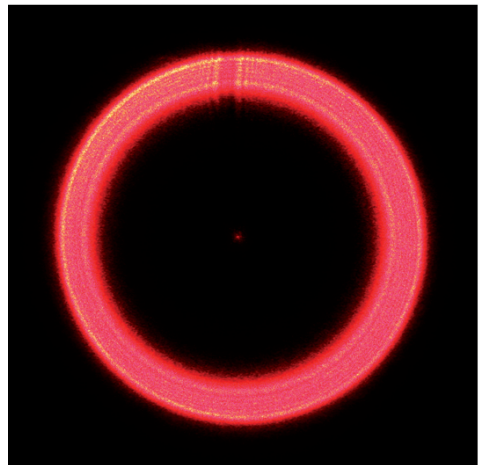


'LICHT-DONKER, 0-1, ZWART-WIT'

Uittreerede

Joseph Braat



10 oktober 2008

**TU**Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit Technische Natuurwetenschappen

“Mijnheer de Rector Magnificus, leden van het College van Bestuur, Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap, Zeer gewaardeerde toehoorders, Dames en heren”.

De titel van mijn afscheidsrede had veel korter gekund. No-nonsense schrijvers als Elsschot of Bordewijk zouden ‘Licht-donker, 0-1, zwart-wit’ hebben samengevat tot ‘Grijs’. Ik heb dit om promotionele redenen niet willen doen. Ook de medewerkers van de sectie Optica waar ik gedurende zoveel jaren mee hebben mogen samenwerken, zouden zich terecht negatief aangesproken kunnen voelen als hun vertrekkende hoogleraar het verleden, heden en toekomst van de onderzoeksgroep op deze manier zou samenvatten. Grijs is somber, middelmatig, deprimerend, mistig, uitzichtloos. Het past zeker niet bij een, moet ik misschien zeggen, *toekomstige* topuniversiteit die aantrekkelijk wil zijn voor haar studenten. Uitzonderingen op de regel zijn natuurlijk toegestaan zoals dit gebouw waarin we vanmiddag te gast zijn. We verlaten dus ‘Grijs’ en zullen nu de onderdelen van mijn meer gecompliceerde titel gaan aflopen om de verschillende aspecten van onderwijs en onderzoek in de optica te belichten. Het vakgebied van de optica heeft zich enorm verbreed in de afgelopen vijftig jaar. De uitvinding van de laser en de bestudering van kwantumverschijnselen in de optica hebben geleid tot het openleggen van nieuwe interessante en specialistische onderzoeksterreinen. De activiteiten van de Delftse sectie Optica hebben zich geconcentreerd op de theorie en de toepassing van beeldvormende technieken. Misschien had dit focus geconcretiseerd moeten worden in een nieuwe naam. Maar tot nu toe hebben we er de voorkeur aan gegeven om de brede naam Optica te blijven voeren. De inbedding in de afdeling Imaging Science and Technology, door mij vrij vertaald als Afbeeldingstechnieken, geeft voldoende aan waar het bij de sectie Optica van de TU Delft om ging en nog steeds om gaat.

Optica en onderwijs

Laten we nu in deze afscheidsrede, die ik ook gedeeltelijk als een afscheidscollege wil beschouwen, wat fundamentele fysische verschijnselen bestuderen die op eenvoudige wijze optisch gedemonstreerd kunnen worden. Het betreft hier de voortplanting van golven, lichtgolven wel te



Christiaan Huygens
(1629-1695)



Isaac Newton
(1642-1727)



Augustin Fresnel
(1788-1827)

verstaan, volgens de gangbare theorieën van vóór 1900 en van daarna. We gaan eerst een eind terug in de geschiedenis en beschouwen drie genieën

uit de optica van lang geleden. U Ziet in de figuur achtereenvolgens Huygens, Newton en Fresnel afgebeeld. Huygens figureert als een jeugdige, aristocratische sinjoor, Newton is geschilderd als veertiger, Fresnel heeft deze leeftijd nooit gehaald. Alle drie hebben zij grote invloed gehad op de optica van hun tijd. Huygens was vooral bekend in Nederland en Frankrijk en heeft naast zijn talrijke andere publicaties, veertien imposante delen in totaal, in 1690 een klein meesterwerkje het licht doen zien, het beroemde *Traité de la Lumière*, waarin hij zijn golftheorie van het licht beschrijft. De golftheorie van Huygens was conceptueel interessant maar gaf geen aangrijpingspunten voor kwantitatieve uitwerking en dat was een van de redenen dat zijn ideeën relatief onderbelicht bleven. Dit was des te meer het geval omdat de reus Newton een andere, mechanische theorie voorstond waarbij licht als een stroom deeltjes werd opgevat. De wetenschapshistorici erkennen natuurlijk unaniem het genie van Newton. Maar bijna allen zijn het er ook over eens dat hij qua karakter twistzoekend en overdreven gelijkhebberig was. Misschien heeft de schilder van het portret bewust of onbewust in de gezichtsuitdrukking iets van de verbeterheid vastgelegd waarmee Newton tot op zeer hoge leeftijd zijn polemieken voerde. Feit is dat de autoriteit van Newton weinig heeft heel gelaten van de golftheorie van Huygens waardoor deze vrijwel in de vergetelheid raakte. Hetzelfde is, door de niet aflatende negatieve bemoeienis van Newton, gebeurd met het werk van bijvoorbeeld Robert Hooke. Beiden hebben latere verdedigers nodig gehad om de plaats terug te winnen die hen objectief toekomt.

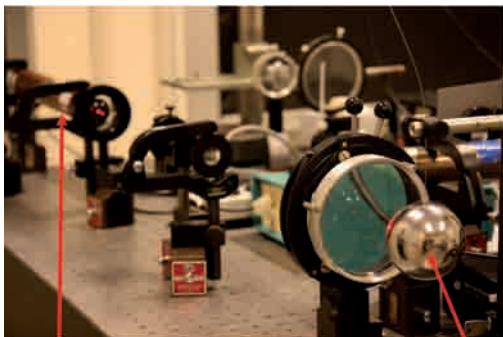
In het geval van Huygens kwam de redding van Fresnel, zo'n honderd dertig jaar na het verschijnen van het *Traité de la Lumière*. In het volgende plaatje ziet u wat de bijdragen van Fresnel aan de optica allemaal

A. Fresnel (1788, Broglie --- 1827, Ville-d'Avray)

- Kwantitatieve golftheorie van licht
 - Fresnel reflectie- en transmissiecoëfficiënten
 - Fresnel diffractie-integralen
 - Fresnel zônes en zôneplaat
 - Fresnel lens
 - Fresnel rhomb voor polarisatie-optiek
 - Experimenten interferometrie gepolariseerd licht
 - Transversaal karakter van licht
- Overleden aan longtering in 1827

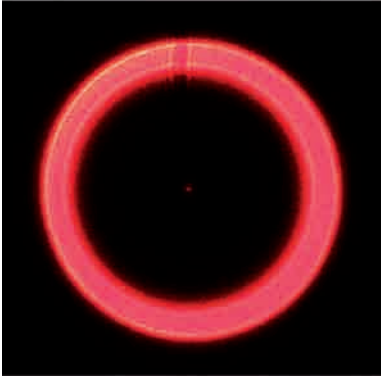


inhouden. Misschien zou de lijst nog veel langer geworden zijn als hij niet onverwacht, veel te jong, overleden was. Twee bijdragen aan de optica door Fresnel zijn ook voor de bredere fysica zeer interessant. Allereerst zijn uitgebreide en kwantitatieve golftheorie van lichtvoortplanting. In 1818 schreef hij een beroemd geworden opstel, het *Mémoire sur la diffraction de la lumière*, in de hoop in aanmerking te komen voor de jaarlijkse wetenschapsprijs van de Académie des Sciences. Het jurylid Poisson las de in die tijd controversiële verhandeling en concludeerde dat er in de schaduwruimte van een verlicht object toch licht gezien zou moeten worden. Poisson beschouwde deze conclusie als een voldoende argument om de theorie van Fresnel als fout te moeten bestempelen. Een tweede jurylid, Arago, nam echter de taak op zich het experiment uit te voeren en constateerde een zwak lichtvlekje in de schaduw van een zwart schijfje. Nu, 190 jaar later, kunnen we met een laser als lichtbron het experiment relatief



laser bundelvormende lenzen stalen kogel

eenvoudig herhalen. In de afgelopen weken hebben we het experiment van Arago met een stevige stalen kogel, die ziet u hier, nog eens over gedaan. De kogel heeft een diameter van ruim zes centimeter en is fraai rond. Een wat grotere rode laserbundel van bijna tien centimeter diameter valt in op de kogel en op een schermpje, enige meters achter de kogel, verschijnt



François Arago
1786-1853

een minuscule lichtvlekje, precies in het centrum van de schaduw die de kogel projecteert. U ziet een foto hiervan op het scherm geprojecteerd. Dit kleine lichtvlekje heeft de golftheorie van Huygens weer in het centrum van de belangstelling gebracht. Vandaag zullen we het bij dit resultaat laten, maar de natuurkundestudenten worden hier verder over 'doorgezaagd'. Zo is er geen fraai lichtvlekje waar te nemen in de schaduw van een houten bol of een bolvormig stuk was. Aan hen de taak om dit te verklaren, ook waarom ondanks Fresnel's theorie de maan toch de zon kan verduisteren. Ter afsluiting van deze beroemde proef in de optica wil ik nog vermelden dat er in Parijs weliswaar een bescheiden Rue Fresnel is maar vooral een imposante Boulevard Arago. In mijn optiek de mooiste boulevard van Parijs, indertijd met vier rijen dikke, rustieke kastanjabomen. Had men in Frankrijk soms meer waardering voor het experiment dan voor de theorie? De verklaring voor het verschil in posthume waardering is echter gelegen in het feit dat Arago later ook politiek actief geweest is en gedurende korte tijd, tijdens het revolutiejaar 1848, eerste minister van een tijdelijke regering was. Frankrijk, dat de monarchie definitief van zich afgeschud heeft, weet zijn republikeinse helden te eren! Alhoewel, recent veldonderzoek door de spreker lijkt aan te geven dat de waardering voor eerste minister

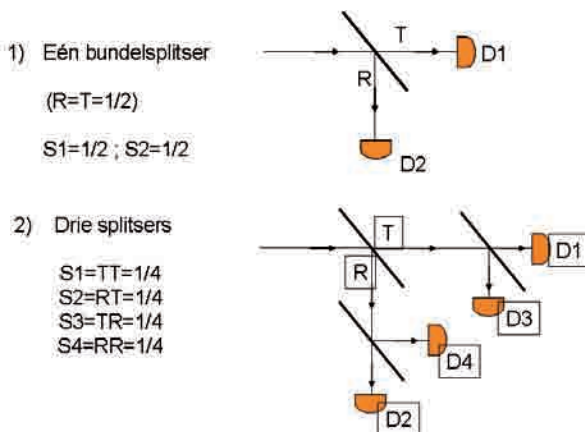


Arago zijn grenzen had. Een monument via een nationale inzameling is blijven steken bij de sokkel, geen standbeeld te zien. Toch blijkt er wel



degelijk een bronzen standbeeld geweest te zijn, maar dit is omgesmolten in de tweede wereldoorlog door de nationaal-socialistische bezetter. In 1994 heeft de stad Parijs, om Arago alsnog te eren, via een prijsvraag het voorstel van de Nederlandse kunstenaar Jan Dibbets goedgekeurd. Honderd vijfendertig ronde bronzen schijven zijn over een afstand van 12 kilometer willekeurig aangebracht op de meridiaan van Parijs die de sokkel doorsnijdt en door Arago als geodeet nauwkeurig in kaart is gebracht. Arago is nu gefragmenteerd aanwezig in Parijs.

Na deze uitweiding gaan we weer terug naar Fresnel en bekijken een ander aspect van zijn werk, de interferentie van golven. Interferentie is het verschijnsel dat optreedt wanneer een lichtgolf gesplitst wordt en de deelgolven via verschillende wegen elkaar uiteindelijk weer treffen. Thomas Young was de eerste die interferentieproeven met licht uitvoerde in het begin van de negentiende eeuw. De golftheorie van Fresnel was in staat om zijn experimenten fraai te bevestigen. Ook conceptueel zijn golven en de optelling van de effecten die ze teweegbrengen bij interferentie goed te plaatsen. Een ideale situatie: eenduidige experimenten met een elegante en inzichtelijke theorie ter verklaring, meer kan de natuurwetenschap zich niet wensen! In 1900 kwam er echter een kleine rimpeling in het oppervlak van de rustige natuurkundevijver. Om bepaalde experimentele resultaten te verklaren zag de fysicus Planck zich genoodzaakt licht te kwantificeren, op te hakken in kleine deeltjes, iets wat hem in 1918 de Nobelprijs voor natuurkunde heeft opgeleverd. Die uiterst minieme lichtdeeltjes of, beter gezegd, lichtenergiepakketjes werden later fotonen genoemd. Er ontstond nu het probleem dat we de tot nu toe zo goed ‘begrepen’ interferentieverschijnselen ook moeten kunnen duiden via een lichttheorie waarin niet golven maar deeltjes, de fotonen, de dienst uitmaken. Ons in diverse leerboeken uitgebreid beschreven interferentie-



experiment begint vandaag met een bundelsplitser, een zogenaamde halfspiegel. Een lichtbundel wordt in gelijke delen gesplitst doordat de fotonen reflecteren aan zo'n spiegel (R) of doorgelaten worden (D), beide

gebeurtenissen met een kans van 50%. De twee lichtdetectoren, $D1$ en $D2$ in het eerste experiment, meten gelijke intensiteiten, ieder de helft van de intensiteit van de totale invallende bundel. In een tweede experiment voeren we even een zijsprong uit door nog twee halfdoorlatende spiegels toe te voegen waardoor het licht zich gaat verspreiden over vier detectoren. De signalen op de vier detectoren zijn tot stand gekomen doordat de fotonen allerlei keuzes maakten met de hiervoor aangevoerde waarschijnlijkheden, respectievelijk TT , RT , TR en RR , en het verbaast niet dat het experiment vier identieke metingen oplevert met de relatieve waarde van $1/4$. Dat resultaat blijft ongewijzigd als we de invallende lichtintensiteit zó laag maken dat we ervan verzekerd kunnen zijn dat altijd slechts één foton tegelijkertijd in de opstelling aanwezig is. Nu gaan we naar experiment 3,

3) Twee splitsers gecombineerd ($R=T=1/2$)

$$S1 = TR + RT$$

$$S2 = TT + RR$$

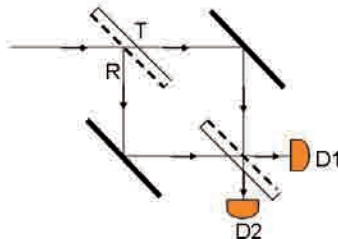
Mogelijkheden:

3a) $S1 = 1/2$, $S2 = 1/2$.

3b) $S1 = 1$, $S2 = 0$.

3c) $S1 = 0$, $S2 = 1$.

3d) $S1 = x$, $S2 = 1-x$.



een echte interferometer waarbij de door de eerste halfdoorlatende spiegel gescheiden bundels weer tot overlapping gebracht worden door de tweede halfdoorlatende spiegel. Hierna valt het licht op de detectoren $D1$ en $D2$. De interferometer is symmetrisch, dat wil zeggen dat de beide mogelijke wegen tussen de twee halfspiegels precies gelijk zijn! Zoals in de figuur aangegeven zijn de signalen op de twee detectoren een optelling van iedere keer twee mogelijkheden: $S1=TR+RT$, $S2=TT+RR$. Welke mogelijkheden voor de signaalwaarden op de twee detectoren zijn er nu? Een eerste veronderstelling is dat het signaal van $D1$ de som is van de signalen $S2$ en $S3$ uit het vorige experiment en het signaal van $D2$ de som van $S1$ en $S4$. Dit zou wel betekenen dat het opvouwen van de lichtweg om interferentie mogelijk te maken geen effect heeft gehad. We vinden dan het meetresultaat

volgens 3a) in de figuur, beide signalen gelijk aan $1/2$. Welke andere mogelijkheden zouden er nog kunnen zijn die door een gewijzigd gedrag van de deeltjes in de interferometer veroorzaakt worden? Stel dat een foton dat bij de eerste halfspiegel gereflecteerd is een voorkeur heeft voor transmissie bij de tweede halfspiegel en omgekeerd, dit om een gemiddeld neutraal gedrag voor reflectie en transmissie te geven. Dan vinden we het meetresultaat volgens 3b). Nog een andere mogelijkheid zou kunnen zijn dat het ene lichtdeeltje gemiddeld een voorkeur voor transmissie heeft en een ander lichtdeeltje voor reflectie. Die soorten lichtdeeltjes komen dan in precies gelijke hoeveelheden voor. Het zou betekenen dat we meetresultaat 3c) zouden krijgen. Als we helemaal onbevooroordeeld zijn laten we alles open en kiezen voor meetresultaat 3d); het enige dat we hier eisen is behoud van energie. Nu komt zoals altijd in de fysica het uur van de 'waarheid', de meting! Het blijkt dat het meetresultaat overeenkomt met onze veronderstelling 3b). De fotonen zouden dus graag om en om gereflecteerd en doorgelaten worden op de halfspiegels. Maar dit geeft weer conflict met het eerdere tweede experiment met de vier gelijke detectorsignalen voor RR , TT , RT en TR in de opstelling die geen interferentie mogelijk maakte. In zo'n patstelling bedenken we een nieuw experiment dat hopelijk als scheidsrechter kan optreden bij de vraag welke veronderstelling de juiste zou zijn. We verlaten de symmetrie in de opstelling. Met een paar extra spiegels hebben we de mogelijkheid een variabel wegverschil aan te brengen in de interferometer. Het meetresultaat is nu meer genuanceerd, 'grijzer' zo u wilt. Alle signaalwaarden tussen 0 en 1 komen voor,

4) Twee splitsers gecombineerd ($R=T=1/2$)

+ weglengteverschil

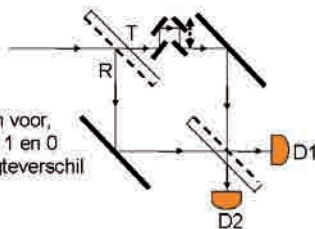
$$S1 = TR + RT$$

$$S2 = TT + RR$$

Uitslag experiment 4 ?

a) $S1 + S2 = 1$

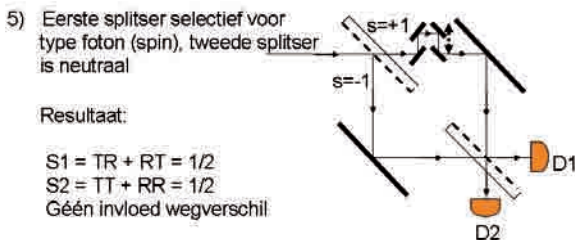
b) Alle signaalniveau's komen voor, $S1$ en $S2$ oscilleren tussen 1 en 0 als functie van het weglengteverschil met een periode L



afhankelijk van het weglengteverschil tussen de beide wegen die de fotonen kunnen afleggen. Maar qua begrip hebben we nu een groot probleem. We

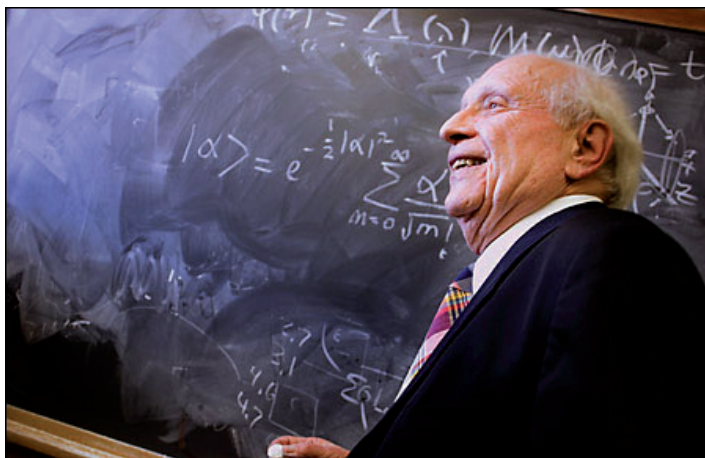
hebben het lichtniveau nog altijd zo laag gekozen dat er slechts één foton tegelijkertijd in de interferometer aanwezig kan zijn. Hoe is het mogelijk dat een foton, dat altijd slechts één van beide wegen kan nemen, tegelijkertijd informatie verkrijgt over de lengte van het andere interferometerpad? En dan vervolgens aan de hand daarvan in staat is te beslissen met welke waarschijnlijkheid er reflectie of transmissie bij de tweede halfspiegel moet plaatsvinden? En dit spookachtig gedrag van de fotonen blijft bestaan als de interferometerwegen heel groot gekozen worden, tot kilometers lang! Een poging dit begripvacuüm te maskeren is het geven van een naam aan het verschijnsel: *“een foton is in staat tot zelfinterferentie”*.

Maar het wordt nog vreemder indien we het experiment verfijnen zoals in de volgende figuur. De eerste halfspiegel is nu in staat de aanstormende fotonen qua type te onderscheiden. Er zijn twee soorten fotonen met een verschillende rotatiezin of ‘spin’, linksom of rechtsom, met genormeerde waarden van +1 of -1. Onze nieuwe eerste halfspiegel laat de fotonen met spin -1 reflecteren en de andere doorgaan. Nu blijkt het meetresultaat weer overeen te komen met dat van het experiment 2), zonder interferentie. Beide detectoren geven hetzelfde signaal van 1/2 en dit signaal hangt niet meer af van het weglengteverschil. Blijkbaar verdwijnt het geheimzinnige vermogen tot *“zelfinterferentie”* zodra we een uitspraak kunnen doen



over de wegkeuze van de fotonen. Deze wegkeuze was inderdaad niet deterministisch in de twee voorgaande interferometrie-experimenten terwijl we in het experiment 5) absolute zekerheid hebben over het type fotonen in iedere weg. In moeizame bewoording: *“een foton is in staat tot zelfinterferentie op voorwaarde dat de interferentieweg niet vastgesteld kan worden”*. Of: *“het vermogen tot zelfinterferentie verdwijnt indien het fotontraject voorspelbaar is”*.

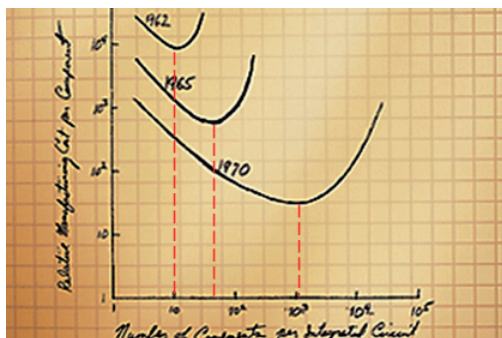
Wat is de conclusie voor de student die zich dit zogenaamde verschijnsel van kwantuminterferentie moet eigen maken? Het verschijnsel is namelijk veel algemener en geldt niet alleen voor fotonen maar ook voor materiedeeltjes, mits klein genoeg. Het begrip van interferentie dat opgebouwd was via de golftheorie van licht blijkt voor fotonen en kwantumdeeltjes niet meer eenduidig toepasbaar. We moeten ons in vreemde bochten wringen om de conclusies op te schrijven van de kwantumexperimenten. Begrip voor het spookachtig gedrag van de kwantumdeeltjes is moeizaam bij een eerste kennismaking en dat blijft ook daarna het geval. Voor de student is het een goede gelegenheid om een stap terug te doen en te aanvaarden dat we met onze macroscopische ervaringswereld de atomaire wereld en kleiner niet kunnen duiden. Wat we wel kunnen is deze nieuwe verschijnselen beschrijven. In taal gaat dat vaak lastig gegeven onze moeizame formuleringen van zoëven. Maar in formulevorm kan deze vreemde wereld toch efficiënt en helder beschreven worden. En mét voorspellende waarde voor nieuwe experimentele omstandigheden, hét sterke punt van een goede en breed toepasbare theorie. De theorie van de kwantumoptica is nog jong, pas ontwikkeld vanaf de jaren zestig. In 2005 heeft professor Roy Glauber op tachtigjarige leeftijd de Nobelprijs gekregen voor zijn pionierswerk uit die tijd. Het voorafgaande is een fraaie illustratie van het feit dat de fysica niet de ambitie kan hebben verschijnselen te kunnen verklaren; we kunnen slechts beschrijven en



nederig het antwoord schuldig blijven indien naar meer gevraagd wordt. Deze beperking komt ook fraai tot uiting in de oude benaming van de natuurwetenschappen: ‘proefondervindelijke wijsbegeerte’. Dit vanwege het verschil met de oorspronkelijke wijsbegeerte, lange tijd de enige wetenschap, met in principe willekeurig te kiezen uitgangspunten waarbij in een complex samenspel van reden, logica en taal de wetenschappelijke conclusies getrokken worden. Maar bij de proefondervindelijke wijsbegeerte is de speelruimte beperkt door de dwingende kracht van het experiment. Filosofische of theologische bespiegelingen spelen hierbij geen rol meer, deze moet de natuurkundige bij wijze van spreken reserveren voor de avonduren of voor het weekeinde. Dat er over dit beperkte bereik van de natuurkunde, “wél beschrijven maar niet verklaren”, wel eens een andere indruk ontstaat bij het grotere publiek ligt aan de beoefenaren van de fysica, niet aan de ambitie van de natuurkunde en de experimentele wetenschappen in het algemeen.

Optica en onderzoek

In het tweede deel van mijn rede wil ik eerst ingaan op de rol die de optica gespeeld heeft en nog speelt in de micro- en nano-elektronica. De welbekende ‘computerchips’, zoals geheugens en processoren, hebben een indrukwekkende ontwikkeling meegemaakt sinds hun eerste primitieve realisatie in 1962. In dit was weer zo’n vijftien jaar nadat de eerste halfgeleidercomponent, de transistor, gedemonstreerd was. De vaart in de halfgeleiderindustrie wordt erin gehouden door de zogenaamde ‘wet’ van Moore. Ik wil even stilstaan bij deze wet die natuurlijk helemaal geen wet is

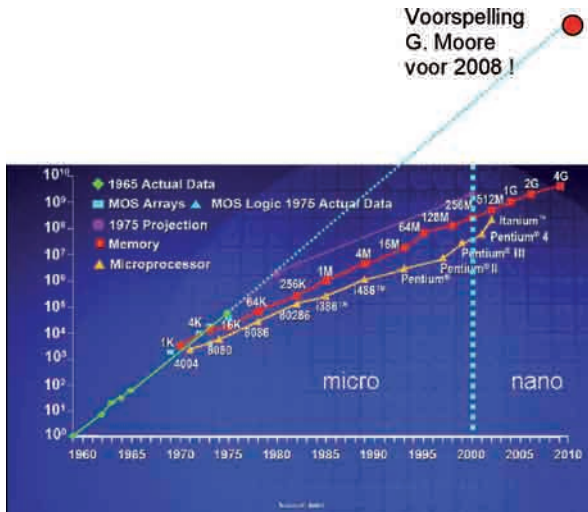


maar een observatie. Die observatie was gebaseerd op zeer weinig gegevens en de zogenaamde wet die eruit gedestilleerd is had het dan ook behoorlijk mis. In de figuur ziet u de gegevens die Gordon Moore van de halfgeleiderfirma Intel gebruikte om zijn beroemde extrapolatie te doen. Horizontaal staat uitgezet het aantal componenten per geïntegreerd circuit, verticaal de fabricageprijs per component. Kort samengevat: in de toekomst wordt alles compacter en goedkoper. De rode gestippelde lijnen in de linkerfiguur zijn door mij toegevoegd en de daarbij behorende minima hebben aan de basis van Moore's wet gelegen. Volgens Moore's oorspronkelijke extrapolatie zouden ons ongehoorde weldaden ten deel gevallen zijn. In onze computers zouden minstens een miljoen maal meer componenten gezeten hebben, 1 PetaByte (PB) in plaats van 1 GigaByte (GB). Om al die transistoren of geheugencellen te huisvesten zou een USB-



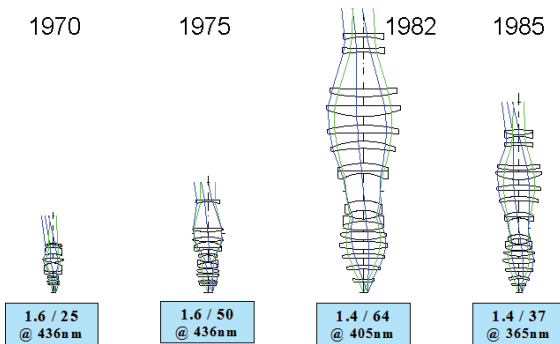
geheugen ook de afmeting gekregen hebben die u in de figuur hierboven ziet, door Gordon Moore zelf in een van zijn voordrachten op relativerende wijze gebracht. Ik vermoed dat hij zich als wetenschapper wat ongemakkelijk begon te voelen bij de gedurfde conclusies die Intel als koploper op chipsgebied uit zijn oorspronkelijke data wenste te trekken. De voorspellingen van Moore waren dus duidelijk niet bedoeld voor de lange termijn van bijna vijftig jaar die wij (of liever gezegd de firma Intel) ervan gemaakt hebben. Waarom waren de voorspellingen van Gordon Moore te optimistisch? Een belangrijke reden hiervoor is het feit dat de technologie in het begin nog met grote stappen voorwaarts kon stormen. De patronen op de chips werden gemaakt via contactafdruk, eenvoudig weg door de siliciumplak en het

masker met de transistorpatronen krachtig tegen elkaar te drukken, eventueel zelfs vast te schroeven en dan het geheel onder een blauwe lamp te houden. Dit soort rudimentaire technieken waren in die beginperiode nog mogelijk. De verfijningen in het optisch aanbrengen van de transistorpatronen waren pas later nodig, bijvoorbeeld door het projecteren van een verkleind

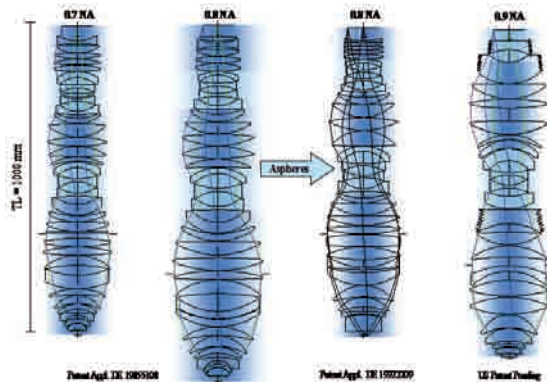


beeld van een masker op de siliciumplak en dit beeld dan te ontwikkelen. Toen deze techniek ingezet moest worden was de vaart er meteen wat uit. U ziet dit in de marsroute-figuur voor de halfgeleiderindustrie (International Technology Roadmap Semiconductors, 2007) waarin horizontaal de tijd is uitgezet en verticaal het aantal elektronische componenten op een geïntegreerd circuit. De voorspelling van Moore, gebaseerd op de getallen uit de jaren zestig, moest aangepast worden omstreeks 1975 om in het spoor te komen met de weerbarstige werkelijkheid. De verkleinende optische projectietechnieken die toen ingezet werden waren welkom en adequaat, maar de voortgang van jaar op jaar in dichtheid op de siliciumplakken was kleiner geworden. Als u de dichtheidscurve vervolgt naar de jaren tachtig en negentig in het micrometergebied en onder het 100-nanometergebied sinds het jaar 2002, valt het op dat de curve de neiging heeft vlakker te worden. De reden daarvoor, gezien vanuit de optica, wordt duidelijk uit de volgende twee

figuren die ontleend zijn aan een publicatie uit 2002 van W. Ulrich van de firma Carl Zeiss. In de eerste figuur ziet u de lenzenstelsels die aanvankelijk gebruikt werden voor het aanbrengen van de patronen op een geïntegreerd circuit. Het waren lenzenstelsels die uit de professionele fotografie en cartografie voortkwamen en gebruikt werden met diepblauw licht. De reden voor deze keuze was de volgende: met kortgolvig licht kunnen in principe kleinere details afgebeeld worden en het opnamemateriaal, fotoresist, is



alleen gevoelig in het diepblauwe of ultraviolette deel van het spectrum. In de tweede figuur ziet u het type lenzen dat ontwikkeld en gefabriceerd is bij Carl Zeiss sinds de jaren negentig, onder andere onder gebruikmaking van niet-bolvormige oppervlakken, de zogenaamde asferische oppervlakken. Deze lenzensystemen vinden toepassing in de belichtingssystemen voor computerchips, de ‘wafersteppers’, van het Nederlandse bedrijf ASML uit



Veldhoven. Deze onderneming is ontstaan uit een activiteit van het bedrijf Philips dat in 1974 voor het eerst een waferstepper demonstreerde op het Philips Natuurkundig Laboratorium. De optische, mechanische, regeltechnische en elektronische technieken die daar gecombineerd werden hebben het bedrijf ASML een start gegeven die geleid heeft tot de positie van wereldleider met ruim zesduizend medewerkers en een jaaromzet in 2007 van bijna 4 miljard Euro. Dat is het zesde deel van de huidige omzet van het vroegere moederconcern. Welke takken van de optica zijn interessant voor een dergelijk hoogtechnologisch bedrijf? In de sectie Optica bedenkt men voor het bedrijf Carl Zeiss nieuwe wiskundige optimalisatiemethoden om de huidige zeer prijzige projectielenzen, u moet denken aan bedragen van 5 miljoen Euro, optimaal te kunnen ontwerpen en fabriceren. We werken aan geavanceerde optische metingen van de kwaliteit van deze lenzen waarvan alle oppervlakken en onderlinge posities tot op de nanometer nauwkeurig beheerst moeten worden. We proberen de optimale vorm te berekenen van de op de chips te projecteren maskerpatronen. Van de op het siliciummateriaal aangebrachte patronen proberen we de karakteristieke dimensies op sub-nanometerschaal vast te leggen, dit om de opbrengst in het chipproductieproces mede te maximaliseren. Bij deze optische onderzoeksonderwerpen is de klassieke optica voor lenzen en spiegels niet voldoende als gereedschap en worden de optische verschijnselen in het kader van de bredere theorie van het elektromagnetisme behandeld. Onder mijn voorganger Frankena was deze trend al breed ingezet via onderzoek op het gebied van golfvoortplanting in optische fibers en planaire optische circuits; in de afgelopen jaren zijn we met deze aanpak intensief verder gegaan binnen de afbeeldende optica en onder de huidige hoogleraar Urbach zal deze richting zeker versterkt voortgezet worden. Maar er moet gezegd worden dat de cruciale optische bijdrage sinds 1975 aan de halfgeleiderindustrie, het optisch projecteren van de chippatronen, hortend en stotend tot stilstand zal komen. Het jaar 2020 lijkt een goede gok in dit verband. Het grote voordeel van de optische projectietechniek, de enorme effectieve snelheid van dataoverdracht van meer dan 1 TeraByte (ofwel de inhoud van 200 DVD-schijven) per seconde, zal dan teniet gedaan worden door het feit dat de details op de chips optisch niet meer verder verkleind kunnen worden. Een nieuwe optische projectietechniek die gebruik maakt van spiegelsystemen en extreem ultraviolet licht voor de belichting zie ik persoonlijk niet als een succesvolle opvolgingskandidaat vanwege de zeer

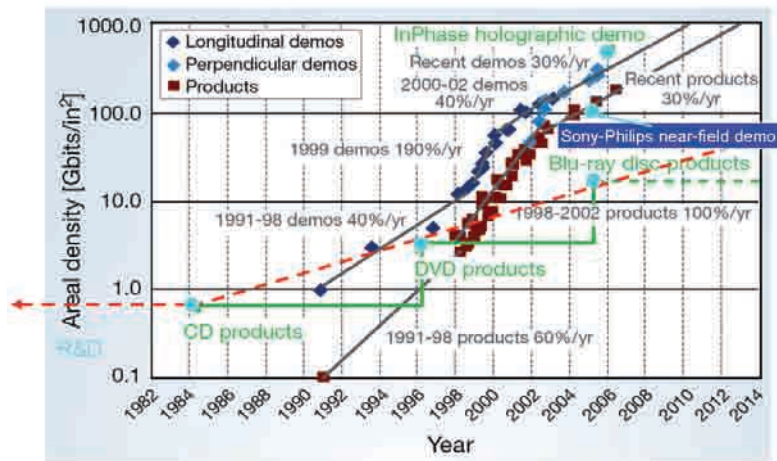
hoge kosten en de nog onopgeloste systeemproblemen, zelfs na meer dan 15 jaar intensief onderzoek. De grote vraag is wie het stokje in 2020 kan overnemen om ook in de vijftig jaar daarna steeds verder geavanceerde dataverwerking en rekenkracht mogelijk te maken. De tijd dringt! Afb beeldende elektronenoptische projectiesystemen hebben in de jaren negentig de strijd om de opvolging verloren. Nieuwe contactafdrukmethoden worden voorgesteld, nanobuisjes gaan ingezet worden, elektronenoptische aftasttechnieken worden bestudeerd, er is zeker beweging in het veld. Maar het mag allemaal niet te lang duren, het stadium van de veelbelovendheid moet op een gegeven moment gepasseerd worden. Wie zal in de nabije toekomst kunnen demonstreren dat geldt: “Bij een goed nieuw idee zit alles mee”? Ik ben benieuwd! Komt er geen revolutionaire nieuwe technologie om onze computerchips goedkoop en snel te blijven maken op nanometerschaal, dan zullen we ons moeten behelpen met de huidige, nog wat verder geoptimaliseerde techniek, zoals we ook nu nog gedwongen worden in auto’s en treinen te rijden met hooguit de dubbele snelheid van honderd jaar geleden.

Een tweede onderwerp binnen het optisch onderzoek van de afgelopen tijd wil ik ook kort met u bespreken aangezien dit illustreert hoe wispelturig en onvoorspelbaar onderzoek, ontwikkeling en markt zich kunnen gedragen. Het gaat hier over de u allen welbekende optische dataopslag met de CD- en de DVD-schijven. De optische dataopslag is al zo’n veertig jaar



oud, met de firma Philips als een van de belangrijke pioniers, maar het heeft toch zo’n vijftien jaar geduurd voordat in 1983 het eerste werkelijk succesvolle product, de CD-schijf voor digitale muziek, op de markt verscheen. De oorspronkelijk analoge videoplaten die de magnetische videocassette recorder moesten gaan vervangen werden geen doorslaand

succes door het ontbreken van de opnamemogelijkheid. De ruimtelijke datadichtheid op een optische schijf was indertijd ongelooflijk hoog. Geavanceerde microscopietechniek werd plotseling voor weinig geld de huiskamer ingebracht. In de marsroute­figuur van het Information Storage Industry Consortium uit 2006 waarin de ruimtelijke gegevens­dichtheid van optische systemen en magnetische systemen uitgezet wordt als functie van de tijd, ziet u dat de gegevens­dichtheid van de optische media in het



begin op eenzame hoogte stond. Er was eenvoudigweg geen concurrentie! De optische schijf is een gestandaardiseerd product. Zo'n standaard wordt voor langere tijd vastgelegd om houvast te geven aan de gebruiker en gemakkelijke data-uitwisseling mogelijk te maken. Verbeteringen komen daarom stapsgewijs tot stand, in de praktijk zowat om de twaalf jaar. Dit leidde in 1996 tot het DVD-systeem dat niet meer op audio alléén maar vooral op video-opslag en natuurlijk ook op computertoepassingen gericht was. DVD heeft zich bewezen in de markt. Net als CD is het systeem beschrijfbaar en zelfs herschrijfbaar. De videocassette­recorder, langzamerhand een fossiel uit de zeventiger jaren geworden, heeft het loodje gelegd. Maar daarna zijn de kaarten drastisch anders geschud. De magnetische harde schijf, een hermetisch afgesloten opslagkastje dat in de computer een cruciale rol speelt, begon een stormachtige ontwikkeling door te maken. Omdat er bij magnetische schijfsystemen inwendig geen

standaardisatie nodig is, vertoont de opslagcapaciteit van deze producten een continue stijgende lijn. Dit kunt u in de marsroutefiguur zien aan de twee, vanaf het jaar 1990 steil omhoog gaande lijnen met elk jaar meerdere nieuwe producten. De optische systemen volgen qua opslagcapaciteit gemiddeld de gestippelde rode lijn en zijn inmiddels op grote afstand gezet. Zelfs de meest recente optische standaard, Blu-ray, verbleekt bij het geweld van de magnetische harde schijven. Twijfels bekruipen mij wat betreft het toekomstige succes in de markt van deze nieuwe blauwe optische informatiedrager. Er zijn toch nog nieuwe optische ontwikkelingen gaande, bijvoorbeeld de zogenaamde ‘nabije-velde’ optische plaat (zie de groene cirkel met Sony-Philips in de figuur) waarbij de informatiedrager in vrijwel optisch contact langs de laatste lens van het objectief beweegt. Interessant onderzoek op dit gebied vanuit het Philips Natuurkundig Laboratorium heeft geleid tot twee promoties bij de sectie Optica, maar dat is helaas niet voldoende voor een marktsucces. Daarnaast bestaat er een professioneel optisch dataopslagsysteem dat gebaseerd is op holografie maar waarvan de prijs prohibitief hoog zal blijven voor consumententoepassingen. In de marsroutefiguur ziet u niets over de snelle vlucht die wissbare halfgeleidergeheugens, de welbekende USB’s, genomen hebben. Ook deze walsen de optische schijven onder de grond. Het ziet er dus somber uit voor de toekomst van de optische dataopslag. De bestaande systemen zullen zeker hun plaats kunnen behouden, nieuwe systemen zoals Blu-ray zullen het moeilijk krijgen. Dat is de reden van mijn titelonderdeel 0-1. Allereerst was dit bedoeld omdat de optica van telecommunicatie en dataopslag digitaal geworden is, maar dan had ik waarschijnlijk 1-0 genoteerd. De 0-1 duidt op een verloren wedstrijd, in dit geval de wedstrijd van de afgelopen 25 jaar met de magnetische dataopslag. Een superieure start in de eerste helft wordt alsnog tenietgedaan in een dramatisch verlopen eindfase. De trainers worden nu weggestuurd, de spelers moeten omzien naar andere clubs. Maar het was inhoudelijk, ook voor mij persoonlijk, een erg leuke wedstrijd om in mee te spelen!

Is er dan géén onderzoekstoekomst in de optica? Het antwoord op deze vraag is zeer nadrukkelijk ontkennend. De optica bloeit als nooit tevoren! Ik noemde u al de ‘elektromagnetische’ optica die in heel veel fijnzinnige optische technieken en componenten nodig is voor analyse en vervolgens ingezet moet worden bij het ontwerp van nieuwe optische structuren en

producten op de micro- en nanoschaal. De elektromagnetische optica is ook duidelijk aanwezig in de Terahertztechnologie die in de sectie onderzocht wordt. Ik zal daar niet over uitweiden omdat de pas benoemde Antonie van Leeuwenhoekhoogleraar Planken daar binnenkort een intrede over zal houden. Daarnaast is er de interactie van gefocusseerde optische velden met oppervlaktestructuren bij optische afbeelding. Ik wil hierbij speciaal vermelden de activiteit op het gebied van de uitgebreide Nijboer-Zernike diffractietheorie. Een intensieve samenwerking met de collega's Dr. Janssen en Dirksen van Philips Research en verscheidene promovendi van de sectie Optica heeft in de afgelopen zes jaar tot interessante nieuwe meettechnieken voor lenskwaliteit geleid. Voor astronomische toepassingen, in een structurele samenwerking met TNO, worden afbeeldingstechnieken met meerdere aperturen tegelijkertijd bestudeerd. Met het Nederlands Meetinstituut voeren we precisie metingen op submicronschaal uit over afstanden van tientallen meters. Medische toepassingen van optische afbeeldings- en analysemethoden worden bestudeerd en geïmplementeerd. De lijst kan naar believen uitgebreid worden met andere interessante onderwerpen. Het probleem is eerder een geconcentreerde selectie te maken die wetenschappelijk, onderwijskundig, industrieel en financieel veelbelovend is. Afhankelijk van met wie gesproken wordt, moet de volgorde van deze vier bijwoorden wel eens gewijzigd worden. Maar vandaag staat wetenschappelijk voorop.

Zwart-wit

Dan is het nu tijd voor het korte laatste deel van mijn rede. Onder de dekmantel zwart-wit kan ik bij deze gelegenheid wat gepeperde uitspraken doen. Degenen die mij kennen weten dat het zo'n vaart niet zal lopen. Ik heb altijd oog voor de vele uitzonderingen op de zwart-witte regel, de nuance, de 'grijze' realiteit. Feit is dat zwart-wit uitspraken of stellingen wel wat in gang kunnen zetten. Hier is er zo een:

- *een universiteit moet haar onderzoek valoriseren via een octrooiportefeuille!*

U snapt al dat ik het hier niet mee eens ben, tenminste indien dit gebeurt op de manier van de TU Delft en de meeste andere universiteiten. Het is voor iedereen duidelijk dat het goede en zelfs excellente onderzoek dat aan een universiteit plaatsvindt potentieel via octrooien verzilverd

zou moeten kunnen worden. In deze tijden van bezuinigingen is dit een aantrekkelijke gedachte. Maar ook hier gaan de kosten voor de baat uit. Een slagvaardig octrooi beleid vereist korte lijnen tussen de onderzoekers en een groot aantal deskundige en ervaren octrooigemachtigden die, met als basis de vaak verbrokkelde ideeën van de onderzoekers, een coherente en brede octrooiaanvraag kunnen schrijven. En dit in een zeer korte tijd om de publicatievrijheid zo weinig mogelijk te beperken. Deze octrooigemachtigden van topkwaliteit kosten veel geld. Daarnaast kan het nodig zijn wetenschappelijke publicaties in het eerste jaar na octrooi-indiening te vermijden om de wettelijke mogelijkheid te benutten alsnog ongepubliceerde waardevolle aanvullingen toe te voegen die de scherpte en daardoor de marktwaarde van het later verleende octrooi vergroten. Een jaar lang niet publiceren is een groot probleem voor een universitair medewerker die afgerekend wordt op aantallen publicaties en citaties. De huidige situatie bij de TU Delft is tweeslachtig. Eigenlijk wil men, heel begrijpelijk, een octrooiaanvraag zo snel mogelijk overdragen aan een derde tegen een forfaitair bedrag. Kassa! Daarvoor moet een zakenpartner, dat kan een bedrijf zijn of een sponsororganisatie, interesse tonen en een uitspraak doen. Maar deze instellingen blinken vaak ook niet uit in slagvaardigheid, de universitaire onderzoeker moet zelf buiten de deur via allerlei moeizame hiërarchische lagen zijn idee zien te verkopen. Dat kost veel tijd en verzandt meestal. Nettoresultaat: grote vertragingen bij het publiceren en uiteindelijk geen doorgezet octrooi. De oplossing van dit probleem ligt volgens mij bij een gewijzigde grondhouding van de universiteit, in de zin dat men bereid is serieus te investeren in een groter eigen en gefocuseerd octrooipakket met de benodigde menskracht ter begeleiding. En er moet een duidelijke waardering komen voor de onderzoeker bij een verleend octrooi, dit ter compensatie van de eventueel gemiste publicaties. Een bundeling van de benodigde octrooikennis via de stichting 3TU zou misschien een oplossing kunnen bieden?

Dan weer zwart-wit:

- *Europa is 'uit' !*

Europa lijkt tijdelijk 'uit' in de nationale politiek omdat het zo gemakkelijk is Europa als zondebok te gebruiken voor de lokale problemen. Maar in de universitaire onderwijs- en onderzoekswereld is Europa naar mijn mening een noodzaak. Hoger onderwijs en onderzoek zijn bij uitstek internationaal en profiteren van internationale samenwerking. Dat de praktische drempels

soms hoog zijn, ook bureaucratisch, is een probleem dat opgelost moet worden maar dit mag geen reden zijn om het gezicht af te wenden van Europa. Zelf heb ik een deel van mijn energie gewijd aan de oprichting en lancering van de European Optical Society die naar mijn mening een belangrijke rol te vervullen heeft en nu ook vervult bij het organiseren van Europese conferenties, het doen publiceren in Europese wetenschappelijke tijdschriften, het faciliteren van onderzoeksaanvragen op Europees niveau en het Europees samenwerken op onderwijsgebied. Lokaal, in de sectie Optica, is een Europese Erasmus Mundus Masteropleiding binnengehaald met de naam “Optics in Science and Technology”, afgekort *OpSciTech*. Deze opleiding geeft een zeer welkome aanvulling op het eigen beperkte bestand aan afstudeerders en brengt potentiële buitenlandse promovendi in een vroeg stadium in contact met de TU Delft. Verder zou ik nog een lans willen breken voor de wetenschappelijke mogelijkheden op Europees terrein voor de metrologie, de wetenschap van het meten en van het bedenken, ontwikkelen en beheren van ultranauwkeurige standaarden. De universiteit in Delft heeft het voordeel het Nederlandse nationale meetinstituut als buur in de directe omgeving te hebben. Een samenwerking op onderwijs- en onderzoeksgebied tussen beide instellingen ligt voor de hand, vindt al plaats maar kan zeker verder uitgebreid worden, onder andere door te profiteren van het Europese onderzoeksprogramma op metrologiegebied, EMRP! Europa is dus zeker niet ‘uit’, het kan eenvoudig niet weggedacht worden!

Rest mij ter afsluiting nog dank uit te spreken. Allereerst, het dichtst bij huis, aan alle vaste medewerkers van de sectie Optica, zowel de wetenschappelijke als de ondersteunende staf. Het was een waar genoegen met jullie samen te mogen werken. De wens om kwaliteit te leveren was altijd prominent aanwezig en ook de bereidheid elkaar te helpen waar dat nodig was. Op losse basis gaan we nu met deze samenwerking op bescheiden wijze verder. Verder dank aan de promovendi die in het onderzoek een essentiële rol vervullen, niet in het minst door hun enthousiaste en gedreven manier van werken. Een tijdelijke dip in zo’n vierjarige promotieperiode, wetenschappelijk of psychologisch, is een natuurlijk en onvermijdelijk verschijnsel, maar ik heb gelukkig slechts bij uitzondering zoiets als permanent verschijnsel hoeven te constateren. Dank ook aan de afstudeerders, aspirant bachelors en masters. Helaas zijn

er momenteel nog steeds te weinig aanwezig in de opleiding, ook al geven de nieuwe instroomcijfers hoop voor de toekomst. Dank ook aan de leiding en de medewerkers van de afdeling Imaging Science and Technology voor de harmonieuze en collegiale samenwerking in de afgelopen tien jaar dat ik sectieleider was. En dank ook aan de leiding van de faculteit Toegepaste Natuurwetenschappen voor het bevorderen van het onderwijs en het onderzoek in de natuurkunde en de optica in het bijzonder op het grotere platform van de TU Delft. En natuurlijk veel dank, Ninanna, Eleni en Joris, voor jullie begrip voor het feit dat de Technische Universiteit Delft en het Natuurkundig Laboratorium van de firma Philips wat onevenredig veel van mijn tijd in beslag namen in de afgelopen vijfendertig jaar.

Ik heb gezegd!

