zélf vermogen tot inleven en gezond verstand gaat bezitten. Het is volgens sommige onderzoekers dan ook wenselijk om een internationaal verbod op autonome bewapende robots af te spreken, totdat helder is aan welke eisen een autonome bewapende militaire robot of politierobot moet voldoen. Dit zal wel snel moeten gebeuren, omdat de tendens is dat de rol van de 'man aan de knoppen' steeds verder wordt uitgehold en dat de tech-

nologie zich zeer snel ontwikkelt in de richting van autonome robots.

'World of Warcraft X'

Omdat de militairen of politieagenten die de robots op afstand bedienen niet in de gevarenzone aanwezig hoeven te zijn worden directe stress en gevaar gereduceerd. Maar wat als ze op hun beeldscherm getuige zijn van burgers die worden aangevallen of wreed worden vermoord terwijl ze machteloos moeten toezien. Deze situaties zijn daadwerkelijk opgetreden bij de Amerikaanse operators die de *predators* en *reapers* aansturen in Irak en Afghanistan. Bij veel van deze operators werd fysieke en emotionele uitputting geconstateerd. Om dit tegen te gaan zijn er wijzigingen aangebracht aan het ontwerp van de interface die gebruikt wordt om de militaire robots aan te sturen. De vijand wordt nu door abstracte stipjes weergegeven op het scherm. Daardoor wordt het echter makkelijker voor de operators om te doden. Er wordt een emotionele, en daardoor ook morele, afstand gecreëerd tussen de dodelijke actie en de ethische implicaties van die actie. Het gevaar van deze ontwikkeling is dat operators beslissingen over leven en dood nemen alsof ze een videospelletje spelen. Illustratief zijn de volgende woorden van een jonge operator: *'It's like a video game. It can get a little bloodthirsty. But it's fucking cool.'*

De nieuwe wapenwedloop

Bewapende robots zijn relatief goedkoop, vaak commercieel verkrijgbaar en eenvoudig te kopiëren. De eerste tekenen van een nieuwe

Het besturen van onbemande vliegtuigen heeft veel weg van een videospel.



wapenwedloop zijn dan ook al zichtbaar. Het gebruik van bewapende robots voor inventieve – en wellicht criminele of terroristische – doeleinden vormt dan ook een reële en actuele bedreiging. De gevolgen van bewapende robots in het bezit van bijvoorbeeld fundamentalisten of terroristen zouden wel eens verwoestend kunnen zijn. De robot kan de plaats innemen van een zelfmoordterrorist. Het indammen van de proliferatie van bewapende robots door internationale wapenbeheersingsverdragen is dan ook een noodzakelijke voorwaarde voordat bewapende robots op een verantwoorde wijze verder ontwikkeld en ingezet

kunnen worden. De VN zou ook wetten moeten maken rond de export van bewapende militaire robots, het bestrijden van illegale handel van bewapende militaire robots en het instellen van licenties voor handelaren in bewapende militaire roboticatechnologie.

Al deze vragen maken een breed internationaal debat nodig over de verantwoordelijkheden van overheden, bedrijfsleven, de wetenschappelijke gemeenschap, juristen, non-gouvernementele organisaties en andere belanghebbenden voor de ontwikkeling van de bewapende roboticatechnologie. Tot nu toe is een dergelijk debat uitgebleven.

De ontwikkeling van robots gaat sneller dan regelgeving en ethische reflectie. En dat terwijl de ontwikkeling van de robots niet per se ethisch verantwoord gebeurt. Een debat over de internationale juridische en ethische principes voor een verantwoorde inzet van bewapende robots zou heel goed kunnen leiden tot een verbod op het gebruik ervan.

ANTWOORD 1

Als zo'n robot handelt op basis van objectieve criteria is hij mogelijk minder bevooroordeeld dan een 'gewone' soldaat. Maar wil je beslissingen over leven of dood werkelijk aan een machine overlaten?

ANTWOORD 2

Dit lijkt hét recept voor levensgevaarlijke robots waar je steeds minder grip op krijgt.

ANTWOORD 3

Agressie, testosteron en adrenaline zijn, evolutionair gesproken, zeker niet nutteloos. In een komend cahier zullen we ons buigen over de grenzen aan dat nut.

Meer informatie

Het centrale thema in dit cahier, de mensverbeteringstechnologie, is een goed voorbeeld van convergerende technologie. In dergelijk onderzoek komen veel verschillende disciplines samen. Met onderstaand overzicht lichten we niet alleen de betrokken technologie toe, maar geven we hopelijk ook een eerste aanzet tot verdere verdieping.

Convergerende technologie

Letterlijk betekent deze term: het samenkomen van technologieën. Kenmerkend is dat er door het combineren van verschillende technologieën nieuwe producten en toepassingsgebieden ontstaan. De combinatie wordt meer dan de som der delen. In de levenswetenschappen zijn vooral nano-, bio-, informatie- en cognitieve technologieën van belang.

Het Rathenauinstituut stimuleert de publieke en politieke meningsvorming over wetenschap en technologie. Ook over convergerende technologie. Zie bijvoorbeeld: http://www.rathenau.nl/uploads/tx_tferathenau/Leven_als_bouwpakket.pdf

Het Vlaamse Instituut Samenleving en Technologie (IST) heeft ook een dossier uitgebracht rond convergerende technologie. http://www.samenlevingentechnologie.be/ists/nl/pdf/dossiers/dossier_13_converging_technologies.pdf

Nanotechnologie

‘Nano’ is Grieks voor ‘dwerg’. In het SI-stelsel is een nanometer een miljardste meter. De nanotechnologie houdt zich dan ook bezig met wetenschap en technologie op de schaal van individuele moleculen.

Om de nanotechnologie uit de onbekend- en vaak ook onbemindheid te halen heeft de Commissie Maatschappelijke Dialoog Nanotechnologie het nanopodium opgericht. <http://www.nanopodium.nl>.

Op de website <http://www.kennislink.nl/nanotechnologie> is een groeiend dossier te vinden met artikelen die betrekking hebben op de nanotech.

Informatietechnologie

De informatietechnologie is het domein van informatiesystemen, telecommunicatie en computers. Door de extreem snelle evolutie van het vakgebied zijn die drie onderdelen nauwelijks nog gescheiden. Om diezelfde reden lijkt het opnemen van links in een gedrukt boek een hachelijke zaak. Hoe snel haalt de tijd ons in? Op <http://www.kennislink.nl/kernwoorden/informatietechnologie> is een up-to-date beeld te krijgen.

Biotechnologie

De biotechnologie is de brug tussen de theoretische biologie en de praktijk van laboratorium en industrie. Een goed voorbeeld van 'technicos' (Grieks: techniek) die gebruikt maakt van 'bios' (Grieks: leven) is de genetische modificatie dan wel genetische manipulatie, afhankelijk van de sfeer waarin het woord wordt gebruikt.

Wageningen UR is een universiteit waar biotech een grote rol speelt. Speciaal voor scholieren en docenten van het voortgezet onderwijs heeft deze universiteit de site <http://www.biotechnologie.net/> opgezet.

Ook op <http://www.kennislink.nl/biotechnologie> is een goed beeld te krijgen van de verschillende thema's binnen de biotech.

Cognitiewetenschap

De cognitiewetenschap is een interdisciplinair wetenschapsgebied dat zich bezighoudt met het brein in de brede zin. In dit wetenschapsgebied komen psychologie, kunstmatige intelligentie, filosofie, taalwetenschappen, antropologie, sociologie en onderwijs samen.

Een elegante omweg naar het crème de la crème van de cognitiewetenschap is de lijst van laureaten van de Heinekenprijs voor cognitiewetenschap, een prijs die om het jaar wordt uitgereikt door de Koninklijke Akademie van Wetenschappen. De laureaten staan op <http://www.knaw.nl> onder 'prijzen'.

Auteurs

Dit cahier is samengesteld door:

Dr. A. (Ann) van der Auweraert, universitair docent wetenschapscommunicatie, TU Delft
Prof. dr. J.M. (Jos) van den Broek, hoogleraar wetenschapscommunicatie, Universiteit Leiden
Prof. dr. W.P.M. (Wiel) Hoekstra, emeritus hoogleraar microbiologie, Universiteit Utrecht
Ir. Rob Buiters (eindredactie), freelance wetenschapsjournalist

De volgende auteurs hebben bijgedragen aan de totstandkoming van dit cahier:

Dr. Kurt Baeten, onderzoeker aan het Biomedisch Onderzoeksinstituut van de Universiteit Hasselt
Dr. Marianne Boenink, verbonden aan de vakgroep filosofie van de Universiteit Twente
Dr. Mark Coeckelbergh, universitair docent bij de afdeling Wijsbegeerte van de Universiteit Twente
Dr. ir. Rinie van Est, coördinator op de afdeling *Technology Assessment* van het Rathenauinstituut in Den Haag en tevens universitair docent aan de TU Eindhoven
Drs. Lars Grieten, verbonden aan het Instituut voor Materiaalonderzoek van de Universiteit Hasselt
Prof. dr. Catholijn Jonker, hoogleraar aan de sectie Mens-Machine Interactie van de Technische Universiteit Delft
Prof. dr. ir. Pieter Jonker, hoogleraar *Vision Based Robotics* aan de Technische Universiteit Delft

Dr. Gert-Jan Lokhorst, universitair docent bij de sectie filosofie van de TU Delft
Mr. dr. ir. Lambèr Royakkers, verbonden aan de vakgroep filosofie en ethiek van de TU Eindhoven
Prof. dr. Gert Storm, hoogleraar biofarmacie en farmaceutische technologie aan de Universiteit Utrecht
Steffie van de Vorstenbosch, communicatiemedewerker bij het IMEC in Eindhoven
Prof. dr. Patrick Wagner, hoogleraar aan het Instituut voor Materiaalonderzoek van de Universiteit Hasselt
Dr. Pascal Wiggers, universitair docent aan de Sectie Mens-Machine Interactie van de Technische Universiteit Delft

Illustratieverantwoording

Foto omslag: Shutterstock

Henk Thomas / Universiteit van Amsterdam: p. 3

Jos van den Broek, Leiden: p. 5, 13, 27, 34, 43, 44, 46,
48, 56

Shutterstock: p. 6, 9 b, o, 11, 17, 24, 32, 40

Wikimedia Commons: p. 9 links, 19 rechts, 25

Flickr.com: p. 10

Visual Photo Design / B en U, Diemen: p. 14

iStockphoto: p. 19, 21, 38, 42

Imageselect, Wassenaar: p. 20, 37, 59

Reporters, Haarlem: p. 22

Pieter Jonker / TU Delft: p. 26

Paul Weber / Flickr.com: p. 28

Festo B.V., Delft: p. 29

Columbia / The Kobal Collection: p. 31

Library of Congress Prints and Photographs

Division Washington, D.C.: p. 36

Theo Pasveer BNO Cartographics, Deventer: p. 45,
50 (2x)

Steffie van de Vorstenbosch / Holst Centre /

Stichting imec Nederland, Eindhoven: p. 51, 53

Spc. Ryan Hallock / Photo Courtesy of U.S. Army:
p. 61

Stephen Baack / Photo Courtesy of U.S. Army: p. 62

Frank E. Schneider / ELROB: p. 63

Photo Courtesy of U.S. Army: p. 64

Nationale Beeldbank, Amsterdam: p. 68

UK Crown Copyright: p. 69

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:



In dit nummer:

- › **Convergerende technologieën**
- › **Nooit meer leren dankzij kunstmatige intelligentie**
- › **Robots doen straks het werk**
- › **Genezen, nog voor je ziek wordt**
- › **Robocop en robotwapens voorkomen oorlog**
- › **Nieuw: QR-codes voor de smartphone**

Redactie:

Ann van der Auweraert

Jos van den Broek

Wiel Hoekstra

Rob Buiter (eindredactie)

Met een voorwoord van KNAW-president Robbert Dijkgraaf

Wat als straks alle saaie, gevaarlijke, of smerige rotklusjes worden gedaan door robots? En wat als die robots ook nog de billen wassen en de sokken aantrekken van al die ouderen waarvoor nooit voldoende jonge handen aan het bed staan? Wat als je om het even welk droog feitje niet meer hoeft te onthouden, maar alle kennis gewoon met een tip van je vinger op je smartphone of zakcomputer verschijnt? Krijgen we echt een toekomst waarin de medische technologie ons geneest nog voor we ziek zijn? En robocop en robosoldier, zijn die echt zo onbevooroordeeld en verstandig dat we nooit meer oorlog hoeven te voeren?

Het cahier Mens 2.0 schetst de opmaat naar een verbeterde versie van de moderne mens. Op een enkel futuristisch vergezicht na is dat vooral een wetenschappelijk verantwoord beeld. Wat is er nú al aan wetenschap en technologie beschikbaar om de mens te verbeteren? Aan het eind van ieder hoofdstuk stelt dit cahier ook vooral veel vragen. Worden we echt wel zo blij van die 'verbeterde' versie van Mens 1.0?

**Bio-Wetenschappen
en Maatschappij**

