

Moleculen in het licht : samenspel van fotonen en elektronen in polymeren

Citation for published version (APA):

Janssen, R. A. J. (2001). *Moleculen in het licht : samenspel van fotonen en elektronen in polymeren*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2001

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

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TU/e

technische universiteit eindhoven

Intreerede
21 september 2001

Frank R.A.J. Janssen



moleculen in het licht

samenspel van fotonen
en elektronen in polymeren

/ faculteit scheikunde en technologie

Intreerede

Uitgesproken op 21 september 2001
aan de Technische Universiteit Eindhoven

moleculen in het licht

**samenspel van fotonen
en elektronen in polymeren**

prof.dr.ir. R.A.J. Janssen



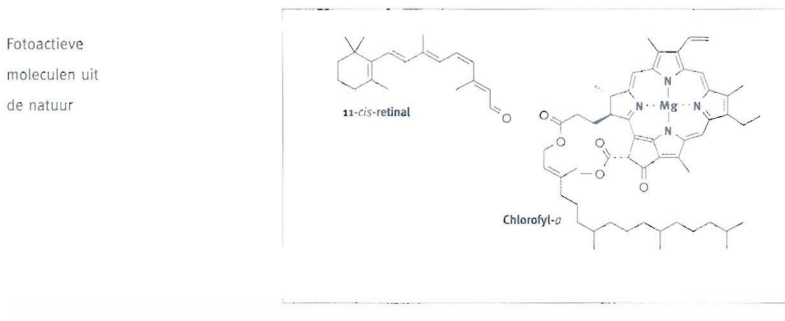
Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Licht is één van de meest fascinerende vormen van elektromagnetische straling. De mens heeft met het oog een zeer gevoelig instrument om licht waar te nemen als een rijkdom aan kleuren. Toch is zichtbaar licht feitelijk maar een piepklein onderdeel van het totale elektromagnetische spectrum. De andere vormen van elektromagnetische straling, zoals infrarood licht of radiogolven, zien we niet, ervaren we als warmte of gaan helemaal aan ons waarnemingsvermogen voorbij. Zichtbaar licht is niet alleen mooi om naar te kijken, denk maar aan 'hemelsblauw' en 'avondrood', het is ook de basis van het leven op aarde. Groene planten zetten met licht koolzuurgas en water om in suikers en zuurstof, allebei stoffen die noodzakelijk zijn voor het leven zoals wij dat kennen. Lang geleden vormden ze ook de basis voor de fossiele brandstoffen die we nu gebruiken om ons van energie te voorzien.

Het 'zien' en de synthese van energierijke verbindingen onder invloed van licht zijn allebei afhankelijk van de interactie van licht met moleculen. In ons oog is het retinalmolecuul verantwoordelijk voor het zien. In planten is chlorofyl de actieve component (figuur 1).

figuur 1



Opmerkelijk bij de interactie van moleculen met licht is dat het 'kleinste' samengaat met het 'snelste'. Moleculen zijn immers de kleinste



eenheden van chemische verbindingen; als je een watermolecuul splitst is het geen water meer. Afmetingen van minder dan een miljoenste millimeter karakteriseren de moleculaire schaal. Einstein leerde ons, dat niets sneller is dan de lichtsnelheid: bijna driehonderdduizend kilometer per seconde. Een pakketje licht, een foton, vliegt dus met een duizelingwekkende vaart door een molecuul en heeft dan ook maar heel even tijd om ermee tot interactie te komen. In een eerste benadering (afstand delen door snelheid) komt die tijd neer op iets meer dan een miljoenste van een miljoenste van een miljoenste seconde. In de fotosynthese leidt die ultrasnelle absorptie van licht, een proces dat we pas recent beter begrijpen, tot het vrijmaken van een elektron dat uiteindelijk de chemische omzetting initieert van koolzuur en water in suiker en zuurstof.

Ook in de techniek komen we moleculen tegen die ons met licht blijven verrassen. Kleurstoffen, vaak organische moleculen, worden gebruikt om producten een specifieke kleur te geven: spijkerbroekblauw en Ferrari-rood hebben een moleculaire oorsprong. Naast deze toepassingen van moleculen als kleurstof zijn er ook tal van 'intelligente' toepassingen van kleurstoffen. Alledaags zijn inmiddels de lichtgevendende kleurstoffen in de beeldbuis van de televisie en het kleurenfilmpje van de fotocamera. Maar ook in modernere vindingen zoals de beschrijfbare compactdisc, de fotoactieve rol van het kopieerapparaat en de laserprinter spelen moleculen en licht een rol. Daarover gaat deze rede: over de wetenschap en de toepassing van moleculen en moleculaire materialen met bijzondere elektrische, magnetische en optische eigenschappen. Kortom: over het 'samenspel van elektronen en fotonen'.

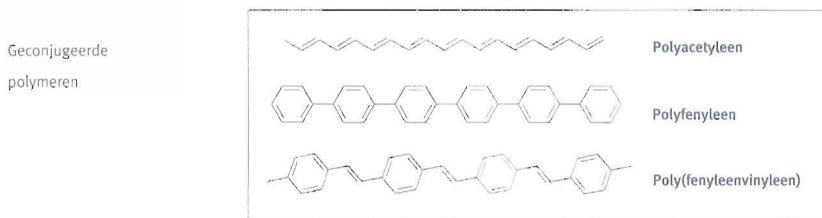
Geschiedenis

De genoemde functionele eigenschappen van organische moleculen en polymere materialen staan momenteel sterk in de belangstelling, zowel in de chemie als in de fysica. De functionaliteit vindt haar moleculaire oorsprong in een afwisseling van enkele en dubbele bindingen. Chemici noemen dat 'geconjugerd'. Dit gemeenschappelijk structurelement is ook aanwezig in de moleculen retinal en chlorofyl, die door de natuur zijn uitgekozen om functioneel te zijn.

Hét moment dat geleid heeft tot wereldwijde activiteiten op het gebied van geleidende polymeren is de publicatie van Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid en Hideki Shirakawa in 1977, toevallig het jaar waarin

ik als eerstejaars mijn studie begon aan de TU/e, toen nog de THE. Deze onderzoekers toonden aan dat door oxidatie met jood de geleiding van polyacetyleen (figuur 2), een geconjugeerd polymeer, toenam met een factor 10 miljoen: van isolator tot metaal [1, 2]. Dit was verbazingwekkend, want polymeren stonden bekend als zeer goede isolatoren. De uitvinding bood dan ook uitzicht op materialen met een unieke mix van eigenschappen: de elektrische eigenschappen van metalen en de verwerkbaarheid van de huis-tuin-en-keuken plastics. Het duurde echter jaren, voordat chemici erin slaagden deze belofte in te lossen.

figuur 2



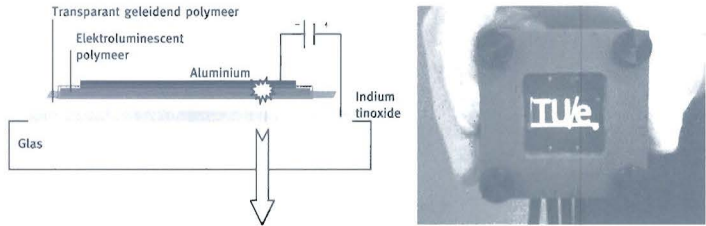
De ontwikkeling van oplosbare en verwerkbare geconjugeerde polymeren leidde tot een tweede mijlpaal op dit gebied. Dat was de ontdekking in 1990 van de polymere lichtgevende diode door Richard Friend [3, 4]. Met die ontdekking keerde het tij: was de aandacht eerst gericht op polymere geleiders, met de komst van de polymere LED verschoof de focus naar polymere halfgeleiders.

Nu, bijna 25 jaar na die eerste publicatie, hebben het onderzoek en de technologische ontwikkeling van deze bijzondere materialen een enorme vlucht genomen. Daarvoor zijn diverse originele en fundamentele bijdragen uit de chemie en natuurkunde noodzakelijk geweest. Het gebied van de geleidende en halfgeleidende polymeren is nu bij uitstek multidisciplinair. Talloze variaties op het polyacetyleen-thema zijn door chemici gemaakt: polythiofeen, poly(fenyleenvinyleen), polypyrrool en polyaniline zijn slechts enkele van de letterlijk honderden verschillende polymeren die inmiddels beschreven zijn. Verwerkbare geleidende en halfgeleidende polymeren hebben geleid tot toepassingen in de elektronica (denk aan antistatische lagen), terwijl nieuwe applicaties (zoals transistors en lichtgevende diodes, figuur 3) op het

punt staan de markt te veroveren. Ook zijn volledig nieuwe gebieden zoals polymere zonnecellen en lasers in onderzoek. Deze diversiteit aan toepassingen is zelfs voor het silicium niet weggelegd.

figuur 3

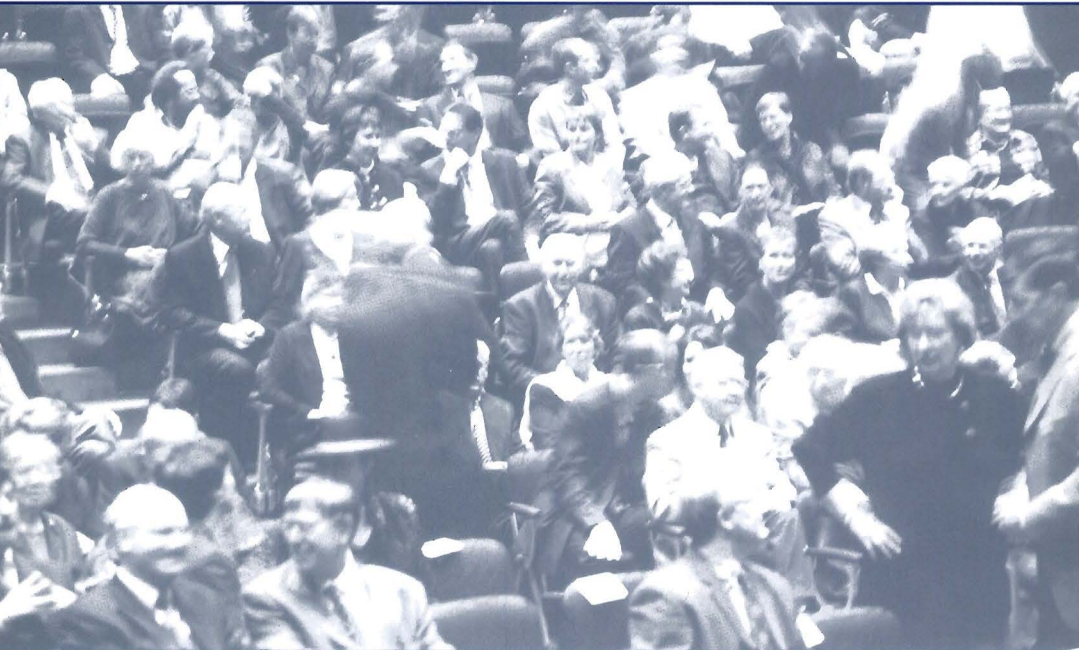
Polymere LED



In 1998 gaf Heeger in de zaal waar we nu zijn de ‘Holst-lezing’. Hij ging uitvoerig in op de vraag of zijn onderzoeksinspanningen de moeite waard zijn geweest. “Twenty years of research into conducting and semiconducting polymers, is it worth the effort?” vroeg hij zich destijds af. In 2000 ontvingen Heeger, MacDiarmid en Shirakawa voor hun ontdekking de Nobelprijs Chemie. Bij die gelegenheid beantwoordde Heeger de vraag met: “I don’t think it’s over at all, I think it’s all just beginning.”

De eerste wetenschapper die in Nederland het belang van de vinding inzag, was Edsko Havinga bij het Philips Natuurkundig Laboratorium. Rond 1980 begon hij de mogelijkheden van geleidende polymeren te onderzoeken. Havinga stelde methoden voor om geleidende polymeren oplosbaar en verwerkbaar te maken; ideeën die weldra wereldwijd werden opgepikt. Mede door zijn werk was Philips in staat om direct in te springen op de ontdekking van de polymere LEDs. Het werk van Havinga vormde tevens de basis voor de ontwikkeling van de polymere elektronica, waarin Philips een wetenschappelijke en technologische topositie inneemt. Havinga heeft met zijn werk dus aan de wieg gestaan van het Nederlandse onderzoek naar geleidende polymeren dat nu internationaal een belangrijke rol speelt.

Naast het werk aan geconjugeerde polymeren heeft in de laatste anderhalf jaar de studie naar zuivere kristallen van kleine, goed-gedefinieerde stukjes polymeer, de zogenaamde oligomeren, een belangrijke vlucht genomen. Bertram Batlogg heeft laten zien, dat



bij zeer hoge zuiverheid de intrinsieke functionaliteit van organische halfgeleiders vergelijkbaar is met die van gallium arsenide [5]. Elektrisch gepompte lasers, supergeleiding, kwantum-Hall-effecten en zeer hoge mobiliteiten van ladingsdragers zijn slechts enkele van de talloze fundamentele doorbraken in het laatste jaar. Hoewel het nog niet zeker is of deze vindingen ook zullen leiden tot technologische toepassing, tonen ze wel aan dat de intrinsieke eigenschappen van de polymeren zoals wij die nu kennen nog lang niet blootgelegd zijn. Zo is onlangs voor het eerst supergeleiding aangetoond in een geconjugeerd polymeer [6].

Samenspel van fotonen en elektronen

De missie van mijn onderzoek is: het ontwikkelen en uitwerken van nieuwe ideeën en concepten voor functionele organische moleculen, macromoleculen en materialen die zouden kunnen leiden tot toekomstige toepassingen. In mijn definitie van functioneel gaat het dan om elektrische, optische of magnetische eigenschappen. Om de intrinsieke eigenschappen van deze materialen te kunnen benaderen en daadwerkelijke relaties te kunnen leggen tussen microstructuur en functie op macroscopisch niveau is een zo hoog mogelijke controle op elk hiërarchisch niveau noodzakelijk. Daarom heb ik gekozen voor één lijn in alle thema's: van Molecuul, via Macromolecuul naar Materiaal en ten slotte naar de toepassing, in het Engels altijd aangeduid met 'device', in het Nederlands vrij vertaald als het Machientje. Die 4M-strategie is doelbewust, evenals de keuze om het brede gebied van molecuul tot device te bewerken. Om dat te realiseren combineren we synthetisch organische chemie, polymeerchemie, polymeerverwerking, spectroscopie, morfologische studies en devicefysica.

Elektrische eigenschappen

Over de aard van de ladingsdragers in geconjugeerde polymeren is nog altijd veel discussie. In de literatuur wordt gesproken over neutrale en geladen solitonen, polaronen en bipolaronen, waarmee analogieën uit de vastestof-fysica aangeduid worden. Wij hebben geprobeerd hier helderheid in te krijgen door oligomeren te bestuderen. In tegenstelling tot de polydisperse polymeren bezitten oligomeren een precies gedefinieerde chemische structuur waardoor structuur-eigenschapsrelaties eenduidiger bepaald kunnen worden. Met een scala aan technieken, zoals elektrochemie, optische spectroscopie met UV, zichtbaar en nabij infrarood licht, elektronspinresonantie, massaspectrometrie en theoretische modellen hebben we geïsoleerde oligomeren en hun intermoleculaire interacties bestudeerd als functie van de lengte, het aantal ladingen en de chemische samenstelling van het oligomeer. Nieuwe soorten deeltjes zijn daarbij geïdentificeerd in de oplossing- en gasfase: dimeren en stapelingen (stacks) van radicaal-

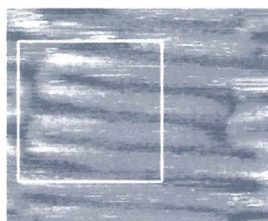
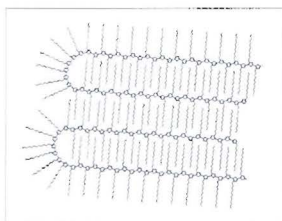


kationen als modellen voor het ladingstransport tussen ketens en diverse geïsoleerde ladingsdragers op één geconjugeerde keten [7]. Deze fundamentele studies hebben geleid tot een verbeterd begrip van de oxidatie van polymeren. Met de inzichten en ontwikkelde technieken is een nieuwe methode gevonden om zeer veel ladingen aan te brengen op polymeerketens in oplossing. Hierbij verdwijnt de oorspronkelijke kleur geheel en ontstaat uiteindelijk een transparante kleurloze geleider die uitzicht biedt op diverse industriële toepassingen.

Naast de identificatie van ladingsdragers is ook hun beweging belangrijk; stroom loopt immers alleen als ladingen getransporteerd kunnen worden. Een hoge mobiliteit van ladingen in polymeren is bijvoorbeeld gewenst om de schakelsnelheid van plastic transistors te verhogen. De meeste halfgeleidende polymeren bezitten helaas een lage mobiliteit door de chemische en structurele wanorde. Door nu de synthese van poly(alkylthiofenen) te optimaliseren met als aandachtspunten de lengte en lengteverdeling van de ketens, de eindgroepen en de chemische en structurele zuiverheid krijgen we materialen die wél hoge ladingsmobiliteiten bezitten, tot aan $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Daarmee benaderen ze de mobiliteiten in oligomeerkrystallen. Toen materialen van verschillende regioregulariteit met elkaar werden vergeleken, bleek het mogelijk een eenduidige relatie aan te wijzen tussen de mesoscopische structuur en de macroscopische tweedimensionale mobiliteit van ladingsdragers [8]. Van dezelfde polymeren zijn ook unieke scanning tunneling microscopie- (STM-)opnamen gemaakt. In figuur 4 is te zien hoe de afzonderlijke polymeerketens zich spontaan ordenen in een tweedimensionaal kristal op een grafietoppervlak [9].

figuur 4

Tweedimensionaal
polymeerkristal





Dit kan alleen als de ketens een hoge mate van regelmaat bezitten. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een Europees project onder leiding van Dago de Leeuw (Philips) samen met Richard Friend (Cambridge), Klaus Bechgaard (Risø) en Peter Bäuerle (Ulm). In 2000 heeft het project de Descartes-prijs van de Europese Commissie ontvangen voor de succesvolle samenwerking.

Optische eigenschappen

Een direct in het oog springende eigenschap van deze functionele materialen is hun soms prachtige kleur. Het oranje van wortels en het rood van tomaten zijn ook gerelateerd aan geconjugeerde moleculen uit de natuur. Deze optische eigenschappen blijken, niet alleen in wortels en tomaten, maar ook in synthetische oligomeren sterk af te hangen van de lengte van het molecuul. Door de eigenschappen te bestuderen in afhankelijkheid van de ketenlengte is een zeer gedetailleerd inzicht verkregen in de structuur-eigenschapsrelaties van heel veel systemen. Op het terrein van de optische eigenschappen van polymeren is veel aandacht besteed aan het effect van de pakking van polymeerketens op de optische eigenschappen, met name op de fluorescentie. In bijna alle toepassingen worden flinterdunne (100 nm) polymeerfilms toegepast, waarin de afzonderlijke polymeerketens elkaar beïnvloeden. Al in 1993 toonden we aan hoe sterk interketeneffecten en procescondities van invloed zijn op de luminescentie-eigenschappen van polymeerfilms. Dit is nog steeds een leidraad bij het ontwerpen van luminescente polymeren voor LEDs. Samen met Bert Meijer (TU/e) hebben we daarbij intensief gebruik gemaakt van chirale, of optisch actieve, polymeren. Deze optisch actieve systemen lenen zich voor circulair dichroïsme spectroscopie waarmee informatie over interketenconformaties verkregen kan worden. Dit heeft geleid tot het ontwikkelen van polymeren en polymere LEDs die circulair gepolariseerd licht uitzenden. Samen met Herman Schoo (toen Philips, nu TNO), Harry Dekkers en Stefan Meskers (toen Leiden) waren we de eersten die een lichtbron maakten en karakteriseerden die intrinsiek circulair gepolariseerd licht uitzond, iets wat inmiddels door anderen is overgenomen [10].

Magnetische eigenschappen

Organische of polymere magnetische materialen bestaan eigenlijk niet. Wel is een aantal verbindingen bekend die vlakbij het absolute nulpunt, typisch beneden 2-3 K, ferromagnetisch gedrag vertonen. De oorsprong

van magnetisme ligt bij de elektronspin. Om een molecuul een substantieel magnetisch moment te geven moet het een oneven aantal elektronen bezitten. Gewone moleculen houden echter absoluut niet van een oneven aantal elektronen en reageren radicaal met bijna alles wat ze op hun weg tegenkomen. Als je de magnetische eigenschappen van deze radicalen samen wilt voegen om een ferromagnetisch materiaal te maken, moet je de radicalen hun reactiviteit ontnemen en ze zo dicht bij elkaar brengen dat hun uiterst zwakke magnetische interacties bepalend worden. Dat kan alleen als de kwantumchemische overlap van de afzonderlijke golf functies nul is. Zie hier het dilemma: breng reactieve radicalen zodanig bijeen dat ze elkaar chemisch niet, maar magnetisch wél ervaren. Dat is vergelijkbaar met het probleem van de kleuterjuffrouw bij het maken van de klassenfoto: kinderen even geen aandacht voor elkaar en alle neuzen in dezelfde richting.

Hoge-spin moleculen waarin veel radicaalcentra ferromagnetisch gekoppeld zijn, zijn een optie in de ontwikkeling van moleculaire materialen met relevante magnetische eigenschappen. Onze strategie om hoge-spin moleculen te verkrijgen is verwant met het geleidend maken van geconjugeerde polymeren, omdat we met oxidatieve doping de elektronspins introduceren. In zorgvuldig ontworpen oligoanilines is dat succesvol gebleken; we zijn in staat om redelijk stabiele hoge-spin oligoradicalen te maken waarmee we een elegante bouwsteen hebben voor verder onderzoek naar moleculaire magnetische materialen [11].

De grote uitdaging nu is het magnetisch koppelen van spindragende deeltjes om zo te komen tot nanoscopische systemen met veel spins en wellicht echte magneten. De ideeën die we daartoe uitwerken maken gebruik van vloeibaar kristallijne interacties, metaalcomplexatie of waterstofbruggen. Het samenvoegen van hoge-spin moleculen in functionele magnetische materialen stelt in mijn ogen de allerhoogste eisen aan begrip en controle op alle hiërarchische niveaus en is zeker een van de moeilijkste onderwerpen in de fysisch organische chemie.

In de drie genoemde gebieden spelen fotonen en elektronen een interactieve rol: de ene keer als functionele eigenschap en de andere keer bij de spectroscopie en het meten van moleculen om hun eigenschappen te ontrafelen. 'Samenspel van fotonen en elektronen' is ook de sleutel tot het volgende onderwerp: plastic zonnecellen.

Plastic zonnecellen: moleculen in het licht

Met plastic zonnecellen kwam ik voor het eerst in aanraking in 1993 toen ik tijdens een verblijf aan de Universiteit van Californië in de groep van Alan Heeger samenwerkte met Serdar Sariciftci, nu werkzaam in Linz. Sariciftci had in de maanden daarvoor een opmerkelijke vondst gedaan, toen hij mengsels bestudeerde van polymere halfgeleiders en fullereen- C_{60} , een bijzonder molecuul waarvan de structuur lijkt op een voetbal [12]. Als er zichtbaar licht op dit mengsel valt, vindt er een uiterst snelle reactie plaats en, vergelijkbaar met de primaire stap in de fotosynthese, wordt er een elektron overgedragen van het polymeer als elektrondonor naar C_{60} als elektronacceptor. Zo worden in de donor en acceptor respectievelijk positieve en negatieve ladingen gecreëerd. Hoe mooi, dacht Sariciftci, zou het zijn om deze ladingen te gebruiken om stroom en spanning op te wekken in een extern circuit. Samen met Kees Hummelen, nu werkzaam in Groningen, hebben we in Santa Barbara de chemie en fysica van dit soort mengsels in detail bestudeerd [13].

In Nederland bleek NOVEM bereid om dit trio, dat inmiddels Santa Barbara had verlaten voor minder zonnige oorden, te ondersteunen om het onderzoek naar plastic zonnecellen te continueren. De voortvarende ondersteuning vanuit het NOZ-PV-programma van NOVEM is bepalend geweest voor het opzetten van de huidige Nederlandse onderzoeksstructuur op het gebied van plastic zonnecellen. Een eerste omvangrijk project op het gebied van polymeer-fullereen zonnecellen, geleid door Kees Hummelen, wordt gefinancierd door het Economie Ecologie en Technologie-programma van de overheid. Het is een genoegen voor mij om bekend te kunnen maken, dat op 1 oktober een nieuw innovatief programma op het gebied van polymere zonnecellen start, gefinancierd door het Dutch Polymer Institute. In dit DPI-programma worden meer dan 20 nieuwe onderzoekers aangesteld en is voorzien in een forse uitbreiding van de infrastructuur. Op korte termijn zullen aan diverse universiteiten in Nederland en binnen de onderzoeksinstituten ECN en TNO dan ook circa 40 onderzoekers direct actief zijn op het gebied van plastic zonnecellen. Met de steun van DPI gaat de polymere fotovoltaïsche cel een zonnige toekomst tegemoet.



Dat neemt niet weg, dat er nog tal van wetenschappelijke en technologische problemen te overwinnen zijn voordat duurzame energie uit plastic realiteit zal zijn.

Helaas komt er een einde aan het NOZ-PV-programma dat zo'n cruciale rol heeft vervuld bij het opstarten van al deze activiteiten. Daarmee pakken donkere wolken zich samen boven het Nederlandse innovatieve zonnecelonderzoek. Jammer, want Nederland is internationaal een van de koplopers op het gebied van nieuwe zonnecelconcepten.

De vier M's

De plastic zonnecel is een prima voorbeeld om de 4M-benadering te illustreren. Op elk niveau gebeurt er iets nieuws. Laat ik eerst kort schetsen hoe op dit moment een 'state-of-the-art' plastic zonnecel eruit ziet. De actieve polymeerlaag die het licht absorbeert en ladingen genereert, bestaat uit een combinatie van polymeer en C_{60} , en is aangebracht tussen twee elektroden. De eerste, een kleurloze en transparante elektrode, bestaat uit een polymere geleider, aangebracht op een glasplaatje dat geleidend is gemaakt met indiumtinoxide. De tweede elektrode is een laagje aluminium dat op de actieve laag is aangebracht. De dikte van al deze lagen is miniem. Als er licht op de cel valt, worden in de actieve laag ladingen gecreëerd aan het grensvlak van donor en acceptor, die vervolgens afgevoerd worden naar de elektroden. Door de stroom-spanningskarakteristieken te meten krijgen we informatie over de werking van deze cel op macroscopisch niveau.

Van Molecuul

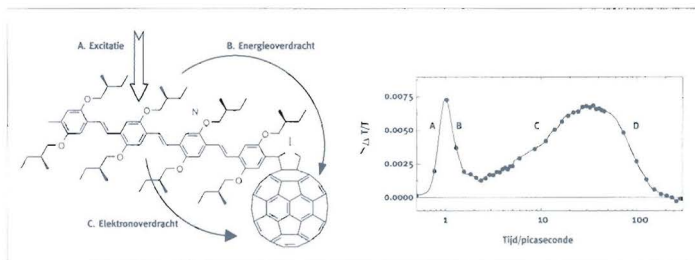
Om een idee te krijgen welke complexe processen zich in de zonnecel afspelen dalen we af naar het moleculaire niveau en vergroten dan langzaam de schaal. In het molecuul afgebeeld in figuur 5 is een klein stukje polymeer, de elektrondonor, vastgemaakt aan het fullereen- C_{60} , de elektronacceptor. Deze dyade is een model om te onderzoeken hoe ladingen gegenereerd worden. Om te achterhalen hoe dat gebeurt, gebruiken we ultrasnelle pump-probe spectroscopie (figuur 6): we sturen twee zeer korte lichtflitsen van elk 150 femtoseconde vlak na elkaar door het onderzoeksmonster. De eerste puls brengt het molecuul in een aangeslagen toestand. Bij de tweede puls bestuderen we in welke toestand het molecuul zich bevindt: 'Moleculen in het licht'. De tijd die verloopt tussen de aankomsttijden van die twee pulsen kan eenvoudig gevarieerd worden door de weg die de tweede puls aflegt met een

beweegbare spiegel naar keuze korter of langer te maken. Het oplossend vermogen van deze techniek is subpicoseconde of sub- 10^{-12} seconde. In verhouding is 10^{-12} seconde net zo'n klein onderdeel van 1 seconde als 1 seconde dat is van ruim 30.000 jaar! Ik kan me er zelf ook niet veel bij voorstellen.

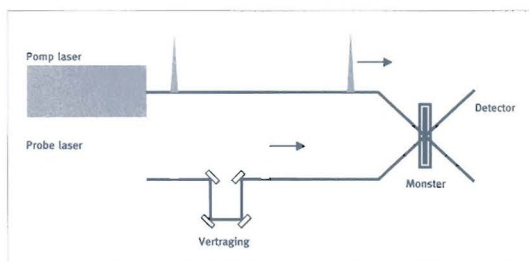
figuur 5

Fotofysica in een oligomeer-C60 dyade

- A. excitatie
- B. energieoverdracht
- $t < 200$ fs
- C. elektronoverdracht
- $t = 10$ ps
- D. recombinatie
- $t = 50$ ps



Femtoseconde spectroscopie



figuur 6

Door de moleculen in een oplossing te brengen kunnen we deze afzonderlijk bestuderen. In dit molecuul ontdekten we zo, dat de ladingsscheiding voorafgegaan wordt door een nog sneller proces: na excitatie van de donor wordt eerst de excitatie-energie overgedragen naar de acceptor [14]. We weten dat deze energieoverdracht sneller is dan 200 fs. Na de energieoverdracht is de acceptor geëxciteerd en die toestand leidt tot elektronoverdracht, maar op een tijdschaal die honderdmaal langzamer is, namelijk 10 ps. De ladingsscheiding die zo ontstaat is kortlevend; met een tijdsconstante van 50 ps vindt recombinatie van de ladingen plaats en keert het molecuul weer terug naar de grondtoestand.

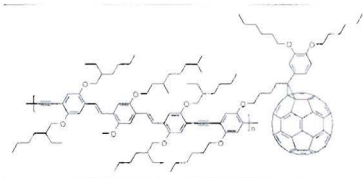
Er is dus niet veel tijd om die ladingen af te voeren, zo lijkt het. Maar waarom werkt de zonnecel dan? Als we de dyaden in de vaste fase bestuderen, waarbij de afzonderlijke moleculen contact met elkaar maken, blijkt de fotofysica significant te verschillen van de oplossing. Zo krijgen we een idee over het waarom van de zonnecel. Energieoverdracht vindt niet meer plaats. Ladingsscheiding is nu vrijwel instantaan, voorlopig bepaald op een bovengrens van 500 fs. Opmerkelijk genoeg is de levensduur van de ladingsscheiding toegenomen van 50 ps naar 1200 ps, en zijn zelfs na een milliseconde, een 'eeuwigheid' in fotofysica, nog ladingen te zien. Naar de precieze oorzaak van deze opmerkelijke verschillen zoeken we nog, maar we vermoeden dat het een gevolg is van de oriëntatie van de chromofore groepen ten opzichte van elkaar en het snelle transport van ladingen naar naburige moleculen in de vaste fase.

Via Macromolecuul

In een volgende stap hebben we de dyaden covalent met elkaar verbonden tot een macromolecuul. Dit polymeer (figuur 7) is het eerste goedgedefinieerde halfgeleidende polymeer waaraan fullereengroepen covalent verbonden zijn, vergelijkbaar met een ketting waaraan kralen hangen [15].

figuur 7

Geconjugeerde
polymeerketen
met C₆₀ kralen



Dit polymeer is oplosbaar en door spincoaten te verwerken in een dunne film die geschikt is voor een zonnecel. Een zonnecel gemaakt van dit materiaal werkt en toont aan dat menging van donor en acceptor op een moleculaire schaal het transport van ladingen niet verhindert. De efficiëntie van de energieomzetting in deze cel is echter beperkt tot 0.1% in het zonlicht.

Naar Materiaal

Veel efficiëntere cellen kunnen gemaakt worden als polymeer en fullereen niet covalent met elkaar verbonden zijn, maar als mengsel

gebruikt worden. De belangrijkste reden: in een mengsel kan fasescheiding optreden. Daardoor ontstaat er een bicontinuu netwerk waarin positieve en negatieve ladingen beter getransporteerd kunnen worden. Ook kan nu de verhouding van de twee componenten eenvoudig gevarieerd worden. Belangrijk bij het maken van dunne films zijn de procescondities: temperatuur, concentratie, oplosmiddel en snelheid. Dit zijn allemaal factoren die invloed hebben op de performance van het materiaal dat gemaakt wordt. Vergelijk het met koken: het resultaat is minstens zo afhankelijk van de kok als van de ingrediënten. Voor testcellen gebruiken we spincoaten; doctorbladen en screenprinten kunnen toegepast worden om grote oppervlakken te bedekken met dunne polymeerfilms. Deze relatief eenvoudige technologieën houden de productiekosten beperkt, zodat plastic zonnecellen kunnen concurreren met andere typen en bestaande energiebronnen.

En Machientje

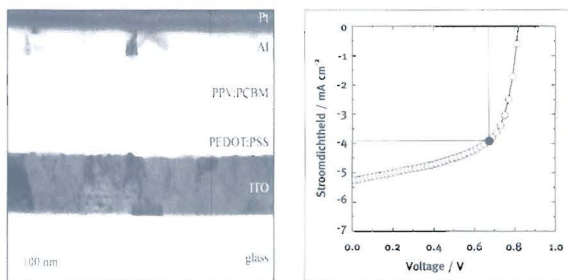
De zonnecel zelf, het machientje, vraagt ook de nodige aandacht. Welke elektrodematerialen kiezen we, hoe brengen we deze elektroden aan, wat is de juiste laagdikte? Dit zijn een paar van de vele parameters die de performance van de zonnecel beïnvloeden.

Op dit moment bestaat de beste testcel uit een pakket van vijf verschillende lagen op een glassubstraat. Met transmissie-elektronenmicroscopie is recent een bijzondere foto van deze cel gemaakt. Daarin wordt de lagenstructuur zichtbaar (figuur 8).

De zonnecel heeft een efficiëntie van meer dan 2.5% in zonlicht. Daarmee begint ze waarden te benaderen die commercieel interessant zijn. Ter vergelijking: commerciële modules met amorf silicium bereiken 6% en met polykristallijn silicium 14% efficiëntie.

figuur 8

Doorsnede en IV karakteristiek in zonlicht van de plastic zonnecel



Bij de ontwikkeling van deze cel is het werk van Christoph Brabec en Serdar Sariciftci, onze partners in Linz, doorslaggevend geweest [16]. Uit golfengte-afhankelijke metingen blijkt dat de externe kwantum-efficiëntie, ofwel het aantal elektronen dat bijdraagt aan de stroom per foton dat op de cel valt, meer dan 50% is in de absorptieband van de actieve laag. In de absorptieband is de cel dus zeer efficiënt. Door stroom-spanningscurves afhankelijk van lichtintensiteit en temperatuur te karakteriseren krijgen we steeds meer inzicht in de limiterende parameters van deze cel. De volgende stap is tijdsopgeloste spectroscopie van zonnecellen.

Recent hebben we een begin gemaakt met het chemisch analyseren van de cel. Aandachtspunten zijn de integriteit van de lagenstructuur en de chemische samenstelling. Daarbij maken we dankbaar gebruik van de expertise en unieke opstellingen die beschikbaar zijn aan de TU/e op het gebied van 'secondary ion mass spectrometry' (SIMS), foto-elektronspectroscopie (UPS en XPS), 'Rutherford backscattering' (RBS), 'low-energy ion scattering' (LEIS), scanning en transmissie-elektronenmicroscopie (SEM en TEM) en 'scanning probe'-technieken (STM en AFM).

Er zijn uiteraard diverse plannen om deze cellen nog te verbeteren. Een van de cruciale punten is de absorptie van licht. De emissie van de zon bestrijkt een breed spectrum, van UV tot infrarood. Het is belangrijk de absorptie van de materialen in de cel daarop af te stemmen. Nu is dat nog niet het geval; zelfs bij een optisch dichte film zouden we nooit meer dan circa 25% van de fotonflux kunnen absorberen. Gelukkig weten we, dankzij het pionierende werk van Edsko Havinga, hoe we de bandafstand van halfgeleidende polymeren kunnen verlagen. Hoewel het verre van gemakkelijk is om geschikt materiaal te vinden dat ook nog metastabiele ladingen genereert na excitatie, is er goede hoop dat we daarin zullen slagen. Een eerste materiaal met een lage bandafstand is recent door ons beschreven.

Nanoscopische materialen

Als we de ontwikkelingen analyseren in de drie onderzoeksgebieden die als basis dienen voor het gebied van de functionele moleculaire materialen, zien we in alledrie een duidelijke trend naar nanoscopische structuren. In de organische en supramoleculaire chemie staan momenteel nieuwe, relatief grote moleculen sterk in de belangstelling. In de polymeerchemie wordt gestreefd naar controle over de morfologie op nanoschaal en in de fysica is er zowel aandacht voor nanoscopische halfgeleiderstructuren als voor de zachte-gecondenseerde materie. Ik denk, dat de tijd rijp is deze trends te combineren in een gebied waar macroscopische functies van moleculaire materialen direct gekoppeld zijn aan hun structuur op nanoscopisch niveau.

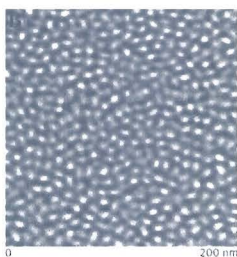
Veel engineering plastics zijn in feite composietpolymeren. Composieten van polymere halfgeleiders zijn daarentegen een veelbelovend, maar nog nauwelijks ontgonnen onderzoeksgebied. De belangrijkste eigenschap die in polymere blends aanwezig is, is de neiging tot fasescheiding en tot het vormen van domeinen door een lage mengentropie. Vanuit de polymeerchemie is veel bekend over hoe die fasescheiding gecontroleerd kan worden door een slim gebruik van complementaire en antagonistische interacties. Doel is controle te krijgen over de driedimensionale structuur en de afmetingen op nanoscopisch niveau. Een mogelijke weg is het gebruik van blokcopolymeren. Door Bert Meijer (TU/e) en Martin Möller (Ulm) is, alweer enige tijd geleden, een tribloksysteem bestudeerd bestaande uit een centraal undecathiofeenoligomeer en twee laagdisperse polystyreenfragmenten [17]. Uit AFM blijkt de spontane vorming van gedefinieerde nanoscopische micellaire aggregaten bestaande uit een thiofeenkern en een polystyreenschil met een afmeting van 12 nm (figuur 9). Dit voorbeeld toont aan, dat met precieze controle over de moleculaire samenstelling gedefinieerde nanostructuren gemaakt kunnen worden.

Inmiddels werken we aan systemen die bestaan uit twee functionele componenten: een donor en een acceptor. We denken controle te krijgen

over de afmetingen van de twee fasen door te spelen met de bloklengtes. Zo verwachten we interpenetrerende netwerken te creëren met een gedefinieerde dimensie op de nanometerschaal. De eerste activiteiten in die richting maken gebruik van twee benaderingen: blokkopolymere en vloeibare kristallen, beide met een donor-acceptorstructuur. Een aantal modelsystemen is inmiddels gemaakt. Met ultrasnelle pump-probe spectroscopie is recent de vorming van ladingen in deze materialen onderzocht. Zonnecellen zijn nu de volgende stap.

figuur 9

Fasescheiding
van een
triblokkopolymeer



Fascinerende mogelijkheden ontstaan daar waar moleculaire en bulkeigenschappen elkaar ontmoeten. Vooral in anorganische nanokristallen en metallische kwantumclusters veranderen de eigenschappen sterk op het moment dat de bulkafmetingen verlaten worden en de nanoschaal bereikt wordt. In organische moleculaire materialen verschillen de elektronische en optische eigenschappen fundamenteel door zwakkere intermoleculaire interacties. Onderzoek naar halfgeleidende moleculaire nanostructuren is veel minder ontwikkeld. Recent konden we tweedimensionaal gedelokaliseerde triplettoestanden en ladingen identificeren in nanokristallen van organische halfgeleiders (figuur 10) [18]. De bouw van geïntegreerde structuren met dergelijke nanokristallen als bouwstenen is de volgende uitdaging.

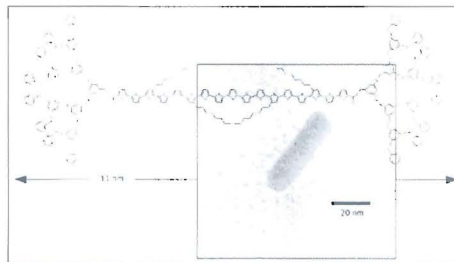
Een ander aandachtspunt zijn composieten van organische en traditionele halfgeleiders, zoals titaniumdioxide, zinkoxide, en cadmiumsulfide en -selenide. Doel hierbij is het beste van twee werelden te combineren en uit deze synergie nieuwe toepassingen te genereren, bijvoorbeeld door de hoge absorptiecoëfficiënten van organische halfgeleiders te combineren met de hoge ladingsmobiliteiten



van de anorganische halfgeleiders. In een recent verleden hebben we samen met Martijn Wienk (ECN) en Jan Kroon (ECN) al de combinatie bestudeerd van geconjugeerde oligomeren en polymeren met nanokristallijn titaniumdioxide voor gebruik in zonnecellen. Nu zijn we met meer fundamentele studies bezig, de eerste M van de vier M's, waarin we uiterst kleine, 3 nm in diameter, titaniumdioxide bolletjes koppelen met halfgeleidende oligomeren. Doel: het bouwen van heterosupramoleculaire structuren en het bestuderen van de fotofysische eigenschappen.

figuur 10

Nanokristal van
een organische
halfgeleider



Ik heb de stellige overtuiging, dat voor nanogestructureerde materialen belangrijke toepassingen ontstaan. Maar zeker voor de moleculaire materialen moet eerst het een en ander gerealiseerd zijn: gedetailleerde kennis en controle op het nanoscopisch niveau plus de ontwikkeling van applicaties. Dan pas zijn we in staat de schaal verder te verkleinen en op te klimmen naar een volgende uitdaging in de nanotechnologie: de moleculaire elektronica.

Moleculaire elektronica

In de traditionele elektronica is er sprake van een continue schaalverkleining met het oog op een toename aan compactheid, snelheid en efficiëntie. In moleculaire materialen vormen individuele moleculen uiteraard de kleinste lengteschaal die we kunnen bereiken. Daarmee ligt het doel van de moleculaire elektronica vast. Diverse moleculaire draden, schakelaars, data bits, versterkers en ‘machientjes’ zijn beschreven en bestudeerd en bieden uitzicht op het gebruik van individuele moleculen in logische circuits. Als ik het begin van mijn verhaal even in herinnering roep, is ook het retinalmolecuul dat in ons oog het licht absorbeert een moleculaire schakelaar: na absorptie van licht verandert de structuur van het molecuul en deze bistabiliteit ligt aan de basis van de zenuwimpuls die naar de hersenen gaat.

In tegenstelling tot de natuur is de wetenschap er nog nauwelijks in geslaagd om deze moleculaire machientjes en schakelaars daadwerkelijk nuttig te gebruiken. Vaak vraag ik me af: wat schakelt deze schakelaar? Het grootste struikelblok is de onderlinge verbinding en logische connectie van deze moleculaire functionaliteiten. De belangrijkste uitdaging in de moleculaire elektronica is dus de realisatie van geïntegreerde circuits op moleculaire schaal. De architectuur van dergelijke machines moet stabiel en exact zijn om enige robuustheid te realiseren. Zelfassemblage blijft een van de meest intrigerende methoden om deze geïntegreerde circuits tot leven te roepen en zal dan ook zeker een rol spelen. De noodzakelijke diversiteit en vrijheid vereisen niettemin dat nanomanipulatietechnieken, nano-imprinting, nanolithografie, microcontact printing en embossing een rol spelen. Dan kunnen we via matrijzen en zelfassemblage ingewikkelde structuren op een moleculaire schaal maken.

Ook hier hebben we de eerste stappen gezet. Samen met Kees Flipse (TU/e) proberen we door zelfassemblage goudbolletjes van nanoscopische afmetingen te binden aan de uiteinden van een lineair geconjugeerd molecuul. Dit is de eerste noodzakelijk stap om moleculen te voorzien van contacten naar de elektrische buitenwereld.



Toch moeten we niet denken, dat we met moleculaire elektronica de bestaande halfgeleider-technologie snel zullen inhalen. Ook daar is de ontwikkeling van nanostructuren in volle gang. Misschien moeten we aandacht geven aan minder traditionele oogpunten. Biomoleculaire chemie en moleculaire elektronica kunnen samen wellicht uitgroeien tot een interessant en potentieel belangrijk onderzoeksgebied. De aard van de bouwstenen is nauw gerelateerd en roept om integratie. Misschien is het een droom en misschien niet, maar is het is zeker een uitdaging om moleculaire elektronica zo te gebruiken dat we een synthetische fotocel kunnen maken die compatibel is met het humane zenuwstelsel.

Onderwijs

Ik realiseer me elke dag, dat het bestaansrecht van de TU/e niet primair het onderzoek is waarvan ik u zojuist enkele resultaten, plannen en dromen heb mogen toelichten, maar wel het onderwijs en de opleiding van jonge mensen tot ingenieur en doctor. Wetenschappelijk onderzoek is daarbij veel meer middel dan doel. De nieuwe generaties studenten en de continue vernieuwing maken het universitair onderwijs tot een dynamisch geheel dat mij bijzonder aantrekt. De dynamiek die uitgaat van jonge mensen met frisse ideeën en nieuwe passies is voor mij dé reden geweest om een academische loopbaan te kiezen. Dames en heren studenten, ik beschouw het als een voorrecht om een wezenlijke bijdrage aan jullie opleiding te kunnen geven en ik leer elke keer van de verrassende vragen die mij gesteld worden en van de ideeën die ik opdoe bij de voorbereiding van de colleges.

Het academisch onderwijs in Nederland staat aan de vooravond van de invoering van de bachelor/master-fase. Dit biedt de mogelijkheid om nieuwe wegen in te slaan, ook aan de TU/e, en traditionele paden los te laten. In de moderne maatschappij en techniek vervagen grenzen tussen gangbare wetenschapsgebieden in snel tempo. We keren terug naar de beginjaren van de natuurwetenschappen. Aan de TU/e zouden we daar, nog meer dan nu al het geval is, een platform voor moeten bieden. Het initiatief om een Science-opleiding op te zetten is een stap in de goede richting, maar geeft misschien nog te weinig flexibiliteit om in te haken op nieuwe maatschappelijke ontwikkelingen. Opleidingen die dwars door de bestaande faculteiten heen lopen kunnen flexibel zijn zonder aan diepgang in te boeten. Bovendien kunnen ze inhaken op maatschappelijke ontwikkelingen. Het succes van de opleiding Biomedische Technologie is daarvan een uitstekend voorbeeld en zou navolging kunnen krijgen in bijvoorbeeld de nanotechnologie.

Het doet mij deugd dat onze TU/e in het woelige water van steeds wisselende studentenaantallen goed overeind blijft. Daar is ook alle reden toe. Als we middelbare scholieren willen blijven fascineren voor natuurwetenschappen en techniek, moeten we niet alleen vertellen hoe



leuk of interessant deze vakken zijn of welke functie zij ermee kunnen vervullen. Ik denk, dat we de middelbare scholieren dan onderschatten. Nee, ze moeten zelf kunnen zien en ervaren dat er voor hen uitdagingen liggen waarvan de oplossing door de maatschappij gewaardeerd wordt. De hoogrendementsketel, het zonnepaneel, de groene stroom, de auto-katalysator en de airbag zijn slechts een paar voorbeelden van hoe hoogwaardige technologie direct bijdraagt aan duurzame energie, milieu en veiligheid. Doordat wij de uitdagingen voor de toekomst onvoldoende voor het voetlicht brengen, is in mijn ogen de belangstelling voor natuur en techniek onder druk komen te staan. Net als met voetballen, zwemmen en schaatsen behoort Nederland ook in de natuurwetenschappen tot de wereldtop en dat hoort eigenlijk iedereen te weten.



Dat ik hier vandaag deze intreedere kan houden is mogelijk dankzij veel mensen die mij in de afgelopen jaren de ruimte en het vertrouwen hebben gegeven om de weg te bewandelen die ik zelf gekozen had. Daarvoor ben ik hen zeer erkentelijk.

Mijn dank gaat uit naar het College van Bestuur en het bestuur van de faculteit Scheikundige Technologie vanwege de voortvarende wijze waarop zij mijn benoeming gerealiseerd hebben en tevens voor het begrip dat zij konden opbrengen toen ik daar nog even over wilde nadenken. De collegiale sfeer en mogelijkheden aan de Technische Universiteit Eindhoven heb ik altijd als zeer prettig en stimulerend ervaren.

Het Gebiedsbestuur Chemische Wetenschappen van NWO heeft een belangrijke rol gespeeld in mijn carrière. De steun uit het 'Jonge Chemici'-programma en de toekenning van de NWO-Pionier-subsidie in 1999 heb ik als een bijzondere stimulans ervaren en zijn doorslaggevend geweest voor het opzetten van een researchgroep met een nationale en internationale uitstraling.

'Concurreren en samenwerken' was enkele jaren geleden de, op het eerste gezicht paradoxale, titel van de strategienota waarmee het College van Bestuur van de TU/e de lijnen uitzette voor de toekomst. In een multidisciplinaire wetenschappelijke context is het noodzaak nationale en internationale samenwerking aan te gaan om op het hoogst mogelijke niveau te kunnen functioneren. Het is een illusie dat je alles zelf zou kunnen doen, maar het is ook een illusie dat samenwerken een doel op zichzelf is. Om een nuttige samenwerkingspartner te zijn moet je op je eigen terrein een concurrerende positie innemen. In deze optiek zijn samenwerken en concurreren onlosmakelijk met elkaar verbonden en is de titel perfect.

Ik prijs me gelukkig, dat ik met veel mensen heb mogen samenwerken. Naast wetenschappelijke resultaten heb ik er veel persoonlijke vrienden aan overgehouden.

De medewerkers van de capaciteitsgroep Macromoleculaire en Organische Chemie dank ik voor de zeer plezierige wijze waarop we constructief samenwerken om onderzoek, onderwijs en organisatie vorm te geven. Met vele collega's binnen de faculteiten Scheikundige Technologie en Technische Natuurkunde heb ik de afgelopen jaren mogen samenwerken in onderwijs en onderzoek. Collega's zijn een belangrijke bron van inspiratie en ik zie ernaar uit de samenwerking te continueren en te intensiveren.

Mijn speciale dank gaat uit naar 'mijn' (ex-)studenten, promovendi en postdocs. Zonder jullie tomeloze inzet, scherpe inzicht en frisse ideeën had ik hier vandaag helemaal niets kunnen vertellen of laten zien. Eeuwig dank daarvoor. Ik leef in de hoop dat jullie iets van mij geleerd hebben in de tijd die je doorbracht aan de TU/e en in de zekerheid dat het omgekeerde in ieder geval geldt. Ik heb met ieder van jullie uiterst plezierig, inspirerend en vrolijk kunnen samenwerken. Jullie bonte combinatie van doeners, denkers en dromers was en is voor mij elke dag weer een bijzondere ervaring.

De tijd ontbreekt helaas om iedereen met name te noemen, en ongetwijfeld zou ik zeer ten onrechte iemand net wat minder aandacht geven dan hem of haar toekomt. Ik wil echter niet eindigen voor ik bij een enkeling stilsta.

De belangrijkste persoon in mijn ontwikkeling als wetenschapper is Bert Meijer. Waarde Bert, de samenwerking met jou, de ondersteuning, de adviezen en het vertrouwen die je mij bijna dagelijks gegeven hebt, zijn bepalend geweest voor het feit dat ik hier nu een paar woorden tot je kan richten. Jouw voortvarende stijl van wetenschap, onderwijs en bestuur bedrijven, alles steeds met veel gevoel en oprechte interesse voor het belang en de toekomst van iedereen in je omgeving, zijn voor mij een voorbeeld waarin ik me alleen kan proberen te spiegelen. Met jouw passie voor het 'knippen en plakken met moleculen' heb je de afgelopen tien jaar ongelofelijk veel bereikt en er ligt ongetwijfeld nog veel moois in het verschiet. De recente bekendmaking dat de Spinoza-prijs, Nederlands hoogste wetenschappelijke onderscheiding, dit jaar aan jou is toegekend, toont aan dat anderen die bewondering met mij delen.



Ouders, familie en vrienden dank ik voor hun belangstelling, vriendschap en aanwezigheid vandaag. Tenslotte, maar zeker niet in de laatste plaats: Ria, Tim en Bas. Ik realiseer me, dat ik in mijn enthousiasme te vaak nog een proefje wil doen, te vaak denk iets te moeten opschrijven, te vaak iets wil afronden in de tijd die eigenlijk aan jullie toebehoort. Ik wil jullie bedanken voor het geduld dat jullie daarbij opbrengen en voor de steun en ontspanning die jullie bieden.

Daarmee wil ik afsluiten en u bedanken voor uw aanwezigheid en aandacht.

Ik heb gezegd.

Met dank aan Joke Apperloo voor haar waardevolle suggesties.

Referenties



- 1 H. Shirakawa, E.J. Louis, A.G. MacDiarmid, C.K. Chiang, A.J. Heeger, Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, $(\text{CH})_x$. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 1977, 578-580.
- 2 C.K. Chiang, C.R. Fincher, Jr., Y.W. Park, A.J. Heeger, H. Shirakawa, E.J. Louis, S.C. Gau, A.G. MacDiarmid, Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Phys. Rev. Lett.* 1977, 39, 1098-1101.
- 3 J.H. Burroughes, D.D.C. Bradley, A.R. Brown, R.N. Marks, K. Mackay, R.H. Friend, P.L. Burns, A.B. Holmes, Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature (London)* 1990, 347, 539-541.
- 4 R.H. Friend, R.W. Gymer, A.B. Holmes, J.H. Burroughes, R.N. Marks, C. Taliani, D.D.C. Bradley, D.A. Dos Santos, J.L. Brédas, M. Logdlund, W.R. Salaneck, Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature (London)* 1999, 397, 121-128.
- 5 J.H. Schön, S. Berg, C. Kloc, B. Batlogg, Ambipolar pentacene field-effect transistors and inverters. *Science* 2000, 287, 1022-1023.
- 6 J.H. Schön, A. Dodabalapur, Z. Bao, C. Kloc, O. Schenker, B. Batlogg, Gate-induced superconductivity in a solution-processed organic polymer film. *Nature (London)* 2001, 410, 189-192.
- 7 J.A.E.H. van Haare, E.E. Havinga, J.L.J. van Dongen, R.A.J. Janssen, J. Cornil, J.L. Brédas, Redox states of long oligothiophenes: two polarons on a single chain. *Chem. Eur. J.* 1998, 4, 1509-1522.
- 8 H. Sirringhaus, P.J. Brown, R.H. Friend, M.M. Nielsen, K. Bechgaard, B.M.W. Langeveld-Voss, A.J.H. Spiering, R.A.J. Janssen, E.W. Meijer, P. Herwig, D.M. de Leeuw, Two-dimensional charge transport in self-organised, high-mobility conjugated polymers. *Nature (London)* 1999, 401, 685-688.

-
- 9 E. Mena-Osteritz, A. Meyer, B.M.W. Langeveld-Voss, R.A.J. Janssen, E.W. Meijer, P. Bäuerle, Two-dimensional crystals of poly(3-alkylthiophene)s: Direct visualization of chain conformations of polymer folds in highly ordered 2D-lattices of poly(3-alkylthiophenes). *Angew. Chem. Int. Ed.* 2000, 39, 2680-2684.
- 10 E. Peeters, M.P.T. Christiaans, R.A.J. Janssen, H.F.M. Schoo, H.P.J.M. Dekkers, E.W. Meijer, Circularly polarized electroluminescence from a polymer light-emitting diode. *J. Am. Chem. Soc.* 1997, 119, 9909-9910.
- 11 M.M. Wienk, R.A.J. Janssen, High-spin cation radicals of meta-para-aniline oligomers. *J. Am. Chem. Soc.* 1997, 119, 4492-4501.
- 12 N.S. Sariciftci, L. Smilowitz, A.J. Heeger, F. Wudl, Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene. *Science* 1992, 258, 1474-1476.
- 13 R.A.J. Janssen, J.C. Hummelen, K. Pakbaz, N.S. Sariciftci, A.J. Heeger, F. Wudl, Photoinduced electron transfer from p-conjugated polymers onto Buckminsterfullerene, methanofullerenes and fulleroids. *J. Chem. Phys.* 1995, 103, 788-793.
- 14 P.A. van Hal, R.A.J. Janssen, G. Lanzani, G. Cerullo, M. Zavelani-Rossi, S. De Silvestri, A two-step mechanism for photoinduced electron transfer in an oligo(phenylene vinylene)-fullerene dyad. *Phys. Rev. B.* 2001, 64, 075206/1-075206/7.
- 15 A. Marcos Ramos, M.T. Rispens, J.K.J. van Duren, J.C. Hummelen, R.A.J. Janssen, Photoinduced electron transfer and photovoltaic devices of a conjugated polymer with pendant fullerenes. *J. Am. Chem. Soc.* 2001, 123, 6714-6715.
- 16 S.E. Shaheen, C.J. Brabec, N.S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromerz, J.C. Hummelen, 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2001, 78, 841-843.



- 17 M.A. Hempenius, B.M.W. Langeveld-Voss, J.A.E.H. van Haare, R.A.J. Janssen, S.S. Sheiko, J.P. Spatz, M. Möller, E.W. Meijer, A polystyrene-oligothiophene-polystyrene triblock copolymer. *J. Am. Chem. Soc.* 1998, 120, 2798-2804.
- 18 J.J. Apperloo, R.A.J. Janssen, P.R.L. Malenfant, J.M.J. Fréchet, Interchain delocalization of photoinduced neutral and charged states in nanoaggregates of lengthy oligothiophenes, *J. Am. Chem. Soc.* 2001, 123, 6916-6924.

Curriculum Vitae

René Janssen (1959) promoveerde in 1987 aan de Technische Universiteit Eindhoven op een experimentele en theoretische studie naar elektronspin-resonantie spectroscopie en kwantumchemische berekeningen van organische radicalen. Binnen de faculteit Scheikundige Technologie werkte hij sinds 1984 als universitair docent en vanaf 1991 als universitair hoofddocent op het gebied van de fysisch organische chemie.

In 1993 en 1994 was René Janssen verbonden aan University of California Santa Barbara waar hij in de laboratoria van prof.dr. Alan J. Heeger de fotofysische en fotochemische eigenschappen van geleidende polymeren en moleculaire materialen onderzocht.

Na zijn terugkeer aan de TU/e richtte hij zijn wetenschappelijke activiteiten op het maken, bestuderen en toepassen van organische moleculen en polymere materialen met elektrische, optische en magnetische eigenschappen.

Op voordracht van het Gebiedsbestuur Chemische Wetenschappen ontving hij in 1999 van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek een Pionier-subsidie voor zijn onderzoek naar 'Functional Nanoscopic Polymers'. Samen met Europese collega-onderzoekers ontving hij in 2000 de Descartes-prijs van de Europese Commissie.

Colofon

Productie:
Communicatie Service Centrum TU/e

Fotografie:
Rob Stork, Eindhoven

Vormgeving:
Plaza ontwerpers, Eindhoven

Drukwerk:
Drukkerij Lecturis, Eindhoven

ISBN: 90-386-1621-x

Postbus 513
5600 MB Eindhoven
Telefoon (040) 247 91 11

Bezoekadres:
Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven

