

## De kunst van het maken

**Citation for published version (APA):**

Kessels, W. M. M. (2012). *De kunst van het maken*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2012

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Intreerede  
prof.dr.ir. Erwin Kessels  
11 mei 2012



/ Faculteit Technische Natuurkunde

**TU** e Technische Universiteit  
Eindhoven  
University of Technology

# De kunst van het maken

Where innovation starts

**Intreerede prof.dr.ir. Erwin Kessels**

---

# **De kunst van het maken**

**Uitgesproken op 11 mei 2012  
aan de Technische Universiteit Eindhoven**

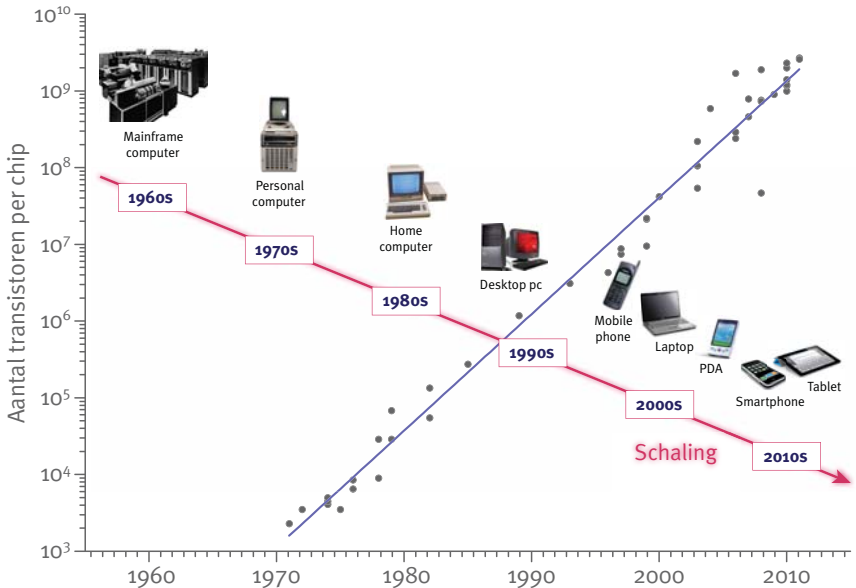


# Kunst- en vliegwerk

Kunst- en vliegwerk verwijst naar de apparatuur en machines die in de periode van de Nederlandse renaissance gebruikt werden om kunstgrepen uit te voeren op het toneel. Zo konden met kunstwerk allerlei scènes uitgebeeld worden door snel van coulissen te wisselen en werden mensen en voorwerpen met behulp van vliegwerken boven en onder het toneel verplaatst. Het begon vrij simpel. De voorloper van de Amsterdamse Schouwburg bevatte een 'daelend hemelwerck' – een op en neer bewegende wolk [1]. Maar daarna – vooral in de Nieuwe Schouwburg die in 1665 de deuren opende – werden de apparatuur en machines technisch complexer om de mogelijkheden op het toneel uit te breiden en zo het publiek te blijven imponeren.

Verlaten we nu de toneelwereld en beschouwen we ons hedendaagse leven in de digitale samenleving, dan wordt er ook veel mogelijk gemaakt met 'kunst- en vliegwerk'. Allerlei technologische ontwikkelingen op het gebied van de ICT – de informatie- en communicatietechnologie – wisselen elkaar in rap tempo af en hebben een immense invloed op ons leven. Denkt u aan internet of de stormachtige opkomst van de mobiele telefoon, inmiddels een apparaatje waarvan bellen slechts een van de vele functies is en dat meer rekenkracht heeft dan een pc tien jaar geleden. Veel mensen – wellicht ook u – ervaren deze snelle ontwikkelingen als vanzelfsprekend. Ik kan u echter verzekeren dat er op technologisch gebied alles uit de kast moet worden gehaald om ze mogelijk te maken. Ik zal daar nu over uitweiden en u vertellen hoe ik hier een bijdrage aan lever met mijn onderzoek.

De enorme vooruitgang op het gebied van ICT is voor een groot gedeelte bepaald door ontwikkelingen binnen de halfgeleiderindustrie, of zoals u wilt, de chipindustrie. Met als uitgangspunt de 'Wet van Moore' streeft deze bedrijfstak ernaar het aantal transistoren op een chip elke twee jaar te verdubbelen, zie figuur 1. Vanaf de jaren zestig tot zeer recent werd dit vooral gedaan door de afmetingen van de transistoren steeds kleiner te maken, zonder de transistor zelf wezenlijk te veranderen. Dit was dus simpelweg 'schaling'. Vanaf de jaren negentig werd deze schaling vooral mogelijk gemaakt door ontwikkelingen op het gebied van lithografie, de stap waarbij de zeer kleine structuren worden afgebeeld op het



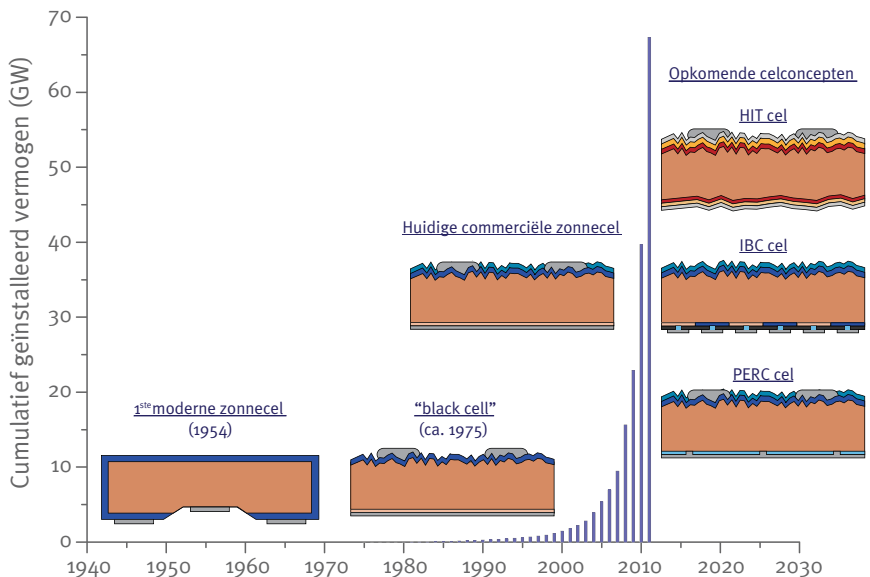
Figuur 1

50 jaar vooruitgang binnen de informatie- en communicatietechnologie (ICT) mogelijk gemaakt door schaling binnen de halfgeleiderindustrie. Transistoren worden steeds kleiner zodat het aantal transistoren per chip elke twee jaar kan verdubbelen, zoals de industrie zichzelf heeft opgelegd met de Wet van Moore.

halfgeleidersubstraat, als begin van het daadwerkelijke maakproces. Maar er zitten grenzen aan deze miniaturisatie. Sinds een paar jaar is niet alleen lithografie de beperkende factor bij de meest geavanceerde chips. Er zijn ook grote veranderingen nodig op het gebied van de materialen die gebruikt worden voor het opbouwen van de transistoren. We noemen dat schaling op materiaalniveau. Het meest prominente voorbeeld op dit moment is het ultradunne isolerende laagje van veldeffecttransistoren. Het siliciumoxide – dat decennialang het hart van de veldeffecttransistor vormde – is vervangen door een oxide van het element hafnium. Dit materiaal heeft een hogere diëlektrische constante, waardoor de transistor sneller wordt. Tevens vindt er een overgang plaats van platte transistoren naar transistoren met een uitgesproken driedimensionaal karakter. Marktleider Intel heeft vorig jaar de *tri-gate*-transistor geïntroduceerd voor hun 22 nm-technologie. Bij deze transistor bevindt zich de poort (de *gate*) voor aansturing aan drie zijden van het siliciumkanaal, in plaats van aan een zijde. De 22 nanometer verwijst naar de breedte van de poorten. De dikte van de allerdunste laagjes waaruit de transistoren bestaan is minder dan enkele nanometers. We kunnen hier dus spreken van nanotechnologie. Kijken we verder in de toekomst, dan zien we

transistoren en andere nano-elektronica met een totaal andere opmaak en met nog veel meer nieuwe materialen. Transistoren zullen dan opgebouwd zijn uit nanobuisjes, nanodraadjes en misschien zelfs uit grafeen. Deze ontwikkeling staat niet alleen in het teken van betere prestaties in termen van snellere en krachtigere chips. Het gaat ook om een lager energieverbruik. Het energieverbruik door ICT begint namelijk heel aanzienlijk te worden binnen onze digitale samenleving.

Daarmee kom ik op een ander punt: de hedendaagse uitdagingen op het gebied van energie en milieu. U bent allemaal bekend met de problematiek die zich manifesteert op drie vlakken: beschikbaarheid van voldoende energiebronnen, een schoon milieu met beperking van de klimaatverandering en een duurzame economische ontwikkeling voor de hele wereldbevolking. De mondiale energiebehoefte blijft gestaag stijgen, zeker nu er in de niet-westerse landen een inhaalslag plaatsvindt. Technologie kan een grote rol spelen bij het aangaan van deze uitdagingen. Sterker nog, de technologie zal mede een uitkomst moeten bieden. Denk bijvoorbeeld aan de transport- en vervoersector, die momenteel voor meer dan 90 %



Figuur 2

Ontwikkelingen op het gebied van commerciële zonnecellen van kristallijn silicium. Na weinig vernieuwing in de eerste 50 jaar na de uitvinding van de moderne silicium zonnecel worden geavanceerde, mede op nanotechnologie gebaseerde, zonnecelconcepten met hoge rendementen geïntroduceerd op een explosief groeiende zonnecelmarkt.

afhankelijk is van olieproducten. Hier kan een stap gezet worden door de omschakeling naar elektrische auto's. Er zullen dan wel betere batterijen, oftewel accu's, ontwikkeld moeten worden. Zonnecellen zijn een ander voorbeeld. Zoals uit figuur 2 blijkt, groeit de zonnecelmarkt explosief. Realiseert u zich echter wel dat vooralsnog nog geen 0,5 % van de elektriciteit wordt opgewekt door zonnecellen. Daarom zijn technologische ontwikkelingen nodig – en deze vinden momenteel ook plaats – om het rendement van de omzetting van zonlicht in elektriciteit te verhogen en om de kostprijs van de opgewekte energie te verlagen. Alleen dan kunnen zonnecellen een rol van betekenis gaan spelen. Bij zowel batterijen als zonnecellen zijn nieuwe materialen en nieuwe materiaalsystemen essentieel. Deze constatering is algemeen geldig voor technologische ontwikkelingen op het gebied van duurzame energieopwekking en energieopslag. Evenals in de halfgeleiderindustrie speelt de nanotechnologie hier een grote rol. Ik ben ervan overtuigd dat fundamentele barrières doorbroken kunnen worden met nanostructureerde materialen en met de beheersing van productieprocessen op de nanoschaal.

In de ontwikkelingen die ik daarnet geschetst heb, zijn mijns inziens twee punten van essentieel en toenemend belang op het gebied van materialen. Deze twee punten staan daarom centraal binnen het Vici-programma dat het hart vormt van mijn onderzoek in de komende vijf jaar. Het eerste is een vergaande beheersing van materialen en hun eigenschappen. Dat wil zeggen dat we het vermogen moeten ontwikkelen materialen zo te maken en hun eigenschappen zo af te stemmen en te verfijnen dat ze optimaal zijn voor de beoogde toepassing. Het tweede punt is de uiterste beheersing van kritieke afmetingen, oftewel dimensies van de materialen en structuren. Dit betekent dat we deze dimensies op de nanoschaal moeten gaan beheersen. In het Engels vertaald zijn deze twee punten samen te vatten als '*materials control and dimensions control*'. Daarmee kom ik tot de essentie van deze rede. Om *materials control and dimensions control* te realiseren zal er veel kunst- en vliegwerk nodig zijn.



# Kunst en kunde

Onder kunst verstaan we creatieve uitingen van de mens die tot doel hebben de menselijke zintuigen en geest te prikkelen door originaliteit of schoonheid. Dat is de betekenis die we er heden ten dage aan geven. Etymologisch heeft het woord dezelfde oorsprong als het woord 'kunde'. Beide woorden kunnen worden opgevat in de betekenis van bekwaamheid, vaardigheid en kennis. Ook in hun huidige betekenis hebben kunst en kunde veel gemeen. In wetenschappelijke 'kundes', zoals in de natuur- en wiskunde, spelen zaken als creativiteit, originaliteit en schoonheid een grote rol, net als in de kunst. In beide gevallen gaat het om scheppingskracht, waarbij abstraheren en generaliseren belangrijke elementen zijn. Het draait – in elk geval bij mij – ook om verwondering. Om tot kunst te komen, is 'kunde' noodzakelijk. Zelfs de meest talentvolle kunstenaars hebben flink in hun vaardigheden en kennis moeten investeren om tot kunstwerken te komen, of het nu beeldende kunst, toneelkunst of dichtkunst is. We spreken niet voor niets over 'oefening baart kunst'.

Ook voor het realiseren van technologische vooruitgang is kunde onontbeerlijk. Het woord technologie komt immers van het Griekse technè, dat als vaardigheid, kunde en ook als kunst vertaald kan worden. In deze regio van het land kijken we graag naar hightech bedrijven zoals ASML, de marktleider op het gebied van lithografie machines. Mondiaal gezien is ASML in 2011 opgeklommen tot de grootste chipmachinefabrikant. ASML is een schoolvoorbeeld van hoe het hele spectrum, van technische vaardigheden tot wetenschappelijke kennis, samengebracht wordt om de technologische grenzen steeds weer te verleggen en daardoor een rol te spelen op het wereldtoneel. Wat ASML bereikt heeft, kunnen we zien als een waar kunststukje, zowel in technologisch opzicht als in termen van hun impact op de ontwikkelingen binnen de halfgeleiderindustrie en hun belang voor de regio. We dienen ons daarbij te realiseren dat ASML behoort tot de maakindustrie, die veel belangrijker is voor de bv Nederland dan vaak gedacht wordt. Het succes van ASML hangt sterk samen met de omgeving, het zogenaamde ecosysteem van bedrijven en kennisinstellingen in Brainport Eindhoven. We zijn hier in Eindhoven, ook aan deze universiteit, trots op het succes van ASML. Dat is geheel terecht, niet alleen vanwege het onderzoek dat we aan de TU/e met hen uitvoeren, maar

ook vanwege de vele mensen die wij hier kundig maken en die vervolgens bij ASML – of bij hun partners – aan de slag gaan.

Laten we nu de zaak breder bekijken. Ik beschreef reeds het toenemende belang van nanotechnologie in de halfgeleiderindustrie en in de energiesector, in het bijzonder de zonnecelindustrie. Binnen deze mondiale ontwikkeling liggen grote kansen voor de regio. Dit geldt voor Brainport Eindhoven, met haar vele bedrijven die apparatuur bouwen voor de zonnecelindustrie – mogelijk ASMLs in de dop – maar ook voor Nederland en de Euregio met haar maakindustrie van specialistische, innovatieve producten en haar succesvolle wisselwerking met vooraanstaande kennisinstellingen en instituten. We kunnen hier grenzen blijven verleggen op technologisch gebied. Met ons ecosysteem hebben we daarvoor een uitstekende uitgangspositie. Ook wetenschappelijk staan we sterk. Ons land is groot in de nanowetenschappen en er wordt veel onderzoek uitgevoerd in het kader van de nanotechnologie. Tegelijkertijd moeten we meer gaan investeren in de ‘kunde’ om daadwerkelijk iets te maken. Vooralsnog is de nanotechnologie, vooral binnen natuurkundig Nederland, veel ‘nano’ en weinig ‘technologie’. We moeten er daarom voor zorgen dat methoden en processen ontwikkeld worden die opschaalbaar en betrouwbaar zijn. We zullen de ontdekkingen in het lab moeten vertalen naar industriële processen. De nanotechnologie moet van lab naar de productievloer; van lab naar fab. Dit is een hele uitdaging, maar we zullen die gemakkelijker kunnen aangaan als we de kunst ervan inzien, de kunst van het maken.

Figuur 3 geeft een simpele maar krachtige weergave van het punt dat ik wil maken. In het lab worden fantastische resultaten geboekt en tonen de beste wetenschappers en de meest kundige technici de mooiste fysische fenomenen aan. Dat zijn bijvoorbeeld metingen aan nanostructuren of nanoschakelingen die misschien maar eenmalig gemaakt zijn. Op basis van puur geluk is dat ene koolstofnanobuisje mogelijk pas na 100 pogingen precies geplaatst over twee elektroden. Voor productie op industriële schaal moet het echter 99 van de 100 keer goed gaan, niet 1 op de 100. Daarnaast moet de productie natuurlijk kosten-effectief en voldoende concurrerend zijn. Mensen die, net als ik, ooit betrokken zijn geweest bij een industriële opschaling weten hoe uitdagend het is om zoiets voor elkaar te krijgen, zowel in technologisch als in economisch opzicht. Het vergt veel meer dan het alleen demonstreren van een bepaald fysisch fenomeen of concept. Het vereist extra kennis, onderzoek en ontwikkeling en ook vele innovaties in methoden en technieken om de resultaten uit de nanotechnologie om te zetten in technologie op de productievloer.



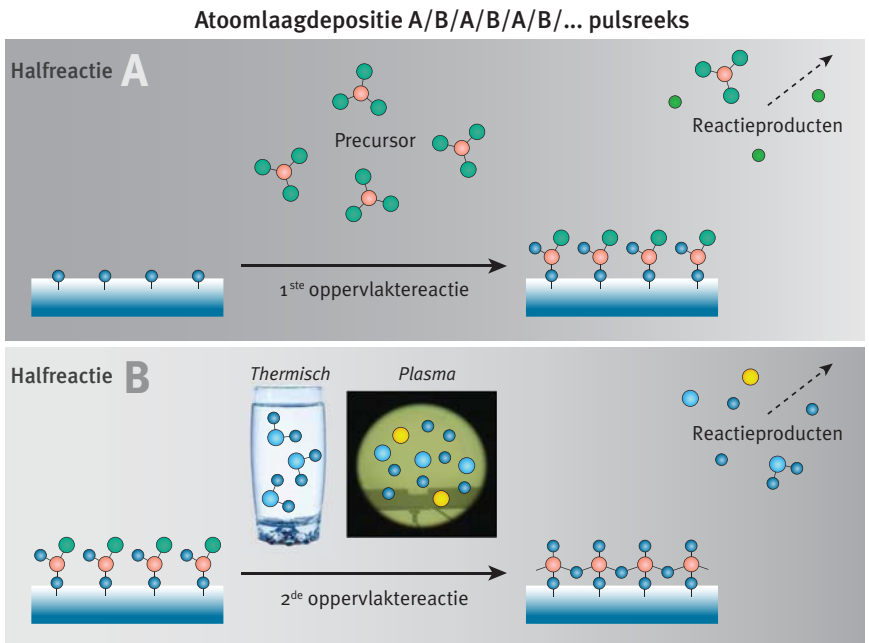
Figuur 3

Schematische weergave van de stap die nodig is om uitvindingen op het gebied van de nanotechnologie in onderzoekslaboratoria op te schalen naar industriële productieprocessen.

Het veld dat zich bezighoudt met het overbruggen van de kloof tussen nanotechnologie in het lab en industriële productie duiden we aan met de Engelse term *'nanomanufacturing'*. *Nanomanufacturing* behelst het ontwikkelen, beheersen, modificeren, manipuleren en assembleren van materialen met typische afmetingen of eigenschappen op de nanoschaal, met als doel het realiseren van een product dat de eigenschappen van de nanoschaal uitbuit of er zelfs zijn bestaansrecht aan ontleent [2]. *Nanomanufacturing* is veel meer dan een collectie van technieken en allerlei technologische handigheden. Het staat voor een interdisciplinair veld waar diepgaande kennis en baanbrekend onderzoek aan ten grondslag liggen.

Een voorbeeld van een methode die uitstekend past binnen *nanomanufacturing* is atoomlaagdepositie, in het Engels *atomic layer deposition*, afgekort als ALD. De methode maakt gebruik van gecontroleerde, zelflimiterende oppervlaktereacties voor het maken van dunne lagen. Zoals de naam al suggereert worden de dunne lagen atoomlaag voor atoomlaag opgebouwd zoals geïllustreerd in figuur 4. Deze methode stelt ons in staat om heel precies complexe structuren te maken op de nanoschaal. ALD biedt vele mogelijkheden en de methode is uniek in haar soort. Tevens is het proces opschaalbaar; ALD wordt sinds een paar jaar al toegepast in de halfgeleiderindustrie. Ongetwijfeld zullen nog vele toepassingen volgen en ALD zal een grote rol spelen binnen de nanotechnologie. ALD biedt een hoge mate van *materials control and dimensions control*.

De methode is nog niet uitontwikkeld en de mogelijkheden van ALD kunnen op allerlei manieren worden uitgebreid. Met mijn groep doe ik veel onderzoek op dit gebied. Vanuit ons onderzoek aan plasma's – een van de hoofdaandachtsgebieden binnen deze universiteit – werk ik al enkele jaren aan de uitbreiding van ALD met plasmastappen, zie figuur 4. Zo heb ik ervoor gezorgd dat we als Plasma & Materials Processing-groep een leidende positie op het gebied van plasma-ALD hebben opgebouwd. We hebben aangetoond dat plasma-ALD veel extra mogelijkheden biedt. Essentieel hierbij is dat het plasma processen mogelijk maakt onder condities ver van thermodynamisch evenwicht. Met plasma's kunnen resultaten behaald worden die niet bereikbaar zijn met louter chemische methoden. Zo kunnen ultradunne lagen bijvoorbeeld bij lagere temperaturen aangebracht worden met plasma-ALD zonder dat de lagen inboeten aan kwaliteit. Dit is van groot belang voor depositie op temperatuurgevoelige materialen. Ook bieden plasmastappen in het ALD-proces de mogelijkheid om meer en betere materialen te maken, geven ze meer keuzevrijheid in chemische processen en materiaaleigen-



Figuur 4

Atoomlaagdepositie (*atomic layer deposition*, ALD), hier uitgebeeld voor de depositie van een metaaloxide. Er wordt onderscheid gemaakt tussen thermische ALD, bijvoorbeeld met water, en plasma-geassisteerde ALD, bijvoorbeeld met een zuurstof plasma.

schappen en kunnen ze ook procestechnisch voordelen bieden. In ons onderzoek proberen we deze voordelen – net als eventuele nadelen – bloot te leggen. Ook bestuderen we de interactie tussen het plasma en het materiaal. Onze aandacht gaat daarbij speciaal uit naar synergetische effecten tussen de plasmadeeltjes en het oppervlak van de dunne lagen, denk bijvoorbeeld aan het stimuleren van oppervlaktediffusie van atomen door middel van ionen.

Atoomlaagdepositie is slechts één voorbeeld van een methode die kan worden aangewend voor *nanomanufacturing*. Ze sluit perfect aan bij de beroemde lezing ‘*There’s plenty room at the bottom*’ die Richard Feynman al in 1959 gaf [3]. ALD is daarom momenteel het startpunt voor veel van ons onderzoek. Naast plasma-geassisteerde processen kijken we ook naar andere, veelal fysische processen om de mogelijkheden van ALD uit te breiden. Denk hierbij aan het gebruik van ionen- en elektronenbundels en het gebruik van licht. Uiteindelijk gaat dit veel verder dan enkel ALD, dat is slechts een methode. Het doel is *materials control and dimensions control* om zo *nanomanufacturing* mogelijk te maken.

---

*What could we do with layered structures with just the right layers? What would the properties of materials be if we could really arrange the atoms the way we want them? They would be very interesting to investigate theoretically. I can't see exactly what would happen, but I can hardly doubt that when we have some control of the arrangement of things on a small scale we will get an enormously greater range of possible properties that substances can have, and of different things that we can do.*

*There’s plenty room at the bottom – Richard P. Feynman*

---

## Uit de kunst!

Masaccio wordt gezien als een van de eerste schilders die gebruikmaakte van lijnperspectief, een ontdekking uit de vijftiende eeuw, toen Florentijnse kunstenaars wiskundige theorieën formuleerden over dit onderwerp. Piero della Francesca deed later die eeuw een even belangrijke ontdekking: door het uitdrukkelijk weergeven van licht en schaduw maakte hij de dieptewerking die opgeroepen wordt door toepassing van het lijnperspectief nog overtuigender (zie figuur 5a) [4]. Della Francesca deed deze ontdekking nadat hij zich had bekwaamd in de euclidische meetkunde. Met zijn experimenten was hij de voorganger van natuurkundigen zoals Newton en Leibniz, die 200 jaar later hun studies deden naar de aard van het licht [5]. Het gebruik van schaduw werd in de renaissancekunst een van de belangrijkste ontwikkelingen op het gebied van licht. In de negentiende eeuw legde de Franse postimpressionist Seurat zich toe op de theoretische grondslagen van de kleurverwerking, met name aan de hand van het recente werk van de chemicus Chevreul. Chevreul deed onderzoek naar het verven van tapijten en hij ontdekte dat naast elkaar aangebrachte kleuren elkaar voor het oog beïnvloeden [6]. In de schilderkunst leidde dit tot de techniek die bekend staat als pointillisme of divisionisme. Seurat bouwde zijn schilderijen op uit kleine penseelstreken van

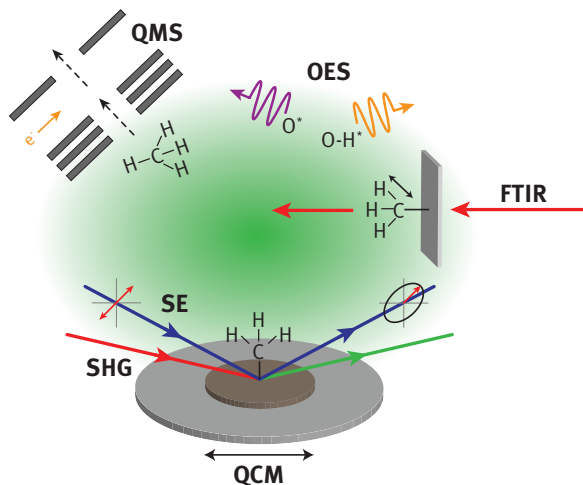


Figuur 5

Piero della Francesca, *De droom van Constantijn*, ca. 1460 (figuur a); Seurat, *Dimanche d'été à la Grande*, 1886 (figuur b)

contrasterende, pure kleuren; kleine stippen die van enige afstand bezien zich vermengen in het oog van de toeschouwer, wat tot een helderheid leidt die niet bereikt kan worden met gemengde kleuren (zie figuur 5b). Deze twee voorbeelden, gekozen uit vele, illustreren dat bepaalde effecten pas volledig aangewend kunnen worden nadat er inzicht is verkregen in de onderliggende principes. Alleen dan kunnen de mogelijkheden ten volste worden uitgebuit.

De parallel met de ontwikkeling van kunde – en technologie – mag duidelijk zijn. Voor *nanomanufacturing* en – specifiek – voor het bereiken van *materials control and dimensions control* is diepgaand inzicht in de onderliggende processen vereist, kennis tot op het atomaire en moleculaire niveau. Voor het aanbrengen van ultradunne films of voor het maken van nanostructuren betekent dit dat er inzicht nodig is in de onderliggende oppervlaktereacties. Dit inzicht kan verkregen worden door de processen te bestuderen met meetapparatuur die we diagnostieken noemen. Het liefst wenden we een scala van diagnostieken aan, diagnostieken die complementaire informatie geven waardoor we een totaalplaatje kunnen krijgen. In figuur 6 ziet u een aantal diagnostieken schematisch weergegeven. Onze voorkeur gaat uit naar *in situ* diagnostieken, technieken die – bij vacuümprocessen – onder vacuüm gebruikt kunnen worden, het liefst zelfs realtime, dus bijvoorbeeld tijdens het aangroeiproces van dunne films. Daarnaast zijn voldoende gevoelig-



Figuur 6

Illustratie van enkele diagnostieken waarmee oppervlaktereacties tijdens het aanbrengen van dunne lagen en nanostructuren bestudeerd kunnen worden. Idealiter worden de complementaire diagnostieken tegelijkertijd aangewend.

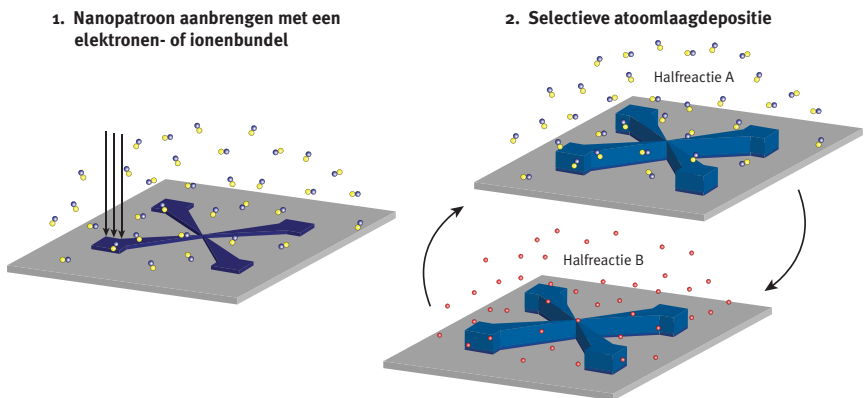
heid en voldoende tijdsresolutie belangrijke voorwaarden om daadwerkelijk inzicht te krijgen in de processen op atomair en moleculair niveau.

De aanpak die ik voorsta, is een aanpak waarbij diagnostieken uit de oppervlaktefysica en -chemie worden aangewend. Denk hierbij aan infraroodspectroscopie, thermische desorptiespectroscopie en allerlei technieken gebaseerd op elektronenspectroscopie. Ook werk ik al jaren aan het ontwikkelen van niet-lineaire optische methoden om oppervlakken van dunne lagen en grensvlakken tussen lagen te bestuderen. De kracht van deze technieken, ook afkomstig uit de oppervlaktefysica, ligt voornamelijk in het feit dat ze speciaal gevoelig zijn voor oppervlakken of grensvlakken. Ik ben destijds begonnen met de techniek van optische tweede-harmonische generatie en in de loop der jaren hebben we de meetmogelijkheden in ons lab stap voor stap uitgebreid. We kunnen nu spectroscopische metingen uitvoeren over een groot golflengtebereik en naast de intensiteit kunnen we ook de fase van het tweede-harmonische signaal meten, zelfs realtime tijdens vacuümprocessen. Daarnaast werken we binnen het Vici-programma aan een techniek die nog geavanceerder is: somfrequentie-generatie. Deze methode zou ons in staat moeten stellen om selectief oppervlaktegroepen te meten met een hoge tijdsresolutie. Dit zal unieke mogelijkheden bieden om het aangroeiproces tijdens atoomlaagdepositie of plasmadepositie in ongekend groot detail te bestuderen. Het vernieuwende element van het onderzoek is dat deze en andere diagnostieken uit de oppervlaktefysica worden toegepast onder daadwerkelijke procescondities en dus niet alleen onder extreem geïdealiseerde omstandigheden. Het vergt dus ook de verdere ontwikkeling van diagnostieken. Op dit gebied lopen we voorop in ons onderzoek. De complexiteit van de processen die geanalyseerd worden, vereist bovendien dat de voorgenoemde experimentele studies gecombineerd moeten worden met theoretische studies, in het bijzonder met simulaties op atomair niveau. Dit theoretische werk is redelijk nieuw voor ons maar via een samenwerking met het Tyndall National Institute in Ierland in het kader van mijn Vici-programma zetten we er flink op in.

Ter illustratie van hoe de oppervlaktefysica en de bijbehorende experimentele studies kunnen bijdragen aan nieuwe *nanomanufacturing* technieken wil ik nu een voorbeeld aanhalen van een onderzoek dat we momenteel uitvoeren met het bedrijf FEI Electron Optics hier in Eindhoven. Ik zal beginnen bij het doel en bij de methode die we uiteindelijk ontwikkeld hebben. Daarna zal ik uitweiden over de kennis en studies die aan het idee ten grondslag lagen.



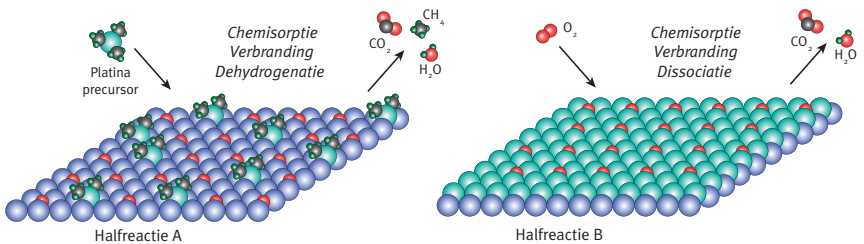
Het doel van het onderzoek is om een techniek te ontwikkelen waarmee nanocontacten voor toekomstige nano-elektronica, bijvoorbeeld transistoren of sensoren, gemaakt kunnen worden in een zogenaamde bottom-up aanpak; het van onderaf stapelen van de verschillende onderdelen. Neem bijvoorbeeld koolstofnanobuisjes waarmee transistoren gemaakt kunnen worden. Met ALD zouden we metaallaagjes kunnen aanbrengen, maar daarmee hebben we nog geen nanocontacten. We kunnen immers niet voorkomen dat de dunne laag zich uitstrekt over het hele oppervlak. Om lokaal nanocontacten te maken zouden we lithografiestappen moeten toepassen, maar dat willen we niet. We willen de nanocontacten achteraf aanbrengen, enkel en precies op de plaats waar ze nodig zijn, bottom-up dus. We hebben daarom een selectief ALD-proces ontwikkeld dat ook opschaalbaar is. Het proces is afgebeeld in figuur 7. We brengen eerst snel een patroon aan van het nanocontact met een techniek die gebruikmaakt van een gefocusseerde elektronen- of ionenbundel. Met deze bundel kan bijvoorbeeld lokaal platina aangebracht worden op het oppervlak. Echter voor het maken van volledige nanocontacten is deze methode niet geschikt, simpelweg omdat het aangebrachte metaallaagje te veel verontreinigingen bevat, zodat het niet goed stroom geleidt. Er is wel *dimensions control* maar geen *materials control*. Tevens is de methode heel erg traag. Daarom volgt er een tweede stap. In deze stap brengen we met ALD selectief materiaal aan op het gedefinieerde nanopatroon van platina. Dit proces vindt plaats over het hele substraatoppervlak, maar werkt natuurlijk alleen daar waar we nanopatronen gedefinieerd hebben.



Figuur 7

Een nieuwe techniek om bottom-up goed geleidende nanocontacten te maken. Eerst wordt het patroon van de nanocontacten aangebracht met een elektronen- of ionenbundel en daarna wordt het patroon met een selectief ALD proces aangedikt.

Aan het idee voor deze methode lag inzicht in het ALD-proces van edelmetalen ten grondslag. Ik zal daar kort over uitweiden maar ik realiseer me dat het nogal specialistisch is. Het volgende is dus voor de kenners in het publiek. Het is gebleken dat een metaal zoals platina met atoomlaagdepositie aangebracht kan worden door pulsen van een gasvormige platina-koolstofverbinding als precursor af te wisselen met pulsen van zuurstof, zie figuur 8. Door het meten van de reactieproducten werd duidelijk dat de katalytische activiteit van platina – platina zit ook in de katalysator van uw auto – een grote rol speelt in de oppervlaktereacties. Platina is in staat om zuurstofmoleculen op te breken in atomair zuurstof dat vervolgens aan het oppervlak gebonden blijft. Deze zuurstofatomen kunnen reageren met de inkomende platinaprecursor zodat deze moleculen gekraakt, dus na afstoting van koolstofgroepen, op het oppervlak blijven zitten. In de daaropvolgende zuurstofpuls reageert het moleculaire zuurstof weer met het platina. De zuurstofatomen die daarbij ontstaan, reageren met de restanten van de koolstofverbindingen en deze worden daarmee van het oppervlak verwijderd. Uiteindelijk blijft er dan weer een platina-oppervlak over dat bedekt is met atomair zuurstof. Dit proces herhaalt zich elke ALD-cyclus en zo wordt het platina laagje voor laagje opgebouwd. De katalytische activiteit van het platina is dus van wezenlijk belang om het ALD-proces op gang te brengen en te houden. Op een oxide-oppervlak, en ook op het oppervlak van koolstofnanobuisjes, kan de platinaprecursor wel adsorberen maar er zijn geen zuurstofatomen beschikbaar om met de koolstofverbindingen te reageren. Dit maakt het depositieproces dus selectief, ALD vindt alleen plaats op het oppervlak waar reeds platina zit. Dit laatste geldt overigens alleen als de gasdruk van de zuurstof tijdens de zuurstofpuls laag genoeg is. Kennis van de invloed van de zuurstofdruk, alsmede van het onderliggende mechanisme van Ostwald-rijping en andere inzichten in de katalytische reacties,



Figuur 8

Oppervlaktereacties tijdens het ALD proces van platina. Tijdens halfreactie A is het oppervlak bedekt met zuurstofatomen. De platinaprecursor adsorbeert aan het oppervlak en reageert met de zuurstofatomen onder de vorming van verschillende reactieproducten. Tijdens halfreactie B dissociëren zuurstofmoleculen op het oppervlak en verbranden de organische restanten van de geadsorbeerde platinaprecursor. Een extra laag platina-atomen bedekt met zuurstof resteert na een volledige ALD cyclus.

zijn de sleutel geweest tot de ontwikkeling van de zojuist beschreven selectieve ALD-methode. Het zou te ver voeren om daar nu op in te gaan. Belangrijk is, en hier kan iedereen weer aanhaken, dat de methode werkt. We hebben inmiddels bottom-up contacten aangebracht op koolstofnanobuisjes en grafeen. Het is dus een mooi voorbeeld van hoe inzicht in de oppervlaktereacties kan leiden tot een nieuwe methode. Het laat duidelijk zien dat fysische en chemische effecten uitgebuit kunnen worden als we inzicht hebben in de onderliggende principes. Het is precies zoals in de kunst.

Het voorbeeld dat ik daarnet gaf staat model voor ons huidige en toekomstige onderzoek. Door het vergaren van kennis tot op het atomaire en moleculaire niveau proberen we nieuwe technieken en methoden te ontwikkelen die ons in staat stellen tot *materials control and dimensions control*. Het illustreert ook dat ALD, of ALD-achtige methoden, veel mogelijkheden bieden, bijvoorbeeld wanneer gecombineerd met fysische of alleszins andere processen. Het voorbeeld leert ook dat we voor het begrijpen van ALD-processen veel kunnen leren van inzichten in de oppervlaktefysica en katalyse. Het frappante daarbij is dat de experimentele omstandigheden waaronder vele studies in de oppervlaktefysica worden uitgevoerd, lijken op de condities tijdens het ALD-proces, veel meer dan bij katalytische reacties. We kunnen daarmee putten uit een enorme kennisbron.

## Kunst-zinnig

In het voorbeeld dat ik zojuist beschreef – de methode om nanocontacten aan te brengen – streven we ernaar om de grenzen van het technisch mogelijke te verleggen. En ook al gaat het om methoden waarvan we verwachten dat ze opschaalbaar zijn, in veel gevallen zijn daadwerkelijk commerciële toepassingen nog ver weg. Maar *nanomanufacturing* draait niet alleen om het technisch mogelijke, dat is slechts een facet van de vraag of iets wel of niet zinnig en bruikbaar is voor toepassingen. Uiteindelijk zijn het de kosten die de doorslag geven. Het is evident dat we daar al rekening mee moeten houden bij het onderzoek, zeker als gaat om innovaties die op korte termijn actueel worden.

Vooraf bij toepassingen voor de opwekking van duurzame energie draait het allemaal om de kosten, veel meer dan in de nano-elektronica. U bent best bereid om honderden euro's neer te tellen voor een groot tv-scherm. Maar zo'n prijs betaalt u liever niet voor een zonnepaneel dat slechts een zeer klein gedeelte van de elektriciteit levert die nodig is voor uw huishouden. Technologisch gezien zijn tv-schermen en zonnepanelen echter redelijk vergelijkbaar. Het punt is dat duurzame energie de concurrentie moet aankunnen met energie opgewekt uit fossiele brandstoffen. Een oneerlijke concurrentie als u het mij vraagt, omdat de schadelijke neveneffecten van fossiele brandstoffen niet in de prijs meegenomen worden. Dat de invloed van de kostprijs verstrekende gevolgen heeft, zal ik demonstreren.

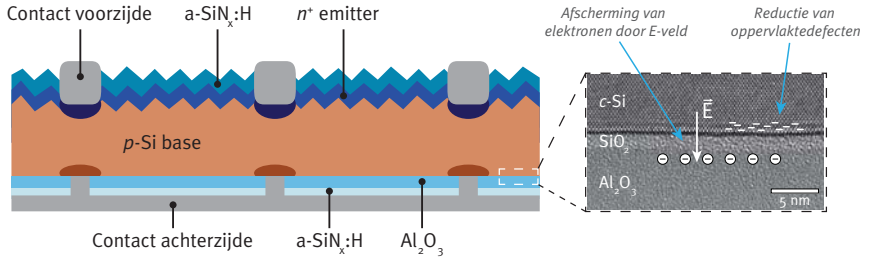
Momenteel wordt tussen de 80 en 90 % van de zonnecelmarkt ingenomen door zonnecellen die opgebouwd zijn uit kristallijn silicium. Het recordrendement voor dit type zonnecellen is 25 %. Van het door de zon ingestraalde vermogen wordt dus 25 % omgezet in elektriciteit. Dit recordrendement is al in 1999 behaald. Opmerkelijk is nu dat de rendementen van zonnecellen die commercieel geproduceerd worden aanzienlijk lager liggen, momenteel gemiddeld tussen de 16 en 19 %, afhankelijk van het type silicium dat in de zonnecel gebruikt wordt. Sterker nog, tot voor kort werd het grootste deel van de zonnecellen geproduceerd op basis van een ontwerp en met een technologie die feitelijk nog uit de jaren zeventig stamt. Hier geldt dus dat we wel weten hoe we zonnecellen met hoge rendementen moeten maken, maar toch passen we deze kennis niet in de volle breedte toe. De reden is dat de innovaties en technieken niet voldoende technisch en

economisch opschaalbaar zijn. Blijkbaar verstaan we de kunst van het maken nog niet goed genoeg om de innovaties kosteneffectief te implementeren. Hier ligt dus een uitdaging.

Met mijn onderzoek ga ik deze uitdaging aan vanuit het perspectief van *nano-manufacturing*. In mijn groep zijn we daar feitelijk al een aantal jaren mee bezig en ik wil hier weer een recent voorbeeld aanhalen om te illustreren welke kant ons onderzoek op gaat. Resultaten uit het verleden mogen dan geen garanties voor de toekomst bieden, ze maken mijn plannen wel inzichtelijker.

Het rendement van zonnecellen van kristallijn silicium kan toenemen door het aanbrengen van dunne laagjes, niet alleen voor het verbeteren van de optische eigenschappen, maar ook voor het zogenoemde passiveren van het oppervlak. Het doel daarvan is het tegengaan van elektronische recombinatie van elektronen en gaten. Een dun laagje siliciumoxide is daartoe perfect in staat. Het siliciumoxide zorgt ervoor dat losse chemische bindingen aan het oppervlak van kristallijn silicium uitgeschakeld worden, onder andere door ze te passiveren met waterstofatomen. Dit proces heet chemische passivatie. Het laagje siliciumoxide moet echter bij zeer hoge temperaturen gemaakt worden en het vraagt ook nog een uitgebreide nabehandeling om waterstofatomen aan het silicium grensvlak te krijgen. Voor commerciële productie zijn deze stappen niet haalbaar. Ze zijn te langzaam en ook niet verenigbaar met andere processen en materialen die gebruikt worden.

Alhoewel naarstig gezocht is naar alternatieve dunne-filmtechnologieën, die in enkele gevallen ook een gedeeltelijke oplossing boden, zorgde ons werk op het gebied van aluminiumoxide, gedeponeerd met ALD, voor een doorbraak. Deze doorbraak zat er niet zo zeer in dat aluminiumoxide excellente passivatie-eigenschappen bleek te hebben. De wetenschappelijke doorbraak zat vooral in het feit dat we ontdekten dat het aluminiumoxide een zeer hoge dichtheid van negatieve lading kan bevatten, dat deze lading zich dicht bij het grensvlak van het silicium bevindt en dat de ladingsdichtheid te manipuleren is door het afstemmen van de condities waaronder de depositie plaatsvindt. Diepgaand inzicht in het passivatieproces, in dit geval veldeffectpassivatie in combinatie met chemische passivatie, schematisch weergegeven in figuur 9, lag aan de oorsprong van de doorbraak. Metingen met de niet-lineaire optische techniek van tweede-harmonische generatie speelden daarbij een belangrijke rol. Met de opgedane kennis wisten we de unieke eigenschappen van aluminiumoxide te demonstreren door hooggedoteerde *p*-type siliciumoppervlakken voor het eerst effectief te passiveren.



Figuur 9

Recombinatie van ladingdragers aan het oppervlak van een silicium zonnecel kan tegengegaan worden door het oppervlak te passiveren. Ultradunne laagjes van aluminiumoxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) leiden tot een combinatie van chemische passivatie van defecten door waterstofatomen en veldeffectpassivatie door ingebouwde negatieve lading.

De klapper kwam toen we *n*-type zonnecellen met *p*-type emitters presenteerden met een rendement van meer dan 23 %.

Belangrijk is nu het feit dat aluminiumoxide wel veel kansen biedt voor opschaling, ook in economisch opzicht. Het materiaal ondervangt daarmee de nadelen van siliciumoxide. Deze conclusies zijn natuurlijk niet zomaar te trekken. In samenwerking met industriële partners hebben we hier in de afgelopen jaren veel bewijs verzameld. Wij stonden daarin niet alleen, want er is een brede belangstelling ontstaan voor aluminiumoxide bij bedrijven die zonnecellen produceren, maar ook bij bedrijven die productieapparatuur bouwen. Inmiddels zijn er met aluminiumoxide ook recordrendementen behaald voor commerciële zonnecellen en de technologie staat op het punt om toegepast te worden in productie. Maar aluminiumoxide en ALD bieden nog veel meer kansen. Dit is ons duidelijk geworden door talloze studies waarbij ook weer fundamenteel begrip hand in hand bleek te gaan met interessante toepassingsmogelijkheden. Wederom voor de kenners in het publiek: we hebben bijvoorbeeld aangetoond dat aluminiumoxide op een siliciumoxide laagje de passivatie-eigenschappen en de thermische stabiliteit van het siliciumoxide sterk verbetert. Tevens biedt zo'n siliciumoxide tussenlaagje de mogelijkheid om de dichtheid en polariteit van de lading in te stellen. Een tussenlaagje van 1 nm dik leidt tot een hoge dichtheid van negatieve lading, bij een dikte van 4 nm is er nagenoeg geen lading aanwezig, en bij een laag van meer dan 5 nm is de lading positief van polariteit. Dit is *materials control and dimensions control* ten voeten uit. Het is een van de vele innovaties die mogelijk zijn voor zonnecellen. In de komende jaren zullen we nog intensiever onderzoek gaan uitvoeren om zulke innovaties technisch en economisch mogelijk te maken.

## Koud kunstje?

Innoveren doe je niet zomaar. Voor innovatie moet je goede omstandigheden creëren. Met innovatiecontracten en projecten waarbij *milestones* en *deliverables* centraal staan kom je er niet, overigens ook niet met enkel de slogan ‘*Where innovation starts*’. Aan universiteiten moet veel ruimte zijn voor onderzoek waarbij de te bewandelen paden en de uitkomsten nog niet vastliggen, waarbij het niet meteen duidelijk is welke bedrijven of bedrijfstakken van het onderzoek kunnen profiteren. Wat Picasso zei over kunst, geldt evenzeer voor technisch-wetenschappelijk onderzoek [7]: “Het geheim van de kunst is daarin gelegen dat men niet zoekt, maar vindt.”

Ik ben dan ook sceptisch over de huidige ontwikkeling met de topsectoren, zoals opgelegd door het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. De plannen zijn niet doordacht en ik ben bang dat deze en andere radicale wijzigingen die het kabinet wil doorvoeren op het gebied van innovatie en onderwijs, veel schade zullen opleveren. Ik vrees dat we aan innovatiekracht zullen inboeten. Ik ben overigens niet tegen het benoemen van topsectoren en sturing vanuit de industrie. Dergelijke sturing is raadzaam in een sector zoals High-Tech Systems and Materials, een topsector waarbij innovatiecontracten waarschijnlijk nog redelijk goed in te passen zijn in vergelijking met andere topsectoren. In mijn onderzoek laat ik me al jaren sturen bij de keuze van de onderzoeksonderwerpen, ik probeer de ontwikkelingen binnen de halfgeleider- en de zonnecelindustrie nauwlettend te volgen. Ik destilleer er onderzoeksvragen uit om zo in te kunnen spelen op ontwikkelingen die over vijf tot tien jaar in de industrie echt actueel worden. Maar ik heb ook gemerkt dat de industrie vaak helemaal niet met nieuwe initiatieven komt. Bij veel bedrijven domineert het kortetermijndenken. Het gaat vaak om nú geld verdienen en nú het hoofd boven water houden. Als bedrijven al over innovatie nadenken dan laten ze zich daarbij vaak inspireren door onderzoekers aan universiteiten. Mij is al een aantal malen gevraagd of ik nog interessante mogelijkheden zag voor innovaties. Ook heb ik meerdere malen ervaren dat bedrijven in eerste instantie heel terughoudend waren over nieuwe ideeën voor innovaties. Maar dat men daarna toch omsloeg als een blad aan de boom, vooral als er extra resultaten vrijkwamen, of als men inzag dat de concurrentie wellicht aan iets soortgelijks werkte. Wat publiek-privaat onderzoek betreft geloof ik daarom niet in

de top-downbenadering van de topsectoren. Ik ben voor het model dat de Technologiestichting STW hanteert. In dat model is meer ruimte voor innovatie van onderaf zonder dat projecten van het begin af aan helemaal dichtgetimmerd zijn met *milestones* en *deliverables*. Daarnaast zijn de procedures van STW heel transparant en sluit het onderzoek van de technische universiteiten – zeker dat van mijn onderzoeksgroep – erg goed aan bij de werkwijze van STW. Ik vind dat er meer onderzoeksgeld via STW verdeeld zou moeten worden.

Om mijn betoog kracht bij te zetten, wil ik erop wijzen dat mijn grootste successen in termen van valorisatie van onderzoek zijn voortgekomen uit onderzoek waarin we veel vrijheid hadden. Deze successen kwamen voort uit projecten waarbij we eigenlijk iets heel anders aan het onderzoeken waren en waarbij we kennis en onderzoek uit verschillende projecten konden combineren. Was er nu sprake van puur toeval en geluk? Nee, dat denk ik niet. Ik ben van mening dat je zulke zaken kunt afdwingen door een samenspel van focus en een brede blik, met het combineren van mensen uit verschillende disciplines en toepassingsgebieden, en met *outside the box*-denken. Op deze manier zijn we bijvoorbeeld tot een nieuwe, snelle methode gekomen om antireflectie- en passivatielagen van siliciumnitride op zonnecellen te deponeren. Dit heeft geleid tot depositiemachines, opgesteld in vele zonnecelfabrieken. Een ander voorbeeld is ons werk op het gebied van aluminiumoxide voor zonnecellen waar ik eerder over sprak. Aan dit onderzoek lag geen project ten grondslag. Het was feitelijk een samenloop van omstandigheden: onderzoek aan ALD voor halfgeleidertoepassingen, onderzoek aan passivatielagen voor zonnecellen en spectroscopische studies om oppervlaktereacties bloot te leggen. Er waren dan ook drie promovendi bij betrokken, gefinancierd uit verschillende projecten. Stel dat ik eerst een projectvoorstel had ingediend voor dit onderzoek. Ik ben er vrij zeker van dat het projectvoorstel het dan niet zou hebben gehaald. De gemeenschap was namelijk van mening dat ALD veel te traag zou zijn voor de zonnecelindustrie. Een ALD-machine met een doorvoer van meer dan 3000 zonnecellen per uur zou niet mogelijk zijn. Gelukkig weten we inmiddels beter. De realiteit is dat er nu een aantal bedrijven zijn die ALD-machines bouwen voor de zonnecelindustrie. Hieronder zijn maar liefst twee Nederlandse start-ups en een Nederlandse multinational. Ook is het niet tot ALD beperkt gebleven. ALD biedt ideale omstandigheden om de mogelijkheden van materialen zoals aluminiumoxide aan te tonen, maar daarna is het mogelijk om de grenzen op te zoeken en andere methoden toe te passen. Voor oppervlaktepassivatie bleek plasma-gedeponerd aluminiumoxide ook goed genoeg te werken. Daar is ook een aantal bedrijven op ingehaakt.



Wat ik zojuist geschetst heb, is dus een mooi voorbeeld van hoe onderzoek ‘spontaan’ tot een groot succes kan leiden en door middel van ‘*market pull*’ industriële activiteiten opwekt. In de toekomst hoop ik deze lijn met mijn onderzoek te kunnen voorzetten. Dat betekent toepassingsgeoriënteerd onderzoek waarbij we intensieve contacten onderhouden met de industrie, maar waarbij we ook voldoende vrijheid hebben om binnen projecten nieuwe paden te bewandelen. Door de bedrijven laten we ons voeden met onderzoeksvragen. Daarnaast zijn we bereid om in beperkte gevallen haalbaarheidsstudies uit te voeren en om te faciliteren in een ontwikkelingsproces. Wij proberen daarom zo veel mogelijk te investeren in onze unieke expertises om daarmee complementair te zijn aan onze partners. Het is belangrijk dat de overheden deze aanpak faciliteren. Tevens hoop ik dat de overheid het fundamentele onderzoek aan de universiteiten op peil houdt. Het fundamentele onderzoek van vandaag is immers belangrijk voor de groei van de topsectoren van overmorgen.

# Oefening baart kunst

Tot dusver heb ik het over onderzoek gehad, maar de tweede kerntaak van een universiteit is wetenschappelijk onderwijs. Het feit dat goed opgeleide mensen ons belangrijkste ‘product’ zijn wordt nog wel eens over het hoofd gezien. Voor een onderzoeksfaculteit als Technische Natuurkunde gaat dat verder dan bachelor- en masterstudenten ofwel de ingenieurs. Ik vind de opleiding en vorming van promovendi zeker zo belangrijk. Daar mag meer aandacht aan besteed worden. We moeten dat ook meer uitdragen. We moeten promovendi niet bij de wetenschappelijke staf tellen als deze cijfers vergeleken worden met het aantal studenten. In dat geval krijgt men het idee dat we per student ongeveer een wetenschappelijk medewerker hebben. Zo’n vertekend beeld maak je niet snel ongedaan. Bij het beoordelen van projectaanvragen moeten subsidiegevers en mensen uit het bedrijfsleven zich realiseren dat een projectaanvraag niet alleen om het onderzoek draait. Het gaat ook om de opleiding van mensen in een bepaald vakgebied, een vakgebied dat mogelijk erg relevant is of wordt voor een bepaalde bedrijfstak en de bv Nederland. Het onderzoek kan daarom zeer in het belang zijn van de bedrijven, ook al worden hun ‘problemen’ niet meteen met het onderzoek opgelost. Het is investeren in mensen. Ik ben dan ook erg te spreken over het werkprogramma ‘people’ binnen de kaderprogramma’s van de Europese Unie. Daarbij draait het om de opleiding van mensen en zijn alleen de hoofdlijnen en de kwaliteit van het onderzoek van belang. Ook op nationaal niveau zouden zulke initiatieven niet misstaan. Het zou goed aansluiten bij de ontwikkeling van zogenaamde *graduate schools* waar ik groot voorstander van ben. Ook acht ik meer samenwerking op het gebied van onderwijs tussen de onderzoeksfaculteiten hier aan de TU/e noodzakelijk. Zo pleit ik voor een nieuwe masteropleiding *nano-engineering* die verzorgd wordt door de faculteiten Technische Natuurkunde, Scheikundige Technologie, Electrical Engineering en Werktuigbouwkunde. We zijn immers een *engineeringschool*. Ik denk dat het goed past in het ecosysteem hier in Brainport Eindhoven. Ik heb me er bijvoorbeeld vaak over verbaasd dat ons onderwijs op het gebied van moderne halfgeleidertechnologie – met name de siliciumtechnologie – erg beperkt is, terwijl een bedrijf als ASML een van de grootste afnemers is van onze natuurkundestudenten. Wellicht dat zo’n samenwerking tussen de faculteiten vanzelf opbloeit nu we op het punt staan om over te gaan

op bredere bacheloropleidingen binnen het Bachelor College. Deze grootste onderwijshervorming uit de geschiedenis van de TU/e is een stap in de goede richting.

Groeien betekent investeren. Op dit punt maak ik me zorgen over wat er allemaal van de wetenschappelijke staf aan universiteiten gevraagd wordt. We moeten top-onderzoek combineren met het beste onderwijs en ook moeten we voortdurend in contact staan met het bedrijfsleven dat haar R&D voor een groot gedeelte heeft afgestoten. Internationale samenwerking is belangrijker dan ooit en dan heb ik het nog niet eens gehad over de *outreach*-activiteiten die we moeten ontplooiën. De studenteninstroom moet namelijk flink omhoog, terwijl de overheidsuitgaven aan onderwijs niet groeien. Dat een wetenschappelijk staflid meer dan acht promovendi begeleidt, is ook absoluut geen uitzondering. De rek is eruit en ik vind dat het aantal wetenschappelijke stafleden moet groeien, zodat we volop kunnen investeren in de opleiding van studenten en promovendi. Ik zou dat het liefst doen in een moderne meester-gezel variant – kleinschalig met veel tijd voor interactie – net zoals in de kunst en wetenschap van weleer. Dat betaalt zich uiteindelijk dubbel en dwars terug, we moeten het immers hebben van onze kenniseconomie.

# Kunst-stukjes

Nu het einde van deze rede nadert wil ik nog een aantal opmerkingen maken over belangrijke zaken waar ik het niet over gehad heb, maar waar mijn hart wel naar uitgaat.

Allereerst wil ik stilstaan bij NanoLabNL, het subsidieprogramma en de daarbij behorende *clean rooms* binnen Nederland die voor de onderzoeksgemeenschap opengesteld zijn. Hier aan de TU/e betreft het de NanoLab@TU/e-faciliteit, zie figuur 10. Naar mijn mening zijn zulke *clean room*-faciliteiten van essentieel belang voor een technische topuniversiteit als de onze. Dit geldt voor het onderzoek, maar ook voor de opleiding van onze studenten en promovendi. Sinds enkele jaren draag ik zorg voor deze *clean room* en via het NanoLabNL-initiatief wil ik de faciliteiten verder professionaliseren en het externe gebruik laten toenemen.



Figuur 10

De NanoLab@TU/e *clean room* voor onderzoek en onderwijs aan de TU/e en opengesteld voor gebruik door derden.

Ons eigen toponderzoek en toponderwijs moet daarbij wel de eerste prioriteit blijven.

Solliance, een samenwerkingsverband tussen ECN, TNO, Holst Centre, IMEC en de TU/e op het gebied van zonnecellen, is een ander initiatief waarvoor ik me inzet. Zoals eerder geschetst voorzie ik veel mogelijkheden op dit gebied voor Brainport Eindhoven en omgeving, vooral wat de ontwikkeling van productieapparatuur voor de zonnecelindustrie betreft. Het is essentieel dat we de krachten bundelen om als regio een rol van betekenis te blijven spelen. Duurzaam opgewekte energie is te belangrijk om er geen verantwoordelijkheid voor te nemen.

Plasmafysica is het laatste onderwerp waar ik iets over wil zeggen. U vraagt zich misschien af waarom ik dit niet uitgebreider aan bod heb laten komen gezien de historie van de onderzoeksgroep. Laat ik u zeggen dat de plasmafysica in goede handen is aan deze universiteit, met maar liefst vier voltijdeleerstoelen binnen deze discipline. Ik acht het echter noodzakelijk dat we vanuit deze discipline bruggen slaan naar andere vakgebieden. Zoals u hebt kunnen constateren, sla ik een brug tussen de plasmafysica en de toepassingen ervan op het gebied van materialen en nanotechnologie. Hier ligt de sterkte van onze groep en op dit unieke grensvlak kunnen we een rol van betekenis spelen. Plasma's blijven daarbij centraal staan.

## Uit de liefde voor de kunst

Tot slot wil ik mijn dank uitspreken aan een aantal mensen. Allereerst wil ik het College van Bestuur van de TU/e bedanken voor mijn benoeming als hoogleraar, alsmede de bestuursleden van de faculteit Technische Natuurkunde die mijn benoeming initieerden.

Ik ben ook veel dank verschuldigd aan mijn collega's – op de faculteit maar ook daarbuiten, tot aan de TU/e-brandweer toe – aan collega-onderzoekers in het binnen- en buitenland en aan mensen uit het bedrijfsleven. Steun van enkele instellingen en bedrijven kwam precies op het juiste moment om mijn plannen en dromen te verwezenlijken. Ik denk daarbij aan de bedrijven OTB Solar, ASM, Oxford Instruments, Q-Cells en FEI. Tevens ben ik STW en NWO dankbaar voor het honoreren van enkele, voor mij zeer belangrijke onderzoeksprojecten.

Zeer grote dank gaat uit naar iedereen die heeft bijgedragen aan dat wat we als groep Plasma & Materials Processing bereikt hebben. Dit betreft dus oud-groepsleden, in het bijzonder mijn oud-studenten en oud-promovendi – en ook het huidige team dat als PMP 2.0 hard aan de weg timmert. Als ik vandaag 'ik' zei bedoelde ik meestal 'wij'. Jullie bijdrage was en is essentieel voor de groep en zonder jullie had ik hier niet gestaan. Ik weet dat ik ronduit veeleisend ben, maar we kunnen nu samen trots zijn op wat we bereikt hebben. Deze dag straalt ook op jullie af. In het bijzonder wil ik de huidige stafleden bedanken voor het vertrouwen dat ze in me geschonken hebben. Richard Engeln, Adriana Creatore, Ageeth Bol en de parttime PMP'ers Fred Roozeboom en Marcel Verheijen. Ook de technische en ondersteunende staf ben ik veel dank verschuldigd. Het liefst zou ik ook al jullie namen noemen, maar dan zitten we hier nog even. Ik wil nog wel twee personen noemen die uiterst nauw betrokken waren bij PMP en dat nog steeds zijn. Dat zijn Daan Schram en Richard van de Sanden. Door jullie enthousiasme is het allemaal begonnen en ik zie jullie als mijn grote leermeesters. Richard, ik ben je ook erg dankbaar voor de vriendschap die we hebben opgebouwd. Ik denk dat we elkaar perfect aanvoelen en aanvullen, iets wat de band tussen DIFFER en de TU/e alleen maar ten goede kan komen.

Ik ben iedereen die ik zojuist genoemd heb erg dankbaar, want ook mijn carrière en persoonlijke ontwikkeling heb ik aan hen te danken. Ik heb het doel dat ik gesteld heb waargemaakt, stap voor stap. Telkens legde ik de lat weer hoger en ik ben blij dat de mensen uit mijn directe omgeving, kennissen, vrienden en familie me de ruimte gaven om telkens weer een horde te nemen. Inmiddels ligt de lat weer hoger en loop ik me warm voor de volgende horde. Zo zal dat wel door blijven gaan. Ik ben niet iemand die goed stil kan blijven staan. Katinka, ik ben je ontzettend dankbaar voor de steun en de liefde die ik van je mag ontvangen.

# Literatuur

---

1. W.M.H. Hummelen, *Amsterdams toneel in het begin van de Gouden Eeuw*, Nijhoff, 1982.
2. A.A. Busnaina, *Nanomanufacturing handbook*, CRC Press/Taylor & Francis, 2007.
3. R.P. Feynman, *There's plenty room at the bottom*, lezing op CalTech, 29 december 1959.
4. E.H. Gombrich, *The story of art*, Phaidon Press Ltd., 1995.
5. L. Shlain, *Art and physics*, Morrow, 1991.
6. M.E. Chevreul, *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés*, 1839.
7. P. Picasso, *Picasso Speaks*, The Arts, 1923.



# Curriculum vitae

**Prof.dr.ir. W.M.M. Kessels is per 1 mei 2011 benoemd tot voltijdhoogleraar Plasma and Materials Processing aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).**

Erwin Kessels (1973) studeerde Technische Natuurkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven, waar hij in 2000 ook promoveerde. Een gedeelte van zijn promotieonderzoek voerde hij uit aan de University of California Santa Barbara en ook tijdens zijn periode als postdoc verbleef hij aan buitenlandse universiteiten, zoals de Colorado State University en de Philipps-Universität Marburg. Nadat zijn aanvraag als Akademieonderzoeker door de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW) was gehonoreerd, werd hij in 2002 aangesteld als universitair docent bij de faculteit Technische Natuurkunde van de TU/e. In 2007 kreeg hij als meest veelbelovende onderzoeker jonger dan 35 jaar de Peter Mark Award van de AVS Science and Technology Society. In 2009 verwierf hij een Vici-beurs uit de Vernieuwingsimpuls van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). Sinds eind 2010 leidt hij de onderzoeksgroep Plasma and Materials Processing. In de loop der jaren is zijn onderzoek opgeschoven van plasmadepositie van dunne lagen naar het maken van ultradunne lagen en nanostructuren met plasmageassisteerde en gerelateerde technieken, voornamelijk voor halfgeleider- en zonneceltoepassingen.

**Colofon****Productie**

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e

**Fotografie cover**

Rob Stork, Eindhoven

**Ontwerp**

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

**Druk**

Drukkerij Snep, Eindhoven

**ISBN 978-90-386-3156-1**  
**NUR 950**

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)