

Ondanks een aantal, op dat moment onoverkomelijk schijnende, technologische barrières heeft de halfgeleiderindustrie zich decennia lang aan Moore's wet weten te houden. Een van de voornaamste problemen voor het verder schalen van transistors, is lekkage door het dunne gate oxide.

### "Nu blijft de vraag hoeveel kleiner een transistor kan worden."

Dit is voorlopig opgelost door op materialen met een hogere dielektrische constante over te stappen. Hierdoor kan  $C_{ox}$  worden geschaald zonder het oxide dunner te maken. Een tweede probleem is een te zwakke koppeling van de gate aan het kanaal waardoor de drempelspanning niet geschaald kan worden met  $S$  maar slechts met  $S/\alpha$ , met als gevolg dat het gedissipeerde vermogen per transistor slechts schaaft als

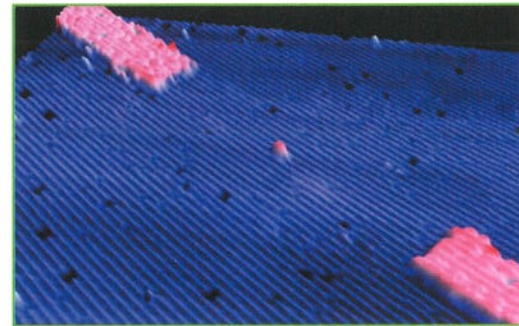
$$P' = I'_{DSAT} V'_{DD} = \frac{I_{DSAT} V_{DD}}{S} \frac{P}{S^2}$$

De vermogensdichtheid  $\frac{P}{WL}$  neemt dus toe met  $\alpha^2$  in plaats van constant te blijven. In de huidige generatie transistoren is dit probleem verholpen door weg te gaan van vlakke transistor structuren. In zogenaamde FinFETs omsluit de gate het kanaal (in de vorm van een vin) aan drie kanten, waardoor de gate sterker aan het kanaal koppelt.<sup>[2]</sup> Op deze manier kan met een lagere drempelspanning gewerkt worden, wat leidt tot een afname van de vermogensdichtheid.

Nu blijft de vraag hoeveel kleiner een transistor kan worden. De kleinste transistor afmeting in de huidige generatie Intel processors is 22 nm en de 14 nm generatie wordt verwacht in 2014. Bij deze afmetingen beginnen kwantumeffecten een belangrijke rol te spelen. Nu al kunnen bij lage temperaturen (<4K) kwantumtoestanden van individuele doteringsatomen worden waargenomen in commerciële FinFETs.<sup>[3]</sup> Deze doteringsatomen zijn tijdens het fabricageproces vanuit de source of drain contacten in het kanaal gediffundeerd en beïnvloeden ook het kamertemperatuurgedrag.

In de ultieme limiet van Moore's wet zullen dit soort kwantumeffecten, alsmede het feit dat materiaal op deze schaal discreet is (het bestaat immers uit atomen), wellicht niet langer bestreden worden maar eerder

worden omarmd. Grafen en koolstofnanobuisjes, materialen die uit een enkele laag atomen bestaan, behoren tot de mogelijke opvolgers van silicium. Ook bijvoorbeeld de moleculaire transistor is een belangrijke kandidaat. De kleinste siliciumtransistor waarvan de werking is aangetoond is de enkel-atoom transistor<sup>[4]</sup>, waarbij het kanaal gevormd wordt door een enkel fosfor (n-type) doteringsatoom, zie figuur 3. Als het fosforatoom met de gate in resonantie wordt gebracht met de source en drain elektrode, kan per keer één elektron van de source naar het fosfor atoom tunnelen om vervolgens van het atoom naar de drain te tunnelen.



Figuur 3. De single atom transistor

Op de lange termijn zal CMOS technologie niet langer te schalen zijn. Hoe fabrikanten de wet van Moore (wellicht op een andere manier) kunnen blijven volgen zal moeten blijken, maar er zullen zeker nieuwe commercieel haalbare oplossingen worden ontwikkeld om snellere, efficiëntere en goedkopere transistors te maken.

#### Referenties

- [1] Sze, S. M. & Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. (Wiley-Blackwell: 2007).
- [2] Intel Silicon Technology Innovations. at <http://www.intel.com/content/www/us/en/siliconinnovations/silicon-innovations-technology.html>.
- [3] Lansbergen, G. P. et al. Gate-induced quantum-confinement transition of a single dopant atom in a silicon FinFET. Nature Physics 4, 656 (2008).
- [4] Fuechsle, M. et al. A single-atom transistor. Nature Nanotechnology 7, 242 (2012).

# Cyborg: van revolutie naar evolutie?

Anneke Smelik is hoogleraar Visuele Cultuur bij de afdeling Algemene Cultuurwetenschappen van de Radboud Universiteit Nijmegen: [www.annekesmelik.nl](http://www.annekesmelik.nl).

In 2012 verscheen haar boek 'Ik, cyborg'. De mens-machine in populaire cultuur': [www.eburon.nl/ik\\_cyborg](http://www.eburon.nl/ik_cyborg).

✍: Anneke Smelik  
#Woorden:  
Geschatte leestijd:  
Moeilijkheidsgraad:  
Drankadvies:

1645  
16 minuten  
●●  
Smeerolie

#### Atlete en fotomodel

Stel, je hebt verlamde benen, maar via de computer kun je een avatar aannemen die jou weer in staat stelt om te lopen, te rennen en te sporten. Met de avatar kun je zelfs de lucht inademen op een andere planeet waar mensen niet zomaar in de atmosfeer kunnen overleven. Dat overkomt Jake Sully in de 3D-sciencefictionfilm 'Avatar' van James Cameron uit 2009. Revolutionair? Zeker, maar dit is dan ook sciencefiction. Jake is een hedendaagse mens-machine die met de computer is versmolten: een cyborg – cybernetisch organisme.

### "Revolutionair? Zeker, maar dit is dan ook sciencefiction"

Wetenschappelijke ontwikkelingen in wat wel NBIC ('enbik') wordt genoemd – nanotechnologie, biotechnologie, informatietechnologie en cognitiewetenschappen – hebben nieuwe mogelijkheden voor interventies in het menselijk lichaam en leven geopend. Technologie verbetert dan ook het lichaam. Vaak is dat medische technologie: neem het voorbeeld van fotomodel en actrice Aimee Mullins, die vanaf de knieën geamputeerde benen heeft en sinds haar jeugd prothesen draagt. Als atlete gebruikte Mullins futuristische beenprothesen om hard te lopen; ze won sprintwedstrijden op de Paralympische Spelen van 1996. Nu zijn dit soort cyborgs ingeburgerd: deze zomer rende Oscar Pistorius op zulke prothesen op de Olympische Spelen mee met de gewone hardlopers. In het voorbeeld van de mooie Aimee Mullins, die met prothesen succesvol is als atlete, model en actrice, zien we dat de sciencefictionfiguur van de cyborg al werkelijkheid is geworden.



Figuur 1. Drie keer Aimee Mullins: als atlete; als model voor Alexander McQueen en als panter in de film Cremaster 3 van Matthew Barney.

#### Populaire cultuur

We willen graag slimmer, sneller en sterker worden en de techniek kan ons daarbij helpen. Manfred Clynes, de wetenschapper die het woord cyborg bedacht, stelt dat de mens, de homo sapiens, verandert op het moment dat hij een bril op zet of leert fietsen. De mens is eigenlijk al een cyborg. Mijn stelling is dat we in het westen van technologie zijn gaan houden. In tegenstelling tot vroeger, toen de technologie of de mens-machine nogal eens als een dreiging of nachtmerrie werd voorgesteld.

In reclames, games en sciencefictionfilms van de laatste decennia zien we de cyborg dan ook als een aantrekkelijke figuur: hij of zij is de belichaming van een superieur bovenmenselijk wezen met een onoverwinnelijk lichaam. De cyborg is letterlijk een grensverleggend figuur. Dit zorgt voor het eerst voor een verschuivende grens tussen mens en machine. De cyborg is immers een cybernetisch organisme; een versmelting van hardware, software en 'wetware'. Hiermee wordt de heel fundamentele tegenstelling tussen natuur en cultuur ongedaan gemaakt. Dat is op zich niet nieuw. Als iets de huidige mens kenmerkt is het dat hij zich onttrekt aan de natuur en deze in cultuur brengt. Cultuur is onlosmakelijk verbonden met mens



zijn. Wetenschapsfilosofe Donna Haraway (die het beroemde 'Cyborg Manifest' schreef) heeft het in dit verband over 'natureculture', als één woord. Natuur en cultuur vormen een geheel waarin je het één niet meer van het ander kunt onderscheiden. Zo is het ook met de cyborg-mens. Of eigenlijk cyborgmens zonder streepje, want wij zijn versmolten tot een nieuwe eenheid van 'natuurcultuur'.

Dat betekent niet *per se* dat wij ontmenselijken, maar dat we de technologie moeten vermenselijken. Aan ons de taak om de cyborg, de mens-machine die we aan het worden zijn, tot een cyborgmens te maken.

**"(...) overal zien we dat de scheidingslijnen tussen mannen en vrouwen aan het verdwijnen zijn"**

Als ergens een radertje gaat schuiven, dan gaat er meer op de helling. Zo sneuvelt de harde grens tussen man en vrouw. In sciencefiction, in populaire cultuur, in mode; overal zien we dat de scheidingslijnen tussen mannen en vrouwen aan het verdwijnen zijn. Technologie maakt ook veel culturele vormen van mannelijkheid en vrouwelijkheid overbodig. Een typisch mannelijke eigenschap, als kracht, wordt betekenisloos wanneer een simpele druk op de knop volstaat. De komst van apparaten bevrijdt vrouwen van een groot deel van het huishouden. En misschien wel het belangrijkste: de loskoppeling van reproductie emancipeert de seksualiteit, maar verandert ook de verdeling van ingesleten culturele patronen over mannen en vrouwen. Cyborgtechnologie maakt een uitwisseling mogelijk van taken en eigenschappen die van oudsher onder de seksen verdeeld waren.

In sciencefictionfilms en populaire cultuur zijn cyborgvrouwen niet alleen erotisch maar ook bovenmenselijk sterk en krachtig, terwijl cyborg-mannen niet alleen hun mannetje staan maar ook een aantrekkelijk lustobject zijn. Deze grenserving sijpelt van de populaire cultuur door naar het alledaagse leven. Nieuwe beelden van mannelijkheid en vrouwelijkheid weerspiegelen zich in de manier waarop we ons kleden en in onze schoonheidsidealen. In eigenschappen en in uiterlijk groeien mannen en vrouwen steeds meer naar elkaar toe. In cybercultuur wordt ook geknabbeld aan traditionele opvattingen over tijd en ruimte. En over wat feit of

fictie is. Vooral in sciencefictionfilms wordt volop geëxperimenteerd in het schuiven met grenzen tussen verleden, heden en toekomst. De tijd voltrekt zich niet meer lineair, terwijl de ruimte niet meer strikt driedimensionaal is, maar zich naar binnen en naar buiten vouwt in onnavolgbare dimensies. Ook spelen de scifi-films een spelletje met wat echt en onecht is. De virtuele werkelijkheid die met de computer en cyberspace is verbonden, roept blijkbaar vragen op over wat virtueel of reëel is: is de matrix een afspiegeling van de werkelijkheid of volledig imaginair? Of is de werkelijkheid een afspiegeling van de schaduwen die cyberspace werpt in de grot van het reële bestaan? Dit is in feite een filosofische vraag, die Plato al stelde in zijn allegorie van de grot: kan de mens de werkelijkheid kennen? Of is onze wereld een afspiegeling van iets anders? Het is opvallend dat de films vaak een fundamentele verwarring laten bestaan aan het einde van het verhaal. De kijker gaat naar huis met een gordiaanse knoop waarin de dimensies van ruimte en tijd zijn verweven met een indringende onzekerheid over de status van de werkelijkheid.



*Figuur 2. Op het affiche van de tweede film uit de Matrix-serie is goed te zien hoe de mannelijke en vrouwelijke acteur op elkaar lijken: digitale androgynie.*

#### {On}sterfelijkheid

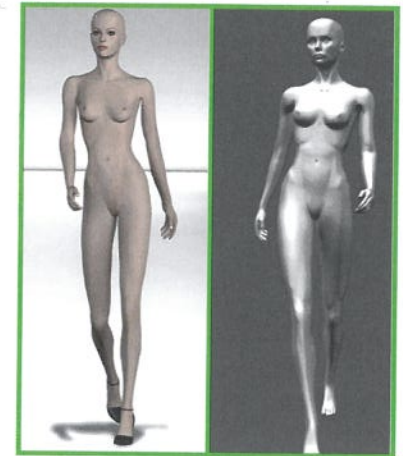
Ook de plaats en positie van het lichaam is aan transformatie onderhevig in de hoogtechnologische cultuur. Technokunstenaars als Stelarc en Orlan geloven dat het menselijke lichaam 'verouderd' is. En wetenschappers als Marvin Minsky en Hans Moravec of futurologen als Ray Kurzweil verwachten dat we in

de toekomst ons bewustzijn kunnen uploaden naar een computer. Of informatie kunnen downloaden van de computer naar ons brein. Scifi-films doen al voorzettes door het geheugen van mensen vast te leggen en te manipuleren in computers en mensen als avatar of als cyborg in cyberspace te laten leven.

**"De mens is een te complex 'natuurcultuur' geheel om zomaar te kunnen nabouwen."**

Voltrekt zich een evolutionaire verandering van mens naar cyborg? Net zomin als anderen kan ik in de toekomst kijken. Maar zulke scenario's lijken mij toch onwaarschijnlijk. Dat komt omdat er te weinig rekening wordt gehouden met het feit dat mensen niet alleen hun brein zijn, maar ook een lichaam hebben. Als je al de hersencellen en de miljarden verbindingen daartussen kunt downloaden of uploaden, dan heb je nog altijd geen enkele verbinding gelegd met het lichaam. Ook in het lichaam lopen miljarden verbindingen tussen cellen. Het brein kan niet voortleven zonder lichaam, alle scifi-fantasieën ten spijt. De mens is een te complex 'natuurcultuur' geheel om zomaar te kunnen nabouwen. In plaats van ons blind te staren op een zogeheten 'transhumane' toekomst die er misschien nooit zal komen, is het belangrijker om te kijken naar de diepere wens die achter dit soort fantasieën schuilgaat. Dat is in eerste instantie het verlangen naar bovenmenselijke macht over het aardse lichaam. In die zin is de fantasie van een cyborg een extreme uitingsvorm van de zoektocht naar de maakbare mens. Maar in tweede instantie lijkt mij daar nog een overkoepelende wens onder te liggen en dat is de hoop op onsterfelijkheid. In de populaire cultuur valt een enorme spanning waar te nemen over de lichamelijke én sterfelijkheid van de cyborg. Veel cyberfilms verbeelden de wens om weg te vluchten van het aardse bestaan en te ontsnappen uit de 'gevangenis' van het lichaam. Buiten de sciencefiction resonanceert dit verlangen naar onsterfelijkheid in de tendens van de beeldcultuur om lichamen als volmaakt voor te stellen. De mensen die in beeld komen in films, op televisie, of op billboards, zijn, net als cyborgs, glad en glanzend door een gepolijste perfectie. In het echte leven proberen mensen dat ideaal te bereiken door fitness, schoonheidspraktijken en plastische chirurgie. Die maakbaarheid houdt – al is het maar tijdelijk – de

angst voor verval, ouderdom en de dood op een afstandje.



*Figuur 3. Gepolijste perfectie in 'Dream of Beauty 3.0' van Kirsten Geisler (2002)*

De belofte om de vergankelijke materie van het lichaam onder controle te brengen is volgens mij de belangrijkste aantrekkingskracht van de cyborg. In onze cultuur brengt het beeld van de cyborg het onbereikbare ideaal van onsterfelijkheid met zich mee. Als we de cyborg willen accepteren als een wenselijk ideaal, dan zullen we onze sterfelijkheid onder ogen moeten (blijven) zien. Lichamelijke en sterfelijkheid zijn met elkaar verbonden: omdat we een lichaam hebben, zullen we op een dag doodgaan. Een cultuur die de cyborg omarmt, kan zich niet zomaar van het lichaam ontdoen. We kunnen misschien de aftakeling van het lichaam tijdelijk tegenhouden, de rimpels in ons gezicht gladstrijken, en onze levensduur oprekken, maar het einde blijft altijd in zicht. Ook voor ons als cyborgs. Dat is de spanning die we zelf moeten oplossen. Laten we vooral de technologie waarderen, daar waar het ons helpt om sterker, slimmer en sneller te worden. Maar laten we daarbij het lichaam steeds in zijn volle glorie vieren, want het gaat om de samensmelting van mens en machine. Een kritiekloze benadering die de techniek boven de mens stelt, zal altijd tekort schieten. De cyborg is een hybride figuur en alleen in het volledige samengaan van natuur (lichaam) en cultuur (technologie) vinden we de zekerheid dat we een duurzame toekomst tegemoet gaan.