

Intreerede 'Zie het licht' van Martin van Exter, vrijdag 18 november 2016, 16:15-17:00  
(Hoogleraar Optica bij Natuurkunde)

## Welkom en Introductie

Mijnheer de Rector Magnificus,  
Leden van de universitaire gemeenschap,  
Dames en heren,

Wat u vanmiddag van mij kunt verwachten, zal u duidelijk worden als ik mijn keuze voor de titel 'Zie het licht' verklaar. Die titel koos ik omdat hij lekker kort is. En op meerdere manieren kan worden uitgelegd. Zelf heb ik er al vijf verzonnen:

1. Licht = Optica = het Onderwerp van mijn leerstoel. Als mensen mij vragen wat ik onderzoek en ik wil kort antwoord geven, dan zeg ik soms 'Ik doe iets met licht' of 'Mijn vak is licht'.
2. 'Zie het licht' is ook beeldspraak. Ik hoop dat u tijdens mijn verhaal af en toe het licht zult zien. Bijvoorbeeld wanneer u hoort waar mijn enthousiasme voor natuurkunde en optica vandaan komt. Of wanneer u zich iets voor kunt stellen bij het technische gedeelte van mijn oratie.
3. De beeldspraak 'Zie het licht' heeft ook betrekking op de inzichten van mijn voorgangers; al die reuzen in de wetenschap op wier schouders mijn collega's en ik nog dagelijks staan. Ook zij hadden af en toe zo'n prachtig 'eureka moment', wanneer zij nieuwe inzichten verwierven en beter begrepen hoe mooi de natuur en de natuurkunde in elkaar zitten.
4. De vierde manier waarop 'Zie het licht' kan worden uitgelegd, is in de tegenstelling Licht versus Zwaar. Wetenschap is 'zwaar', omdat ze exact en volledig probeert te zijn, en dat ook moet zijn. Toch pleit ik ervoor om wetenschap vooral ook 'licht' te zien. Door steeds, soms schijnbaar naïeve vragen te blijven stellen en deze vooral ook op intuïtie te beantwoorden, vóórdat we de wiskunde erbij halen. De woorden 'Physical insight' en 'Intuitive approach' heb ik dan ook in meerdere publicaties gebruikt [1].
5. Dit figuurlijke gebruik van het woord licht versus zwaar geldt ook voor de studie Natuurkunde. Natuurkunde is een pittige studie, waar je een flinke dosis wiskunde bij nodig hebt en hard voor moet werken. Maar dat betekent niet dat je de studie te zwaar moet opvatten. Natuurkunde moet je doen omdat je het leuk vindt. En omdat je wilt begrijpen hoe de natuur in elkaar zit. Als student wil je liever licht en intuïtief werken, gewoon met pen en papier, en zoeken naar onderlinge verbanden en het totaalplaatje. De technische aspecten en de details moet je natuurlijk ook leren beheersen, maar van die intuïtieve aanpak geniet je vaak het meest.

Ik houd van structuur. Daarom vertel ik u nu alvast dat de rest van mijn verhaal bestaat uit drie delen:

- Ik begin met een korte omschrijving van wat Natuurkunde is, wat het uniek maakt en waarom ik gefascineerd ben door dit prachtige vak.
- Daarna geef ik een uitgebreidere omschrijving van mijn rol binnen de natuurkunde en in het bijzonder van de onderzoeksgebieden in de optica waar ik mij momenteel op richt.
- Tot slot geef ik u mijn Visie op Onderwijs. Geen verrassing denk ik. Zoals velen van u weten heb ik sinds 2014 een dubbele of eigenlijk drievoudige baan. Ik ben zowel onderzoeker, docent als opleidingsdirecteur van de bachelor Natuurkunde en de master Physics in Leiden.

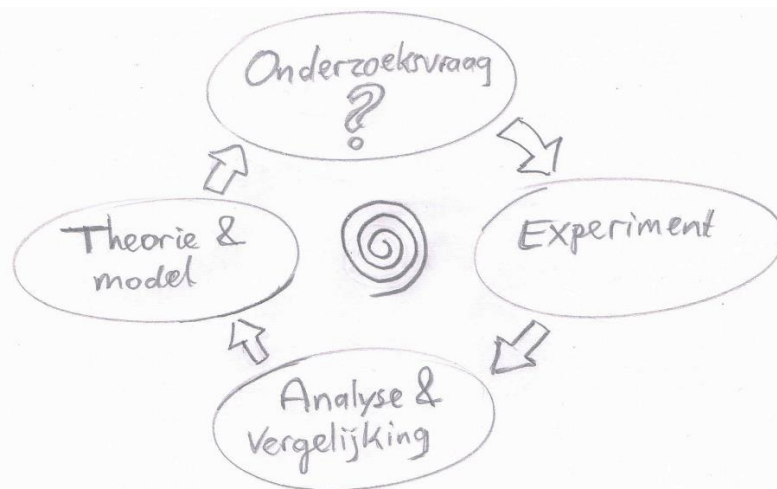
Deze duidelijke splitsing in drie delen betekent hopelijk dat u wakker blijft tijdens mijn verhaal. Het geheel gaat namelijk langer duren dan de 15 minuten die geldt als de maximale tijdsduur waarop publiek aandachtig kan luisteren en waarop de lengte van de meeste TED Talks zijn afgestemd [2]. Door het opknippen in drie delen hoop ik drie keer uw maximale aandacht te krijgen.

## Fascinatie voor Natuurkunde

Mijn fascinatie voor Natuurkunde begon al vroeg. Ik was zo'n kind dat overal met z'n handen aan zit en dat voortdurend wil weten hoe alles werkt. Zo'n kind dat apparaten het liefst sloop om te zien wat er in zit, soms tot wanhoop van mijn ouders. Een geboren onderzoeker dus. Extreme eigenschappen van de natuur fascineerden mij en als jochie van tien heb ik nog een oranje schriftje volgeschreven met de eigenschappen van de planeten in ons zonnestelsel. Met informatie en plaatjes die ik had overgenomen uit een boek van de openbare bibliotheek in Heiloo. En nog steeds wil ik begrijpen hoe de natuur in elkaar zit. Nog steeds ben ik gefascineerd door haar schoonheid. De natuur is ingenieuzer dan ik en mijn collega-wetenschappers voor mogelijk hielden.

Wat maakt Natuurkunde zo bijzonder? Natuurkunde begint met goed kijken en nadenken over wat je ziet. Natuurkunde beschrijft eigenlijk gewoon de waarnemingen van alledag, van de wereld om ons heen, alleen exacter en wiskundiger. En in die exacte wiskundige beschrijving van de natuur zit nu precies de kracht van de natuurkunde en haar voorspellende waarde. In dit kader citeer ik graag een uitspraak van Eugene Wigner die praat over de 'unreasonable effectiveness of mathematics in natural sciences' en die eindigt met de fraaie slotzin 'The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve' [3]. Het is inderdaad verrassend om te zien hoe logisch de natuur in elkaar zit en hoe goed de taal van de wiskunde haar beschrijft. Wiskunde is 'unreasonably effective' omdat de natuur blijkbaar een hele logische structuur heeft. En daar zijn wij als onderzoekers erg blij mee! En u als publiek zou dat ook moeten zijn, want als er geen heldere natuurkundige wetten waren zouden we niets kunnen voorspellen. Zéker niet het weer van morgen of volgende week.

Als natuurkundige ben ik niet alleen nieuwsgierig, maar ook kritisch op mijn eigen meetresultaten. Ik houd van 'knoppen draaien in het lab', maar daar is al een aantal jaren minder tijd voor. Ik houd van de combinatie van experiment en theorie. Ik houd van de onderzoeksspiraal, die via het stellen van vragen loopt naar experimenteren, naar het vergelijken met de theorie en het aanpassen daarvan tot het stellen van nieuwe onderzoeksvragen. Lang geleden, toen ik promovendus was bij professor Ad Lagendijk, viel het mijn collega's op dat ik soms gevangen zat in een redentatie die zij de 'Exterloop' hebben genoemd. Het probleem treedt op als je een meting doet die niet klopt met de theorie en die je dus kan beschrijven met de zin 'Het kan niet, maar toch is het zo'. Het kan niet, want de theorie voorspelt iets anders. Maar toch is het zo, want ik meet het. De Exterloop kan frustrerend zijn, want publicatie van onbegrepen meetresultaten is op z'n zachtst gezegd lastig. Maar het kan ook het begin zijn van extra inzichten en nieuwe kennis. Mijn advies aan alle wetenschappers is daarom 'Wees altijd kritisch op je meetresultaten. Vraag je steeds af of je ze begrijpt en wat je ervan leert. En wees niet bang voor de Exterloop.'



Als experimentator heb ik ook te maken met de spiraal van wetenschap en techniek, die door de beroemde natuurkundige Casimir in 1969 als volgt is omschreven: 'Techniek gebruikt de resultaten uit wetenschappelijk onderzoek, maar met vertraging. Wetenschappelijk onderzoek gebruikt de resultaten uit

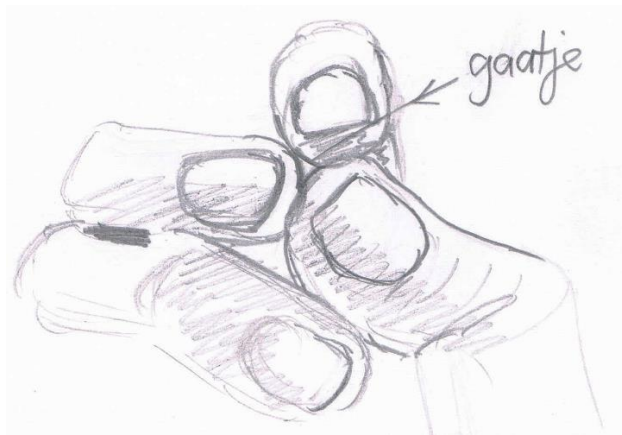
de techniek zonder vertraging.'[4] Wetenschap en techniek hebben elkaar hard nodig en versterken elkaar. Ik steun dan ook het pleidooi van de Nederlandse Nobelprijswinnaar Ben Feringa voor extra investeringen in fundamenteel onderzoek. Zonder voldoende fundamenteel onderzoek NU kunnen we in de toekomst weinig grote technologische doorbraken verwachten. En dat fundamentele onderzoek mag best breed van opzet zijn, want een bedrijfsmatige sturing van valorisatie is lastig als veel succesvolle toepassingen juist ontstaan uit ontdekkingen waar je niet bewust naar op zoek was. Laat wetenschappers alstublieft meer spelen minister!

### Fascinatie voor Optica

Licht is overal en optica is superbelangrijk, zowel in ons dagelijks leven als in de natuurkunde. Het oog is het belangrijkste zintuig van de mens. Andere waarnemingen zoals reuk, tast, gehoor en smaak spelen slechts een bescheiden rol in het spervuur van beelden waaraan we dagelijks worden blootgesteld. Dat mensen zo visueel zijn ingesteld maakt het extra leuk om over dit onderwerp te praten. Zo kan ik u bijvoorbeeld hier en nu een eenvoudig natuurkundig experiment met licht laten zien! Het werkt als volgt:

Door veroudering verliest de oogbol veel van z'n flexibiliteit en krijg je als 50plusser voor kortere afstanden vaak problemen met scherpstellen; je hebt een leesbril nodig. Mij is hetzelfde overkomen, maar ik vergeet die leesbril geregeld mee te nemen. Om ook zonder bril op korte afstanden scherp te zien verzond ik deze truc:

Maak met drie vingers een klein gat. Plaats dit gat vlakbij één oog en kijk er doorheen. U zult zien dat het beeld dan veel scherper wordt en dat deze scherpste afhangt van de grootte van het gat, dat als verkleinde pupil fungeert. Mijn gezin vindt het gênant nerd-gedrag als ik deze truc in de praktijk gebruik. Maar ik vind het gewoon heel handig als ik mijn bril weer eens vergeten ben. Nu ik sinds kort een varifocus bril draag hoef ik dit simpele experiment niet meer uit te voeren. Ze zijn er blij mee thuis.



Ook in wetenschappelijk onderzoek en bij technische toepassingen worden veel waarnemingen met licht gedaan. Dit is het terrein van de klassieke optica, waarbij licht als een elektromagnetische golf of zelfs als een bundel van lichtstralen wordt beschreven. De klassieke optica biedt ons heel veel mogelijkheden. Denk aan het optisch vangen van kleine deeltjes en het meten van minieme verplaatsingen in een tastmicroscop. Of aan kleur-opgeloste beelden voor inspectie in de industrie of de beveiliging. En ook sterrenkundigen werken vooral met licht. Maar dan wel met heel veel vormen van licht, want ik gebruik de term 'licht' hier bewust lichtvoetig. Ik vind namelijk dat alle frequenties of spreekwoordelijke kleuren van het elektromagnetische veld gewoon onder de optica vallen. Alle elektromagnetische golven gedragen zich immers volgens dezelfde natuurkundige wetten.

Veel doorbraken in de Natuurkunde zijn verbonden met de optica. Zo is het idee voor de quantummechanica mede ontstaan omdat Max Planck de waargenomen kleurverdeling van warmtestraling alleen kon begrijpen als hij deze straling verdeelde over pakketjes met een vaste hoeveelheid energie. Max Planck heeft hier in

1918 de Nobelprijs voor gekregen. Albert Einstein volgde in 1921 met zijn Nobelprijs voor de beschrijving van het foto-elektrisch effect dat deze energiepakketjes veroorzaken. Pas vijf jaar later gaven Frithiof Wolfers en Gilbert Lewis deze energiepakketjes hun definitieve naam 'foton'[5].

Onderzoek naar het deeltjes- of quantumkarakter van licht leverde aan het eind van de vorige eeuw ook overtuigende experimentele bewijzen voor het voorspelde vreemde gedrag van samengestelde quantumsystemen. Hierbij verandert een meting aan één systeem niet alleen de toestand van dat systeem, maar ook de toestand van het hiermee verstrengelde systeem. Zelfs als deze twee systemen niet met elkaar zijn verbonden en niet snel genoeg met elkaar kunnen communiceren. Albert Einstein vond deze verstrengeling maar vreemd. Hij omschreef haar als 'Spukhafte Fernwirkung', of 'spooky action at a distance' en heeft steeds gedacht dat de quantumtheorie onvolledig was [6].

## **Ons onderzoek in de Optica**

Wat voor onderzoek wordt er dan in mijn groep gedaan? Dat onderzoek heeft licht als centraal thema, maar is verder nogal breed. Als ik het kort moet typeren in twee woorden kies ik voor 'Nano' en 'Quantum'. Ik hoop dat u na afloop van mijn verhaal aan uw vrienden en familie kunt navertellen wat deze begrippen inhouden.

Het voorvoegsel 'Nano' geeft aan dat wij onderzoek doen aan structuren die ongelooflijk klein zijn en afmetingen hebben die je in nanometers uitdrukt. Ter vergelijking, een mensenhaar is ongeveer 50 micrometer dik en een nanometer is een duizendste van een micrometer. Dus onderdelen van onze structuren zijn kleiner dan een honderdste van de dikte van een haar. Je kunt licht binnen zulke kleine afstanden concentreren omdat de golflengte van licht ook heel klein is. Verder helpen metalen nanostructuren ons om het licht nóg compacter op te sluiten. Onderzoek aan nanostructuren is belangrijk, omdat de compacte opsluiting van licht zorgt voor een sterkere interactie of wisselwerking tussen licht en materie. Hiermee kunnen we onder andere betere zonnecellen en LED lampen maken.

Het voorvoegsel 'Quantum' geeft aan dat wij onderzoek doen waarbij het quantum of deeltjeskarakter van het licht belangrijk is. Wij doen experimenten waarbij we merken dat licht bestaat uit een (vaak onregelmatige) stroom van lichtdeeltjes met een vaste hoeveelheid energie, de eerder genoemde fotonen. Onderzoek aan quantumoptica is belangrijk omdat het ons leert hoe de wereld van de quantummechanica in elkaar zit en hoe licht en materie er hun energiepakketjes uitwisselen. Ik vertelde u al dat onderzoek naar het quantumkarakter van licht aan het begin van de vorige eeuw de aanzet gaf tot de quantummechanica en dat latere experimenten bewezen dat samengestelde quantumsystemen verstrengeld kunnen zijn. Deze verstrengeling is essentieel voor de ontwikkeling van quantumcommunicatie en quantumcomputers. Quantumcommunicatie is een vorm van communicatie met quantumtoestanden die superveilig is en niet ongemerkt kan worden afgeluisterd, want afluisteren is een vorm van meten en metingen hebben altijd invloed op de toestand van een quantumsysteem. Een quantumcomputer kan berekeningen uitvoeren die op een klassieke computer vele malen langer zouden duren.

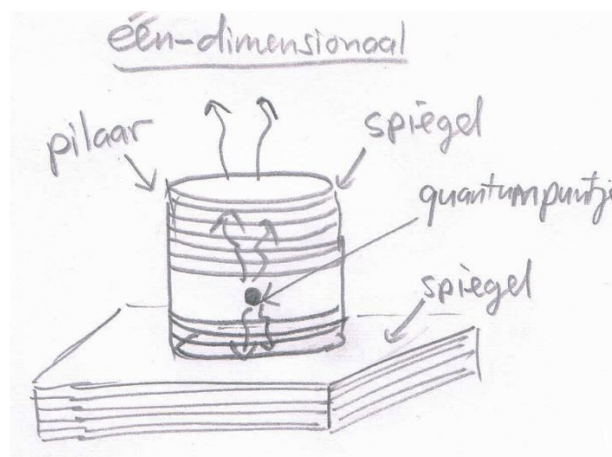
Na deze algemene omschrijving van ons onderzoek met de voorvoegsels 'Nano' en 'Quantum' geef ik u nu wat details over onze drie belangrijkste onderzoekslijnen; te omschrijven met de sleutelwoorden 'Quantumpuntje', 'Oppervlakteplasmon' en 'Lichtverstrooiing'.

Quantumpuntjes, in het Engels 'Quantum Dots', zijn nanometer-grote gebiedjes van één type halfgeleider materiaal die zijn ingekapseld in een andere halfgeleider. In het Nederlands worden deze gebiedjes meestal quantumputjes genoemd, omdat ze elektrische lading kunnen invangen, maar het woord quantumpunt is eigenlijk netter omdat er geen echte put zit in het materiaal. Quantumputjes gedragen zich als kunstmatige atomen, maar zijn groter dan atomen en hebben daardoor een sterkere wisselwerking met licht. Een ander voordeel van deze kunstmatige atomen is dat je hun eigenschappen kunt aanpassen. Verder kunnen we voor hun productie profiteren van tientallen jaren ervaring van de halfgeleiderindustrie; een industrie die de

computerchips maakt voor uw computers, mobieltjes, tv's, en andere producten. Ja, waar stoppen ze geen slimme elektronica in?

De ontwikkeling van de halfgeleiderindustrie is trouwens een typisch voorbeeld van de spiraal van Casimir; 'Ontwikkelingen in de wetenschap en de techniek hebben elkaar nodig en versterken elkaar'. Onze systemen worden gemaakt in de groep van Dirk Bouwmeester aan de universiteit van Santa Barbara in Amerika. Deze groep bouwde in de loop van vele jaren heel veel expertise op, en die hebben we hard nodig. Onze systemen zijn ingewikkeld en er kan helaas veel fout gaan. In Leiden doen wij de finishing touch.

In ons onderzoek gaan wij op zoek naar de grenzen van de quantumoptica, waarbij het deeltjeskarakter van licht opvallend zichtbaar is. Om deze grenzen te bereiken, plaatsen we onze quantumpuntjes tussen twee hoogreflecterende spiegels, waartussen het licht meer dan duizend keer heen en weer loopt en als het ware blijft rondzingen. U kent vast wel het veelvoudige spiegelbeeld dat je ziet als je tussen twee vrijwel evenwijdige spiegels staat, zoals vroeger op de kermis. Onze kunstmatige atomen voelen zich net zo vreemd en gedragen zich tussen de spiegels anders dan daarbuiten. Om het licht NOG beter op te sluiten, etsen we kleine pilaartjes in het materiaal. Hierdoor creëren we een omgeving waarin het aantrekkelijk is om licht uit te zenden en dan vooral in de richting langs het pilaartje. De goede optische opsluiting en de sterke wisselwerking zorgen in ons systeem voor allerlei spannende quantumeffecten. Ons systeem is uniek. We kunnen er dwars doorheen kijken en kunnen dus ook aan het doorgelaten licht meten. Verder zijn onze pilaren groter dan die van andere groepen, waardoor het oppervlak voldoende ver weg ligt om storende effecten op het quantumpuntje te voorkomen. Kortom, we hebben een uniek systeem om trots op te zijn.



De laatste jaren leerden we veel over het vreemde gedrag van opgesloten quantumpuntjes. In onze experimenten belichten we ons systeem meestal met een zwakke lichtbundel, waarvan de golflengte ongeveer tussen de twee spiegels past. Wij meten dan de eigenschappen van het licht dat spiegelt en van het licht dat wordt doorgelaten. Wij meten niet alleen de intensiteit en de trillingsrichting/polarisatie van dit licht, maar ook de variaties hierin; variaties die ons tonen hoe de lichtdeeltjes/fotonen over de bundels zijn verdeeld. De optische wisselwerking in ons systeem is zó sterk dat de aanwezigheid van één enkel quantumpuntje voldoende is om een systeem dat eerst veel licht doorlaat te veranderen in een systeem dat bijna geen licht meer doorlaat. We meten ook sterke niet-lineaire effecten, waarbij de aanwezigheid van één enkel foton het gedrag van een tweede foton beïnvloedt en waarbij de transmissie van een toestand met één foton dus anders is dan de transmissie van twee fotonen. Het doorgelaten licht krijgt hierdoor een apart quantummechanisch karakter, terwijl het invallende licht gewoon zuiver klassiek is. Wij doen onze metingen ook als functie van het elektrisch veld dat we over het quantumpuntje aanleggen en krijgen hiermee een schat aan informatie over dit systeem; waardevolle puzzelstukjes met extra kennis waar ik u verder niet mee wil vermoeien.

Een belangrijke uitdaging voor de toekomst is het bruikbaar maken van de elektronspin in de quantumpuntjes voor het opslaan en verwerken van quantuminformatie. Het Engelse woord spin verwijst hier naar spinnen of ronddraaien en geeft aan dat elektronen op ronddraaiende tolletjes lijken. Het vullen van een quantumpuntje met één enkele elektronspin is relatief eenvoudig; door een elektrische spanning aan te leggen kunnen we elektrische lading toevoegen en deze lading heeft van nature een spin. De uitdaging zit hem vooral in het gevecht tegen de ruis vanuit de omgeving; een omgeving die ons systeem op allerlei manieren probeert te beïnvloeden. Dit gevecht en het perfectioneren van onze kunstmatige atomen zijn uitdagingen waar wij nog zeker jaren werk aan zullen hebben. Een volgende stap in ons onderzoek kan dan de overgang worden naar een platform waarin meerdere systemen op één chip met elkaar samenwerken. Onze droom van een geïntegreerd quantumoptisch netwerk dat allerlei quantummechanische bewerkingen kan verrichten komt dan in zicht: een soort quantumcomputer.

Er doen meer groepen onderzoek naar 'systemen met quantumpuntjes'. In Denemarken en Frankrijk startten collega's zelfs spin-off-bedrijven, in de verwachting dat er een commerciële markt voor is. En daar hebben ze vast gelijk in, want de beste systemen functioneren al als bijna ideale één-foton bronnen; bronnen die met een spreekwoordelijke druk op de knop altijd precies één foton uitzenden. Nooit meer. Nooit minder. Zulke één-foton bronnen zijn essentiële bouwstenen in veel apparaten die op basis van quantummechanische principes willen werken. Daar moet dus een markt voor zijn! Wij houden het voorlopig bij fundamenteel onderzoek op dit terrein, want daar ligt onze kracht. De Europese Unie onderschrijft het belang van de quantummechanica en zegde hier onlangs veel onderzoeksgeld voor toe. Na twee eerdere grote onderzoeksprojecten komt er nu een EU Flagship over een derde thema: quantumtechnologie [7]. Goed nieuws dus.

Mijn tweede onderzoekslijn gaat over oppervlakteplasmonen. Oppervlakteplasmonen lijken op fotonen, maar verschillen van deze lichtdeeltjes doordat ze vastgeplakt zitten aan het oppervlak van een metaal, waarbij hun elektromagnetische veld op korte afstand van het oppervlak snel verzwakt. Het metaal concentreert het optische veld op de nanometerschaal, zoals een bliksemafleider het elektrisch veld concentreert. Om dit duidelijker uit te leggen zou ik het liefst gebruik maken van een overheadprojector of een krijtbord, zoals bij mijn hoorcolleges, maar de traditie schrijft voor dat er bij een oratie geen uitgebreide visuele middelen mogen worden gebruikt. Best jammer als je vakgebied Optica is.

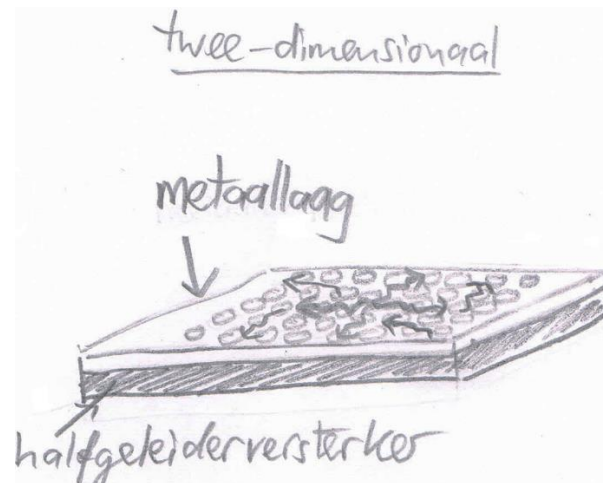
Het onderzoek aan metaaloptica en oppervlakteplasmonen is een typisch voorbeeld van veranderde interesses in natuurkundig onderzoek. Al tijdens mijn promotie in Amsterdam werkte ik met oppervlakteplasmonen en schreef ik het proefschrift 'Ultra-fast spectroscopy of vibrational excitations and surface plasmons'. Mijn vrouw kent de titel nog steeds uit haar hoofd. Het waren prachtige experimenten [8], maar de tijd was er nog niet rijp voor. Tien jaar later veranderde dat toen Thomas Ebbesen een baanbrekend experiment deed aan metaallagen met gaatjes en liet zien dat oppervlakteplasmonen hierbij een cruciale rol spelen [9]. Zijn ontdekking viel samen met de ontwikkeling van de metaaloptica en de lithografie op nanometer schaal en deze ontwikkelingen versterkten elkaar. Sindsdien is er weer volop belangstelling voor metaaloptica, nabije-veld optica en optische metamaterialen; kunstmatige materialen met spannende eigenschappen.

Ook wij hebben ons steentje bijgedragen aan dit onderzoeksveld. Onder andere met experimenten aan het transport van quantumverstrengeling door oppervlakteplasmonen, met metingen aan verstrooiing van oppervlakteplasmonen aan gaatjes in metaallagen en met een experimenteel bewijs van de voorspelde nabije-veld bijdrage aan de transmissie van licht door gatenroosters.

Een groot probleem van oppervlakteplasmonen is dat zij afzwakken, omdat elektronen in het metaal meetrillen en bij botsing een deel van hun energie verliezen. Een paar jaar geleden kozen we voor de uitdaging om deze verliezen te compenseren met een optische versterker. Best spannend om te proberen, want je kunt zo'n truc wel verzinnen, maar je weet nooit zeker of het werkt. Gelukkig konden we gebruik

maken van de expertise van de Technische Universiteit Eindhoven. Na hard werken was het geweldig om te zien dat de beoogde compensatie ook echt werkte en dat de optische versterker de verliezen zó goed compenseerde dat ons ontwerp zelfs ging laseren.

Onze laser is anders dan andere lasers. Hij werkt met oppervlakteplasmonen in plaats van licht. Onze laser is ook anders omdat het licht vastgeplakt zit op het oppervlak maar verder alle kanten op kan bewegen in een platte TWEE dimensionale pannenkoek-achtige structuur. Hierbij verstrooit het aan de gaatjes in het metaal, die als een soort spiegeltes werken. In een gewone laser, zoals deze laserpen, gaat het licht alleen maar op-en-neer in één richting, dus ééndimensionaal.



Wij willen precies begrijpen hoe de natuur werkt en doen hiervoor allerlei zorgvuldige en nauwkeurige metingen. In dit fundamentele onderzoek vinden we dat de werking van oppervlakteplasmonlasers wordt bepaald door een subtiele balans tussen verstrooiing, absorptie en versterking. Verder merken we dat de ruimtelijke verdeling van het waargenomen licht heel anders kan zijn dan dat van de laser, omdat de omzetting van oppervlakteplasmonen naar fotonen afhangt van de symmetrie van het elektromagnetische veld. Voor sommige symmetrieën is er bijna geen verstrooiing en spreken we van 'dark modes', terwijl andere patronen van het veld juist extra veel verstrooien en daarom 'bright modes' worden genoemd. Zo'n mode kun je vergelijken met een toon van geluid; een 'dark mode' is dan een toon die je niet hoort omdat hij in de luidsprekerbox blijft hangen. Het gedrag van oppervlakteplasmon lasers is intrigerend en roept vele onderzoeksvragen bij ons op. Wij zijn dagelijks hard op zoek naar de antwoorden. Een spannend avontuur.

In mijn derde onderzoekslijn bestuderen we de combinatie van lichtverstrooiing en absorptie. De belangrijkste onderzoeksvraag in dit project is hoe verstrooiing van licht optimaal kan bijdragen om zonnecellen en LED lampen beter te laten werken. We weten al lang dat verstrooiing een belangrijke sleutel is, omdat het licht hierdoor langer heen en weer kaatst en meer tijd in het materiaal doorbrengt. Onze bijdrage is dat we kijken naar ruimtelijke variaties in de gevoeligheid en proberen het licht precies in die gebiedjes te krijgen waar de zonnecel of LED het gevoeligst is. We combineren hiervoor lichtverstrooiing met de juiste patronen van het aangeboden licht. Dit onderzoek doen we samen met de Universiteit Twente, de trekker van dit onderzoek, en met enkele andere partners in Nederland.

## Visie op onderwijs

Ruim twee jaar ben ik nu directeur van de opleiding Natuurkunde en geniet ik van het enthousiasme en de inzet van studenten en docenten. Met deze ervaring en die uit het verleden ontwikkelde ik een persoonlijke visie op onderwijs, de kerntaak van onze universiteit. Een visie die ik graag met u deel.

Studeren is iets dat studenten vooral zélf moeten doen. Een docent kan en moet studenten hiertoe motiveren en hen de juiste weg wijzen, door passend studiemateriaal te kiezen of te ontwikkelen. De docent kan de aangeboden kennis echter niet rechtstreeks naar binnen gieten. Studenten zullen zelf aan de slag moeten en hier ook zelf de verantwoordelijkheid voor moeten nemen! Daarom dwingen we zelfstudie vaak af met huiswerk, toetsen en tentamens. Ik begrijp dat het lastig voor ze is, want studenten zijn ook actief buiten de studie of werken om hun studie te financieren.

Studeren is bij exacte vakken vooral wennen aan nieuwe ideeën, concepten en technieken. Essentieel hierbij is dat studenten zelfstandig met nieuwe kennis aan de slag gaan en deze vanuit verschillende gezichtspunten leren bekijken. Ik pleit dan ook voor minder contacturen en meer tijd voor zelfstudie. Wetenschappelijke studies toonden aan dat deze aanpak werkt bij de studie Geneeskunde [10]. Door de beperktere beschikbare contacturen vooral te gebruiken voor uitleg van en discussie over basisbegrippen en fenomenen, krijgen studenten meer tijd om zelfstandig te oefenen en actiever met de collegestof bezig te zijn. Niet zonder reden bloeien veel studenten pas echt op tijdens hun bacheloronderzoek, wanneer zij zelf de onderzoeksspiraal doorlopen. Deze zelfstandigheid, in combinatie met het meedraaien in een onderzoeksgroep, werkt vaak heel stimulerend.

De traditionele mix van universitair onderwijs bestaat uit hoorcolleges, werkcolleges, practica en zelfstudie. Hoorcolleges worden vaak gebruikt voor pure kennisoverdracht, maar zijn daar eigenlijk niet geschikt voor. Voor mij is lesgeven vooral de weg wijzen, en dan het liefst op een actieve manier. Passief geconsumeerde kennis wordt immers snel vergeten. De kern van goed lesgeven zit 'm in het inspireren en activeren van studenten.

Een efficiënte en leuke manier hiervoor is het flipped-classroom concept, waarbij studenten de lesstof vóóraf bestuderen, het liefst deels in de vorm van kennisclips of Youtube filmpjes. De colleges kunnen dan gebruikt worden voor voorbeelden en discussies op niveau. Deze vorm van lesgeven houdt goed rekening met de vaak grote niveaoverschillen tussen studenten, die hun zelfstudietijd naar behoefte kunnen aanpassen. Verder wordt interactie gestimuleerd door discussievragen te stellen en is het ideaal voor het wegwerken van verkeerde interpretaties en voor het verdiepen van de lesstof waar nodig. Een extreme vorm van flipped-classroom wordt al op enkele buitenlandse universiteiten [11,12] toegepast. Dan zijn er zelfs helemaal geen hoorcolleges meer, maar is de kennisoverdracht verdeeld over zelfstudie vooraf en kleine discussiegroepen tijdens de lessen. Dit sluit goed aan bij mijn opvatting 'Studeren is iets dat studenten zelf moeten doen.'

Ik pleit voor meer aandacht voor didaktiek in het algemeen en voor activerend onderwijs en meer discussies tijdens de colleges in het bijzonder. De 'Peer instruction' methode van Eric Mazur [13], waarbij de docent regelmatig vragen stelt en studenten elkaar proberen te overtuigen van hun keuze voor het juiste antwoord, is een mooi voorbeeld van activerend en effectief onderwijs. Ook andere lesmethoden kunnen effectief zijn, zoals de 'Whole task first' aanpak van Fred Janssen [14], waarbij studenten direct de hele taak krijgen voorgeschoteld en dus vanaf het begin van het college al weten welke kennis ze aan het eind dienen te beheersen.

Om studenten efficiënt te laten studeren moet het voor hen kristalhelder zijn hoe het curriculum is opgebouwd en wat de opleiding van hen verwacht. Het is jammer dat veel studenten dit laatste vertalen in 'de opleiding verwacht dat ik mijn tentamens haal'. Dat is natuurlijk óók belangrijk, maar dit is slechts het middel en niet het doel. De opleiding verwacht vooral dat afstudeerders voldoende kennis en vaardigheden



leren om een waardevolle bijdrage aan de maatschappij te kunnen leveren. Deze algemene leerdoelen van de opleiding, de zogenaamde eindtermen, zijn weliswaar verspreid over individuele vakken, maar het gaat ons uiteindelijk om het totaalplaatje. In dat verband is het schrijnend om collega's te horen klagen over het beperkte geheugen van sommige studenten, die bij tentamens in het tweede jaar al belangrijke delen van de eerstejaars lesstof zijn vergeten. De vraag is dus: 'Hoe zorgen wij ervoor dat studenten de kennis die ze tijdens hun studie opdoen blijven onthouden en niet direct na het tentamen vergeten?' De invoering van een jaarlijkse voortgangstoets zou hieraan bij kunnen dragen; een toets over de lesstof van alle vakken van het curriculum, zoals ook bij geneeskunde gebeurt [15]. Zo'n voortgangstoets is voor studenten handig om hun algehele vordering te checken en een prima voorbereiding op toelatingsexamens voor vervolopleidingen, zoals (buitenlandse) graduate schools. Bij sommige universiteiten in het buitenland worden al jaarlijkse voortgangstoetsen afgenomen. Soms zijn dit zelfs de enige examens. Maar dit zou wel een erg grote verandering in onze manier van toetsen betekenen.

Wat willen wij onze natuurkundestudenten meegeven? Allereerst een bijzondere manier van denken, die zich vertaalt in een groot probleemoplossend vermogen. Studenten ontwikkelen dit door voortdurend te oefenen met de natuurkundige aanpak om de werkelijkheid te vereenvoudigen en in wiskundige modellen te vatten. Verder willen wij studenten tijdens hun studie voldoende parate kennis aanbieden en een duidelijk beeld geven van de natuurkunde met al zijn verbanden. Dit bereiken we door basisbegrippen regelmatig terug te laten keren en de onderlinge verbanden te benadrukken. Ik pleit hierbij voor de 'Less is more' aanpak: liever een bescheiden maar degelijke parate basiskennis met de mogelijkheid van uitbreiding via boeken en internet, dan een wankele brede basis. De combinatie van probleemoplossend vermogen en voldoende kennis zorgt voor wat ik 'natuurkundig inzicht' noem. Studenten kunnen dit inzicht ontwikkelen door problemen van diverse kanten te benaderen en op voldoende hoog abstractieniveau op te lossen. Zelfstandig problemen oplossen, in de praktijk vaak sommen maken, en het begrijpen van de achterliggende principes is essentieel om ook aanverwante problemen te herkennen en op te kunnen lossen. Tot slot willen we studenten leren om de juiste onderzoeksvragen te stellen en om te gaan met vragen waarop het antwoord nog niet bekend is; de spil waarom wetenschappelijk onderzoek draait.

## **Samenvatting**

Dames en Heren,

In mijn verhaal in drie delen heb ik u allereerst beschreven waar mijn enthousiasme voor de natuurkunde vandaan komt. Een beter begrip van de wereld om ons heen en van de 'unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences' was hierbij de rode draad. Daarna heb ik u iets verteld over de onderzoeksprojecten in mijn groep, die over quantumoptica en nano-optica gaan. Voor het ene project sluiten wij licht op in pilaartjes met quantumpunten. Voor het andere project sluiten we licht in de vorm van oppervlakteplasmonen op in een pannenkoek-achtige structuur.

Ik heb benadrukt dat samenwerking essentieel is voor mijn onderzoek. Bovendien stipte ik het belang van fundamenteel onderzoek aan en de winst die meer 'vrijheid in onderzoek' op zou kunnen leveren. Tot slot heb ik in mijn visie op onderwijs de verantwoordelijkheid voor het studeren voor een belangrijk deel bij de student gelegd, onder het motto 'Studeren moet je zelf doen'.

## **Dankwoord en afsluiting**

Als afsluiting van mijn rede wil ik eerst allen die mijn benoeming mogelijk hebben gemaakt danken voor het in mij gestelde vertrouwen. Collega's van het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde, ik voel me al lang bij jullie op mijn plek en ben blij met deze waardering.

Ik heb verschillende leermeesters gehad, ieder met zijn eigen stijl. Van mijn promotor Ad Lagendijk leerde ik om kritisch te zijn op mijn eigen onderzoek, want Ad kon genadeloos scherp doorvragen. Van Dan

Grischkowsky op IBM Watson in de VS heb ik geleerd om promovendi en postdocs de ruimte in hun onderzoek te geven. En Han Woerdman liet me in Leiden zien hoe spannend en vernieuwend kleinschalige experimenten kunnen zijn, als de onderzoeksvraag maar creatief is en op het grensvlak ligt van experiment en theorie. Han's favoriete zin was dan ook altijd 'Het experiment loopt in dit onderzoek voor op de theorie'.

Het in deze oratie beschreven onderzoek was niet mogelijk geweest zonder de hulp van collega's van de Quantumoptica groep met wie ik veel samenwerk: Michiel de Dood, Wolfgang Löffler, Dirk Bouwmeester, Eric Eliel, Gerard Nienhuis, Han Woerdman en een grote groep postdocs, promovendi en studenten. Op onderwijsgebied werk ik prettig samen met, en voel ik me gesteund door de leden van het onderwijsteam en door mijn voorganger Jan Aarts.

En tot slot de belangrijkste mensen in mijn leven, mijn lieve vrouw Mirjam en mijn kinderen Roos, Sabien en Emiel. Dank dat jullie mij regelmatig van m'n werk houden en mij van zoveel andere en mooie aspecten van het leven laten genieten. En ook die andere aspecten vind ik fascinerend hoor!

Ik dank u allen voor uw aandacht.  
Ik heb gezegd.

## Referenties

- [1] M.P. Van Exter, R.F.M. Hendriks, J.P. Woerdman, *Physical insight into the polarization dynamics of semiconductor vertical-cavity lasers*, Physical Review A 57 (3), 2080 (1998).
- [2] [www.ted.com/talks](http://www.ted.com/talks)
- [3] E. Wigner, *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*, Communications on pure and applied mathematics, vol. XIII, 001-14 (1960), <https://www.dartmouth.edu/~matc/MathDrama/reading/Wigner.html>
- [4] H.B.G. Casimir, *Toeval van de werkelijkheid, een halve eeuw natuurkunde* (Meulenhoff, 1983), zie digitale bibliotheek voor de Nederlandse letteren, [http://www.dbnl.org/tekst/casi003toev01\\_01/](http://www.dbnl.org/tekst/casi003toev01_01/)
- [5] Wikipedia: photon, <https://en.wikipedia.org/wiki/Photon>
- [6] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Physical Review 47, 777 (1935).
- [7] European Commission will launch €1 billion quantum technologies flagship, <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-commission-will-launch-eu1-billion-quantum-technologies-flagship>
- [8] M.P. van Exter, A. Lagendijk, *Ultra short surface-plasmon and phonon dynamics*, Physical Review Letters 60, 49 (1988).
- [9] T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H.F. Ghaemi, T. Thio, P.A. Wolff, *Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays*, Nature 391, 667 (1997).
- [10] H.G. Schmidt, J. Cohen-Schotanus, H.T. van der Molen, T.A.W. Splinter, J. Bulte, R. Holdrinet, H.J.M. van Rossum, *Learning more by being taught less: a 'time-for-self-study' theory explaining curricular effects on graduation rate and study duration*, Higher Education 60, 287 (2010).
- [11] *The Learning & Teaching Approach @ The University of Northampton*, <https://www.youtube.com/watch?v=tOwbqaoJUoc&feature=youtu.be>
- [12] *Learning Futures @ University of Technology Sydney*, <http://www.uts.edu.au/research-and-teaching/teaching-and-learning/learningfutures>
- [13] C.H. Crouch, E. Mazur, *Peer Instruction: Ten years of experience and results*, Am. J. Phys. 69, 970 (2001).
- [14] F.J.J.M. Janssen, H. Hulshof, K. van Veen, *Uitdagend gedifferentieerd vakonderwijs, Praktisch gereedschap om je onderwijsrepertoire te blijven uitbreiden*, <http://wordpress2.iclon.nl/iclonboekenblog/wp-content/uploads/2016/03/uitdagendgedifferentieerdvakonderwijsdef.pdf>
- [15] *De voortgangstoets is geliefd*, Arts in spe, <https://www.medischcontact.nl/arts-in-spe/nieuws/ais-artikel/de-voortgangstoets-is-geliefd.htm>