

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/83168>

Please be advised that this information was generated on 2017-12-06 and may be subject to change.

Geen toepassing zonder fundament

AFSCHEIDSREDE DOOR PROF. DR. HANS TER MEULEN

Radboud Universiteit Nijmegen



AFSCHEIDSREDE

PROF. DR. HANS TER MEULEN



De molecuulfysica kent belangrijke toepassingen in de bestudering van gasfaseprocessen in de aardatmosfeer, de interstellaire ruimte en verbrandingsprocessen. Voor het begrijpen van de chemie en de fysica in deze processen is fundamentele kennis van de structuur en dynamische eigenschappen van de betreffende mole-

culen van essentieel belang. In zijn afscheidscollege illustreert Hans ter Meulen dit met enkele voorbeelden. Zo beschrijft hij onder andere de toepassing van moleculaire spectroscopie voor de bestudering van het verbrandingsproces in een dieselmotor. Niet alleen in onderzoek, maar ook in onderwijs geldt dat eerst een stevig fundament dient te worden gelegd alvorens de opgedane kennis kan worden toegepast. De toepassingen komen echter nog onvoldoende aan bod in het onderwijs. Ter Meulen gaat op het belang hiervan in en bespreekt tevens enige andere actuele problemen in het bachelor- en masteronderwijs.

Hans ter Meulen (1945) studeerde natuurkunde aan de Radboud Universiteit Nijmegen en promoveerde daar in 1976 op een onderzoek naar de oorzaken van de maserstraling van interstellaire hydroxylradicalen. Zijn gehele loopbaan is hij aan de Nijmeegse universiteit werkzaam geweest, eerst als universitair docent en later als hoofddocent. In 1997 werd hij tot hoogleraar benoemd met als leeropdracht Toegepaste fysica. Na het opzetten en coördineren van de brede opleiding natuurwetenschappen is hij van 2005 tot 2008 directeur geweest van het onderwijsinstituut Wiskunde, Natuurkunde en Sterrenkunde (WInSt). Sinds twee jaar is hij vicedecaan onderwijs van de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica.

GEEN TOEPASSING ZONDER FUNDAMENT

Geen toepassing zonder fundament

Rede in verkorte vorm uitgesproken bij het aftreden als hoogleraar Toegepaste fysica aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica van de Radboud Universiteit Nijmegen op vrijdag 29 oktober 2010

door prof. dr. Hans ter Meulen

Vormgeving en opmaak: Nies en Partners bno, Nijmegen
Fotografie omslag: Bert Beelen
Drukwerk: van Eck & Oosterink

ISBN 978-90-9025880-5

© Prof. dr. Hans ter Meulen, Nijmegen, 2010

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar worden gemaakt middels druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de copyrighthouder.

*Mijnheer de rector magnificus,
dames en heren,*

Op 13 mei 1897 slaagde Guglielmo Marconi er in om een draadloos telegram te versturen over het Bristol Channel. De afstand bedroeg 14 kilometer. De boodschap was kort: 'Are you ready?'. Dit experiment luidde het tijdperk van de telecommunicatie in. Aan het experiment van Marconi stond het werk van Heinrich Hertz ten grondslag. Hertz was ongetwijfeld een van de grootste natuurkundigen, ondanks zijn korte leven van 37 jaar. Het doel van zijn experimenten was de verificatie van Maxwells geniale theorie, waarin de scheiding tussen licht en elektromagnetisme werd opgeheven. Toen in 1889 een collega aan hem vroeg wat de mogelijke toepassingen zouden kunnen zijn van zijn experimentele resultaten, een vraag die toen tamelijk ongewoon was, maar tegenwoordig zowat bij iedere promotie wordt gesteld, antwoordde Hertz dat hij niet geloofde dat de draadloze elektromagnetische golven, die hij als eerste had geproduceerd en aangetoond, enige praktische toepassing zouden hebben (Süsskind, 1965). Niet alleen Hertz, maar ook andere grote fysici in die tijd hebben het praktische belang van de onderzoeksresultaten van Hertz niet onderkend. Zijn projectaanvraag bij de Pruisische Akademie der Wissenschaften schijnt te zijn gehonoreerd 'obwohl es wohl nie zu einer praktischen Anwendung kommen wird' (Zeilinger, 2010).

Dit is een beroemd voorbeeld van fundamenteel onderzoek met onvoorziene revolutionaire toepassingen: zo kunnen wij ons geen wereld meer voorstellen zonder de telecommunicatie. Ook voor de ontwikkeling van de natuurwetenschappen waren de onderzoeksresultaten van Hertz van cruciaal belang, onder andere voor de radioastronomie en de experimentele molecuulfysica, het vakgebied waar ik halverwege de jaren zestig vertrouwd mee raakte. Juist in die tijd vonden op het gebied van elektromagnetische golven twee belangrijke ontdekkingen plaats, die binnen de molecuulfysica de deur wagenwijd hebben opengezet naar toepassingen en die beide beslissend waren voor mijn latere onderzoeksactiviteiten.

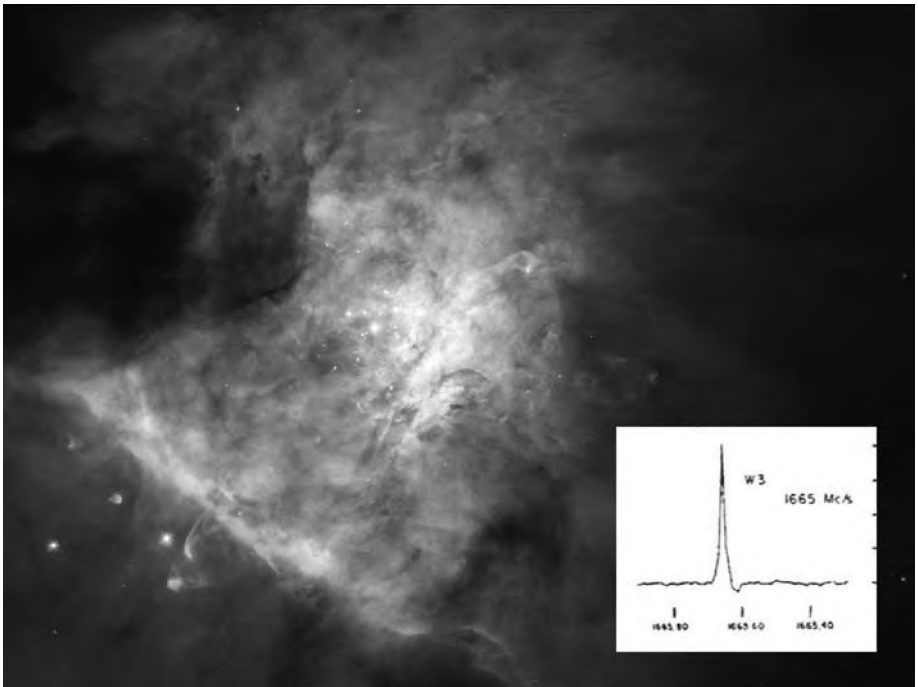
De eerste ontdekking betrof de laser en de voorloper ervan, de maser, die gebaseerd is op hetzelfde werkingsprincipe, maar dan in het microgolfgebied. De tweede ontdekking was de waarneming vanuit de interstellaire ruimte van microgolfstraling, die afkomstig bleek te zijn van een groot aantal verschillende moleculen.

INTERSTELLAIRE MASERS

Het was Charles Townes die, samen met zijn medewerkers Gordon en Zeiger, in 1954 heeft laten zien dat elektromagnetische straling kon worden opgewekt en versterkt door ammoniakmoleculen in een resonerende microgolf-trilholte (Gordon, 1954). Hij noemde dit proces *microwave amplification by stimulated emission of radiation*, afgekort maser. Tien jaar later, vrijwel op hetzelfde moment waarop ik met mijn studie natuurkunde begon, werd hem hiervoor de Nobelprijs voor natuurkunde toegekend.

Het principe van de laser of de maser is versterking van straling die door energierijke atomen of moleculen wordt uitgezonden. Wanneer deze atomen terugvallen naar de normale toestand wordt de vrijkomende energie uitgezonden in de vorm van straling. Deze straling kan vervolgens weer andere energierijke atomen stimuleren terug te vallen naar de normale toestand, waarbij weer opnieuw straling vrijkomt. Er treedt dus een versterking van straling op die sterk kan worden opgevoerd door het proces te laten plaatsvinden in een trilholve die resonant is op de golflengte van deze straling. Een klein deel van die straling kan uit de trilholve worden afgetapt en dat geeft dan bijvoorbeeld de laserstraal zoals iedereen die tegenwoordig wel kent. Je moet echter nogal wat kunstgrepen toepassen om laser- of maserstraling te verkrijgen.

Toen, in 1965, bleek dat maserstraling ook zonder al die kunstgrepen kan optreden in de vrije natuur, was dat onvoorstelbaar. Vanuit de interstellaire ruimte, onder andere vanuit de Orion-nevel, een bakermat van nieuwe sterren, werden door een groep in Berkeley zeer sterke signalen ontvangen in het microgolfg gebied (Figuur 1) (Weaver,



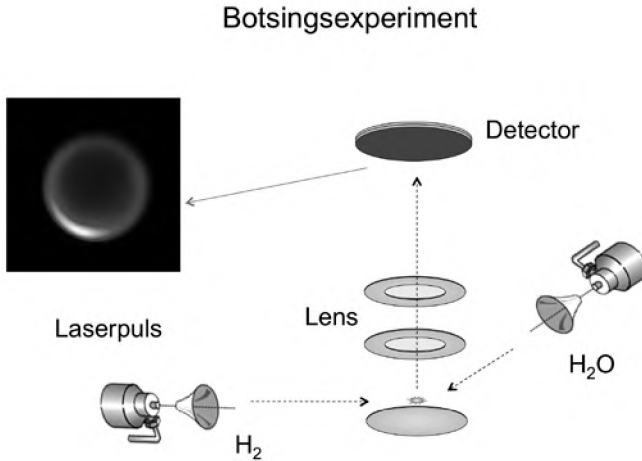
Figuur 1 Orion-nevel. Rechtsonder de eerste waarneming van een interstellair masersignaal, afkomstig van het OH-molecuul (Weaver, 1965).

1965). De signalen vertoonden dusdanige abnormale eigenschappen dat ze in eerste instantie werden toegeschreven aan een nog onbekend molecuul dat ‘mysterium’ werd genoemd. Nadat signalen werden ontvangen op enkele andere golflengtes werd duidelijk dat het om straling ging van het twee-atomige molecuul OH. De abnormale eigenschappen, waaronder de hoge intensiteit, konden worden toegeschreven aan een gigantische versterking van door OH uitgezonden straling. Het ging dus om maserstraling uit de ruimte, maar dan zonder resonerende trilholtte.

Binnen enkele jaren werd ook van een aantal andere moleculen maserstraling ontvangen op golflengtes die karakteristiek zijn voor deze moleculen, waaronder water (H_2O), ammoniak (NH_3) en formaldehyde (H_2CO). Onmiddellijk rees de vraag wat het mechanisme is achter deze masersignalen. In de afgelopen vijftig jaar zijn hierover tal van artikelen verschenen. De voorgestelde mechanismen zijn gebaseerd op een energieverandering van deze moleculen door ultraviolet- of infraroodstraling, of door botsingen met elektronen of ionen, of op de manier waarop de moleculen worden gevormd in de interstellaire ruimte. Maar in vrijwel alle scenario's spelen botsingen met waterstofmoleculen een belangrijke rol (Flower, 1990). Al deze artikelen betroffen theoretische studies. Experimentele studies waarin de interstellaire omstandigheden worden nagebootst zijn namelijk vrijwel onmogelijk.

De drijfveer achter deze studies is niet alleen wetenschappelijke nieuwsgierigheid, maar ook de veronderstelling dat de verkregen kennis kan worden toegepast om meer inzicht te krijgen in de sterformatieprocessen die in die interstellaire ruimte plaatsvinden. De vorming van sterren vindt plaats in de zogenaamde *giant molecular clouds* (reusachtige moleculaire wolken), met temperaturen rond 10 K en dichtheden tussen 100 en 1000 moleculen per cm^3 , ijler dan in het beste vacuüm dat in het laboratorium haalbaar is. Het kan weken tot maanden duren voordat een molecuul in botsing komt met een ander molecuul, en dan is dat meestal, 999 van de 1000 keer, een waterstofmolecuul H_2 en 1 op de 1000 keer een He-atoom.

Om de oorsprong van de interstellaire masersignalen te achterhalen en daarmee ook meer over stervorming te weten te komen, moeten we weten wat er in zo'n botsing gebeurt. Neem bijvoorbeeld een water- en een waterstofmolecuul die je op elkaar laat botsen. Je zou verwachten dat met de huidige kennis op theoretisch chemisch gebied en de huidige krachtige computers de uitkomst van een dergelijk fundamenteel proces al lang en breed bekend zou zijn. Het blijkt echter een bijzonder complex probleem te zijn. Pas onlangs hebben wij de eerste resultaten van kwantummechanische berekeningen kunnen vergelijken met onze metingen aan dit botsingsproces. (Yang, 2010). In het experiment wordt in vacuüm een pakketje watermoleculen afgeschoten op een pakketje waterstofmoleculen (Figuur 2). Bij een juiste timing komen de pakketjes met elkaar in botsing. Met de huidige technieken kunnen we de botsing zo laten plaatsvinden dat alle condities volledig vastgelegd zijn, dat wil zeggen: de snelheid van de moleculen, de hoek waaronder ze met elkaar botsen, de energetische toestand van de moleculen en



Figuur 2

Experimentele opzet voor de bestudering van botsingen van H₂O-moleculen met OH-moleculen. De door de botsing verstrooide H₂O-moleculen worden door een laserpuls geïoniseerd, waarna ze door een elektrisch veld worden versneld in de richting van een detector. Linksboven is een typisch meetresultaat te zien, waaruit direct de hoekverdeling van de verstrooide H₂O-moleculen kan worden bepaald.

zelfs in bepaalde gevallen de onderlinge oriëntatie van de botsende moleculen. Tevens kunnen we met behulp van lasertechnieken precies het resultaat van de botsing bekijken: onder welke hoek ze uit elkaar gaan, wat er gebeurt met de interne energie van het watermolecuul en hoe zijn snelheid is veranderd. Het is fantastisch wat we met de tegenwoordige lasertechnieken kunnen meten!

Linksboven in figuur 2 zien we een typisch resultaat van zo'n botsing. Deze figuur geeft aan in welke richtingen watermoleculen door de botsing worden verstrooid. Deze hoekverdeling is afhankelijk van de energieverandering van de watermoleculen in de botsing. Door deze hoekverdelingen te bestuderen, krijgen we gedetailleerde informatie over het krachtenveld tussen een water- en een waterstofmolecuul. Een van de conclusies van dit onderzoek is dat waterstof zich in zo'n botsing totaal anders gedraagt dan helium, na waterstof het meest voorkomende element in de interstellaire ruimte, in tegenstelling tot wat astrofysici tot nu toe veronderstelden. De modellen van de astrofysici moeten dan ook opnieuw tegen het licht worden gehouden.

Onderzoek aan het botsingsgedrag van watermoleculen in de interstellaire ruimte is juist nu bijzonder actueel vanwege de waarnemingen van de Herschel ruimtetelescoop, die, na een technisch probleempje dat optrad na de lancering vorig jaar, nu uiterst succesvol opereert op anderhalf miljoen kilometer van de aarde. Deze telescoop, met aan boord een interferometer van grotendeels Nederlandse makelij, is er op gericht om infrarood spectra van interstellaire moleculen te bestuderen. Deze spectra zijn niet of zeer moeilijk op de aarde waar te nemen vanwege absorptie van de straling door de atmos-

feer. In het bijzonder zijn de Herschel-waarnemingen gericht op water. De eerste resultaten laten een rijkdom aan signalen zien van een groot aantal moleculen, waaronder water. Uit deze spectra hopen de astrofysici informatie te verkrijgen over de vorming van sterren. Om de spectra goed te kunnen analyseren is kennis van de structuur en de dynamische eigenschappen van de betreffende moleculen essentieel.

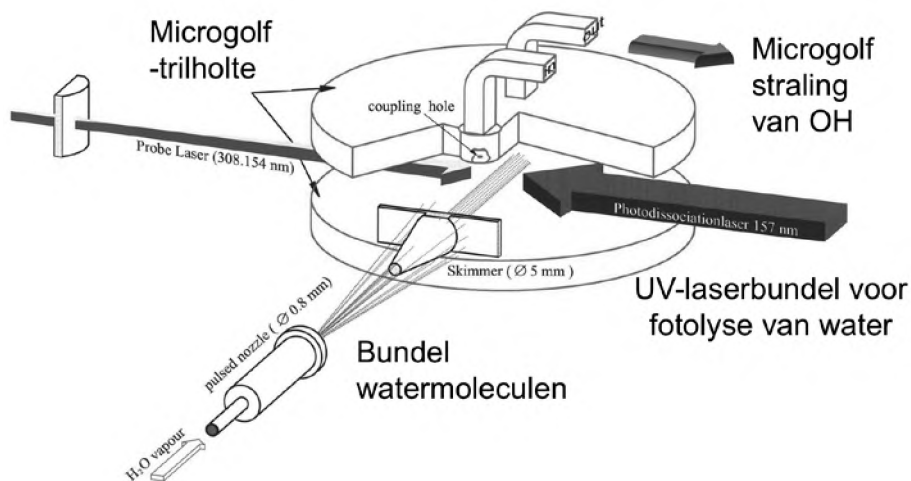
Dat we nu in staat zijn om een botsingsproces van twee moleculen tot in de kleinste details te bestuderen, is het resultaat van jarenlang vaak moeizaam promotieonderzoek van achtereenvolgens Jacques Reijnders, Dick Klaassen, Niek van Hulst, Jean Schleipen, Koen Schreel, Michiel van Beek en Angelica Moise. Fundamenteel onderzoek met steeds interstellaire moleculaire processen als toepassing. Onderzoek dat grotendeels is gesubsidieerd door FOM en deel heeft uitgemaakt van meerdere Europese netwerken.

Aan de basis van dit onderzoek staat de spectroscopie, de wisselwerking tussen straling en materie, die bijvoorbeeld aanleiding geeft tot de interstellaire spectra, zoals hierboven besproken. Het zijn spectroscopische technieken en resultaten die worden gebruikt om moleculen te identificeren en hun energetische toestand te bepalen. En om van deze moleculen de snelheden te bepalen door middel van de Doppler-verschuiving van hun overgangsfrequenties. En eveneens de grootte van eventueel aanwezige magnetische velden. Hierdoor kon bijvoorbeeld worden vastgesteld dat OH-masers zich vrijwel steeds in de buurt bevinden van watermasers.

Dit heeft Peter Andresen, bijzonder hoogleraar in Nijmegen in de periode 1988 tot 1991, op het idee gebracht dat interstellaire OH-moleculen worden geproduceerd door fotolyse van watermoleculen door ultraviolette straling en daarbij in energetische toestanden worden geproduceerd die direct aanleiding geven tot maserstraling. Samen hebben we in Bielefeld een experiment opgezet waarin watermoleculen werden bestraald door een krachtige ultravioletlaser binnen in een resonerende microgolf-trilholte. Het idee was dat als we door fotolyse van het water een groot aantal OH-moleculen zouden produceren, het maserproces van de OH-moleculen op gang zou komen (Figuur 3). We zijn een heel eind gekomen en hebben inderdaad microgolfstraling van OH-moleculen gezien, alleen bleek de hoeveelheid OH niet groot genoeg om maserstraling te verkrijgen (Thissen, 1999). Pogingen om de dichtheid verder op te voeren werden doorkruist door het vroegtijdige overlijden van Peter Andresen. Het zou een fantastisch experiment zijn geweest: een interstellaire maser in het laboratorium. Daarbij zou ook duidelijk zijn geworden dat je niet alle interstellaire condities op het gebied van tijd, lengte, dichtheden, stralingsintensiteiten, et cetera, hoeft na te bootsen. Het kan ook gaan om het product of de verhouding van twee of meer grootheden, zoals in dit geval om het product van dichtheid en lengte. Peter Andresen heeft ook op andere gebieden een uiterst belangrijke rol gespeeld in het Nijmeegse moleculaire onderzoek. Ik kom daar straks uitgebreid op terug.

Eerst wil ik nog wat meer kwijt over de spectroscopie. Dankzij Tony Dymanus heeft de spectroscopische kennis ertoe geleid dat er inmiddels zo'n 150 verschillende moleculen

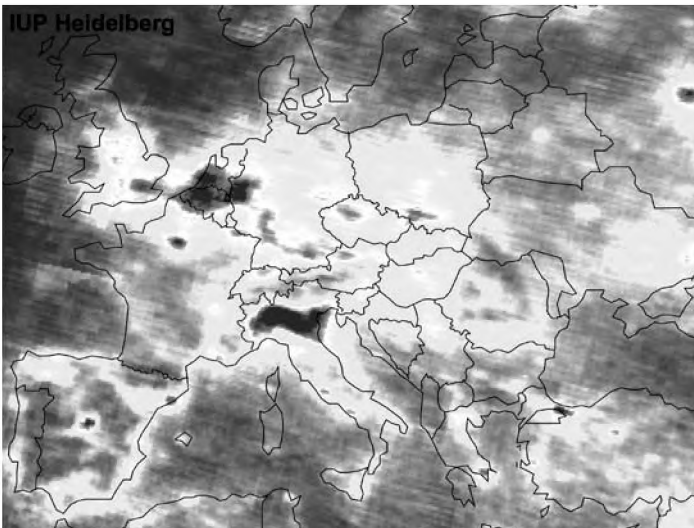
zijn ontdekt in de interstellaire ruimte. Door Tony Dymanus, de *founding father* van de atoom- en moleculfysica in Nijmegen en tevens mijn promotor, is Nijmegen wereldberoemd geworden op het gebied van de hoge-resolutie spectroscopie. In het bijzonder betrof dat het microgolf- en het ver-infrarood-golflengtegebied waarin de fijn- en hyperfijnstructuren van veel moleculen konden worden bepaald, niet alleen van stabiele neutrale moleculen, maar vooral ook van kortlevende vrije radicalen, ionen en complexen, waarbij het iedere keer weer een uitdaging was om voldoende grote hoeveelheden van het betreffende molecuul te produceren. In veel gevallen werd daarvoor een elektrische ontlading gebruikt, waarbij het meestal op voorhand niet duidelijk was wat die zou opleveren. Het was *black magic*, nogal eens resulterend in spectra die niet konden worden geïdentificeerd en ten langen leste in de bureaula verdwenen.



Figuur 3 Experimentele opzet voor de bestudering van mogelijke maserstraling van OH-moleculen in een resonerende microgolf-trilholte (Thissen, 1999). De OH-moleculen worden in de trilholte geproduceerd door fotolyse van H₂O-moleculen door middel van ultraviolette straling.

VERBRANDINGSPROCESSEN

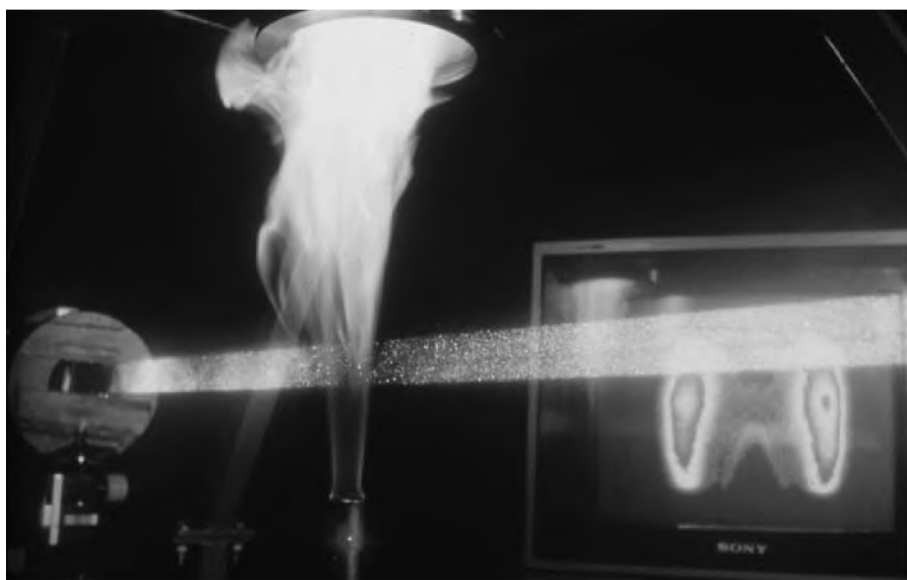
Het zijn dikwijls kleine moleculen, vaak twee- of drie-atomig, die in de ogen van veel chemici nauwelijks molecuul genoemd mogen worden, die een cruciale rol spelen in tal van fysische en chemische processen om ons heen, in de atmosfeer van de aarde of in de interstellaire ruimte, zoals bijvoorbeeld stikstofoxide, NO . De uitstoot van stikstofoxide in de atmosfeer veroorzaakt smogvorming, zure regen en een reductie van de ozonlaag, en vormt dan ook een van de grootste milieukundige problemen. Veruit de grootste bijdrage tot de stikstofoxideconcentratie wordt geleverd door verbrandingsprocessen. Door middel van satellietwaarnemingen is de stikstofoxide-uitstoot nauwkeurig in kaart te brengen (Figuur 4). We zien hier resultaten van de SCIAMACHY-spectrometer aan boord van de satelliet Envisat van ESA (ESA, 2010). Niet alleen zijn hierop industriële centra en enkele grote steden van Europa goed te lokaliseren, maar zelfs ook de autosnelwegen. Ook scheepsroutes kunnen zo in kaart gebracht worden. Al decennia lang is onderzoek aan verbrandingsprocessen er op gericht om deze processen schoner en efficiënter te maken. Tot op zekere hoogte is dat gelukt door middel van *trial and error*: verander de condities en meet de resulterende verandering in de samenstelling van de verbrandingsproducten. Tevens zijn er katalysatoren ontwikkeld om stikstofoxide en andere schadelijke producten af te vangen. Het behoeft geen betoog dat veruit de beste oplossing wordt verkregen door het verbrandingsproces zelf schoner te maken. Echter, daarvoor is wel een goed begrip van de fysische en chemische processen in verbranding vereist. En hoewel verbranding reeds eeuwenlang wetenschappers heeft geïntrigeerd, is



Figuur 4
Uitstoot van stikstofoxide in Europa zoals gemeten door de SCIAMACHY-spectrometer aan boord van de ENVISAT-satelliet van de European Space Agency (ESA). Deze kaart is gemaakt door de Universiteit van Heidelberg op basis van remote sensing meetgegevens van ESA.

nog steeds niet volledig bekend hoe stikstofoxide wordt geproduceerd. Om dat te onderzoeken zou je de chemische reacties in de verbranding precies willen volgen. De moeilijkheid is echter dat je daarbij het verbrandingsproces niet mag verstoren. Het aftappen van reactieproducten door middel van een *sampling probe* die je in een vlam steekt, geeft bijvoorbeeld geen betrouwbare resultaten.

Het was in 1987 dat Gerard Meijer, toen nog promovendus in mijn groep, enige tijd doorbracht in de groep van Peter Andresen aan het Max Planck Instituut in Göttingen. Peter had een gloednieuwe laser, een excimeerlaser, en wist eigenlijk niet zo goed wat hij daarmee wilde gaan doen. Het bijzondere van die laser was dat de golflengte kon worden gevarieerd in het ultraviolet, een bijzonder interessant golflengtegebied want daar liggen de elektronische overgangen van veel moleculen. Gerard, die niet wars is van het uit-



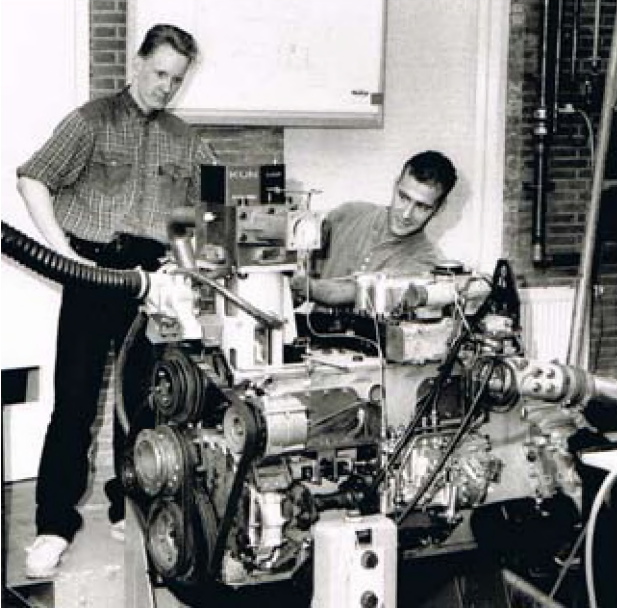
Figuur 5 Lasergeïnduceerde fluorescentie van OH-moleculen in een gasvlam. De golflengte van de laser kan worden gevarieerd. Straling bij golflengtes die passen op energetische overgangen van het OH-molecuul kan door dit molecuul worden geabsorbeerd, waardoor het molecuul in een energierijke toestand terechtkomt. Binnen 1 miljoenste seconde valt het molecuul weer terug naar de oorspronkelijke energetische toestand, waarbij energie vrijkomt in de vorm van straling die door een CCD-camera kan worden gedetecteerd. Door een dunne lintvormige laserbundel te gebruiken wordt een tweedimensionale verdeling van de OH-moleculen in het vlak van de laserbundel verkregen, zoals te zien op het scherm rechtsonder.

proberen van nieuwe speeltjes met nieuwe mogelijkheden, richtte de laserbundel dwars door de vlam van een bunsenbrander. Bij bepaalde lasergolflengtes bleek de vlam ultraviolette straling uit te zenden. Deze zogenaamde lasergeïnduceerde fluorescentiestraling konden we identificeren als zijnde afkomstig van het OH-molecuul, dat, net als in de interstellaire ruimte, in relatief hoge concentraties voorkomt in verbrandingsprocessen. De sterkte van de fluorescentiestraling is een maat voor de hoeveelheid OH-moleculen. En dat maakt deze methode toepasbaar als diagnostische techniek die kan worden toegepast zonder de vlam te verstoren (Andresen, 1988). Door de laserstraling in de vorm van een dun lint de vlam te laten doorsnijden kan direct informatie worden verkregen over de ruimtelijke verdeling van de OH-moleculen in het vlak van de laserbundel (Figuur 5). De lasergeïnduceerde fluorescentiemethode is niet beperkt tot OH. Ook andere belangrijke moleculen kunnen in principe zo gemeten worden, zolang ze maar fluoresceren bij bepaalde lasergolflengtes. Omdat de golflengtes waarbij fluorescentie optreedt karakteristiek zijn voor ieder molecuul beschikken we hiermee over een moleculenspecifieke diagnostische methode (Eckbreth, 1996).

Dit was het begin van het verbrandingsonderzoek in Nijmegen. Weliswaar wisten we niet veel over verbrandingstechnologie, maar we beschikten wel over een voor Nederland tamelijk unieke expertise op het gebied van zowel de moleculenspectroscopie als de laserdiagnostiek. Samenwerking met de groep van Philip de Goey aan de TU Eindhoven voorzag in de noodzakelijke technische knowhow en theoretische basiskennis van verbrandingsprocessen. Dat bleek een uiterst vruchtbare samenwerking te zijn, die heeft geleid tot tien promoties (Michel Versluis, Robert Klein-Douwel, Theo Brugman, Genie Stoffels, Erik-Jan van den Boom, Robert Stolk, Rogier Evertsen, Kasper Verbiezen, Bas Bougie en Arjan Donkerbroek) en een veelvoud daarvan aan artikelen. Vrijwel het gehele verbrandingsonderzoek is bekostigd uit de tweede geldstroom, en ik wil bij deze gelegenheid dan ook graag mijn erkentelijkheid jegens de Nederlandse Technologiestichting STW uitspreken.

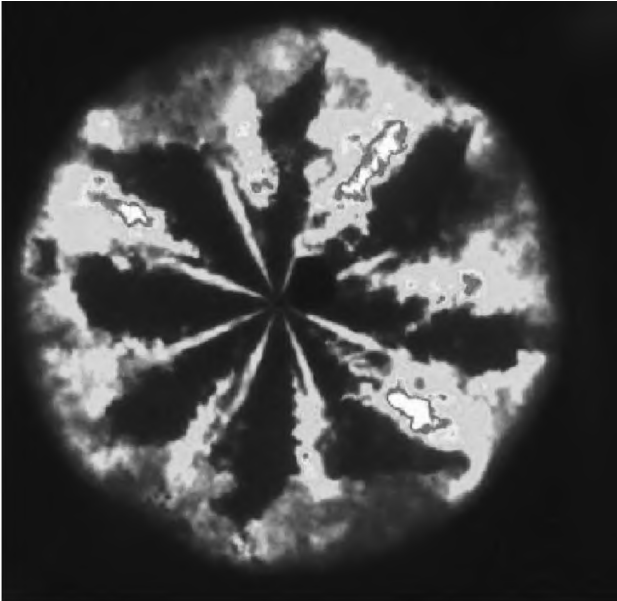
DIESELMOTOR

De beperkte tijd die tot mijn beschikking staat laat mij niet toe uitgebreid over dit maatschappelijk relevante onderzoek uit te weiden. Toch wil ik u enige resultaten niet onthouden, en dan in het bijzonder van het onderzoek aan verbrandingsmotoren. Het grootste deel van dit onderzoek vond plaats aan een zware truck-dieselmotor van DAF (Figuur 6), waarvan een van de zes cilinders optisch toegankelijk was gemaakt door het aanbrengen van meerdere kwartsvensters in de cilinderkop en één groot venster in de zuiger. De injector bestaat uit 8 gaatjes via welke de dieselbrandstof wordt ingespoten in de verbrandingskamer zodra de zuiger bijna in de bovenste positie is. Op dat moment is als gevolg van de compressie door de zuiger de temperatuur gestegen tot zo'n 500 °C, waardoor de brandstofsprays tot ontbranding komen, zoals te zien in figuur 7. Om het verbrandingsproces te bestuderen, hebben we een laserbundel dwars



Figuur 6

De zescilinder dieselmotor waarin het verbrandingsproces is bestuurd met behulp van laserdiagnostiek. Een van de cilinders is verlengd om waarnemingen via een venster in de zuigerkroon mogelijk te maken. Op deze foto, die is gemaakt bij de installatie van de motor in het diesellab in 1996, zijn promovendus Erik-Jan van der Boom (links) en technicus Charles Spaanjaars (rechts) te zien.

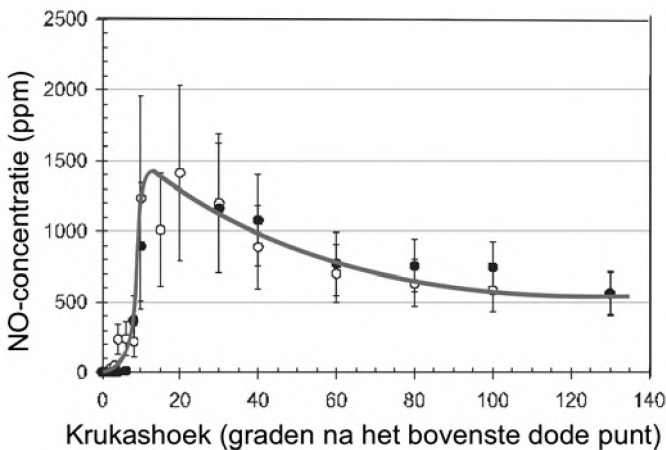


Figuur 7

Verbranding in de dieselmotor. De acht dieselsprays zijn zichtbaar doordat ze worden verlicht door de straling van de hete roetwolken. Door de werveling van de lucht (swirl) bevinden deze roetwolken zich aan de zijkant van de sprays volgens de richting van de klok.

door de verbrandingsruimte geschoten. De fluorescentiestraling van de moleculen in het vlak van de laserbundel kan via het venster in de zuigerkop en een spiegel onderin de cilinder worden uitgekoppeld en worden gedetecteerd door een CCD-camera, waardoor de ruimtelijke verdeling van de betreffende moleculen in het vlak van de laserbundel kan worden bepaald.

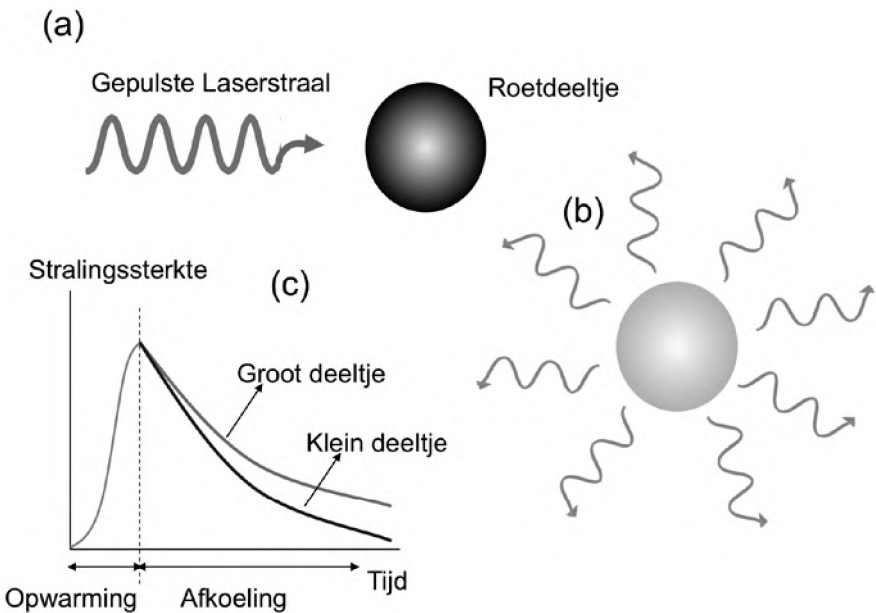
Dat was althans het idee en hoewel we wisten dat het een enorme uitdaging was om te midden van duizenden verbrandingsproducten, bij drukken tot zo'n 100 atmosfeer en temperaturen tot boven 1700 °C, de relatief kleine hoeveelheden stikstofoxide en andere relevante moleculen zichtbaar te maken, bleek de werkelijkheid nog aanzienlijk problematischer. Dat kwam vooral door de vrijwel volledige absorptie van zowel de laser als de fluorescentiestraling ten gevolge van onder andere het roet dat in de verbranding wordt gevormd. Het hart van de motor is een black box, letterlijk en figuurlijk. De laserstraal komt er aan de andere kant niet meer uit. Hij verdwijnt in het donker. Desalniettemin zijn we er in geslaagd om verschillende moleculen, waaronder stikstofoxide, tijdens de verbranding in de motor te detecteren en te volgen gedurende het verbrandingsproces (Figuur 8) (Verbiezen, 2006). Met behulp van deze resultaten kunnen de modellen van werktuigbouwkundigen worden getoetst, wat uiteindelijk moet leiden tot een verbetering van de dieselmotor. Van cruciaal belang daarvoor is de **kwantitatieve** bepaling van moleculaire concentraties waarvoor fundamentele kennis van moleculaire structuren en dynamische eigenschappen een absolute vereiste is. Het is deze kwantificering die in experimenteel verbrandingsonderzoek de grootste uitdaging blijkt te zijn. Dat komt voor een belangrijk deel door de verstoringen van de te meten signalen door andere, in groten getale aanwezige, moleculen. Zoals te zien in figuur 8 is het gelukt om absolute concentraties van stikstofoxide in de motor te bepalen.



Figuur 8

De gemeten absolute NO-concentratie als functie van de tijd tijdens de verbranding in de expansieslag. Deze slag duurt in totaal circa 10 milliseconden. Na ongeveer 1 milliseconde neemt de concentratie af als gevolg van de expansie.

Naast de stikstofoxide vormt de uitstoot van roetdeeltjes, ook wel fijnstof genoemd, een groot probleem. Roetfilters kunnen weliswaar een groot deel van het roet in het uitlaatgas afvangen. Dat gaat echter minder goed bij de kleinste deeltjes, kleiner dan 0,1 micrometer, die het gevaarlijkst zijn voor de gezondheid omdat ze diep in de longen kunnen doordringen (Araujo, 2008). Roet is het gevolg van onvolledige verbranding en bestaat uit koolstof en polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen. Net als voor stikstofoxide geldt dat een beter begrip van de vorming van roetdeeltjes vereist is om een vergaande reductie van de uitstoot te kunnen bereiken. Het eerste wat je dan moet doen is een methode ontwikkelen om de roetdeeltjes tijdens de verbranding zichtbaar te maken en hun grootte te bepalen. Uit elektronenmicroscopopnamen van

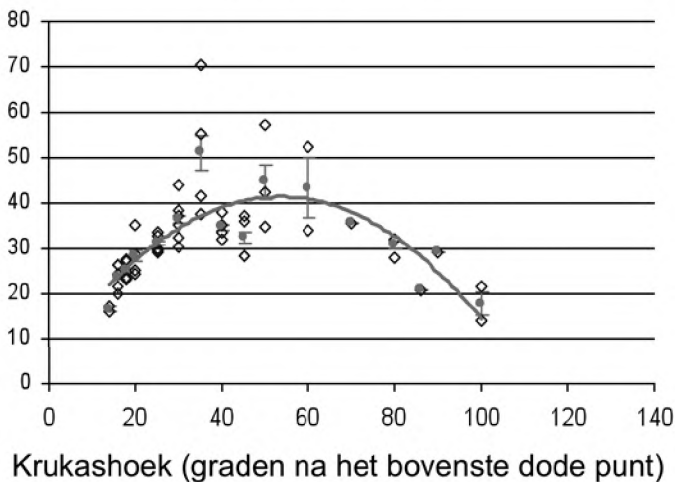


Figuur 9 Door middel van de lasergeïnduceerde incandescentiemethode kunnen de verdeling en de grootte van de roetdeeltjes worden bepaald. Door middel van een laserpuls worden de deeltjes binnen enkele nanoseconden verhit tot circa 4000 °C. De straling van de gloeiend hete deeltjes wordt vervolgens gedetecteerd door een camera. Net als bij de lasergeïnduceerde fluorescentiemethode kan op deze manier de ruimtelijke verdeling van de roetdeeltjes worden gemeten. Verder kan de grootte van de roetdeeltjes worden bepaald door de stralingsintensiteit als functie van de tijd te meten. Grote deeltjes koelen langzamer af dan kleine deeltjes.

roetdeeltjes blijkt dat deze bestaan uit fractale structuren van koolstofdeeltjes, de zogenaamde primaire deeltjes (Lee, 2003). Deze primaire deeltjes kun je zichtbaar maken door ze met een krachtige laserpuls te verhitten tot zo'n 4000 °C (Figuur 9). Bij die temperatuur zijn ze roodgloeiend en de straling die ze dan uitzenden kun je ruimtelijk opgelost meten en analyseren. We zijn erin geslaagd om deze techniek ook in de dieselmotor toe te passen en daarmee de vorming van de roetdeeltjes tijdens de verbranding te volgen. We hebben gezien dat de deeltjes eerst groeien, maar vervolgens weer kleiner worden als gevolg van oxidatie (Figuur 10) (Bougie, 2007). Dit beeld is in overeenstemming met de verwachting. Het is namelijk bekend dat de hoeveelheid roet die wordt uitgestoten door een dieselmotor slechts een kleine fractie is (in de orde van 1 procent) van wat er in eerste instantie in de motor wordt gevormd.

Het is natuurlijk bijzonder interessant om de vorming van roet en stikstofoxide te bestuderen voor verschillende brandstoffen, zoals synthetische brandstoffen met verschillende zuurstofgehalten of biobrandstoffen. Inderdaad hebben we zeer verschillend gedrag gevonden. Zo blijkt toevoeging van bepaalde stoffen met een cyclische moleculaire structuur, zoals cyclohexaan en cyclohexanoon, aanzienlijk minder roet te produceren (Klein-Douwel, 2009). In Eindhoven wordt nu getracht efficiënte productiemethodes te ontwikkelen om dit soort brandstoffen van plantenresten te maken zonder schadelijke gevolgen voor de voedselproductie, met als uiteindelijke doel een schone en zuinige dieselmotor.

Grootte roetdeeltjes (nanometer)



Figuur 10
Grootte van de roetdeeltjes als functie van de tijd in de expansieslag. Tijdens het verbrandingsproces worden de roetdeeltjes weer kleiner als gevolg van oxidatie.

Verbetering van verbrandingsprocessen is een topprioriteit. Momenteel is meer dan 80 procent van de energiehoeveelheid in de wereld afkomstig van fossiele brandstoffen. De productie van duurzame energie neemt weliswaar toe, maar op wereldniveau neemt de totale energiebehoefte minstens zo hard toe. Het ziet er daarom naar uit dat ook in de komende decennia verbranding veruit de belangrijkste energiebron zal blijven. De verdere ontwikkeling van betrouwbare diagnostische methoden is daarom van groot belang en samenwerking van molecuulfysici en verbrandingswetenschappers is daarbij een absolute noodzaak. Ik ben dan ook zeer verheugd dat het laseronderzoek aan verbrandingsprocessen door Nico Dam wordt voortgezet in Eindhoven, waar men dan beschikt over expertise op het gebied van zowel de modellering als de moleculaire laserdiagnostiek, een unieke combinatie.

TOEGEPASTE FYSICA

Ik heb u een aantal voorbeelden gepresenteerd van toepassingsgericht onderzoek dat is gebaseerd op kennis die is verkregen in fundamenteel onderzoek, in dit geval op het gebied van de molecuulspectroscopie en de moleculaire dynamica. Ook in andere onderzoeksgroepen zijn dit soort voorbeelden te vinden. Dit heeft er in 1997 toe geleid dat de toenmalige subfaculteit Natuurkunde een werkgroep Toegepaste fysica heeft ingesteld, waarin meer dan tien natuurkunde-onderzoeksgroepen vertegenwoordigd waren. De doelstellingen waren: (1) het onderzoek in de toegepaste natuurkunde te verbreden, in het bijzonder door het stimuleren van inter- en multidisciplinaire dwarsverbanden, (2) een onderwijsprogramma te ontwikkelen dat gericht is op studenten met belangstelling in toepassingen van fundamenteel onderzoek, en (3) de aantrekkingskracht van Nijmegen op potentiële toekomstige studenten te vergroten door een alternatief te bieden voor de technische universiteiten. Aan de werkgroep was tevens gekoppeld mijn benoeming tot hoogleraar met als leeropdracht de Toegepaste fysica.

Voor de uitbouw van het toepassingsgerichte onderzoek werd samenwerking van de verschillende groepen nagestreefd, onder andere door het verwerven van promovendi- en postdocposities in samenwerkingsprojecten en de gezamenlijke aanschaf en het gezamenlijk gebruik van kostbare apparatuur. Een mooi voorbeeld hiervan is het onderzoek aan diamantgroei, waarin vier groepen hebben samengewerkt. Binnen het onderwijsprogramma werd een afstudeervariant toegepaste fysica ingevoerd, naast de bestaande varianten experimentele, theoretische en numerieke fysica. In die afstudeervariant werden specifieke toepassingsgerichte colleges opgenomen, zoals materiaal-kunde, optica & lasers, stromingsleer en elasticiteitsleer. Tevens was een externe stage bij een bedrijf of onderzoeksinstelling een verplicht onderdeel van het afstudeerwerk. De belangstelling voor deze variant was groot: gemiddeld studeerde een derde van de studenten af binnen de variant toegepaste fysica.

Het effect van de toegepaste fysica op het aantrekken van nieuwe studenten kon worden gemeten op basis van de zogenaamde eerstedagenquêtes, waarin gevraagd werd

naar de motieven van de studenten om natuurkunde in Nijmegen te gaan studeren. In de periode 1997-2003 gaf een kwart van de eerstejaarsstudenten aan dat toegepaste fysica hun eerste keus was en voor nog eens een kwart betrof het de tweede keus op een totaal van vier keuzemogelijkheden. Geconcludeerd kan worden dat zowel onder afstudeerders als onder vwo-scholieren een sterke belangstelling aanwezig was voor de toegepaste-fysicavariant. Ik zeg 'was', want deze variant verdween met de overgang van de subfaculteiten naar de huidige onderzoeks- en onderwijsinstituten per 1 januari 2005. Natuur- en sterrenkunde werd opgesplitst en ondergebracht binnen drie verschillende onderzoeksinstituten waarbinnen moest worden samengewerkt met andere disciplines: natuurkunde met scheikunde binnen IMM, het Institute for Molecules and Materials, met wiskunde binnen IMAPP, het Institute for Mathematics, Astrophysics and Particle Physics. Daarnaast zijn de biofysici werkzaam in het Donders Centre for Neuroscience. Met de wijziging van de organisatiestructuur veranderden ook de aandachtspunten. Gewerkt moest worden aan de eigen identiteit van de nieuwe onderzoeksinstituten, wat betekende dat de afstudeerrichtingen dienovereenkomstig moesten worden ingevuld. Het onderwijsprogramma werd themagericht in plaats van methodegericht en de vier afstudeervarianten werden opgeheven met ingang van het studiejaar 2004-2005. De gebleken interesse van scholieren en studenten voor toepassingsgericht onderwijs en onderzoek rechtvaardigt echter ruimere aandacht hiervoor.

VERBREIDING

Het profileren van de onderzoeksinstituten en de daarmee samenhangende invulling van het masteronderwijs zijn noodzakelijk, maar er dient voor gewaakt te worden dat daardoor de onderzoeksinstituten teveel in zichzelf gekeerd raken. Er vindt nog weinig samenwerking tussen de verschillende onderzoeksinstituten plaats. In navolging van het onderwijs, waar in de afgelopen jaren al verbreding door middel van multidisciplinaire dwarsverbanden heeft plaatsgevonden, zouden die dwarsverbanden ook tussen de onderzoeksinstituten moeten worden gecreëerd. Met het huidige onderzoekspotentieel binnen de bètafaculteit kan een dergelijke samenwerking leiden tot doorbraken op multidisciplinair gebied, wat zal resulteren in een nog uitbundiger bloei van de bètafaculteit.

Alle bacheloropleidingen binnen de bètafaculteit hebben voor die verbreding veel ruimte gecreëerd, wat het niveau van de opleidingen ten goede is gekomen. Dat niveau heeft immers betrekking op zowel de diepte als de breedte van de opleiding. Ten onrechte wordt met niveau vaak alleen de mate van abstractie bedoeld. Wat hebben we echter aan een hoge mate van abstractie als de vaardigheid in het toepassen ontbreekt? Juist door toepassing kan de student zich de stof eigen maken. En toepassing betekent vaak ook verbreding. Een goed voorbeeld van een brede opleiding van hoog niveau is de opleiding natuurwetenschappen, die zich bevindt op het snijvlak van de natuurkunde, scheikunde en moleculaire biologie. Deze opleiding is een van de eerste multidiscipli-

naire natuurwetenschappelijke opleidingen in Nederland. Gestart in 1997 als een bovenbouwopleiding, waarin studenten met een propedeuse natuurkunde, scheikunde of biologie konden instromen, kreeg de opleiding, die aanvankelijk algemene natuurwetenschappen heette, in 1999 een eigen propedeuse. De instroom kwam echter langzaam op gang. Er was de voor de hand liggende, maar onterechte, associatie met het vak algemene natuurwetenschappen op het vwo, dat door veel scholieren nogal negatief werd gewaardeerd. Al snel werd daarom de naam gehalveerd. Het eerste jaar stroomden 7 studenten in. Het jaar daarna was dit verdubbeld, en vervolgens trad een gestage stijging op tot rond de 30 studenten. In totaal hebben tot nu toe meer dan 200 studenten gekozen voor deze opleiding. In het algemeen worden ze vanwege hun veelzijdige kennis en vaardigheden met open armen ontvangen door een groot aantal onderzoeksgroepen voor het verrichten van hun afstudeerstage. Maar liefst driekwart van de afgestudeerden blijkt verder te gaan met promotieonderzoek op gebieden variërend van neurofysiologie tot sterrenkunde, wat zowel de breedte als de diepgang illustreert. Interessant is dat meer dan een derde van de studenten natuurwetenschappen meisjes zijn, terwijl dat bij natuurkunde op 20 procent blijft steken. Dit hangt mogelijk samen met het toepassingsgerichte karakter van de opleiding. Meisjes blijken meer in toepassingen te zijn geïnteresseerd dan jongens.

STUDEERBAARHEID

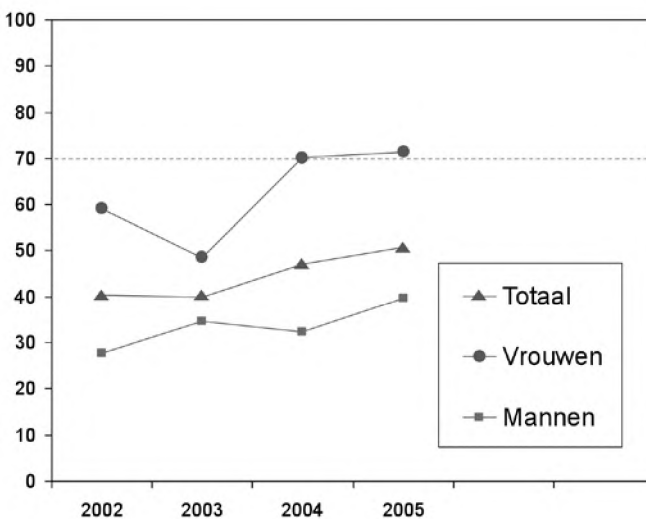
Het niveau van de universitaire opleidingen staat onder druk nu verbetering van het studierendement in het hoger onderwijs een topprioriteit is. Het is immers gemakkelijk om een beter rendement te behalen door de inhoud van de als moeilijk ervaren vakken of de omvang van verbredende vakken te reduceren, of het anderszins gemakkelijker te maken het diploma te halen. Binnen het hoger onderwijs zijn voorbeelden hiervan de laatste tijd uitgebreid in de publiciteit gekomen. Met de huidige kabinetsplannen, waarin de universiteiten een korting wordt opgelegd voor iedere student die te lang over de studie doet, wordt het echter wel heel verleidelijk om aan dat niveau te gaan sleutelen. Naar mijn mening dient niveauverlaging met kracht te worden tegengehouden. De Nijmeegse bèta-bacheloropleidingen zijn alle, zonder uitzondering, bij onderwijsvisitaties zeer goed beoordeeld wat inhoud en niveau betreft. De scholier die een keuze maakt voor Nijmegen weet dat hij voor een hoog niveau kiest, en dat moeten we zo houden! De bacheloropleiding is het fundament van de masteropleiding, en een fundament kun je beter niet uithollen.

Je kunt je natuurlijk wél afvragen of onze opleidingen goed studeerbaar zijn. Een mogelijk criterium daarvoor lijkt te worden gegeven door het zogenaamde bachelorrendement, gedefinieerd als het percentage van de studenten die niet zijn uitgevallen in het eerste jaar en die het bachelordiploma binnen 4 jaar halen. De universiteiten hebben met de minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap afgesproken dat een bachelorrendement van 70 procent moet worden gehaald in 2014. De nominale studieduur van

de bacheloropleiding is 3 jaar. Dat wil zeggen dat van de 10 studenten die na het eerste jaar doorgaan, er 7 hooguit 1 jaar vertraging mogen oplopen in het behalen van het bachelordiploma. In figuur 11 zien we voor de jaargangen 2002 tot en met 2005 het gemiddelde bachelorrendement over alle bètaopleidingen. Het gemiddelde bachelorrendement is in de afgelopen jaren gestegen tot iets meer dan 50 procent, dus nog ver verwijderd van het streefrendement. Komt dit door een slechte studeerbaarheid of zijn er andere factoren? Wanneer de cijfers worden uitgesplitst naar mannelijke en vrouwelijke studenten, dan wordt een opmerkelijk verschil zichtbaar. Voor de mannen is het gemiddelde rendement nog geen 40 procent terwijl de vrouwen al op het streefrendement van 70 procent zitten. De vrouwelijke studenten doen het dus bijna twee keer zo goed als hun mannelijke collega's!

Gezien de resultaten van de vrouwelijke studenten kan worden geconcludeerd dat het niet zo slecht is gesteld met de studeerbaarheid van de bètaopleidingen. De vraag is natuurlijk waarom de vrouwen het zoveel beter doen dan de mannen. Mogelijk zijn de meisjes meer gedisciplineerd, hebben ze een betere studiehouding en vullen ze tussenuren in met zelfstudie terwijl de jongens gaan kaarten. De tijdsbesteding aan de studie blijkt in ieder geval nauwelijks verschillend te zijn: volgens de algemene studenten-enquête 2009 besteden mannelijke en vrouwelijke eerstejaars bètastudenten respectievelijk 38,0 en 38,1 uur per week aan hun studie (IOWO, 2009). Een verschil in efficiëntie

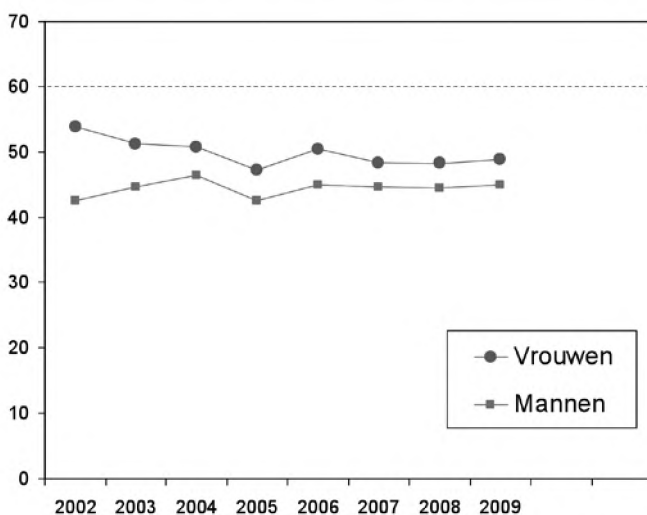
Bachelorrendement



Figuur 11
Gemiddeld bachelorrendement van de Nijmeegse bètaopleidingen voor de cohorten 2002 tot en met 2005.

zou moeten blijken uit de aantallen behaalde studiepunten. In figuur 12 worden de door jongens en meisjes in hun eerste jaar behaalde aantallen studiepunten weergegeven. Voor de lichtingen 2002 tot en met 2008 hebben de mannelijke studenten gemiddeld 44 studiepunten behaald, de vrouwelijke 50, een aanmerkelijk verschil. Het lijkt er dus op dat meisjes efficiënter werken dan jongens. Men zou kunnen aanvoeren dat het gemiddelde aanvangsniveau van meisjes die een bètaopleiding gaan doen misschien hoger ligt dan dat van jongens, omdat jongens meer van zichzelf overtuigd zijn en daarom eerder een pittige studie kiezen dan meisjes. Dat zou dan met name bij natuurkunde moeten blijken. Daar worden al sinds jaar en dag de eindexamencijfers bijgehouden, ook omdat deze een goede indicatie geven voor het te verwachten studiesucces. Het blijkt dat voor dezelfde jaren, dus 2002 tot en met 2008, het gemiddelde eindexamencijfer voor natuur- en wiskunde exact gelijk is voor mannelijke en vrouwelijke eerstejaarsstudenten, namelijk 7,50. Het lijkt dan ook zinvol om onderzoek te doen naar de verschillen tussen de studiemethodes van mannelijke en vrouwelijke bètastudenten, en op basis daarvan de mentoren en studieadviseurs richter de mannelijke eerstejaarsstudenten te laten begeleiden. Tevens dient te worden nagegaan bij welke cursussen de verschillen tussen mannelijke en vrouwelijke studenten het grootst zijn en of die verschillen gerelateerd kunnen worden aan de gehanteerde werkvormen of het abstractieniveau.

Behaalde aantal studiepunten in het eerste jaar



Figuur 12
Gemiddeld aantal studiepunten (ec) van de Nijmeegse eerstejaars bètastudenten in hun eerste jaar voor de cohorten 2002 tot en met 2009.

Momenteel worden door alle hogeronderwijsinstellingen koortsachtig maatregelen genomen om de studenten te stimuleren hun bachelordiploma tijdig te halen. Zo wordt in Nijmegen het bindend studieadvies per 1 september aanstaande ingevoerd, in navolging van veel andere universiteiten. Daarnaast zijn er nog andere maatregelen genomen om de studenten sneller te laten doorstromen en daarmee beter te scoren in beoordelingen en bekostiging.

Wellicht doeltreffender dan deze harde maatregelen is het aantrekkelijker maken van de opleidingen door een meer op de belangstelling van de student toegesneden programma aan te bieden. Onlangs is in opdracht van het Platform Bèta Techniek een onderzoek uitgevoerd naar de bèta-affiniteit van vwo-scholieren (PBT, 2007). Daarin werden drie typen bèta-geïnteresseerde vwo-scholieren onderscheiden. In de eerste plaats is daar de door nieuwsgierigheid gedreven scholier die in bèta is geïnteresseerd, de scholier die het naadje van de kous wil weten, die geïnteresseerd is in de fundamentele wetenschap. De scholier die, net zoals ik destijds, naar Nijmegen komt om theoretische fysica te gaan studeren. Er is echter ook een grote categorie scholieren die, onder de indruk van de mogelijkheden die de bètawetenschappen bieden, deze willen toepassen om grote maatschappelijke problemen op te lossen, zoals de klimaatbeheersing, energieproblematiek, biotechnologie, ziektebestrijding, et cetera. Tenslotte is er de categorie scholieren die een carrière in het bedrijfsleven voor ogen heeft.

De studenten van de eerste categorie kunnen uitstekend aan hun trekken komen in Nijmegen. Zoals al eerder gezegd, het niveau is hoog. Bovendien zijn er de laatste jaren excellentietrajecten in de studieprogramma's opgenomen die een extra uitdaging bieden voor de student die nog meer wil. Zo is er de Radboud Honours Academy, waarvoor de beste vijf procent van de eerstejaarsstudenten in aanmerking kunnen komen, en er zijn drie dubbele bachelorprogramma's: natuurkunde & wiskunde, wiskunde & informatica en natuurkunde & scheikunde.

Voor de tweede categorie, de breed geïnteresseerde student die toepassingsgericht is ingesteld, zijn de multidisciplinaire opleidingen moleculaire levenswetenschappen en natuurwetenschappen bij uitstek geschikt.

Dan is er de derde categorie scholieren, de carrièregerichte bèta's, volgens het onderzoek van het Platform Bèta Techniek een kwart van de in bèta geïnteresseerde scholieren. Voor hen is het aanbod van de bètafaculteit aan de magere kant. In de masterfase kan worden gekozen voor de variant management & toepassing, waarin cursussen op het gebied van bedrijfskunde en management zijn opgenomen, alsmede een afstudeerstage van een half jaar in het bedrijfsleven. In de bachelorfase zijn er echter geen onderdelen van de onderwijsprogramma's die de carrièregerichte bèta's naar Nijmegen zouden kunnen trekken.

Om deze leemte op te vullen is momenteel een minor ondernemerschap, innovatie en duurzaamheid in voorbereiding, die naar verwachting in september 2011 geïmplementeerd zal worden. Duurzaamheid zal hiervan een belangrijk onderdeel uitmaken, niet

alleen omdat innovatie in het bedrijfsleven veelal op duurzaamheid is gericht, maar ook omdat duurzaamheid in deze tijd, als een van de grootste uitdagingen voor de maatschappij, niet mag ontbreken in het universitaire onderwijs. Juist binnen onze bèta-faculteit zijn er tal van ontwikkelingen die, voortvloeiend uit het fundamentele onderzoek, direct of indirect betrekking hebben op duurzaamheid. Denk bijvoorbeeld aan zonnecellen, biobrandstoffen, enzovoort. Het blad *B4U*, dat wordt verspreid op vwo-scholen, staat er vol mee. Onze studenten, met name ook degenen die in toepassingen zijn geïnteresseerd, dienen al in de bachelorfase hiermee kennis te kunnen maken en niet pas tijdens hun masterstage. Verder zouden wat betreft die masterstage studenten meer gestimuleerd moeten worden om deze geheel of gedeeltelijk in het bedrijfsleven of bij overheids- of onderzoeksinstellingen in binnen- of buitenland door te brengen.

Er is nog een vierde categorie bèta-geïnteresseerde vwo-scholieren, namelijk de breed geïnteresseerde scholier die niet kan kiezen tussen de aangeboden opleidingen. Voor hen zou een brede bèta-propedeuse geschikt zijn met oriëntatie op de monodisciplines en tevens een aantal basisvakken waarmee kan worden ingestroomd in het tweede jaar van een van de bestaande bacheloropleidingen. De mogelijkheid van een dergelijke opzet wordt momenteel bestudeerd.

DANKWOORD

Geen toepassing zonder fundament. Ik heb getracht u aan de hand van enige voorbeelden uit mijn onderzoek duidelijk te maken hoe belangrijk het fundamentele onderzoek is voor de toepassing. Ook voor het academisch onderwijs geldt dat in de bachelorfase eerst het fundament gelegd moet worden om in de masterfase de verworven kennis en vaardigheden toe te kunnen passen op een specialisatie binnen een van de onderzoeksinstituten. Als docent heb ik het altijd een geweldige uitdaging gevonden om kennis over te dragen en daarbij de studenten duidelijk te maken hoe deze kan worden aangewend, zowel voor wetenschappelijke als praktische toepassingen. Terugkijkend op meer dan veertig jaar onderzoek en onderwijs kan ik alleen maar zeggen dat dit een prachtige tijd was en dat ik mezelf enorm bevoorrecht voel dat ik mijn beide fascinaties, onderzoek en onderwijs, zo heb kunnen combineren. Met veel plezier heb ik aan de Radboud Universiteit gewerkt en ik wil het college van bestuur hiervoor danken. Met veel personen heb ik een bijzonder prettige samenwerking gehad, op het gebied van zowel onderwijs als onderzoek, waarvoor ik hen graag wil bedanken. Het is niet mogelijk hen allemaal te noemen. Ik wil toch enkele personen hier uitdrukkelijk vermelden.

In de eerste plaats Tony Dymanus, mijn promotor, die mij na mijn promotie een positie aanbood als wetenschappelijk ambtenaar in de groep Atoom- en molecuulfysica. Mijn belangstelling voor dit vakgebied is vooral ook te danken aan de colleges die jij gegeven hebt. De wijze waarop jij onderwijs gaf is altijd een voorbeeld geweest voor mij.

Mijn interesse voor de toegepaste fysica is aangewakkerd door Jörg Reuss. Voor mij

was jij een inspirator met veel creativiteit. Jij zag het belang en de mogelijkheden van samenwerken met andere disciplines, wat je altijd sterk hebt gestimuleerd.

Ik ben ook veel dank verschuldigd aan Peter Andresen, helaas veel te vroeg overleden. Hij was een onuitputtelijke bron van innovatieve ideeën. Wij hadden dezelfde interesses en hebben veel met elkaar zitten brainstormen over zeer uiteenlopende onderwerpen, variërend van moleculaire fotodissociatie tot alternatieve verbrandingsprocessen.

Ook Gerard Meijer heeft daarbij een belangrijke rol gespeeld. Ik ben jou daarvoor bijzonder erkentelijk. Ik ben zeer onder de indruk van de resultaten die jij na je promotieonderzoek hebt behaald, in het bijzonder het onderzoek aan koude moleculen, en ik wens je alle succes toe met het botsingsonderzoek dat je in Berlijn hebt opgezet.

Ook al mijn andere promovendi ben ik veel dank verschuldigd. Zij zijn het die het daadwerkelijke onderzoek verricht hebben en die door hun inzet het succes van de groep Toegepaste molecuulfysica hebben bepaald. Het was mij een groot genoegen om met ieder van hen te mogen samenwerken. Vooral het samen met hen analyseren en discussiëren van hun onderzoeksresultaten en het brainstormen over mogelijke oplossingen van problemen waren een continue geestelijke uitdaging voor mij en ik zal dat in de komende periode zeker gaan missen. Ik ben er trots op dat zij in alle gevallen hun onderzoek met een promotie hebben afgesloten en daarna uitstekende posities hebben weten te verwerven in zeer uiteenlopende sectoren van de maatschappij.

Leo Meerts was min of meer mijn wapenbroeder vanaf het begin van onze beide promotieonderzoeken, die vrijwel gelijktijdig hebben plaatsgevonden. Veel ontwikkelingen binnen de moleculaire wetenschap en binnen de universitaire organisatie in de afgelopen veertig jaar hebben wij gezamenlijk meegemaakt. Wij hebben de laser zijn intrede zien doen in het laboratorium. Wij hebben de tijd meegemaakt dat je nog zonder computer wetenschap kon bedrijven, tegenwoordig is dat onvoorstelbaar. Ik kon altijd terugvallen op jouw kennis en expertise op het gebied van de moleculaire spectroscopie en jij wist daar steeds tijd voor vrij te maken. Ik ben je daarvoor bijzonder dankbaar, en natuurlijk ook voor het fantastische symposium dat je vandaag hebt georganiseerd.

Nico Dam zwaaide de scepter in de Graalburcht, zoals het diesellab werd genoemd. Op onnavolgbare wijze weet jij studenten, promovendi en postdocs altijd weer te prikkelen en te stimuleren. Het verbrandingsonderzoek zal door jou worden gecontinueerd, zij het dan in Eindhoven, en ik wens je daar bijzonder veel succes bij.

Met Dave Parker heb ik vooral de laatste jaren samengewerkt. De uitbreiding van de botsingsopstellingen met de door jou ontwikkelde *velocity map imaging* detectietechniek maakt unieke metingen mogelijk. Ik ben blij dat het botsingsonderzoek op deze manier gecontinueerd kan worden en ik wens jou hierbij alle succes toe.

Ook de vruchtbare samenwerking met theoretische chemici wil ik hier vermelden. In het bijzonder wil ik hier noemen Ad van der Avoird, Paul Wormer en Gerrit Groenenboom.

Het diamantonderzoek, waarover ik in verband met de beperkte tijd niet heb kunnen spreken, was een uiterst vruchtbare samenwerking van meerdere groepen. Ik wil daar in het bijzonder vermelden John Giling, John Schermer, Willem van Enckevort, Paul Hageman en Ivan Buijnsters. Ik hoop zeer dat ook dat onderzoek behouden kan blijven. Dit is een prachtig voorbeeld van toepassingsgericht fundamenteel onderzoek.

Met vele medewerkers binnen de experimentele fysica heb ik zeer prettig samengewerkt, zoals met Wim van der Zande en Frans Harren, en vooral ook met de technici. Zonder hen was het onderzoek onmogelijk geweest. Ik noem in het bijzonder Cor Sikkens, Eugene van Leeuwen, Arjan van Vliet, Leander Gerritsen, Frans van Rijn, Chris Timmer en Peter Claus. Ik wil hen van harte bedanken voor hun enorme inzet. Tevens moet hier ook de zeer professionele ondersteuning door de Instrumentmakerij worden vermeld. Ook wil ik speciaal een dankwoord richten tot Ine Meijer, die mij fantastisch goed ondersteund heeft, en nu ook weer bij de organisatie van deze dag onschatbare diensten heeft verricht.

De laatste vijftien jaar heb ik mij, naast mijn onderzoek, in toenemende mate beziggehouden met de onderwijsorganisatie. Het uitbouwen van het onderwijs in toegepaste en in multidisciplinaire richting heb ik als zeer uitdagend ervaren. Daarbij heeft verbetering van de onderwijskwaliteit bij mij altijd de hoogste prioriteit gehad. Ik heb het geluk gehad om met zeer gedreven docenten en onderwijscoördinatoren te kunnen samenwerken. We hebben een geweldig team van onderwijsdirecteuren en opleidingscoördinatoren, die weer kunnen terugvallen op onderwijsbureaus met zeer betrokken medewerkers. Ik ben allen die bij de onderwijsorganisatie zijn betrokken zeer erkentelijk voor de uitstekende samenwerking. We hebben daardoor echt veel bereikt, maar ik moet daaraan toevoegen dat er ons ook nog veel staat te doen! Een bijzonder woord wil ik richten tot de studenten. Ik vond het een voorrecht om met jullie te kunnen samenwerken. We hebben samen in tal van commissies, werkgroepen en besturen gezeten. Steeds weer viel het me op hoe betrokken jullie zijn met een duidelijke visie op onderwijsontwikkelingen. Ook al waren we het niet altijd met elkaar eens – dat zou ook niet goed zijn –, de sfeer was altijd constructief. Mijn dank daarvoor.

Tenslotte de personen die het belangrijkste in mijn leven zijn. Marieke, Katerien en Jan Matthijs, jullie hebben je weg in de maatschappij weten te vinden, jullie hebben fijne partners gevonden en ik mag me gelukkig prijzen met de vier kleinkinderen van wie ik steeds weer enorm geniet. We hebben een bijzonder zware tijd achter ons door het verlies van Anne, en we missen haar nog enorm. De banden in ons gezin zijn daardoor zeer sterk geworden. Ik ben dankbaar voor al het goeds dat we met elkaar mochten hebben, en ik weet dat jij, Liesbeth, je daarmee kunt verenigen. Ik ben je ontzettend veel dank verschuldigd voor je niet aflatende steun, ook al had je graag gezien dat ik meer tijd voor jou, ons gezin en mijn hobby's had gehad. Ik beloof je dat dat er nu echt van gaat komen.

Ik heb gezegd.

REFERENTIES

- Andresen, P., Bath, A., Gröger, W., Lülf, H.W., Meijer, G., Ter Meulen, J.J., 1988, 'Laser-induced fluorescence with tunable excimer lasers as a possible method for instantaneous temperature field measurements at high pressures: checks with an atmospheric flame', *Applied Optics*, 27, 365-378
- Araujo, J.A., Barajas, B., Kleinman, M., Wang, X., Bennett, B.J., Gong, K.W., Navab, M., Harkema, J., Sioutas, C., Lusi, A.J., Nel, A.E., 2008, 'Ambient particulate pollutants in the ultrafine range promote early atherosclerosis and systemic oxidative stress', *Circulat. Res.*, 102, 589-596
- Bougie, B., Ganippa, L.C., Van Vliet, A.P., Meerts, W.L., Dam, N.J., Ter Meulen, J.J., 2007, 'Soot particulate size characterization in a heavy-duty Diesel engine for different engine loads by laser-induced incandescence', *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 685-691
- Eckbreth, A.C., *Laser diagnostics for combustion temperature and species*, 1996, Taylor & Francis, Inc.
- ESA, 2010, <http://envisat.esa.int/instruments/sciamachy/>
- Flower, D., *Molecular collisions in the interstellar medium*, 1990, Cambridge University Press
- Gordon, J.P., Zeiger, H.J., Townes, C.H., 1954, 'Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃', *Phys. Rev.* 95, 282-284
- IOWO, Algemene studentenenquête 2009, Radboud Universiteit Nijmegen
- Klein-Douwel, R.J.H., Donkerbroek, A.J., Van Vliet, A.P., Boot, M.D., Somers, L.M.T., Baert, R.S.G., Dam, N.J., Ter Meulen, J.J., 2009, 'Soot and chemiluminescence in diesel combustion of bio-derived oxygenated and reference fuels', *Proceedings of the Combustion Institute* 32, 2817-2825
- Lee, K., Zhu, J., Sekar, R., 2003 *Characterization of particulate sizes, microstructures and fractal geometry of a light duty diesel engine via thermophoretic sampling*, <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/EE/283.pdf>
- Platform Bèta Techniek, 2007, *Bèta mentality; jongeren boeien voor bèta en techniek*, <http://www.betamentality.nl/>
- Süsskind, C., 1965, 'Hertz and the technological significance of electromagnetic waves', *ISIS* 56, 342
- Verbiezen, K., Klein-Douwel, R.J.H., Van Vliet, A.P., Donkerbroek, A.J., Meerts, W.L., Dam, N.J., Ter Meulen, J.J., 2006, 'Quantitative laser-induced fluorescence measurements of nitric oxide in a heavy-duty diesel engine'. *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 765-773
- Weaver, H., Dieter, N.H., Williams, D.R.W., Lum W.T., 1965, "Observations of a strong unidentified microwave line and of emission from the OH molecule" *Nature* 208, 29-31
- Yang, C.-H., Sarma, G., Ter Meulen, J.J., Parker, D. H., McBane, G. C., Wiesenfeld, L., Faure, A., Scribano, Y., Feautrier, N., 2010, 'Mapping water collisions for interstellar space conditions', *J. Chem. Phys.* 133, 131103
- Zeilinger, A., 2010, *Zum Nutzen der Forschung*, Falter Verlagsgesellschaft mbH

