

Plasma's, vuur, en wat nu?

Citation for published version (APA):

Schram, D. C. (2005). *Plasma's, vuur, en wat nu?* Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2005

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TU/e

technische universiteit eindhoven

Afscheidscollege
23 september 2005

prof.dr.ir. Daan Schram

plasma's, vuur,
en wat nu?

/ faculteit technische natuurkunde

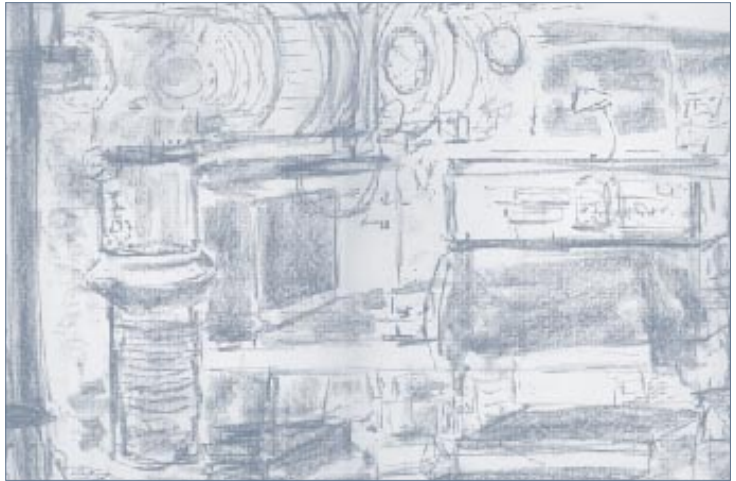
Afscheidscollege

Uitgesproken op 23 september 2005
aan de Technische Universiteit Eindhoven

plasma's, vuur, en wat nu?

prof.dr.ir. Daan Schram

Schets (DCS) van
plasma experiment,
waarin excitatie,
rotatie en transport
zijn onderzocht



Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en Heren,

De eerste gedachte, die opkwam bij de voorbereiding van dit afscheidscollege was die van “kleiner Mann, was jetzt”? Het is een goede omschrijving van wat ik nu toch eindelijk moet ondergaan. Ik waarschuw U maar bij voorbaat: als het aan mij ligt komt het niet van genieten. Zonder discussie, zonder spanning, geen creatie en dus geen leven. Het gaat om: ‘wat nu’.

De tweede gedachte is die van de laatste kans om nog een paar zaken te herhalen, omdat ze zo zijn en waaraan niemand ooit gehoor gaf in die mate die ik logisch en nodig achtte: teveel gebouw, te weinig mens. Ik wil dit uur echter hier niet aan besteden. Het is zo en ieder ander, ook U, zou het kunnen opmerken. Laat ik dit uur gebruiken om een discussie te houden over een onderwerp, waarbij het wenselijk is dat ik daarin gestudeerd heb. Waarbij ik kennis heb kunnen nemen van resultaten van promovendi en afstudeerders. Dan wordt het voor U wellicht een bruikbaar uur.

Dit afscheidscollege heeft als titel gekregen: ‘Plasma’s, vuur en wat nu’. Een andere wellicht mooiere titel zou geweest kunnen zijn, de titel van een van Primo Levi’s boeken: *Zo niet nu, wanneer dan*. Deze drukt een ernstige urgentie uit: de noodzaak van onmiddellijke aandacht voor iets wat niet kan wachten. Dat natuurkunde, de plasmafysica, in de eerste plaats verder moet als wetenschap. Niet omdat ik toepassing minder vind. Integendeel, iets maken vind ik mooier en moeilijker dan iets bedenken. Ieder die mij kent weet dat: het ontwerpen met Ries van de Sande, het werken met Bertus Husken, Herman de Jong en Jo Janssen zal ik misschien wel het meeste missen. Maar fysica moet allereerst op inhoud, op essentie en in de breedte bedreven worden. Alleen zo blijft de kennis aanwezig voor een verdere ontwikkeling van bijvoorbeeld zonnecellen en kernfusie. De urgentie die ik ook voel is die van onze bijdrage aan de hardnekkigste problemen van alle tijden: die van beschikbaarheid van energie en water. Een nieuw soort Manhattan-project, nu voor energie voor mensen, niet alleen met thermonucleaire

fusie, maar ook en vooral met zonnecellen, windenergie, biomassa, ook om andere mensen elders een snellere start te gunnen. Onze fysieke agenda is niet klaar. Laten we net als bij andere disciplines als de geneeskunde onze diepe gedachten en vindingen combineren met, of zelfs ophangen aan de noodzaak van iets.

Dit pleidooi voor inhoud en daarnaast sterke aandacht voor gebruik hangt samen met mijn achtergrond. Met veel offers van mijn ouders kon ik als een van de talloze van hun kinderen studeren. Ik begon in Delft scheikunde, maar moest, hoewel niet onhandig, na een maand een andere studie kiezen omdat de hoeveelheid glasbreuk mijn budget te boven ging. Ik koos toen een studie die niet te abstract was en uitzicht bood op minder breuk: Elektrotechniek. Natuurkunde heb ik niet gekozen omdat er een proef bij was waar je door afvlijen een bepaalde weerstand moest bereiken. Het bleek niet veel te baten: bij Elektrotechniek waren er zeker zoveel proeven en was er daarnaast praktisch werken, ook een maand op een werktuigbouwkundig onderwerp. Het is allemaal onverhoopt toch heel nuttig geweest en heeft zeker een rol gespeeld bij mijn interesse voor het detail in het ontwerpen van experimenten.

Als afgestudeerd ingenieur, met microgolven als onderwerp, heb ik toen gekozen voor het FOM-Instituut voor Plasmafysica. Deels omdat ik dacht dat microgolfervaring van groot belang zou kunnen zijn, maar deels ook vanwege de doelstelling van het instituut: de nieuwe energie van thermonucleaire fusie. Iets wat zeer goed paste bij mijn achtergrond als gereformeerde met de onverwoestbare neiging anderen te willen helpen. Alles is dus toeval, maar geen slecht toeval.

Ries van de Sande
bij etsopstelling



Plasma

Hoe zie ik plasmafysica, de fysica van geïoniseerde media, zoals een moderne naam nu wel luidt. Ik houd mij liever bij de oude naam: 'plasma', een term die plastisch, door je vingers heen glippen, betekent. Heeft het voordeel de wetenschap, de natuurkunde, disciplinair te ordenen? Is plasma een aparte subdiscipline? Enerzijds is het klassieke natuurkunde; de moeilijkheid, en dus de aardigheid, ligt bij de complexiteit van de verzameling van processen, niet zozeer bij één fysisch mechanisme, überhaupt een nieuwe weg in de natuurkunde. Plasma's hebben anderzijds karakteristieken van een eigen materie-toestand met sterke kenmerken, die het wel een aparte positie geven. Het is principieel een niet-evenwicht systeem, plasma is er niet, maar moet gemaakt worden. Er is dus altijd in tijd en/of ruimte een deel van het plasma ioniserend, daar waar het wordt gemaakt, en een ander (meestal groter) deel recombinerend, daar waar het relaxeert en uitsterft. Plasma is dus altijd in de overgang van geworden naar verdwijnen en is in ruimte en tijd gestructureerd. Hoewel nooit in thermodynamisch evenwicht, kan toch bij benadering een soort dubbel quasi-evenwicht worden gevonden, gekarakteriseerd door één of twee extra niet-evenwicht parameters, die de afwijking van thermisch en ionisatie-evenwicht aangeven. Zo'n beschrijving wijst op twee toestanden: een ioniserende en een recombinerende fase. Een van de mogelijkheden het teveel genieten te vermijden is deze niet-lineaire beschrijving van het plasma verder uit te werken. Deze zou kunnen wijzen op een essentieel gestructureerd zijn van plasma's, met stroomdragende filamentachtige structuren in een rustige recombinerende achtergrond.

Plasma is dus een dynamisch, moeilijk grijpbaar medium, geheel naar mijn zin. Het lijkt oppervlakkig gezien op een ijl gas: de deeltjes, atomen, elektronen en ionen zijn ver van elkaar. De geladen deeltjes zijn echter essentieel: de sterke elektrische krachten tussen de geladen deeltjes maken dat een plasma meer weg heeft van een geleidende vloeistof. Elektrische stroom wordt mogelijk en daarmee verhitte van het plasma. Bovendien kunnen de geladen deeltjes door magnetische velden worden opgesloten, doordat de diffusie loodrecht op



magnetische velden sterk wordt verminderd. Daardoor kan een zeer heet en toch tamelijk ijl plasma voldoende lang opgesloten worden om thermonucleaire fusie mogelijk te maken.

Nu moet vermogen toegevoerd worden om het plasma (de elektronen) voldoende te verhitten om met productie van nieuwe elektronen het verlies door transport en recombinatie te compenseren. De elektronentemperatuur moet daarbij voldoende hoog zijn, minimaal een tiental procenten van de ionisatie-energie, dus enkele tienduizenden graden. Het opgenomen vermogen wordt verdeeld over de geproduceerde elektronen en ionen, met een extra factor die de andere verliezen beschrijft. De geproduceerde ionenflux is dus ruw te schatten als die extra factor, die afhangt van dichtheid en afmeting van het ioniserende deel, kan worden berekend.

De productie van nieuwe deeltjes en de verhitting zal leiden tot drukverhoging in het ioniserende deel. Door het drukverschil met de recombinerende achtergrond ontstaat een sterke, soms supersonische, stroming. Plasma's zijn interessante objecten voor de stromingsleer. Door de lichte massa zullen de elektronen sneller kunnen expanderen en ontstaat een elektrische stroom naar het ioniserende deel toe. Plasma is dus in staat elektrische en magnetische velden en stromen te genereren uit drukverschillen: plasma als dynamo. Dit leidt tot een zeer interessante dynamiek bij laser- en kathodespots en het is van belang in de astrofysica.

In een plasma is er een sterke dissociatie van moleculen en dus zijn de dichtheden van radicalen, chemisch actieve atomen en moleculen hoog, veel hoger dan die in evenwicht bij de temperatuur van de koele omgeving en de wand. Een plasma heeft dus een hoge specifieke reactiviteit, die alle chemie met alle deeltjes mogelijk maakt. Bij grote flux radicalen wordt het oppervlak veranderd, gepasseerd, en een gewijzigde oppervlaktechemie is het gevolg.

Plasma's geven licht; elektronen kunnen atomen en ionen exciteren met als gevolg karakteristieke lijnstraling. Bij gewone plasma's met temperaturen in het elektronvolt gebied zal dat straling zijn van het infrarood tot het vacuüm ultraviolet. Plasma's zijn dus geschikte stralingsbronnen voor zichtbaar licht en het ultraviolet. Indien men meer energie toevoert dan zal het atomaire systeem kunnen springen naar een hogere ionisatietoestand met straling tot in het zachte röntgengebied. Straling geeft ook informatie over de processen in een plasma. Hier keert

het nadeel van de complexiteit van een plasma om in een voordeel: er is meer waar te nemen en met goede modellen kunnen deze gegevens worden vertaald naar kennis van plasmagrootheden.

De subdiscipline plasmafysica met fusie, met genereerde velden, met hoog specifiek impuls met sterke stroming, met licht van infrarood tot het verre ultraviolet, met chemie in plasma en aan het door het plasma veranderde oppervlak, met clusters, is een ideale proeftuin voor niet-evenwicht fysica en chemie.

Bovenstaande kenmerken maken plasma zeer bruikbaar. Plasmafysica is gegroeid in het kader van toepassing van dit medium: verlichting, astrofysica, fusie en de laatste decennia de fijnzinnige chemie aan een oppervlak in de micron- tot nanotechnologie. Oppervlakte modificatie, oxidatie, nitreren, restauratie van archeologische artefacten, depositie van dunne lagen silicium, koolstof en zinkoxide zijn voorbeelden van in onze groep onderzochte toepassingen. Maar in mijn ogen is een plasma in de eerste plaats een zeer boeiend medium, ideaal voor analyse van niet-evenwicht straling, chemie, dynamiek, de opwekking van velden, van elektromagnetische golven, kortom van vrijwel alle fysica.

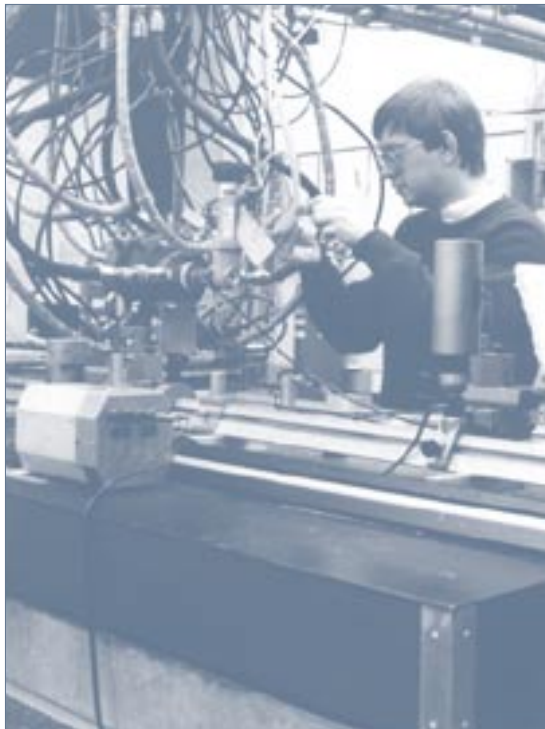
In natuurlijke vorm komt plasma op aarde weinig voor. De bliksem, de bolbliksem, het noorderlicht: op aarde is plasma als vuur. Wij leven nu in de tijd dat we ook dit vuur kunnen maken. Plasmafysische verschijnselen kunnen een rol spelen in de atmosfeer, voor de afbraak en creatie van bijvoorbeeld ozon. Zij zijn belangrijk in de ionosfeer. Het vuur van kometen is plasma. De zon kent vele plasma's: de hete corona met gemagnetiseerde plasmadraden, de koelere zonneatmosfeer met omstandigheden die lijken op die van atmosferische bogen, en het binnenste zeer dichte en zeer hete plasma, dat de zon (en ons) door fusiereacties in stand houdt. Dan zijn er vele sterren, kleine, hete, zeer dichte maar ook grote koelere sterren, en daartussen de interstellaire ruimte met de diffuse en donkere wolken. Plasma is sterrenstof. De omstandigheden zijn natuurlijk zeer verschillend met die van aardse plasma's. Het zou toch heel goed zijn als het onderwijs kennis van beide zou aanbieden.

Thermonucleaire fusie in het plasma houdt de zon in stand. De dichtheid van waterstof is hoog, de afmetingen zijn groot, en de toegemeten tijd is lang, zodat ook de langzame fusiereactie tussen protonen heeft kunnen plaatsvinden voordat de energie van de protonen heeft kunnen

weglopen. Deze vorm van fusie is verwant aan één aardse strategie: die van traagheidsopsluiting. Daarbij ontstaat door de snelle laserverhitting en compressie van minuscule bolletjes deuterium-tritium-ijs een zo dicht en zo heet plasma dat fusiereacties een kans krijgen voordat het plasma en de energie weglopen.

De meeste hoop op aardse fusie en energieopwekking is nu echter gevestigd op magnetisch opgesloten plasma's, waarbij de energie lang genoeg opgesloten moet worden om thermonucleaire fusie een kans te geven. In de laatste decennia zijn plasma's als bron voor licht en chemie meer in beeld gekomen. Thermo-atomaire en -moleculaire plasma's, een terminologie van mijn directe collega Frits de Hoog, vormen nu met de thermo-nucleaire plasma's de basis voor de discipline.

Jos de Haas werkt aan eerste cascade boog met stromend plasma



Plasma's in fusie: Alcator geschiedenis

Fusiereacties in een plasma komen tot stand als het plasma voldoende lange tijd voldoende heet en voldoende dicht is, zodat deuterium- en tritiumionen kunnen fuseren voordat de energie verloren gaat: het tripelproduct $nT\tau$ moet voldoende groot zijn. Daartoe wordt het plasma magnetisch opgesloten en rondgebogen in een torusachtige configuratie, zoals de tokamak of stellarator. In de zeventiger jaren werd het fusie onderzoek geconcentreerd op de tokamak, een Russische vinding, waarin door een aangelegd magneetveld en een geïnduceerde stroom een stabiele configuratie wordt bereikt. In de Verenigde Staten was de stellarator in Princeton vervangen door de ST tokamak. In MIT werd de Alcator tokamak gebouwd, gekenmerkt door een zeer hoog magneetveld, opgewekt door een Bitter magneet. Deze keuze was ingegeven door theoretische beschouwingen, maar ook door de expertise van het Francis Bitter Magnet laboratorium. Het gebrek aan mankracht leidde tot een vraag bij mijn leermeesters Kees Braams en Luuk Ornstein om mensen naar MIT te sturen. Dit gebeurde en met Luuk was ik een der eersten die ging.

Bij aankomst bleek dat de vooraanstaande diagnostieken reeds waren bezet door MIT-collega's en uit noodzaak was mijn keus dan ook voor de eenvoudige diagnostiek: stroom, spanning, positie en elektronendichtheid. Het bleek snel een gouden greep: het was het enige dat werkte en het gaf de nodige basisinformatie. Met het bereiken van kwaliteit kwam ook de appreciatie van de MIT-collega's. Het bleek ook dat het onderwijs in Nederland zich zeer goed kon meten met dat op het vooraanstaande MIT. Het feit dat alle Nederlandse deelnemers heel Amerika doorreisden uit nieuwsgierigheid maakte dat vrijwel elk jaargetijde één teamlid de andere fusielaboratoria bezocht, Princeton, Oak Ridge, Austin, San Diego, UCLA, Berkeley. Het wekte de indruk dat FOM-deelnemers het MIT-project leidden en wij hebben een zeer goede naam gekregen. Samenwerking kan dus onbedoeld zeer belangrijke vruchten hebben. Het is voor mij, voor Sytske, mijn eerste vrouw, voor Anne, Gerrit en Renze een drukke, interessante en leerzame tijd geweest. Echter, met Alcator ging het niet goed. Zij was niet schoon genoeg en kwam niet over de stralingsbarrière heen. Toen mede door toedoen van

een Nederlands teamlid Alcator in vlammen opging, dreigde stillegging van het project. Ongewild heb ik een belangrijke bijdrage geleverd aan het redden van Alcator. Ik herinnerde mij de woorden van Bruce Montgomery van het Bitter laboratorium: deze tokamak zou werken als er geen fysici in zouden willen kijken. Dit bevatte een grond van waarheid: het willen weten van fysici brengt meestal met zich mee, dat er extra moeilijke toegang tot de tokamak moet worden gemaakt, met zeker bij hoge velden zeer grote extra krachten. Ik stelde dus voor om de Bitter magneet opnieuw op te bouwen, maar nu zonder tokamak, zonder fysica en fysici, en te bewijzen dat het hoge veld kon worden gehaald. Dit noodplan had succes en de financiering werd voortgezet. De geschiedenis maakte wel dat nu zeer sterk werd gelet op de zuiverheid van Alcator, vooral ook omdat bij deze kleine hoog veld tokamak de oppervlak/volumeverhouding groot was.

In de volgende jaren ging het moeizaam met de fusie; het bleek veel moeilijker dan gedacht om een hoog produkt $nT\tau$ te bereiken. Een vondst was nodig om opnieuw elan te brengen in het fusieonderzoek. Deze vernieuwing kwam van Bob Taylor van het MIT: de introductie van gepulste gastoevoer en 'discharge cleaning' het met een ontlading vooraf schoonbranden van het ontladingsvat. Nu bleek de grote oppervlak/volumeverhouding een voordeel: het schoonmaken kon veel efficiënter dan in de gewone grotere tokamaks en uiteindelijk was juist Alcator een der schoonste ter wereld. In combinatie met de hoge dichtheid die mogelijk is met hoog veld bleek het in 1976 een tripel- $nT\tau$ op te leveren, ver boven Moore's fusie-lijn, die toen en nu de logica van de geschiedenis weergeeft. Braams benadrukt dit vroege succes, waar hij zeker aan heeft bijgedragen, niet in zijn geschiedenis van de fusie.[1] Het lijkt dat de geschiedenis de interessante details wegstrijkt, de logische lijn zoekt. Een hoog veld machine blijft echter een interessante optie.

Later volgde opnieuw een tijd van verminderde hoop. Moeilijkheid bleef het anormale, i.e. het meer dan normale, en onbegrepen transport. Extra verhitting had tot gevolg dat de energiebehoudtijd afnam, zodat de temperatuur onvoldoende steeg. Met dit anormaal verhoogde transport zou het moeilijk zijn om de voorwaarden voor een reactor te halen. In 1982 werd in Asdex, een Duitse tokamak, het H regime gevonden, met een ten opzichte van het gewone L regime sterk verbeterde opsluiting [2] en dus kwam er weer uitzicht op beheerste kernfusie.

Plasma in fusie, periode JET

In 1986 raakte ik opnieuw betrokken bij het fusieonderzoek, in een werkbezoek bij JET, Joint European Torus, uitgenodigd door Chris Schüller. In Eindhoven was ik geïnteresseerd geraakt in de vraag in hoeverre rotatie van gemagnetiseerde plasma's en wrijving met neutralen invloed hadden op het transport. Sterke rotatie in combinatie met wrijving met neutralen bleek van belang bij de vorming van kathode- en anodespots in vacuümschakelaars. De rotatie is gekoppeld aan het elektrische veld en dus aan transport en stroomverdeling. Uit metingen in Eindhoven bleek de ionenrotatie achter te blijven bij die van elektronen, door viscositeit en vooral door wrijving met neutralen. Dit verschil in rotatie gaf op haar beurt een veranderd transport. Mijn twee interesses golden dus rotatie en neutralendichtheid in een tokamak plasma.

Al snel bleek dat ook in JET het centrale plasma roteerde, ook zonder injectie van bundels energierijke neutralen. De rotatie was daarbij een functie van de tijd: ze nam toe in de periode van eilandgroei, waarna ze instortte, om daarna opnieuw te groeien, samen met de temperatuur, het zogenaamde zaagtanden. Het impulsmoment lijkt dus gekoppeld te zijn aan de temperatuur en dus lag de vraag naar verband tussen het anomale energietransport en rotatie voor de hand.

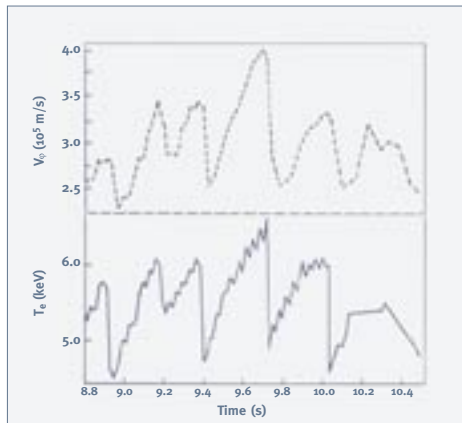
Nu wordt het anomale elektronen energietransport in tokamaks toegeschreven aan elektrostatische turbulentie. Deze blijkt vooral effectief te zijn tussen rationale oppervlakken, maar niet nabij deze oppervlakken. De magnetische topologie geeft dus aanleiding tot sterk gestructureerde temperatuurprofielen met transportbarrières nabij rationale oppervlakken waar het transport sterk verlaagd is.

Op die oppervlakken komen roterende magnetische eilanden voor, die periodiek groeien en uiteenvallen. Bij grote amplitude blijkt het roterende centrale eiland de meer naar buiten gelegen verstoringen te dwingen om mee te roteren. Daarmee zou telkens opnieuw impulsmoment worden getransporteerd naar buiten. Een plotselinge verandering zou ook energietransport betekenen.

Het centrale eiland blijkt [3] opgebouwd uit stroomdragende

substructurering. Over het eerder aangenomen bestaan van substructurering in de vorm van filamenten is de afgelopen jaren een discussie gevoerd, die moest worden aangegaan omdat het eerdere experimentele bewijs bij een tweede inspectie in de marge bleek van onzekerheid. De sterke tijdstructurering en het samengaan van energietransport met dat van impulsmoment blijven toch de vraag voeden of er naast elektrostatisch gedreven continu transport ook geen intermitterend, ademend mechanisme is. Daarbij zouden groei van magnetische eilanden met stroomdragende substructuren en overdracht naar verder gelegen rationale oppervlakken een rol spelen. Hoe het ook zij, deze kwestie staat voor mij nog steeds overeind en het heeft mij wel eens gespeten dat het niet gekomen is tot een verdere discussie met nog eens een nauwkeurig kijken naar de oorspronkelijke data. Een sluitende uitleg voor het anomaal verhoogde transport en voor de koppeling tussen transport van energie en impulsmoment is er nog niet. Duidelijk is wel geworden dat rotatie, magnetische structuur en neutralen, een rol spelen bij het bereiken van het H regime. Ongeweten had ik met de agenda van rotatie en neutralen ingegeven door ervaring in Eindhoven een vooruitziende blik gehad, opnieuw toeval. Het vermijden van een begrenzing door een materiële wand, het hebben van een divertor, is belangrijk gebleken voor het bereiken van het H regime. Plasma-wandwisselwerking en de gevolgen voor het transport is dus een belangrijk onderwerp geworden, nu ook in Rijnhuizen.

Tijdsgedrag
van rotatie en
temperatuur in JET



Fusievuur, ITER

In de afgelopen decennia zijn steeds hetere en dichtere plasma's bereikt in steeds grotere experimenten. Het H regime was gevonden en in de nu grotere tokamaks zijn indrukwekkende vorderingen gemaakt en de onzekerheid in opschaling van JET en ITER is klein. Een beter begrip kan nog leiden tot een gunstiger schaalwet, met grotere opbrengst van ITER en een kortere weg naar een werkende reactor.

De beslissing om de nieuwe testreactor ITER, een factor 3 groter dan JET, in het Europese Cadarache te plaatsen zal hier ongetwijfeld nieuw elan geven aan plasmafysisch onderzoek. Dit was enkele jaren geleden onder de druk van grote onzekerheid over de ontwikkelingen in de wereld anders; er was grote onduidelijkheid over de maat van het toekomstige fusieonderzoek in Nederland. Nu komt ITER en is er uitzicht op het fusievuur.

Het aantal mensen dat in detail op de hoogte is van gemagnetiseerde plasma's is afgenomen. Nu ook ik vertrek is er slechts nog een enkeling aan de TU/e en nog een beperkt aantal specialisten in Rijnhuizen. Het is dan een zorg hoe de nu aanwezige kennis op peil gehouden moet worden. JET is slechts een deel van de periode tot 2014, wanneer ITER werkelijk fysica gaat bedrijven, beschikbaar. En in Nederland zal de aandacht meer uitgaan naar plasma - wand dan naar opsluiting en magnetische plasma effecten. 'Front' kennis is er dus genoeg maar achtergrondkennis wordt schaars en opleiding is een agenda.

Ik ben ervan overtuigd dat fusie kan, dat ITER zich zal gedragen volgens de schaalwetten en dat Nederland voldoende inzet en geld voor ITER moet vrijmaken. Een moeilijker vraag is wanneer er na DEMO, de opvolger van ITER, een bijdrage aan de energievoorziening is te verwachten en voor welke kosten. Ik houd het er op dat het niet goedkoop zal zijn en dus dat het water aan onze lippen moet staan om elektriciteitsopwekking met kernfusie ook in economische zin mogelijk te maken. Het sterk inzetten op ITER verandert dus niets aan de noodzaak om ook een grotere inspanning te geven aan andere energieopties, zoals zonnecellen. Ik ben ervan overtuigd dat als een fusieachtige omvang en concentratie zou worden gevolgd bij onderzoek naar

Promotie van
Hugo Cornelissen
met voorzitter
M. Tels,
secretaris H.R.
Gijsman, en
promotoren H.L.
Hagedoorn en
D.C.Schram



zonnecellen, dat deze snel hun bijdrage zouden kunnen leveren aan de oplossing van de onvermijdelijke energieschaarste, ook voor landen met veel zon en weinig infrastructuur. Ik onderschat de problemen niet; ik neem wel waar dat die problemen met wind-energie en zonne-energie ieder duidelijk zijn. Echter, vragen over mogelijke problemen bij fusie, zoals tritium huishouding, wanderosie, plasma-afbreking moeten ook gesteld kunnen worden. Is het niet de taak van de universiteit en van de overheid om te zorgen dat er goed disciplineonderwijs en dus -onderzoek is, zodat er voldoende mensen worden opgeleid om met detailkennis mee te kunnen beslissen over te volgen ontwikkelingen? Het door de overheid voorgestelde beleid is er nu een van taakverdeling, aan de industrie vragen hoe en besparen op uitgaven door nadruk op competitie tussen universiteiten. Zal dit niet het averechtse effect hebben van afnemende kwaliteit, waarbij het per eenheid van onderwijs toch niet goedkoper wordt? Waarom niet meer een model gevolgd van aanvulling in samenwerking met vrienden, ik durf het bijna niet te zeggen. Nieuwe kansen liggen hier voor de as TU/e-Rijnhuizen, zeker gezien de gezamenlijke interesse voor het systeem plasma-oppervlak en de mede op de Eindhovense bron geïnspireerde uitvoering in Rijnhuizen.

Plasma, depositie en oppervlak

Na het vuur in de fusie zal ik nu een hoofdmoot inruimen voor de wisselwerking tussen plasma en oppervlak, de wereld van plasma-depositie en -etsen, van oppervlakte modificatie en van moleculair generatie. Sinds 1972 is het in mijn Eindhovense omgeving het centrale thema. De zeer grote flux van reactieve deeltjes, die mogelijk is met plasma's en dan in het bijzonder met (ik mag het toch wel zeggen) 'ons' plasma, maakt het nieuw ook qua oppervlaktefysica.

Voordat ik overging van Rijnhuizen naar de toenmalige Technische Hogeschool in Eindhoven, direct na het eerste verblijf in het MIT, had ik gedroomd dat er naast het luxe schip waar ik op verbleef een kleine roeiboort langsij kwam. Een stem bezwoer mij dat ik daarin moest gaan en de luxe van het grote schip moest verlaten. Braams was niet blij, ook wel voorstelbaar bij deze Jozef-arrogantie. Tijdens mijn MIT verblijf wees Frans Sluijter mij op een advertentie voor de TU/e, zodat hij mede verantwoordelijk kan worden gehouden voor de moeite die ik U vandaag berokken. Ik verliet het schip van fusie om in Eindhoven het werk daar aan plasma's, excitatie en licht voort te zetten, met sterkere plasma's en met meer aandacht voor de opkomende plasmachemie. Die lijn werd toen in het gangpad aangegeven als 'stoffige' fysica, niet goed bedoeld natuurlijk, maar wel naar later bleek feitelijk geheel juist: het plasma bleek inderdaad vol met stof te kunnen zijn. Het vormt nu een der onderwerpen van de groep van Gerrit Kroesen hier aan de TU/e en ook in de deposities van Richard van de Sanden's groep spelen nucleatie en clusters een rol. Het bleek later dat deze nederige keus voor aardse thermo-atomaire plasma's een uitstekende was. Het vormt een aanwijzing dat het kiezen voor een disciplinelijn op lange termijn een betere toekomst waarborgt dan die voor het hete onderwerp van het moment.

Het werk in de groep van mijn voorganger Arie Kruijthof bewoog zich op gebieden als licht, excitatie, straling en optische diagnostiek. Onder andere werden in thermische plasma's, met dichtheden als die in de zonneatmosfeer, afwijkingen van evenwicht nauwkeurig in kaart gebracht. Het vormde de basis van latere studies naar niet-evenwicht straling en excitatie. Het plasma, een cascadeboog werd later dé bron

voor depositie en andere toepassingen. Door additioneel pulsen werden 'niet ideale' plasmacondities bereikt in een heet en zeer dicht plasma met sterke straling tot in het verre vacuüm ultraviolet. Deze gepulste plasma's zijn nu opnieuw interessant als stralingsbron, maar ook als zeer heldere deeltjesbron, met nieuwe mogelijkheden voor depositie van dunne lagen.

In een andere lijn kwam er aandacht voor gemagnetiseerde plasma's mede in verband met laserfysica, en later kathode- en anodespots in vacuümschakelaars. Daaruit volgde weer onderzoek naar generatie van velden, plasma als dynamo, het verband tussen rotatie en transport. Het optreden van roterende structuren werd vastgesteld met collectieve verstrooiing, hetgeen opnieuw aangaf dat structuur in plasma eerder regel dan uitzondering is. Later volgde studie van expansie vanuit een dicht plasma naar een omgeving met lagere druk. Moleculaire plasma's te beginnen met waterstof, kwamen in onze belangstelling. Dit vormde de setting, waarin we eind zeventiger jaren de wereld van plasmadepositie en etsen ingingen.

Zonnecellen voor minder dan een gulden per Watt vermogen zou energie voor iedereen kunnen betekenen. Dit bepaalde mijn interesse in snelle depositie. Een aanleiding kwam in een bezoek aan Philips waar Cees Beenakker werkte aan het etsen van dunne lagen siliciumoxide voor toepassing in microntechnologie. Ik vroeg naar de druk, de stroom en keek naar de afmetingen en voorspelde de etssnelheid. Het vormde het begin van een FOM/STW-project, later gevolgd door een FOM Rolling Grant met als onderwerp plasma-etsen en snelle depositie.

Het werd snel duidelijk dat iets veranderd moest worden aan de plasma-methodiek wilde men een hogere ets- of depositiesnelheid halen. [4] Men moet 'remote' werken: de plasma productie in de bron moet geometrisch worden gescheiden van het volume waarin de laag wordt aangebracht. Gezien de ervaring in de groep lag het voor de hand een hogedrukplasma te gebruiken als bron, de cascadeboog. Hier speelt een extra 'detail': een hoge druk plasma is efficiënter en dus kan met hetzelfde vermogen een grotere primaire chemie worden geproduceerd en dus een hogere depositiesnelheid. Pas veel later kwam ook elders de methode van 'remote' depositie op en dan nog waren het bronnen bij lagere druk, waarbij het voordeel beperkter is. De voorgeschiedenis van de groep, de plasmafysische kennis van excitatie, straling en transport

speelde dus een rol in sturing van het toeval. Dit weer overdenkend wil ik U opnieuw voorhouden dat het bijbelse model van onderzoeksturing in de vorm van de gelijkenis van de dwaze en wijze maagden meer werkelijkheidszin bevat dan de huidige lijn van positieve planning en van selectie van de extreem veelbelovende.

Het plasma met het oppervlak vormt als het ware een nieuw systeem. En in een zeer ruwe eerste benadering kan men stellen dat het plasma dissocieert, dus de reactiviteit creëert, terwijl aan het oppervlak associatie plaats vindt, dus moleculen worden gevormd en deeltjes worden gedeponeerd, geëtsd of ingebouwd als bij oxidatie. Globaal kan men plasma-chemie zien als plasmafysica én oppervlaktechnie, waarbij het oppervlak door plasma is veranderd. Men zou daarbij opnieuw kunnen denken aan een tweedelig quasi-evenwicht met een dissociërende en associërende toestand, ook hier gekarakteriseerd door twee extra niet-evenwicht parameters, eveneens wordend of verdwijnend.

In plasma's kunnen gassen, vloeistoffen en ook vaste stof volledig worden opgebroken in chemisch actieve moleculaire fragmenten. Deze kunnen dan als bouwstenen dienen voor het opbrengen van dunne lagen, waarvan de samenstelling vrij kan worden gekozen. Wij begonnen met depositie van amorf gehydrogeneerd koolstof, dat interessant is voor vele toepassingen. Het argon plasma uit de thermische bron dissocieert het geïnjecteerde acetyleen door ionen molecuulreacties. De geproduceerde radicalen, bij grote monomeer flow C_2H , bij lagere CH , C_2 en C , leiden dan tot depositie. De efficiëntie van de bron maakt daarbij een zeer grote flux radicalen mogelijk en daarmee een hoog depositievolume.

Het bleek snel dat inderdaad een zeer hoge groeisnelheid kon worden bereikt tot boven 100 nm/s over een oppervlakte van 100 vierkante cm, ik denk nog steeds een record in absolute hoeveelheid materiaal per eenheid van tijd en plasmavermogen. Maar nog veel interessanter was dat bovendien bleek dat de kwaliteit in materiaaldichtheid het beste was bij de hoogste groeisnelheid.

Een reden voor deze onverwachte meevaller kan zijn de dominantie van een mobiele niet te sterk hechtende precursor, zoals C_2H , of C_3 en C_3H en de afwezigheid van sterk hechtende radicalen. [5] Ook zouden additioneel geadsorbeerde fragmenten kunnen voorkomen. Alleen bij hoge flux zijn er dan voldoende mobiele radicalen aan het oppervlak om

defecten te kunnen neutraliseren, voor zij overgroeid worden. Dit is één uitleg voor het gunstige resultaat van toenemende materiaaldichtheid bij meer flux en dus hogere groeisnelheid.

Octrooi [4] werd aangevraagd, eigenlijk omdat Shell dat deed voor een specifieke toepassing: voor membranen voor gasscheiding. Shell had dat recht uit de samenwerkingsovereenkomst voor dit toepassingsgebied. Door ons is toen een algemeen methodisch octrooi aangevraagd om ook vrij te zijn voor interesse van partners op andere gebieden, bijvoorbeeld voor zonnecellen. Voor mij gold (en geldt) dat het vrij zijn van een universiteit voor het meewerken aan een nieuwe technologie voor zonnecellen, een wereldlevensnoodzaak, belangrijker is dan een beperkte opbrengst. Een opbrengstbeding heb ik wel altijd gevraagd, uit principe: ik vind dat een privaat lichaam niet onnodig voor niets gebruik kan maken van iets dat met publieke middelen is voortgebracht. Het verleende mondiale octrooi en de latere uitzetting van deellicenties hebben uiteindelijk goed uitgewerkt. Een grootschalige productie van vensters met een dunne beschermende laag aangebracht met ons proces is nu bij General Electric ver ontwikkeld.

Ook diamant kan worden gedeponereerd met de expanderend thermisch plasmamethode. Dan wordt methaan met een overmaat waterstof ingezaaid en een hoge substraattemperatuur gebruikt. Kennelijk moet voor een goede diamantlaag amorf en grafietachtig materiaal weer worden geëst. Bij hogere druk zagen we een hogere depositiesnelheid, maar ook de fraaiste diamant. Opnieuw dus een toename van de kwaliteit met een hogere depositiesnelheid.

Later begonnen wij met het deponeren van amorf silicium, voor zonnecellen. De methodiek was analoog: met behulp van het plasma uit de bron werd ingezaaid silaan gedissocieerd. De zo ontstane sylil radicalen leiden dan tot depositie. Nu bleek de werkelijkheid weerbarstiger en ingewikkelder: de kwaliteit van de laag hing niet alleen samen met de materiaaldichtheid. De elektronische eigenschappen bleken sterk afhankelijk van de wijze van fragmentatie en vooral van de depositie temperatuur. Het leek erop dat twee aspecten een rol speelden: het materiaal zelf en de structuur. Voor amorf silicium werd duidelijk dat voor goede lagen een groot deel van de radicalen het relatief zachte radicaal SiH_3 moet zijn, gecombineerd met een juiste temperatuur. Dit vereist dat het bronplasma anders moet worden bedreven: met atomaire



waterstof in plaats van met ionen. Dan krijgt men voornamelijk SiH_3 radicalen. Dit beeld is fysisch: het juiste deeltje op de goede plaats. De zeer sterke temperatuurafhankelijkheid werpt echter de vraag op of toch de werkelijkheid niet meer chemisch is: de juiste delen silicium en waterstof en de juiste oppervlaktetemperatuur. Inmiddels zijn nieuwe in situ diagnostieken ontwikkeld om een direct inzicht te krijgen in wat er nu precies gebeurt aan het oppervlak. [6] Met meer waterstof en een lagere temperatuur wordt het gedeponeerde materiaal microkristallijn, een relatief nieuw zonnecellenmateriaal.

Het belang van goed inzicht in de noodzakelijkheid van een mechanisme is groot. Als het meer chemisch is, dan zijn andere, mogelijk snellere depositiestrategieën mogelijk: snel aanbrengen en dan verdichten met een energiepuls. Eén methodiek zou zijn herhaald ionen met een te kiezen energie uit het plasma te trekken, een soort zachte implantatie. Is lading aan het oppervlak ook aan de orde bij depositie? In dat geval zou een sterke positieve puls een fraaie andere benadering zijn. Die puls kan zo kort zijn dat alleen een zeer dunne laag aan het oppervlak heet wordt. Dit zou toestaan dat snel gedeponeed wordt, bij een hoge effectieve temperatuur, terwijl de gemiddelde temperatuur na het wegvloeien van de warmte, lager kan zijn.

Het gebruiken van de tijd op vooral korte tijdschalen is het primaat van een plasma. Daar keert het moeilijke van een plasma, dat het onder je vingers wegglipt, om in een voordeel. Per aantal atomaire lagen kan men plasma, monomeer en temperatuur variëren; gemoduleerde lagen met nieuwe te kiezen samenstelling en eigenschappen zijn dan mogelijk. De aanwezigheid van lading aan het oppervlak kan een laterale ordening tweebrengen. Dit zou mede aanleiding zijn een plasma een grotere rol toe te delen in het nanogebeuren. Met Atomaire Laag Depositie is door Erwin Kessels een aanzet gegeven. De grote materiaalvrijheid, die een plasma biedt is nog nauwelijks geëxploiteerd. Kan een kleine dosering de kwaliteit beïnvloeden? Ook voor doseren geeft 'onze' methode meer mogelijkheden, kleine fracties metalen, oxides, kunnen worden mee-gedeponeed. Met TNO is ook gewerkt aan de depositie van zinkoxide, als doorzichtige geleidende laag van belang voor zonnecellen.

In de vernieuwde groep onder leiding van Richard van de Sanden zijn

voor zonnecellen veelbelovende resultaten bereikt. Voor een deel is dat uitgevoerd met Dimes aan de TU-Delft in verdere samenwerking met Universiteit van Utrecht, TNO en Akzo Nobel: het Helianthos project. Er is interactie met het Forschungslabor in Jülich waar nu zonnecellen van microkristallijn silicium op een flexibele drager gemaakt zijn met goede eigenschappen. Parallel is het inzicht in wat nu precies de laag bepaalt groeiende.

Akzo Nobel is begonnen met het maken van zonnecellen op een flexibele drager voor grote schaal toepassing van goedkope zonnecellen met acceptabel rendement. Een prototypelij is ontwikkeld, die zonnecellen van de gevraagde specificatie aflevert. Ik heb daar grote bewondering voor. Het is, zoals ik al eerder zei, veel gemakkelijker om een goed idee te hebben dan in een productie te bewijzen dat het kan.

Een andere ontwikkeling vindt plaats in Duitsland, door tussenkomst van een partner, OTB engineering. Daar wordt nu met onze methode zeer snel een dunne film aangebracht op een (multi-) kristallijn zonnecel. Hiermee wordt de reflectie aan het oppervlak en de recombinatie van elektronen en gaten in het materiaal verminderd, waardoor het rendement van de zonnecel verbeterd.

Het levensvatbaar maken van de ETP methode is pas na een periode van veel proberen gelukt. Dit is in het algemeen mijn ervaring: van alle geprobeerde materialen zijn uiteindelijk goede eigenschappen bereikt, vaak na lange tijd zoeken naar de juiste depositiecondities. En nog veel meer is mogelijk, zonnecellen, nieuwe materialen, coatings. Het gebruik van de tijd, van clusters. Ik ben ervan overtuigd dat met de kennis in Eindhoven, met de ideeën, de infrastructuur, wij iets goeds kunnen bieden aan nieuwe methoden, aan studenten. Wat dat betreft zou het zeker kunnen bijdragen aan de verdere profilering van onze universiteit. Mijn droom was om uiteindelijk in een zonnecel ons werk, onze methodische vondst te zien; ik kijk nu in de toekomst als een kleine Mozes.

Molecuulgeneratie aan het oppervlak

Hoe worden moleculen gegenereerd? Dat is de vraag die onder andere Richard Engeln en mij heeft aangezet tot een experimentele studie van het belang van reacties aan het oppervlak voor molecuulvorming in plasma's. Daar vindt associatie plaats van in het plasma gedissocieerde fragmenten tot nieuwe moleculen. Daar is de beschikbare chemie geconcentreerd in de vorm van geadsorbeerde radicalen. Generatie van moleculen is belangrijk voor synthese van moleculen en voor vernietiging ervan. Het kan ons ook helpen de mechanismen bloot te leggen van depositie en andere oppervlakprocessen.

Laten we eerst de vorming van waterstofmoleculen bekijken, belangrijk bij fusie, bij plasmachemie en in de ruimte. [7] Door adsorptie van de eerste waterstofatomen wordt het oppervlak direct bedekt met chemisch gebonden atomen, het wordt gepassiveerd, dus meer inert. Vorming van moleculen is nu allereerst mogelijk door associatie van twee geadsorbeerde atomen, een langzaam proces bij normale oppervlakte-temperaturen. Belangrijker is de vorming van waterstofmoleculen door een directe pick-up van een geadsorbeerd waterstofatoom door een inkomend atoom. Op deze wijze worden de waterstofatomen weer gerecombineerd tot moleculen, waarbij het oppervlak grotendeels gepassiveerd blijft.

Nu zijn er aanwijzingen dat bij zeer grote flux een extra mechanisme optreedt. Dat dan bovenop de chemisch gebonden monolaag additionele adsorptie mogelijk is, met een energie tussen die van een chemische en fysische binding in, een 'heet atoom'. Bij zeer grote flux is de verblijftijd van deze mobiele additioneel geadsorbeerde atomen voldoende om moleculen te vormen. Het gevormde molecuul kan sterk geëxciteerd zijn: vrijwel de hele dissociatie-energie van het molecuul is nu beschikbaar. Hiervoor zijn sterke aanwijzingen gevonden: bij waterstof zijn sterk rotationeel en vibrationeel aangeslagen moleculen gemeten. [7] Bij grote flux stikstofatomen zien we bij het substraat extra licht, een teken van elektronisch aangeslagen moleculen. Met bovendien zuurstofatomen ontstaat een fraaie oranje gloed [8] van geëxciteerde NO_2 moleculen. Dit verschijnsel is ook bekend als 'shuttle glow', een gloei bij het terugkeren van de shuttle in de dampkring. Dit 'hete atoom' of 'hete

fragment' mechanisme zou inderdaad beter werken naarmate de flux hoger is en wellicht vormt dit mechanisme een uitleg voor het succes van snelle depositie.

Algemeen is aanvaard dat bij lage druk in plasma's met puur waterstof, stikstof of zuurstof de vorming van moleculen aan de wand plaatsvindt. Echter voor mengsels is dit veel minder duidelijk. Als voorbeeld kan de vorming of afbraak van NO worden genomen, een systeem dat van groot belang is voor toepassingen als oxidatie van oppervlakken, voor atmosferische fysica. Uit recente experimenten is gebleken dat de vorming en de vernietiging van NO in belangrijke mate gebeurt door wandprocessen. Dit baseren wij mede op de observatie dat het resulterende mengsel van vooral N_2 en O_2 en slechts een paar procenten NO, onafhankelijk is van het toegevoerde gas. Het is hetzelfde voor stikstof en zuurstof en voor puur NO. Additioneel bewijs volgde uit tijdsafhankelijke experimenten. Deze laten zien dat de reactie van NO-vorming op een plotseling uitzetten van vooral de stikstoftoevoer veel te traag is, veel langzamer dan de verblijftijd van het gas in het experiment. Dit kan slechts worden uitgelegd door vorming van NO aan de wand, waarbij stikstof op en in het metaal van de wand een rol speelt. Als nu na het branden met zuurstof én stikstof de laatste wordt uitgezet, dan kunnen de zuurstofatomen uit het plasma toch nog enkele minuten NO vormen door uit dieper gelegen lagen gekomen stikstofatomen op te pikken. De voorlopige conclusie is dat bindingsenergie een rol speelt: die van O_2 en N_2 is veel groter dan die van NO. Maar daarnaast is kennelijk de aanwezigheid van een radicaal in de geadsorbeerde laag, in dit geval N of NO, van belang. Dit beeld van plasmageactiveerde katalyse geeft wellicht nieuwe mogelijkheden aan om de productie of juist de vernietiging van NO te optimaliseren. Kan men niet zuurstof in pulsen toedienen? Kan men door een verstandige keuze van verhouding van oppervlakte tot volume en van materialen en oppervlaktestructuur dit proces niet sterk verbeteren?

Een belangrijke rol speelde hier een kort bezoek van de groep van Jürgen Röpcke uit Greifswald. Met een meegebrachte geavanceerde infrarode laser adsorptie diagnostiek kon een groot aantal gevormde moleculen worden gemeten. De resultaten bevestigden ons beeld dat moleculen aan de wand worden gevormd en wel die moleculen die eenvoudig kunnen worden samengesteld uit aan de wand geadsorbeerde fragmenten: NH_3

uit NH_2 en H, H_2O uit OH en H, N_2O uit NO en N. Om te zien of dit meer algemeen was hebben wij daarna in een bezoek aan Greifswald gekeken in hoeverre dit ook het geval was bij een totaal ander plasma, opgewekt met microgolven met ander wandmateriaal. Het bleek, toch enigszins tot mijn verbazing, dat de vorming van de diverse moleculen inderdaad vrijwel identiek was: niet alleen dezelfde moleculen, maar zelfs de fracties waren ruwweg gelijk. Het lijkt dus opnieuw een meer chemisch resultaat: het is niet erg afhankelijk van plasma, van de precieze uitvoering, van het wandmateriaal. Het blijkt ook dat samenwerking met een ander instituut duidelijk grote voordelen biedt: zeer snel succes door combinatie van expertise en ideeën.

In mengsels met H, N, O en C atomen ontstaan dus vooral bepaalde moleculen zoals koolmonoxide en water naast waterstof en stikstof. [9] Daarnaast worden methaan, stikstofoxide en waterstofcyanide en in mindere mate ook moleculen zoals koolwaterstoffen, kooldioxide en eenvoudige organische moleculen, zoals methanol en formaldehyde gevormd. Het lijkt erop dat vorming van moleculen in eerste aanleg chemisch van aard is en bepaald wordt door de bindingsenergieën. Maar daarnaast speelt waarschijnlijk een fysisch detail een belangrijke rol: de aanwezigheid aan het oppervlak van specifieke radicalen, zoals OH, NH_2 , NO, CH_3 .

Het is nu illustratief om met een zeker gevoel van schroom te kijken naar de generatie van moleculen in de stoffige donkere en diffuse wolken in de interstellaire ruimte. Tal van in de plasmachemie gemeten moleculen en fragmenten en van emissies zijn ook waargenomen in de ruimte. [10] Ook daar is de vraag: hoe worden moleculen gevormd, ook organische, en kan een begin van leven zo zijn ontstaan. De wand wordt hier gevormd door het oppervlak van minuscule stofdeeltjes. Er zijn grote verschillen; in de ruimte zijn de processen veel meer fotonbeheerst, de dichtheden zijn zeer klein en de temperatuur is laag. Alle processen zijn nu veel, veel langzamer, de molecuulvorming op en desorptie van de beijde clusterwand, maar ook de adsorptie van radicalen bij de zeer trage productie van radicalen en dus zeer kleine flux. Een directe vergelijking is moeilijk, maar kan toch nieuwe inzichten geven. Daarbij kunnen we de vraag stellen of er een invloed van het plasmakarakter is, want een plasma is het zeker.

In de donkere wolken [10] heerst een ijzige temperatuur van 10 K, de dichtheid van de waterstofmoleculen is laag, 10^{10} m^{-3} , en die van

de elektronen nog veel lager: 10^2 m^{-3} . Nu is de eerste verrassing dat ondanks deze zeer lage dichtheid toch, dank zij de lage temperatuur, de (Coulomb)botsingen van elektronen met ionen overheersen en niet die met de neutrale deeltjes. De zeer kleine aantallen ionen en elektronen hebben ook chemisch een grote invloed: ionen molecuul reacties overheersen de chemie en dissociatieve recombinitie leidt tot geselecteerde fragmenten, die aan de wand van de clusters tot nieuwe moleculen kunnen bijdragen. [11] Ook mutuele recombinitie van negatieve ionen en positieve ionen is snel. Deze reacties kunnen leiden tot vorming van bijvoorbeeld koolstofclusters door samensmelting van C_nH_m^- en C_oH_p^+ . Uit clusters kunnen door samenklonteren grotere stofdeeltjes worden gevormd. Dit zijn processen die alle goed bekend zijn in de plasmachemie.

Nu wordt meestal aangenomen op grond van lage reactieconstanten dat er weinig of geen negatieve ionen worden gevormd. Indien echter geëxciteerde moleculen worden gevormd aan wanden van stofdeeltjes dan zijn de reactieconstanten veel groter en worden wel negatieve ionen gevormd. Daarmee is de cirkel rond: het creëren van negatieve ionen maakt het eenvoudiger dat clusters zich kunnen vormen, terwijl clusters en stofdeeltjes essentieel zijn voor de vorming van moleculen met interne excitatie, die weer gemakkelijker kunnen leiden tot negatieve ionen.

Algemeen wordt aanvaard dat de vorming van H_2 , NH_3 en CO in de koude donkere wolken plaatsvindt aan clusters en stofdeeltjes; dit lijkt echter minder duidelijk voor grotere organische moleculen. Typische dichtheden zijn (gerelateerd tot waterstof), 10^{-4} voor koolmonoxide, een kleinere fractie ammoniak, methaan en andere kleine moleculen en weer een fractie kleiner eenvoudige organische moleculen als formaldehyde en methanol. Het is een vergelijkbare ordening in dichtheden als in de plasmachemie. In hoeverre is er ook hier niet de mogelijkheid voor de vorming van complexe moleculen aan de wand van stof. Kunnen ook hier moleculen worden gevormd door directe pick-up van bepaalde fragmenten als OH, NH_2 , CH_3 door atomaire radicalen die vanuit de gasfase het oppervlak van stofdeeltjes naderen.

Ik ben nieuwsgierig geworden door deze analogie van gegenereerde moleculen. Ik heb mij gerealiseerd dat ons beeld is: we hebben moleculen, deze willen we dissociëren, waarna we de fragmenten weer willen samenstellen tot nieuwe moleculen en waarmee we deponeren.

In de astrochemie gaat men uit van een hete voorgeschiedenis van een atomaire wereld, waarin bij afkoeling moleculen worden gevormd. Deze verschillende denklijnen geven juist extra mogelijkheden voor een kritisch bekijken van mogelijke mechanismen en dus tot nieuwe interpretaties en nieuwe strategieën. Het is dus voor plasmachemici van buitengewone waarde om kennis te nemen van inzichten en waarnemingen in de astrochemie.

Dus een nieuw soort brede school, breder dan nano: bv. met de naam mesoscopische fysica, met een breed masterprogramma, met korte intensieve cursussen van 2-3 dagen naast reguliere colleges inleidend op de verschillende vakgebieden, met inbreng vanuit verschillende andere subgebieden, zou mij een nastreefbare vorm zijn van onderwijsvernieuwing.

Discussie tijdens
Rarefied Gas
Dynamics symposium,
Marseille, 1998, met
Gerard Meijer en
Steven Stolte





Wij zijn dus niet klaar. Nog steeds vormt de noodzaak van nieuwe wegen voor energie en water een volwassen agenda voor fysici, naast het vinden van de massa van het Higgs deeltje, naast het uiteenrafelen van de processen in de astrofysica. Het onderzoek aan kernfusie en dat naar zonnecellen heeft een verdere studie naar nieuwe fysica afgedwongen. In alle gevallen heb ik gezien dat er uiteindelijk resultaten werden geboekt, soms pas na enkele decennia, meestal na periodes van teleurstellingen en gevoelens dat het niet kon. Voor fusie zijn we vanaf 1958, na de eerste koude douche, dat het niet gemakkelijk was, vijf ordes van grootte opgeschoten in het tripelproduct $nT\tau$. Nu zijn we slechts een kleine factor verwijderd van de fusiereactor. De zorg geldt meer de technologie en de prijs, maar ook dat zal opgelost worden.

Naar mijn oordeel hebben we geen keus ook andere energieopties na te gaan, zeker die van zonnecellen. Dit blijft zo als ten lange leste regering, maar ook wetenschappers, universiteiten en Koninklijke Academie zouden gaan wijzen op de absolute noodzaak van beperking, van een andere filosofie, die ook ruimte laat voor een ander, ook al leeft die in Afrika. Zo'n beperking hoeft nog geen essentiële verworvenheden aan te tasten, alleen een beetje kleiner, geen vierwiel maar slechts twee wielen, een graad minder. Dan is eetbare olie in de auto wellicht niet nodig. Het ontbreken van waarschuwingen doet ieder geloven dat het allemaal maar kan. Betaalt echter niet iemand anders, ergens anders de prijs?

Blijft de wetenschap niet teveel suggereren dat met fysica en techniek alles wel kan worden opgelost? Het is, denk ik, niet zo; er is een grens. Ik heb wel eens vernomen van een plan om door een Gigawatt microgolf vermogen naar boven te stralen een aanzet zou kunnen worden geleverd aan de bestrijding van het ozongat. Kan dan niet iemand met gezag opmerken, dat dat ook anders kan worden bereikt, zodat die Gigawatt kan worden gebruikt voor iets nuttiger, waterproductie bijvoorbeeld. Ik pleit voor een krachtige voortzetting van het zonnecellenonderzoek in alle richtingen, silicium, polymeren, Grätzel cel, hoog rendement. Welke het antwoord zal zijn valt nog te bezien. Op silicium gebaseerde zonnecellen maken nu ook zeker een goede kans. De plasmafysica kan hierbij van onschatbare hulp zijn. In Eindhoven zijn fluxen van deeltjes

gehaald die nieuwe mechanismen en kwaliteit van lagen bij zeer snelle groei mogelijk maken. Nauwelijks zijn de potenties van plasma's als snelle tijdsgemoduleerde groei, detaïldoseringen, beïnvloeding van structuur door tijdsbeheersing van temperatuur uitgeprobeerd. Het is wel moeilijk kiezen. Er is geen zekerheid: het blijft 'high risk, high potential'. Maar, zoals Anne mijn dochter eens opmerkte: het is *niet* saai.

De plasmafysica heeft dus een dubbel zonnig perspectief, niet in de minste plaats omdat deze gerichtheid op resultaat, met de uitdaging in fysica om het onmogelijke te willen, jonge mensen zal aantrekken. Het past in hun filosofie, die veel directer is dan die van ons ouderen. Dus naast nieuwe gebieden, als ultradichte en ultrakoude plasma's, ook onmogelijke nieuwe mogelijkheden zoeken in de gewone plasmafysica en -chemie, zogewenst in een technologisch top instituut TTI. Maar ook verder kijken naar de processen in de astrochemie en -fysica: hoe ontstaan daar organische moleculen, hoe worden velden en stromen gegenereerd?

Het kan dan goed zijn plasma's in te scharen in een breder verband: mesoscopische fysica, samen met warmte en stroming, met molecuulfysica, ionosfeer en atmosfeeronderzoek, met contacten naar katalyse, naar polymeren, naar nano, naar geavanceerde groeiethoden. Dit in een verband met andere instellingen als de Radboud Universiteit te Nijmegen, natuurlijk het FOM-Instituut voor Plasmafysica en andere universiteiten. Als ik jong was zou ik dat nastreven: een breder verband, het maken van een school, vanwege het brede onderwijsaanbod.

De essentie is de belangstelling van de jonge onderzoeker. De korte zomerscholen die ik heb georganiseerd op de grenzen van plasmafysica met andere gebieden gaven aan dat dit de weg is om te gaan: zeer veel belangstelling van studenten en door hen en alle collega's ervaren als zeer nuttig en stimulerend. In drie dagen groeide snel het besef van gezamenlijke interesse en belang. Dit soort korte scholen op doctoraal niveau op grenzen tussen onderzoeksscholen zou een mooie gelegenheid zijn voor de KNAW om zich te manifesteren voor de jonge onderzoeker. Het zou de KNAW dichter bij de gewone man of vrouw brengen, niet alleen bij de excellente.

Samenwerkende groepen en scholen tussen de subdisciplines zouden wel eens een goed onderzoeksstimuleringsmodel kunnen zijn, beter dan het competitie model met geïsoleerde profilering, terwijl het nog steeds taakverdeling wel openlaat. Daarbij hoop ik, dat er opnieuw belangstelling ontstaat voor de steun en profilering langs de lijnen

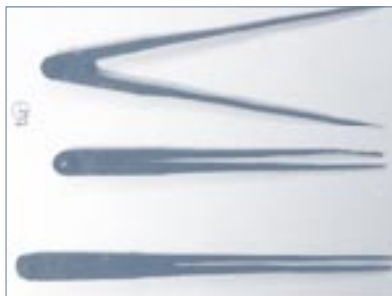
van discipline. Zodat sterke scholen kunnen worden ontwikkeld over de grenzen van onderwijsinstellingen heen. Ik hoop dat wij dat willen voordat we worden gemarginaliseerd door de politieke eis van profilering om te overleven. Wij zijn niet de beste universiteit in Europa. Dat is ook nergens voor nodig; wij zijn aantrekkelijk voor studenten.

De overheid noemt zichzelf vaak de terugtrekkende, eigenlijk de zich onttrekkende, overheid. Overheid: trekt U zich niet terug van onderwijs. Onderwijs moet vrij zijn, op inhoud gericht, op kennis. Goed onderwijs, dat volwassen meebeslissende mensen oplevert, wijze maagden met de lampen gevuld met olie, is niet goedkoop.

Het 'wat nu' is uit het voorgaande wel duidelijk geworden. We kunnen even nog genieten van een receptie en een weekend rust. Maar daarna moeten we verder: er is nog veel te doen. Zonnecellen, water, schone lucht, onderwijs voor iedereen. Hoe verloopt de chemie in de ruimte, kan diamant snel gegroeid worden, is het bruikbaar als ultiem materiaal. Dunne laag zonnecellen, membranen, andere functionele lagen, nano en geen nano, we hebben geen tijd te verliezen. Wanneer niet nu, wanneer dan. Het is ernst.

Ook voor mij een nieuw begin: moleculen in de chemie en in de ruimte, nieuwe depositiestrategieën, de invloed van plasma, van lading, van rotatie, van niet-evenwicht. Verder een nieuwe kennismaking met de fysica van herstel en behoud van archeologische artefacten met plasma's. Ik wil mij vooral ook richten op scholen tussen onderzoekscholen in, met katalyse, met molecuulfysica, met warmte en stroming, met polymeren, met nano.

Oude gerestaureerde
scheepspassers
in oven, argon en
waterstofplasma



Dank

Ik dank het College van Bestuur voor het besluit om een aantal jaren eerder twee nieuwe jonge wetenschappers, Richard van de Sanden en Gerrit Kroesen te benoemen op de plaatsen die Frits de Hoog en ik zouden vrijmaken. De stichting FOM ben ik erkentelijk voor de dakpanconstructie. De nieuwe hoogleraren hebben het vaandel glansrijk overgenomen, samen met stafleden Richard Engeln en Erwin Kessels en in de andere groep Joost van de Mullen, Eddy van Veldhuizen, Winfred en Eva Stoffels. Ik ben blij met de bijdragen van Niek Lopes Cardozo, Ute Ebert en Marco Haverlag. Naast Frits de Hoog is een aantal leden van de groep mij voorgedaan: Bart van de Sijde en Bob Timmermans. Met hen samenwerken heb ik zeer gewaardeerd. Een bijzonder woord van dank geldt Richard van de Sanden. Jouw kwaliteit en intensiteit hebben voor mij het proces van overgang naar een andere invulling eenvoudig gemaakt.

Ik dank de vele studenten en promovendi die mij telkens dwongen kennis te nemen van hun verrichtingen en vondsten. U bent de reden voor het feit dat ik niet kan ophouden: van Bert Pots, die de moed had de eerste promovendus te zijn, tot Rens Zijlmans, vermoedelijk de laatste. U allen ben ik zeer dankbaar voor wat ik heb mogen leren.

In het werk heb ik altijd de steun gehad van de onderzoeksschool CPS, nu onder leiding van Marnix van de Wiel; mijn dank hiervoor. Dit gold ook de steun voor de zomerscholen, welke ik met inzet van vele collega's heb mogen organiseren. Mijn dank geldt ook Jeanne Loonen, die met haar zorg ook deze activiteit heeft mogelijk gemaakt. Van de vele vriendschappen wil ik hier Chris Schüller en Theo Schep van Rijnhuizen en Henk Hagedoorn, Herman Bouma en Frans Sluijter noemen; zij zijn ook van belang geweest in tijden van verandering.

Ik dank Hannie voor haar onmetelijke geduld, haar mooie taal en bemoediging. Er komt nu tijd, ook voor fietsen met de kleinkinderen. Ik dank U voor Uw aandacht.

Referenties

- 1 C.M.Braams, P.E.Stott, Nuclear Fusion, Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research, Institute of Physics, Bristol, 2002.
- 2 F. Wagner et al., 9th Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Baltimore, 1982, Nucl. Fusion Suppl. I, 43.
- 3 A.J.H.Donné et al, Evidence for High-m Islands Induced by Large Low-m Islands in a tokamak Plasma, Phys. Rev. Letters **94**, 85001, 2005.
- 4 D.C.Schram, G.M.W. Kroesen, Method of Treating Surfaces with the Aid of a Plasma and a Reactor for carrying out the Method, European patent 0297637B1, 1992; US patent 4871580, 1989.
- 5 J. Benedikt, K.G.Y. Letourneur, M. Wisse, D.C. Schram, M.C.M. van de Sanden, Plasma chemistry during deposition of a-C:H, Diamond and Related Materials **11** (2002) 989.
- 6 W.M.M.Kessels, J.P.M. Hoefnagels, P.J. van de Oever, Y. Barrell, M.C.M. van de Sanden, Temperature dependence of the surface reactivity of SiH₃ radicals and the surface hydride composition during amorphous silicon growth, Surface Science **547** (2003) L865.
- 7 P. Vankan, D.C.Schram, R. Engeln, Relaxation Behavior of Rovibrationally Excited H₂ in a rarefied expansion, J. Chem. Phys. **121** (2004) 9876.
- 8 J. van Helden, R. Zijlmans, R. Engeln, D.C. Schram, Molecule formation in N and O Containing Plasmas, IEEE transactions on Plasma Science **33** (2005) 390.
- 9 M. Capitelli, C.M. Ferreira, B.F. Gordiets, A.I. Osipov Plasma Kinetics in Atmospheric Gases, Springer Verlag, Berlin, 2000.

- 10 E.F. van Dishoeck, The Chemistry of Diffuse and Dark Interstellar Clouds, in: The Molecular Astrophysics of Stars and Galaxies, T.W.Hartquist, D.A.Williams, Clarendon Press, Oxford, 1998.
- 11 E. Herbst, Molecular ions in Interstellar Reaction Networks, Journal of Physics: Conference series 4 (2005) 17.

Zie voor JET en ITER ook: www.jet.efda.org en www.iter.org.
Proefschriften van promovendi van wie werk aan de orde is gekomen, zijn opgesomd in www.etp.phys.tue.nl.

Schets (DCS) van
eerste koolstof
depositie opstelling



Curriculum Vitae

Prof.dr.ir. Daan Schram is sinds 15 december 1972 verbonden aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Per 31 augustus eindigt zijn dienstverband als voltijds hoogleraar Technische Natuurkunde.

Daan Schram (1940) studeerde Elektrotechniek (TU Delft) en specialiseerde zich in plasmafysica aan het FOM-instituut (Nieuwegein). In 1969 promoveerde hij op het proefschrift: 'Elektronen cyclotron resonantie verhitting van plasma's'. Van 1971 tot 1976 was hij betrokken bij het Alcatorproject, een samenwerkingsprogramma tussen het MIT Cambridge USA en de FOM op het gebied van fusieonderzoek. Dit programma leidde in 1976 tot veelbelovende resultaten betreffende hete en dichte plasma's in magnetische plasmaconfiguraties en betekende een mijlpaal in het fusieonderzoek.

Colofon

Productie:
Communicatie Service
Centrum TU/e

Fotografie cover:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Plaza ontwerpers,
Eindhoven

Druk:
Drukkerij Lecturis,
Eindhoven

ISBN:
90-386-1483-7

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

In 1972 aanvaardde prof.dr.ir. Schram de leerstoel Technische Natuurkunde aan de TU/e. Hij verlegde zijn aandacht naar kinetiek en dynamiek van plasma's bij lage temperaturen en het potentieel van dit medium voor toepassingen in en buiten de materiaalkunde en modificatie van oppervlakken. Daarbij kregen onder meer zonnecellen, lichtbronnen, diamant en restauratie van archeologische artefacten aandacht. Behalve aan onderzoek heeft hij de laatste jaren aandacht gegeven aan onderwijs in de vorm van korte, intensieve scholen. Eerst op het gebied van plasma's, meer recent op de grenzen van plasmafysica en andere disciplines als katalyse, oppervlaktefysica en molecuulfysica. De band met fusie is onder meer onderhouden door een verblijf bij JET in Oxford en door zijn adviseurschap bij het FOM Instituut voor Plasmafysica. Een nieuw programma op het gebied van plasma-oppervlakte-interactie geeft daar nu aanleiding tot verdere samenwerking met de afdeling plasmafysica aan de TU/e.