

## Naar de hoogste versnelling

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

Wiel, van der, M. J. (2000). *Naar de hoogste versnelling*. Technische Universiteit Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/2000

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

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

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

[Link to publication](#)

***General rights***

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

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

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

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

***Take down policy***

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

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

providing details and we will investigate your claim.

**Naar de hoogste  
versnelling**  
Intreerede

prof.dr. M.J. van der Wiel

---

## **Intreerede**

Uitgesproken op 8 september 2000  
aan de Technische Universiteit Eindhoven

prof.dr. M.J. van der Wiel

## **Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,**

Een oratie wordt ook wel openbare les genoemd. We hebben dus kennelijk te maken met een onderdeel van het primaire proces van deze universiteit. En dat nog wel in de vorm van het ouderwetse hoorcollege, een vorm van lesgeven die sterk ter discussie staat, mijns inziens terecht. Lesgeven houdt doorgaans het overdragen van informatie in. Maar vooral in het geval van een oratie lijkt mij dat, gezien de samenstelling van het gehoor, een aanvechtbare zaak. Dat mondelinge presentaties bedoeld zouden zijn om informatie over te dragen, berust op een hardnekkig misverstand -vooral in ingenieurskringen-, zo wordt ons vanuit het cursuswezen regelmatig voorgehouden. Het gaat er uitsluitend, of in elk geval in allereerste instantie, om te overtuigen, zo wordt betoogd.

Die goede raad neem ik ter harte. In de komende 45 minuten ben ik er dan ook niet op uit kennis over te dragen over het 'wat' en 'hoe' van het onderzoek in mijn groep. Ik zal vooral proberen de brede achtergronden van ons werk te schetsen en U

ervan te overtuigen dat wij een geschikte 'niche' hebben gedefinieerd waarin we zowel interessant als relevant werk kunnen doen. Het wordt dus een verhaal over natuurkunde op meta-niveau, maar niet over metafysica. Overigens zal het U hiermee duidelijk zijn, voor zover dat nog nodig was, dat deze oratie over natuurkunde gaat en niet, zoals de titel mogelijk deed vermoeden, over een leeropdracht 'Versnellingsbakken' bij de faculteit Werktuigbouw.

## **Technische Natuurkunde**

Na deze start schakel ik nu bewust naar de eerste versnelling, hoewel ik dat in mijn dagelijkse autopraktijk aan een automaat overlaat. Om op gang te komen wil ik wat zeggen over de natuurkunde in het algemeen, en de technische natuurkunde in het bijzonder. Wat maakt het fascinerend dat vak te bedrijven aan een universiteit? Voor mijzelf is dat het samenspel van drie aspecten. Het eerste waar je al als aankomend fysicus door gegrepen wordt is het doen van eigen onderzoek. Zelf je vragen formuleren, zelf nieuwe kennis genereren. En zo af

en toe het idee krijgen de eerste te zijn die een bepaald verschijnsel begrijpt, eerder dan al die slimme collegae van je. Dat geeft een kick. Zoiets gebeurt niet dagelijks, en hoeft ook niet direct een Nobelprijs op te leveren. Toch houdt het je gaande als fysicus.

Een tweede aspect dat vaak pas op wat rijpere leeftijd aan de satisfactie gaat bijdragen, is het geven van onderwijs. Weliswaar gaat het om het doorgeven van bestaande kennis, maar als fysicus ben je eigenwijs genoeg om te menen dat je iets nieuws toevoegt door eigen verbanden te leggen, eigen voorbeelden te kiezen, de zaken met eigen woorden opnieuw weer te geven. Deze twee aspecten gelden voor de natuurkunde in het algemeen. De technische natuurkunde voegt daar nog een belangrijk derde aspect aan toe: het ontwikkelen van nieuwe concepten, om vervolgens daarmee iets te ontwerpen en te maken dat er eerder niet was, iets dat 'werkt' en waar iemand iets aan heeft. De drie genoemde aspecten maken voor mij technische natuurkunde tot natuurkunde 'met een plus', en zeker niet tot een zijspoor zoals vanuit 'fundamentalistische' hoek wel eens wordt gesuggereerd.

Dit laatste brengt mij op de indeling van de natuurkunde in hoofdstromingen. Mijn ruwe indeling is opnieuw in drieën.

Richting één graaft in de diepte, naar nieuwe basiswetten op de allerkleinste schaal.

Richting twee graast in de breedte, en verklaart -op basis van bekende basiswetten- fenomenen op tenminste atomaire, maar vaak mesoscopische of grotere schaal.

Richting drie, tenslotte, combineert nieuw verworven kennis tot iets bruikbaar, dat er nog niet was. Er wordt wel gepoogd in dit drietal een hiërarchie aan te brengen. U kunt wel raden waar de technische natuurkunde dan terecht komt. Soms lijkt het wel of er een tegenstelling gezien wordt tussen 'fysisch interessant' en 'bruikbaar'. In mijn ervaring gaan die twee gelukkig heel vaak samen. Het zal U niet verbazen dat ik het hanteren van een rangorde afwijs: voor mij is de natuurkunde pas compleet wanneer alle drie facetten gelijkwaardig tot hun recht komen. De subatomaire fysica zou niet verkomen zijn zonder de technische fysica, die voor de versnellers moest zorgen. En met name voor de uitstraling naar andere disciplines is meer nodig dan alleen kennis van de allerdiepste fundamenten.

Ik rond mijn algemene inleiding af. Ik hoop duidelijk gemaakt te hebben waar mijn enthousiasme voor de natuurkunde uit voortkomt. Wat jammer toch dat natuurkunde zo'n slecht imago heeft bij VWO-leerlingen die hun studiekeus nog moeten maken: het imago van 'nerds' die in hun eentje in een donker hoekje iets moeilijks zitten te doen, en meestal ook nog vrouwonvriendelijk zijn. Wat een verschil met onze dagelijkse praktijk: werken in teams van gemotiveerde mensen, regelmatig jezelf en je werk moeten presenteren, buitenlanders over de vloer, op reis naar laboratoria en conferenties in het buitenland. Kortom, als we dit beeld nu eens wisten over te brengen, dan zou dat zeker bijdragen aan het verhogen van de studenteninstroom.

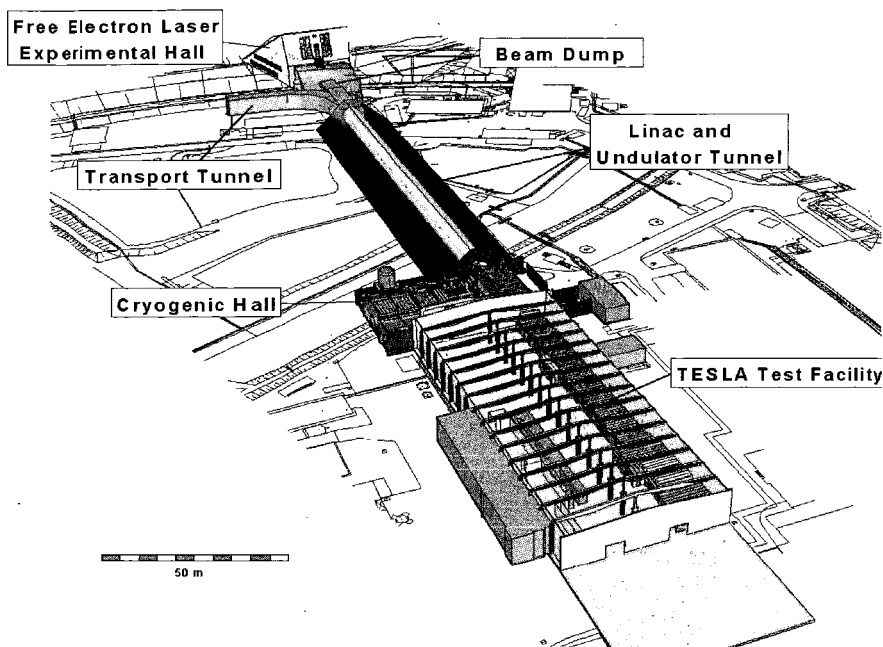
## Holy Grail

Hiermee ben ik wat op toeren gekomen, en kan ik naar de tweede versnelling. Het wordt tijd ter zake te komen: wat is de 'niche' van mij en mijn groep in het grote geheel van de technische natuurkunde? Om met de deur in huis te vallen: de rode draad

-ook wel 'Holy Grail' genoemd- van ons werk is '*het genereren van licht met relativistische elektronen*'. Als U er iets van afweet, zult U direct opmerken dat dit al 50 jaar gebeurt. Ik haast mij dan ook een nadere precisering te geven. Het gaat om drie dingen:

- om golflengten in het extreem ultraviolet en zachte-röntgengebied
- om pulsduren ruim beneden de picoseconde ( $10^{-12}$  seconde)
- om systemen die compact zijn, dus 'table-top' ofwel op laboratoriumschaal.

Deze verlanglijst heeft nadere uitleg. Om U toch snel een idee te geven waar ik naar toe wil, verwijs ik naar fig. 1. Daar ziet U een schema van de Tesla Test Facility-Free Electron Laser (FEL) van het instituut DESY in Hamburg. Deze machine, een grote faciliteit, wordt als eersteling van de 4<sup>e</sup> generatie lichtbronnen gepresenteerd, in een familie van al drie generaties synchrotronstralingsbronnen. Hij is recent afgebouwd en begint nu in bedrijf te komen. Straks kom ik met een historisch overzicht, en leg ik uit wat er zo bijzonder is aan dit apparaat. Neemt U nu vast van mij aan dat dit de absolute 'state-of-the-art' is, de



Figuur 1. 'Bird's eye view' van de Tesla Test Facility bij DESY, Hamburg. Hier wordt een 'state-of-the-art' lineaire versneller met een nieuw type supergeleidende trilholten getest voor toepassing in de hoge-energie fysica. De versneller (1GeV) drijft tevens een vrije-elektronen laser aan, de eerste ter wereld in het extreem ultraviolet. Versneller en laser hebben een totale lengte van 300 meter.

culminatie van 50 jaar ontwikkeling van lichtbronnen gebaseerd op elektronenversnellers.

De DESY-machine voldoet aan de eisen van golflengte en pulsduur die we stelden, maar bepaald niet aan die van compactheid. De machine is enkele honderden meters lang

en kost ook enkele honderden mega-euro. Wat moet nu een bescheiden groep, zelfs al is dat een groep aan de beste TU in Nederland en met de talenten van de medewerkers en promovendi in mijn groep, in dit internationale geweld? Aan iets dergelijks een kleine, nauwelijks zichtbare bijdrage leveren trekt ons in het geheel niet.

Wij hebben gekozen voor iets veel uitdagenders: het ontwikkelen van concepten en technieken om dit soort versnellers aanzienlijk te verkleinen. De lange-termijn droom daarbij is om een bron als de DESY-FEL zo te verkleinen dat hij in een normale laboratoriumruimte past. 'Table-top' is de gangbare term daarbij; de discussie over hoe groot die tafel dan wel wordt, ga ik voorlopig uit de weg. Om zo'n verkleining te realiseren is een revolutie in de technologie nodig, met geheel nieuwe concepten voor zowel de versneller als voor dat andere grote onderdeel, de undulator.

Voordat ik daar iets over zeg, eerst weer de onvermijdelijke meta-vraag: Wat is de zin van zo'n compacte lichtbron? Een bron die in sommige opzichten vergelijkbaar wordt met wat de grote faciliteiten bieden, maar die niet alle specificaties zal halen? Zijn die grote internationale faciliteiten, waar een breed spectrum van wetenschappelijke gebruikers over de vloer komt, geen prachtige, efficiënte wetenschapsfabrieken? Leidt de interactie tussen een lokale staf van hoog niveau en gebruikers van buiten, gestimuleerd door ruime hoeveelheden geld, niet tot enorme vooruitgang in de wetenschap?

Zeer zeker, maar ook hieraan zijn schaduwkanten: de druk om te 'produceren' is zeer hoog; er is nauwelijks tijd voor reflectie over vernieuwing, laat staan om echt te experimenteren. Veel van de bezoekers zouden maar wat graag een eigen lichtbron in het eigen laboratorium hebben, eventueel naast toegang tot een grote centrale faciliteit. Zelfs als die eigen bron wat minder fraaie specificaties had, maar wel elk moment ter beschikking stond, zou dat voor lief genomen worden. Nog steeds worden de echt slimme doorbraken gerealiiseerd op instrumenten die men in het eigen laboratorium onder eigen beheer kan bedrijven. Kortom, er is duidelijk plaats voor beide benaderingswijzen.

## Licht en Bronnen

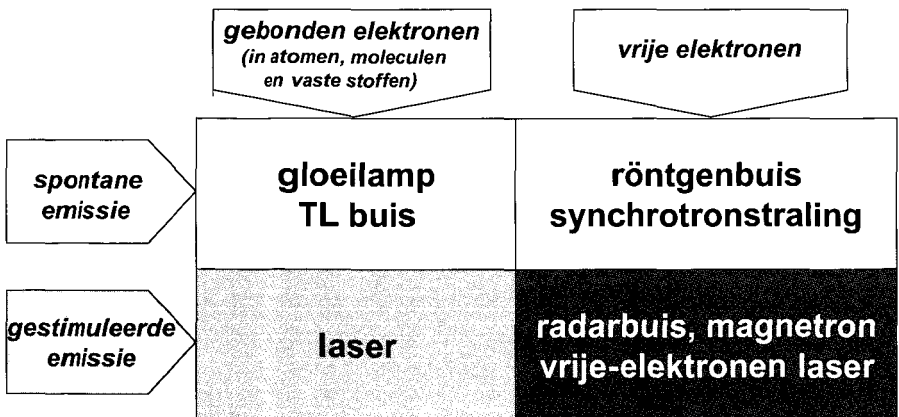
Hiermee gaf ik – heel in het kort – een schets van de richting en de zin van onze ambitie. De derde versnelling gebruik ik nu om de bredere achtergrond van het terrein van ons onderzoek te belichten. Daarbij zal ik een enkele keer van het meta-niveau afdalen en toch enige uitleg geven. Allereerst het begrip licht: ik doel daarmee op



elektromagnetische straling over een veel breder gebied dan het kleine deel van het spectrum dat voor ons nog zichtbaar is. Licht is er geweest vanaf het begin van het heelal. Of je nu gelooft in 'big bang' of schepping, *er was licht* op  $t=0$  (of heel kort daarna). Licht speelt een centrale rol in alles wat de mens afweet van zijn omgeving. Het grootste deel van de historie ging het om passieve observatie, via processen als reflectie, absorptie en transmissie van licht. Pas heel recent, in 1960, kwam hierin een fundamentele verandering. Met de komst van de laser werd het mogelijk behalve te observeren ook te manipuleren, dwz. actief in te grijpen in de omgeving. De grote intensi-

teit, of beter gezegd helderheid, van laserlicht maakt mogelijk wat eerder niet kon: atomen afbuigen, afremmen en vasthouden; grotere objecten als weefselcellen verplaatsen; evenwichten ingrijpend verstoren; licht omzetten in licht van kortere of langere golflengte. Dit heeft een doorbraak teweeggebracht in vele disciplines; daarnaast is er sprake van een nog steeds groeiend aantal toepassingen buiten de wetenschap.

Kortom: licht is belangrijk en lasers betekenden een omwenteling. Maar er zijn meer typen lichtbronnen, en lasers kunnen ook niet alles. Daarom is het zinvol de



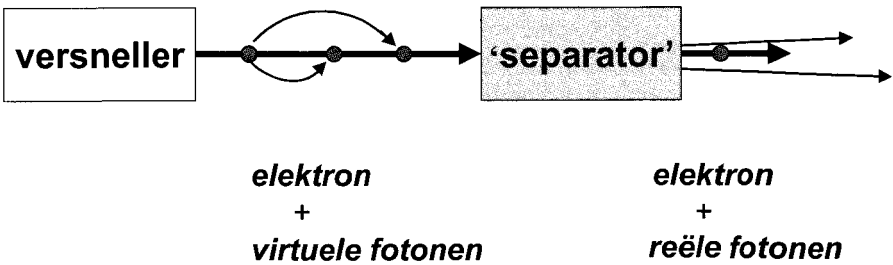
Figuur 2. Klassificatie van lichtbronnen naar de aard van de stralende elektronen en van het proces voor opwekking van de straling.

diverse lichtbronnen te classificeren, en wel vanuit twee invalshoeken: is het licht afkomstig van gebonden elektronen in een atoom, molecuul of vaste stof, of van vrije elektronen? En als tweede: is het licht van spontane aard of is het gestimuleerd, termen waar ik aanstonds nog op terugkom. Dit levert de matrix op als gegeven in fig. 2. Onze rode draad bevindt zich in de rechterhelft van dit plaatje, en wel voornamelijk in de gestimuleerde hoek. Daar herkent U in elk geval één stralingsbron, de bekende magnetron.

Misschien is het aardig om kort in te gaan op het mechanisme waarmee een vrij elektron straling uitzendt. Conceptueel is het verbazend simpel. Ik ga een beeld hanteren waar sommige collegae de wenkbrauwen

bij fronsen, maar dat mij voor deze gelegenheid toch zeer bruikbaar lijkt, ook omdat ik ermee aansluit bij het zo modieuze begrip 'virtueel'. Het beeld is het volgende: een elektron dat vrij in de ruimte beweegt, moet U zich indenken als omgeven door een wolk van virtuele fotonen, een soort spookdeeltjes van licht die voortdurend uitgezonden worden maar binnen zeer korte tijd weer door het elektron opgeslokt worden. Als we nu erin slagen elektron en virtuele fotonen van elkaar te scheiden, dan hebben de fotonen geen andere keus dan reëel te worden, en hebben we dus licht opgewekt.

Wat moet er gebeuren om die scheiding tot stand te brengen? De 'separator' (zie fig.3) moet iets doen dat het elektron wél voelt,



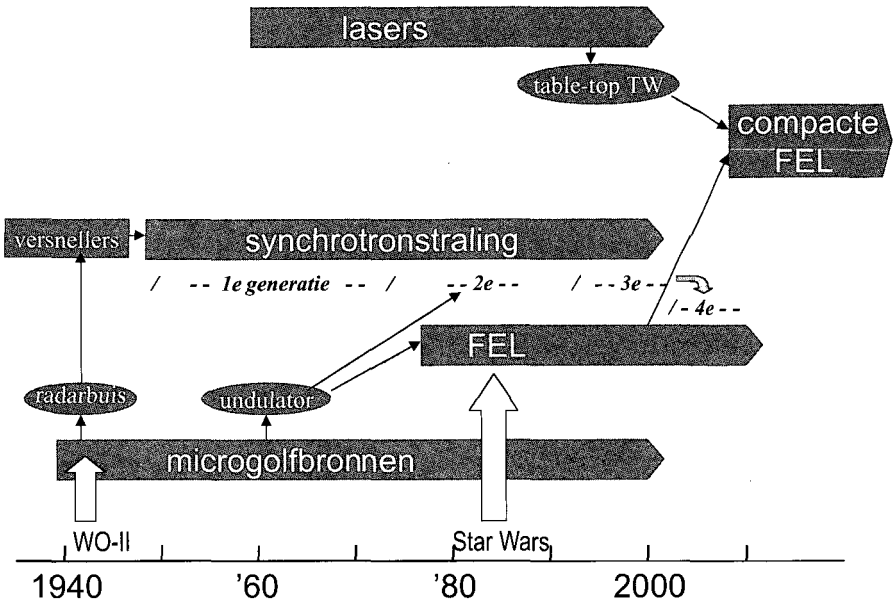
Figuur 3. Generiek schema voor het genereren van licht (fotonen) uitgaande van elektronen die tot vrijwel de lichtsnelheid versneld zijn. De bolletjes stellen één elektron voor, op vier opeenvolgende tijdstippen.

maar de fotonen niet, of omgekeerd. Dat kan van alles zijn: bijvoorbeeld afbuigen van een relativistisch elektron -dus een elektron met bijna de snelheid van licht in vacuüm- in een magneetveld. Daarbij vliegen de fotonen rechtdoor 'de bocht uit', en krijgen we de bekende synchrotronstraling. De omgekeerde situatie doet zich voor wanneer een relativistisch elektron zich niet door het vacuüm, maar door een materiaal voortbeweegt. In eerste instantie behoudt het elektron zijn oorspronkelijke snelheid, terwijl de fotonen in het materiaal langzamer worden dan in het vacuüm en dus het elektron kwijtraken. Wat betreft de verdeling van het opgewekte licht in de ruimte is op te merken dat, zolang we uitgaan van relativistische elektronen, het licht sterk voorwaarts gepiekt wordt uitgezonden en alle intensiteit geconcentreerd wordt in een nauwe bundel.

Wat ik hier beschreef is een proces dat ieder elektron individueel ondergaat, zonder iets te merken van wat er gebeurt met zijn burens in de elektronenbundel. Dit proces heet spontane emissie. We kunnen de elektronen ook zo dicht opeen pakken dat fotonen uitgezonden door één elektron, nog binnen de 'separator' eerder binnengeko-

men elektronen inhalen. Die zullen daardoor gestimuleerd worden om meer fotonen uit te zenden dan ze in het spontane proces gedaan zouden hebben. Dat heet gestimuleerde emissie, de basis van de werking van alle lasers, zowel de 'gewone' laser als het vrije-elektron type.

Na dit intermezzo over enkele simpele basisprincipes, ga ik nu over naar de grote lijnen van de ontwikkeling van vrije-elektronen bronnen. Ik blik terug op de historie op dat gebied sinds de Tweede Wereldoorlog. Ik schets (zie fig. 4) de ontwikkeling van twee parallelle lijnen van vrije-elektronen lichtbronnen: de vacuümbuizen of microgolffbronnen (waartoe ook de bekende magnetron hoort), en daarnaast de synchrotronstraling. Om redenen die later in mijn verhaal duidelijk worden, neem ik als derde lijn de lasers mee. De lijnen blijken overigens niet alleen maar parallel te zijn, er is ook interactie. Welnu, fig. 4 start met de Tweede Wereldoorlog, waarin de net uitgevonden radar vraagt om ontwikkeling van hoogvermogen microgolffbronnen. Deze worden onmiddellijk ook ingezet in de kernfysica, en veroorzaken een doorbraak in de versnellertechnologie. In 1947 ontdekt



Figuur 4. Overzicht van de ontwikkeling in de tijd van drie typen lichtbronnen: twee gebaseerd op vrije elektronen, en daarnaast de laser. FEL is de Engelse afkorting voor vrije-elektronen laser. Bij de bronnen van synchrotronstraling worden drie generaties onderscheiden; een vierde zal vermoedelijk op de FEL gebaseerd zijn. De Tweede Wereldoorlog en het Star Wars-programma hebben een directe invloed op de ontwikkeling van resp. de microgolfbronnen en de vrije-elektronen lasers.

men in een van de nieuwe, ringvormige elektronenversnellers –bij toeval!- de emissie van zeer intens licht uit een buigmagneet, de synchrotronstraling.

Eerst als lastig bijproduct beschouwd, is die synchrotronstraling inmiddels uitgegroeid tot een omvangrijke wetenschaps-‘industrie’: 24 uur per dag, 7 dagen per week pro-

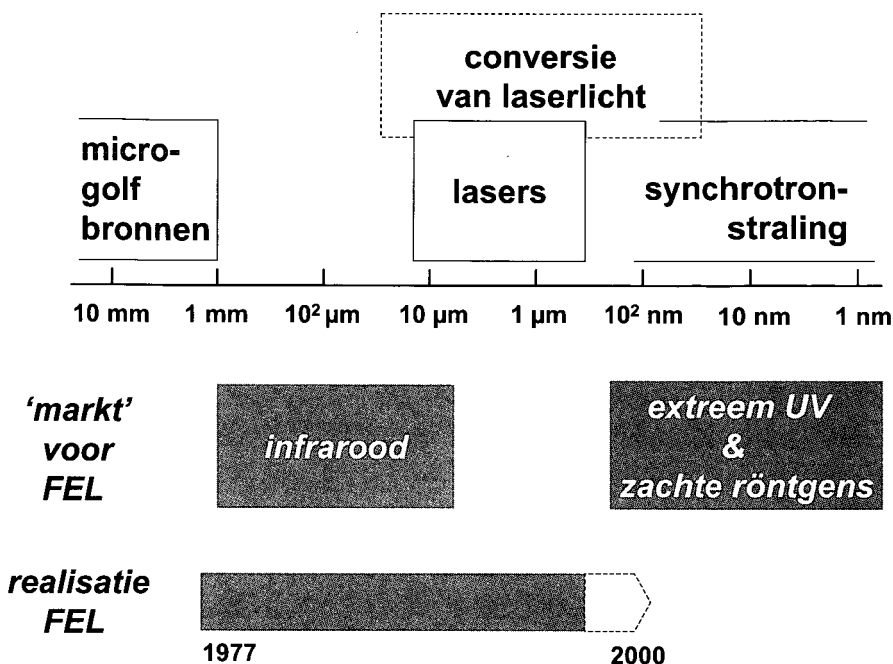
duceren enkele tientallen grote faciliteiten wereldwijd bij elkaar zo tegen de twee miljoen (!) meet-uren per jaar. De gebruikers van al die meettijd, inmiddels verslaafden aan die meettijd, zijn allang niet meer alleen uit de fysica afkomstig; het zwaartepunt is aan het verschuiven naar chemie, naar materiaalkunde en naar ‘life sciences’. De relevantie van het ontwikkelen van

bijzondere lichtbronnen lijkt mij hiermee voldoende aangetoond, ook al is over het prachtige onderzoek met synchrotronstraling zeker nog een aantal oraties te houden. De huidige, derde generatie van deze lichtbronnen maakt gebruik van zogenaamde 'undulatoren'. Dat zijn geen gewone buigmagneten, maar periodieke. Het normale spectrum van de synchrotronstraling -dat zeer breed en daarom bijna 'wit' is- wordt door een undulator samengeperst tot een nauwe lijn, met veel grotere intensiteit. Deze undulatoren zijn overigens weer een uitvinding uit de tak van de microgolffbronnen.

De twee zojuist besproken lijnen brengen iets nieuws voort: de *vrije-elektronen laser*. Dit type laser heeft dan ook kenmerken van elk van beide ouders: het kan gezien worden als de relativistische versie van de vacuüm-buis, maar even goed als de gestimuleerde versie van synchrotronstraling. Die laatste omschrijving is degene die ik in dit verhaal verder zal hanteren. Een oer-versie van de vrije-elektronen laser wordt al in 1960 gepatenteerd, onder de naam 'ubitron', weer een radarbuis, met voor het eerst de al eerder genoemde undulator, in de rol van 'separator'. Deze vinding trekt in eerste instantie

echter nauwelijks aandacht. In 1977 volgt de heruitvinding van het principe, maar nu onder de nieuwe naam vrije-elektron laser, een naam met veel betere p.r.-waarde. De ontwikkeling komt in een stroomversnelling dankzij de vele miljarden van het Star Wars-programma van Reagan. Militair wordt dat programma een grote flop, maar de wetenschap vaart er wel bij: de vrije-elektronen laser 'staat op de kaart' en alles wijst erop dat de volgende generatie synchrotronstralingsbronnen van dit gestimuleerde type zal zijn. Als we nog verder vooruitblikken in fig. 4, zien we tenslotte iets nieuws ontstaan uit de lijnen van de gewone lasers en de vrije-elektronen lasers: de *compacte vrije-elektronen laser*, het eigenlijke thema van mijn verhaal.

Tot zover mijn grove schets van de ontwikkelingen en hun samenhang in de tijd. Om de plaats van de vrije-elektronen laser in het grote geheel beter te begrijpen, is het nodig naast de tijd ook twee andere dimensies te bekijken: die van de geproduceerde golflengte en die van de intensiteit. Ik begin met de golflengte (zie fig. 5). De eerste ontwikkelingen vonden plaats in het spectrale gebied tussen de mm-golven en het zicht-



Figuur 5. Spectrale gebieden bestreken door de diverse lichtbronnen vóór de komst van de vrije-elektronen laser. De vrije-elektronen laser vulde eerst het gat in het (verre) infrarood en zal mogelijk in de toekomst de synchrotronstraling vervangen, of tenminste aanvullen, in het extreem ultraviolet en het zachte-röntgengebied.

bare gebied. Ik heb het genoeg betrokken te zijn geweest, samen met een team van het FOM-Instituut voor Plasmafysica, bij de bouw van de eerste infrarood-FEL in Europa. Deze laser, FELIX genaamd, maakte in 1991 als eerste ter wereld een van de cruciale beloften van de vrije-elektronenlaser waar, namelijk snelle afstembaarheid

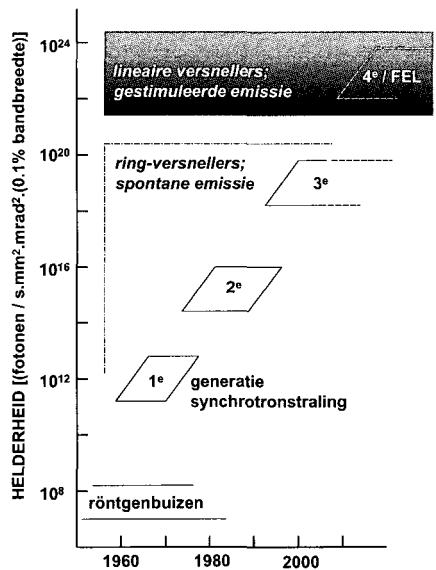
over een breed golflengtegebied.

Momenteel gaat de ontwikkeling door naar het fysisch en technisch moeilijker -en ook nog veel duurder- gebied van het extreem-ultraviolet en de röntgenstraling. Door velen wordt dit gezien als de ontwikkeling van de volgende -en wel de vierde-generatie synchrotronstraling.

Uiteraard is ook de intensiteit van de diverse lichtbronnen een cruciale parameter. Interessant is dat het gemiddelde vermogen van al die lichtbronnen in de loop van de jaren niet dramatisch stijgt. Het typische vermogen van lasers is nog vaak van de orde van slechts een watt, met als uitschieters de industriële lasers, die tot in het kilowatt gebied doordringen. Volstrekt anders ligt dat met de 'helderheid', een grootheid die in één getal uitdrukt hoeveel licht van een bepaalde bandbreedte gaat door een gegeven oppervlak, en hoe goed het licht gebundeld is. Bij de synchrotronstraling is over de afgelopen 40 jaar in deze helderheid een vooruitgang geboekt van maar liefst een factor 1000 per 10 jaar (zie fig. 6). De vooruitgang komt van twee zaken: van de toename in de helderheid van de elektronenbundel (inderdaad, voor elektronen dezelfde grootheid) en van de introductie van de undulator.

Met de drie generaties ringvormige versnellers die we inmiddels gehad hebben, loopt de technologie weer tegen zijn grenzen aan. Een volgende stap vooruit, zoals de machine bij DESY die nu gaat maken, vereist een wezenlijk andere aanpak, een paradigma-

verschuiving: van spontane emissie naar gestimuleerde, en van de ringvormige versneller naar de lineaire. Lineaire versnellers gaan weliswaar minder efficiënt met energie om, maar ze blijken een aanzienlijk hogere helderheid van de elektronenbundel



Figuur 6. De helderheid, de meest gangbare kwaliteitsfactor van lichtbronnen, voor de klassieke röntgenbuizen, voor drie generaties synchrotronstralingsbronnen en voor de geplande vierde generatie op basis van de vrije-elektronen laser. De overgang naar de vierde generatie wordt gekenmerkt door verandering van zowel het type versneller als de aard van het proces voor opwekking van de straling.

te kunnen leveren, en daarnaast veel kortere pulsen. De vierde generatie lichtbron belooft opnieuw een winst in helderheid met een factor 1000. Nog indrukwekkender is dat de piek-helderheid, gedurende de zeer korte pulsen, zelfs met vijf tot negen orden van grootte zal toenemen ten opzichte van die van de beste bron uit de derde generatie. Juist die piek-helderheid is de grootheid waar het om gaat in de meest geavanceerde wetenschappelijke toepassingen, meestal in combinatie met een zo kort mogelijke pulsduur. Ook in de pulsduur is sprake van een doorbraak: deze gaat bij de lineaire versneller naar een waarde van de orde van 100 femtoseconde, dat wil zeggen zo'n factor honderd korter dan wat met een ringvormige versneller haalbaar lijkt.

Daarmee komen we in het gebied waar atomaire bewegingen in moleculen in de tijd opgelost kunnen worden, en zou het opnemen van een 'real-time' hologram van een vibrerend molecuul mogelijk moeten worden. Het golflengtegebied waar de DESY-machine zal gaan werken is dat van enkele nanometers tot enkele tientallen nanometers, een gebied dat uitstekend aansluit bij de afmetingen die relevant zijn in de huidige groeigebieden nanofysica en 'life

sciences'. Ook liggen de karakteristieke absorpties van biomoleculen vooral in dit gebied, waardoor goed contrast in de microscopie binnen bereik komt.

## Wetenschap-Technologie Spiraal

Hiermee bereiken we een goed punt om nu de vierde versnelling te kiezen. Wat fascineert mij in de geschetste historie?

Enerzijds het samenspel van ontwikkelingen in een puur fundamentele discipline als de kernfysica met die in de maatschappij: ik noemde al de Tweede Wereldoorlog en het SDI-programma. Dit samenspel leidt tot iets volstrekt onverwachts en nieuws, de synchrotronstraling, die binnen 20 jaar uitgroeit tot wat ik eerder een 'wetenschaps-industrie' noemde, die naast de fysica volop andere disciplines bedient. Dit is typisch de manier waarop fundamentele wetenschap behoort te werken: alle aspecten, van puur fundamenteel tot die van 'enabling science', spelen een rol. Anderzijds boeit mij de niet aflatende race naar weer een volgende generatie machines, met weer orden van grootte verbetering. De wetenschap lijkt onverzadigbaar, mateloos. Wat technisch kan, komt



direct voor de wetenschap beschikbaar, en waar de wetenschap om vraagt wordt met man en macht ontwikkeld.

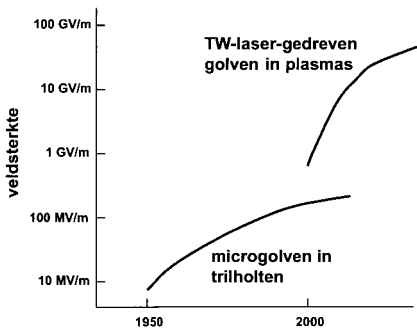
In dat licht moet ook onze Holy Grail gezien worden. Het compact maken van een vrije-elektronen laser, tot de afmetingen van een laboratoriumruimte, is conceptueel binnen bereik gekomen dankzij een doorbraak bij de concurrentie, de 'gewone' laser. Waar ik op doel is de ontwikkeling van de 'table-top terawatt' laser (T<sup>3</sup>-laser), een fantastisch apparaat dat een piekvermogen van 100 maal het vermogen van de gehele Nederlandse elektriciteits-voorziening levert, zij het gedurende pulsen van slechts zo'n 100 femtoseconde ( $10^{-13}$  seconde). Wat er in korte tijd al met dit nieuwe instrument bereikt is, is een fraaie illustratie van mijn eerdere uitspraken in de discussie 'grote faciliteiten' versus 'table-top instrumenten': sinds onderzoekers niet langer gebruik hoeven te maken van een van de weinige centrale TW-laser faciliteiten, heeft zich een explosie van nieuwe toepassingen voorgedaan. Eén daarvan betreft directe omzetting van het zichtbare laserlicht in zachte röntgenstraling via generatie van hogere harmonischen. Het gaat daarbij

om een alternatief voor de door ons beoogde methode, en dus is de vraag aan de orde wat wij meer doen dan een ingewikkelde omweg na te streven. Mijn antwoord is dat de vrije-elektronen laser twee duidelijke voordelen heeft: de golflengte is snel verstembaar over een breed gebied, en daarnaast kan de energiedichtheid in een elektronenbundel hoger opgevoerd worden dan in een typisch laser-medium omdat er geen koelproblemen zijn.

## De Hoogste Versnelling

Het is nu hoog tijd voor de hoogste versnelling, waar het allemaal om begonnen was. Hoewel de hoogste versnelling vaak een 'overdrive' is, ga ik misschien wel wat speculeren maar niet overdrijven. De uitdaging die mijn groep en ik zijn aangegaan, is om nieuwe concepten te ontwikkelen voor een 'poor man's' versie van de vrije-elektronen laser. Als de omvang omlaag moet, zal de energiewinst per meter in de versneller omhoog moeten. En dat terwijl de huidige versneltechnologie, gebaseerd op microgolven, in de loop van 50 jaar uitgeëvoelued is en tegen zijn grenzen aanloopt, bij

zo ongeveer 100 MV per meter (zie fig. 7). Wat nodig is, is een revolutie, en bij de belangrijkste optie daarvoor spelen twee steekwoorden: plasma's en TW-lasers, kortom volstrekt nieuwe technologie. Het idee is simpel: we nemen een plasma, een gas van positieve ionen en elektronen; als we daar een intense laserpuls doorheen schieten, laten de plasma-elektronen zich kortstondig door de stralingsdruk van hun plaats duwen, terwijl de veel zwaardere ionen op hun plaats blijven. Zo ontstaat vlak achter de laserpuls een hekgolf, om precies te zijn een golf in de elektronen-



Figuur 7. De ontwikkeling in de tijd van de maximaal haalbare veldsterkten voor versnelling van deeltjes, op basis van de huidige microgolf-cq. radiofrequent-technologie en van de recent opgekomen nieuwe methode, waarin plasmagolven worden opgewekt met intense laserpulsen.

dichtheid, waardoor het normale evenwicht tussen positieve en negatieve ladingen verstoord wordt, zij het zeer kortstondig en zeer lokaal. In die hekgolf heerst dus een sterk elektrisch veld, dat we kunnen gebruiken om een pakketje elektronen -van buitenaf ingeschoten- te versnellen. De veldsterkten die in een plasma gehaald kunnen worden lopen op tot 100 GV/m, dat wil zeggen wel 1000 maal hoger dan de tot nu toe gebruikelijke! Als er één principe is dat de omschrijving 'hoogste versnelling' verdient, dan toch wel dit.

Maar hoe maak je er een serieuze plasma-versneller van? Er zijn tenminste drie 'issues' waar nog flink aan gewerkt moet worden:

- de te versnellen elektronen moeten bij het inschieten al tegen de lichtsnelheid aan zitten (bedenk hierbij dat een elektronen-'versneller' in de meeste gevallen de snelheid nauwelijks laat toenemen, maar alleen de energie verhoogt)
- de in te schieten pakketjes elektronen moeten kort zijn ten opzichte van de lengte van de hekgolf
- de hekgolf moet over een redelijke afstand in stand blijven.

Om de eerste twee punten te begrijpen, moet U zich een golfsurfer voor de geest halen. Als zo'n surfer niet op het juiste moment als een gek meepeddelt met een aanstormende golf, gaat hij -of zij- alleen op en neer en wordt niet door de golf meege-sleept. Vervolgens is het zaak een surfboard te hebben dat duidelijk korter is dan de flank van de golf, anders gaat er iets heel erg mis. Voor de praktijk van de plasmaver-snelser betekent dit dat er elektronen-pak-ketjes gemaakt moeten worden die zeker tienmaal korter zijn dan wat tot nu toe haalbaar werd geacht. Omdat de lading dan wel heel erg opeen geperst wordt en de afsto-ting enorm wordt, is zo'n pakketje elektro-nen eigenlijk een bom, die dan ook in één miljardste seconde uit elkaar spat. Tenzij we heel hard versnellen, vanaf nul over zo kort mogelijke afstand tot bijna de lichtsnel-heid. Bij die snelheid wordt gelukkig de afstoting onschadelijk. Onze benadering om dit te realiseren, waaraan we volop bezig zijn, is het toepassen van een heel ouderwets versnelprincipe, het elektrostati-sche, maar dan wel in een heel nieuw jasje. Daartoe gebruiken we opnieuw de TW-laser en een plasma, waarmee we, sinds kort beschermd door een patent, de kortste

hoogspanningspulsen ter wereld gaan realiseren.

Dan is er nog de derde, belangrijke 'issue'. Op zich is het maken van de hekgolf zoals ik eerder beschreef, geen kunst. Probleem is alleen het verschijnsel van diffractie: om de gewenste intensiteit te halen moet de laser vrij scherp gefocusseerd worden, en is de hoge intensiteit maar over een vrij korte lengte beschikbaar. In de praktijk gaat het om lengten van ruim beneden de millime-ter, terwijl voor een serieuze versneller vele centimeters nodig zijn. Voor dit type pro-bleem is in de telecommunicatie allang een oplossing; de glasvezel. Maar helaas kun-nen daar geen vrije elektronen doorheen. Dus moeten opnieuw plasma's uitkomst brengen. Het creëren van een geschikte plasma-licht geleider is een plasmafysische uitdaging van de eerste orde. Binnen de onderzoekschool CPS, waarover straks meer, is hiervoor een nieuw concept ont-wikkeld. Als dat blijkt te werken, is er sprake van een echte doorbraak die een bruikba-re plasmaver-snelser een stuk dichterbij de realiteit brengt. Dan rest nog het probleem van het miniaturiseren van het andere grote onderdeel van de vrije-elektronen laser, de

undulator. Ook hiervoor denken wij de eerder genoemde supersnelle hoogspanningstechnologie te kunnen inzetten om daarmee de eerste elektrostatische undulator te bouwen.

Inmiddels ben ik toch weer flink wat aan het uitleggen geweest. Voor het zeer waarschijnlijke geval dat U hebt afgehaakt, bij dezen, helaas achteraf, een 'executive summary': wat zou U van dit verhaal toch mee kunnen nemen? Ten eerste dat het ene extreem, de TW-laser, andere extremen mogelijk maakt, zoals bijvoorbeeld in veldsterkten. Ten tweede dat plasma's een essentiële rol spelen en dat er nieuwe plasma-regimes verkend worden. Ten derde dat dit werk een bijdrage gaat leveren aan een echte revolutie in versnellerland. En tenslotte: dat we vol ideeën zitten, die ons zeker de komende acht jaar van de straat zullen houden. En net als de oorspronkelijke ridders van de Heilige Graal zullen ook wij de neiging hebben het 'zoeken naar' de graal haast nog interessanter te vinden dan het 'bereiken van' die graal. Zo hebben we nu al diverse interessante zijpaden op het oog, die ook zullen leiden tot het opwekken van licht, maar nog niet met de specificaties van de uiteindelijke vrije-elek-

tron laser. Dat einddoel overigens verliezen we zeker niet uit het oog; dat zal toch steeds de richting blijven bepalen.

## Positionering

Dan rest mij nu nog een belangrijke vraag: Waar staan we met dit onderzoek, in Nederland en internationaal? Om in Nederland te beginnen: Na het sluiten van de versneller AmPS bij het NIKHEF in Amsterdam, zijn wij de laatste groep in de versnellerfysica in Nederland. Dus in eerste instantie zouden we ons wat eenzaam moeten voelen. Echter, u kent het inmiddels gevleugelde woord: 'ieder nadeel heeft zijn voordeel'. Welnu, we zijn tenminste absoluut uniek. En bovendien, we zitten niet alleen in de 'klassieke' versnellerfysica, maar we zijn betrokken bij een revolutie, die zich afspeelt op het interessante raakvlak met de plasmafysica en met de laserfysica of quantumelektronica. Voor velen van U zullen die gebieden heel dicht bij elkaar lijken, maar ik kan U verzekeren dat binnen fysisch Nederland dit toch nog heel verschillende werelden zijn. In feite is het slaan van een brug tussen deze drie sub-

gebieden de bestaansgrond voor de landelijke onderzoeksschool CPS, het Centrum voor Plasmafysica en Stralingstechnologie. Het zwaartepunt van deze onderzoeksschool, qua omvang van de betrokken groepen, ligt bij de TUE, die penvoerder is en die zich hiermee landelijk profileert. De door mij beschreven activiteit, die deze profilering verder verscherpt, zou niet mogelijk zijn zonder de spontane interactie die binnen CPS is opgetreden. Met spontaan bedoel ik: niet gedreven door veel extra geld, maar op basis van wederzijdse interesse en complementariteit. Voor mij is dit een schoolvoorbeeld van hoe een onderzoeksschool behoort te werken.

Dan nog het internationale aspect. Daar opereren we binnen een selecte, wereldwijde gemeenschap die zich georganiseerd heeft via het International Committee for Future Accelerators (ICFA). Deze gemeenschap heeft een zeer duidelijk zwaartepunt in de Verenigde Staten, terwijl de vertegenwoordiging vanuit Europa nog beperkt is. De ICFA richt zich in eerste instantie op versnellers voor de hoge-energie fysica, en de eerste spin-off van onze ontwikkelingen zullen ook in die richting zijn. Onze meest

directe concurrenten zitten in Berkeley, Los Angeles en Brookhaven. Wij hebben daar goede contacten mee, ondermeer door uitwisseling van studenten op stage. De concurrentie kunnen wij zonder problemen aan, door de kwaliteit van onze promovendi, door de goede technische ondersteuning, met name vanuit de GTD, de Gemeenschappelijke Technische Dienst van de TUE, en omdat we duidelijk eigen, en naar onze mening uiteraard betere, accenten leggen in ontwerp en uitvoering.

## Onderwijs

Tot zover mijn beschouwing over het onderzoek. Geheel los van enige versnellingen ga ik nog kort in op een heel ander onderwerp, waarbij ik niet op lange ervaring kan bogen, en daardoor misschien niet eens weet welke open deuren ik kan intrappen: het onderwijs. Ik begin met een citaat van Oscar Wilde: 'Education is an admirable thing, but it is well to remember from time to time that nothing that is worth knowing can be taught'. Als dit onverkort waar was, konden we de universiteit wel sluiten. Toch zit er wel wat in. Vandaar ook dat de

meeste moderne vormen van onderwijs terecht het overdragen van enige basiskennis zo snel mogelijk laten volgen door iets dat de studenten zelf moeten doen. Waar het dan mijns inziens verder om gaat, is de studenten te leren 'systeem-denken', ze verbanden te laten zien, en hoe ze die verbanden kunnen uitbuiten; ze te leren hoe ze ontbrekende kennis kunnen vinden en hoe daarmee om te gaan; ze te laten zien hoe je kunt leren van kritische discussie met collega's, inclusief het stellen van domme vragen. Wat betekent dat voor de hoorcollege's? Niet langer het voordoen van hele afleidingen; liever meer meta-niveau erin: uitgangspunten, verbanden, relevantie en dergelijke zaken. En daarnaast vooral demonstraties, bij voorkeur in de vorm van simulaties, waartoe het notebook tegenwoordig de mogelijkheden geeft. En de moeilijke sommen maar liever naar een werkcollege waar vooral zelfstudie plaatsvindt, met goede boeken en andere literatuur.

## Slotwoord

Dames en heren, inmiddels ben ik ruim twee jaar werkzaam aan deze universiteit, die ik beschouw als de best bestuurde universiteit van Nederland, en waar ik me uitstekend thuis voel. Eén voorbeeld van besluitvaardigheid en daadkracht wil ik noemen: het nationale snelheidsrecord waarmee indertijd het College van Bestuur, bijgestaan door de toenmalige decaan van de faculteit Natuurkunde, collega Sluijter, mijn benoeming realiseerde. Aan die snelheid was behoefte op dat punt in mijn loopbaan, en ik ben er U nog steeds dankbaar voor.

Vervolgens wil ik de collegae in de faculteit Natuurkunde bedanken voor de prettige wijze waarop zij mij in hun midden hebben opgenomen. Bijzondere waardering heb ik voor de regelmatige interactie met collega Schram: beste Daan, hoewel je zeer snelle laterale denkwijze mij wel eens problemen geeft, blijft jouw diepe inzicht in de plasmafysica –in al zijn facetten- voor mij een bron van inspiratie. Dat geldt zowel voor de fysische inhoud van mijn werk als voor de acties die wij samen ondernemen ter bevoor-

dering van de plasmafysica op beleidsniveau.

Vanaf dit punt wordt het moeilijk: dankwoorden als deze hebben de neiging onvollediger te worden naarmate ze langer worden. En is nu niet juist de kunst van management, ook van het managen van een oratie, om heldere keuzen te maken en nee te kunnen zeggen. Ik maak dan ook slechts twee uitzonderingen.

Waarde Kistemaker, beste Jaap, ik heb je vele jaren meegemaakt als directeur van AMOLF. Jouw stijl van 'science management', het omgaan met medewerkers en hun ideeën, met buitenlandse collegae en met bestuurders is een lichtend voorbeeld voor mij geworden, ook al duurde het jaren voor ik me daarvan bewust werd. Ik vlei me met de gedachte er iets van te hebben overgenomen. Al lukt het mij nog steeds niet om alle post af te handelen op de dag van binnenkomst.

Tenslotte mijn ouders: Vader en moeder, wat een genoegen dat jullie beiden hier aanwezig kunnen zijn. Jullie hebben een belangrijke invloed gehad op mijn keuze

voor het vak dat ik nog steeds blijf te beoefenen: niet zozeer door wetenschap en techniek actief te stimuleren, dat had ik niet zo nodig. Maar wel door de juiste soort rustige belangstelling en vooral doordat altijd alles kon, binnen redelijke grenzen: van scheikundeproefjes in de keuken tot radio's solderen op de eettafel en zelfs versnellingsbakken reviseren in de woonkamer. Jammer dat expliciete dankbaarheid daarvoor soms zo laat komt, maar bij deze 'en public'!

Ik dank U allen voor Uw aanwezigheid hier en voor Uw aandacht. Ik heb gezegd.







Marnix van der Wiel werd geboren op 2 februari 1943 in Den Haag, waar hij ook het gymnasium doorliep. Na het behalen van het kandidaatsexamen Scheikunde aan de Rijksuniversiteit Leiden, studeerde hij in 1966 af in de Experimentele Natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam. In 1971 promoveerde hij cum laude bij Prof.dr. J. Kistemaker op een proefschrift getiteld 'Oscillator Strengths for Multiple Ionisation of He, Ne and Ar'.

Na een postdoctoraal verblijf aan de University of British Columbia te Vancouver werd hij in 1972 groepsleider aan het FOM-Instituut voor Atoom-en Molecuulfysica in Amsterdam. Daar startte

hij onderzoek aan de interactie van intense lasers met materie, onder andere aan de elektron-spectroscopie van multifotonprocessen en aan de productie van röntgenstraling met laserplasma's. In 1978 werd hij benoemd tot bijzonder hoogleraar aan de Vrije Universiteit te Amsterdam. In 1987 volgde zijn benoeming tot directeur van het FOM-Instituut voor Plasmafysica te Nieuwegein, waar zijn wetenschappelijke activiteit zich concentreerde op de ontwikkeling van twee vrije-elektronen-laser projecten.

Sinds 1 december 1997 is hij voltijds hoogleraar aan de TU/e, met als leeropdracht de 'Fysica en Toepassingen van Versnellers'. Daarnaast is hij directeur van de landelijke onderzoekschool CPS, het Centrum voor Plasmafysica en Stralingstechnologie. Tevens is hij lid van de KNAW en van haar Raad voor de Natuur- en Sterrenkunde, lid van het bestuur van SRON en voorziter van de Stuurgroep van de Nederlands-Vlaamse bundellijn aan de synchrotronstralingsfaciliteit ESRF in Grenoble.

---

**TU/e** technische universiteit eindhoven

---

Informatie:  
Service Bureau Auditorium Plus  
Telefoon 040 - 247 22 50

ISBN 90 386 1052 1