

Donder en bliksem voorbij

Citation for published version (APA):

Kroesen, G. M. W. (2001). *Donder en bliksem voorbij*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2001

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

Intreerede
9 februari 2001

prof.dr.ir. G.M.W. Kroes



donder en bliksem voorbij

/ faculteit technische natuurkunde

Intreerede

Uitgesproken op 9 februari 2001
aan de Technische Universiteit Eindhoven

donder en bliksem voorbij

prof.dr.ir. G.M.W. Kroesen



Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Elektrische gasontladingen behoren tot mijn leeropdracht als hoogleraar aan deze instelling, de *lagetemperatuurplasmafysica*. De bekendste verschijningsvorm van elektrische gasontlading is de welbekende bliksem, die gepaard gaat met donder. Een plasma is strikt genomen slechts een onderdeel van een elektrische gasontlading, maar in het dagelijkse taalgebruik binnen mijn vakgebied worden de uitdrukkingen *plasma* en *gasontlading* veelal als synoniem beschouwd.

Voor veel mensen buiten het vakgebied lijken de voornoemde uitdrukkingen echter op toverwoorden, waarbij – om de verwarring nog te vergroten – de term plasma ook vaak in verband wordt gebracht met “de vierde aggregatietoestand”. Aan het begin van deze drie kwartier zal ik de structuur van zo’n gasontlading aan u duidelijk proberen te maken. Een gasontlading begint met een elektrische doorslag. Een duidelijk voorbeeld van zo’n *doorslag* heb ik al genoemd: de bliksem.

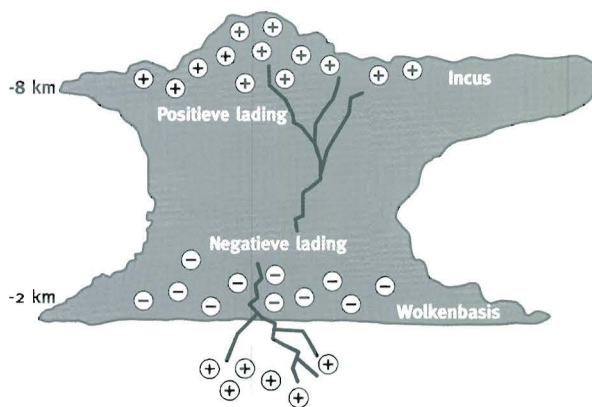
figuur 1
bliksem



Bliksemse ontladingen

In het geval van onweer moet de uitdrukking *elektrische gasontlading* zeer letterlijk worden opgevat: bliksem is ontlading tussen een gebied met positieve lading en een gebied met negatieve lading. Over het algemeen wordt aangenomen dat deze gebieden in een onweerswolk ontstaan bij het bevriezen van kleine waterdruppels tot ijskristalletjes. De buitenkant van het bevriezende druppeltje wordt positief opgeladen. Door de uitzetting van het druppeltje tijdens het bevroeringsproces springt er een schilfertje van de buitenkant af. Dat schilfertje neemt positieve elektrische lading mee. De zwaardere binnenkern blijft achter met een negatieve lading. De opwaartse luchtstroming zal vooral de lichte, positief geladen schilfertjes mee naar boven nemen en de zwaardere, negatief geladen kernen achterlaten. Zo krijgt de bovenkant van de donderwolk een positieve elektrische lading en de onderkant een negatieve. De grootte van de elektrische ladingen bedraagt meestal enkele tientallen coulomb, maar kan oplopen tot meer dan 100 coulomb.

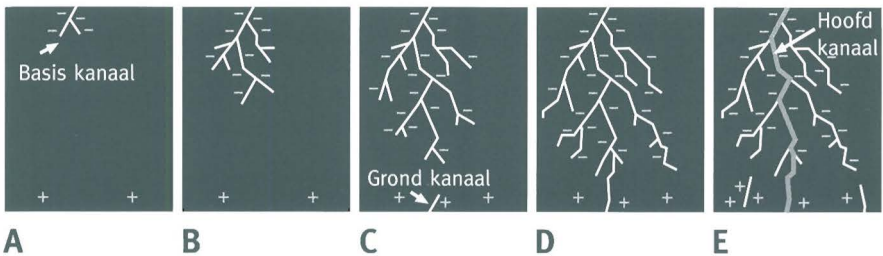
figuur 2
structuur van
een onweerswolk



Tussen deze twee hoofdgebieden in de wolk vinden de meeste ontladingen plaats, die we als een oplichten van de wolk zien. Onder de wolk ontstaat op de aarde een spiegel­lading door de negatieve lading onderin de wolk. Ook tussen de onderkant van de wolk en het aardoppervlak vinden ontladingen plaats, maar slechts een kwart van alle ontladingen bereikt de aarde.

Een bliksemontlading tussen de diverse tegengesteld geladen gebieden kan niet ineens plaatsvinden, want daar is lucht een te slechte geleider voor; zelfs bij spanningen van meer dan 10 miljoen volt kan er geen spontane “vonk” overspringen over een afstand van vele kilometers. Hiervoor is een kanaal nodig dat stapsgewijs wordt opgebouwd, een zogenaamde *stepped leader*. Zo'n kanaal ontstaat doordat lading zich verplaatst in die richting waar de lucht om de een of andere reden wat beter geleidend is.

figuur 3
ontwikkeling van
een bliksemkanaal



Gebleken is dat de veldsterkte in de wolk van moment tot moment fluctueert, bijvoorbeeld doordat door lucht­bewegingen positieve en negatieve ladingen dichter bij elkaar of verder van elkaar af worden gebracht. Daardoor kan plaatselijk in de wolk over een afstand van enige tientallen tot enige honderdtallen meters de voor een doorslag vereiste veldsterkte worden bereikt. Er volgt dan een ontlading van beperkte afmetingen. In zo'n ontlading wordt het gas gedeeltelijk geïoniseerd: elektronen splitsen zich af van de atomen en worden vrij. Die elektronen worden dan versneld in het elektrische veld tot ze genoeg energie hebben om weer andere atomen te ioniseren; een kettingreactie van ionisaties is het gevolg.

De elektronen hebben een dermate hoge energie dat ze ook in staat zijn om atomen in een aangeslagen toestand te brengen. Als die

aangeslagen atomen terugvallen naar een lager energieniveau wordt er licht uitgezonden: dat is het licht dat we zien. Meestal wordt er door de ontlading negatieve lading in de richting van de aarde of in de richting van een positieve lading in de wolk gevoerd. Vlakbij de plaats tot waar de ontlading reikt, heerst een zeer hoge potentiaal, waardoor de lucht gedeeltelijk wordt geïoniseerd en dus geleidend wordt. Hierdoor kan de negatieve lading iets verder in de richting van de aarde of het positief geladen gedeelte van de wolk doordringen. Dit proces herhaalt zich, tot deze voorontlading, die op deze wijze stapsgewijs voortschrijdt met een snelheid van 10^5 tot 10^6 m/s, de grond bereikt of, wat vaker gebeurt, een positieve, opwaarts bewegende vangontlading ontmoet, die onder invloed van de naderende, sterk negatieve voorontlading van een spits voorwerp uitgaat. Dit wordt in sommige gevallen voorafgegaan door een lichtschijnsel aan de top van dat voorwerp: het sint-elmsvuur.

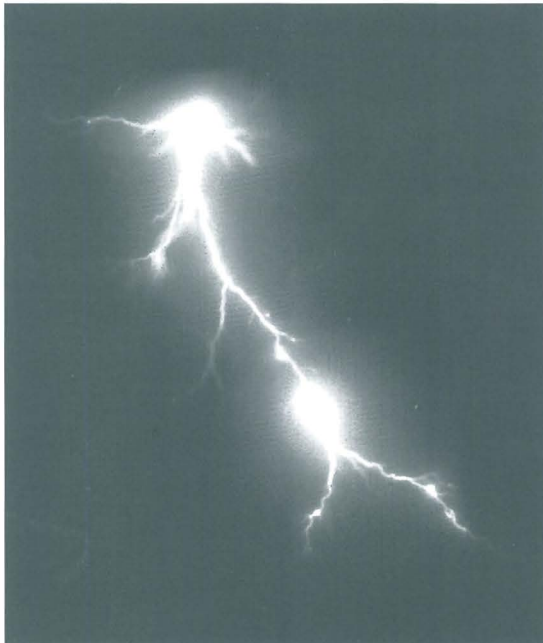
Het geleidende kanaal, waardoor de voorontlading zich beweegt, heeft meestal een doorsnede van meer dan een meter. Onmiddellijk na het op deze manier tot stand komen van de elektrische verbinding tussen wolk en aarde vindt de hoofdontlading plaats, die bij de aarde begint en in de meeste gevallen negatieve lading naar de aarde voert. De voortplantingssnelheid van de hoofdontlading is vele malen hoger dan die van de voorontlading en bedraagt ongeveer eenderde van de lichtsnelheid.

Deze hoofdontlading ioniseert het bliksemkanaal volledig, zodat dit een zeer goede geleider wordt. De doorsnede bedraagt nu ongeveer 10 cm. Na enige honderdsten tot enige tienden van een seconde zullen vervolgens nieuwe ontladingen plaatsvinden, bestaande uit een voorontlading die naar de aarde is gericht en een daaropvolgende deelontlading van aarde naar wolk. Er kunnen maximaal ongeveer 15 van zulke secundaire ontladingen plaatsvinden, met een gemiddelde van 4 tot 5. De hoogste stroomsterkten worden bereikt in de hoofdontlading, tot zo'n 100.000 ampère.

Gasontladingen in het laboratorium

De bliksem is een wel heel spectaculair voorbeeld van een elektrische gasontlading. Er zijn echter veel dichterbij huis ook andere voorbeelden. Een mini-bliksem is bijvoorbeeld de ontlasting die optreedt als er een vonk overslaat tussen twee elektrodes die zich in lucht op een afstand van enkele millimeters bevinden. Een bekende toepassing van deze ontlasting is de in veel huishoudens gebruikte *piëzo*-gasaansteker. Een andere mini-bliksem is de zogenaamde *corona*-ontlasting. Deze ontstaat als men een hoogspanning aanlegt tussen een spitse en een vlakke elektrode, die zich bevinden in lucht of water met een onderlinge afstand van een paar millimeter tot enkele centimeters.

figuur 4
corona-ontlasting
in water



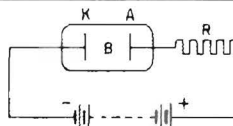


De foto laat duidelijk zien dat er een ontladingsstructuur ontstaat die veel lijkt op die van de bliksem: een kanaal dat zich met duizelingwekkende snelheden voortspoedt van de ene elektrode naar de andere (de foto was dan ook zeer moeilijk te maken...) en dat zich onderweg splitst in meerdere vertakkingen. Was in het geval van de bliksem de kanaallengte enkele kilometers, de stroomsterkte honderdduizenden ampère, en de kanaaldiameter 10 cm: bij de corona-ontlading is de kanaallengte enkele millimeters, de stroomsterkte een paar ampère en de kanaaldiameter enkele tienden van een millimeter. Feitelijk zijn corona-ontladingen dus niets anders dan bliksemschichten die in alle opzichten ruwweg een factor 10.000 zijn verkleind. Ze hebben toepassingen op vele gebieden; ik zal hier later nog op terugkomen.

Als we om ons heen kijken in deze zaal ziet u, misschien zonder het te weten, vele gasontladingen. Een groot deel van de lampen in de zaal bestaat uit fluorescentielampen, die voorkomen in vele maten: van groot, zoals de tl-buis, tot klein, zoals de spaarlamp. In zo'n fluorescentielamp bevindt zich een elektrische gasontlading in een mengsel van argon en kwikdamp. Doordat de druk in de buis is verlaagd, kan de diameter van de de ontleding, die in het geval van het zojuist genoemde voorbeeld bij een druk van één atmosfeer minder dan een millimeter bedraagt, toenemen tot enkele centimeters. Zelfs in de projector waarmee ik deze presentatie op het scherm projecteer zit waarschijnlijk een gasontladingslamp, zij het van een totaal ander type.

Als we nu in het laboratorium een stabiele gasontlading willen produceren, dan kan men volgens een beproefd recept aan weerszijden van een glazen buis twee elektrodes insmelten. Die elektrodes worden dan aangesloten op een voeding en nog wat andere elektronica, die ter stabilisatie van de ontleding dient. De glazen buis wordt, voor hij wordt dichtgesmolten, eerst vacuüm gezogen en vervolgens gevuld met een gasmengsel van de gewenste samenstelling. Het plaatje dat ik nu laat zien is afkomstig uit een boekje van Penning, één van de Nederlandse pioniers van de gasontladingsfysica.

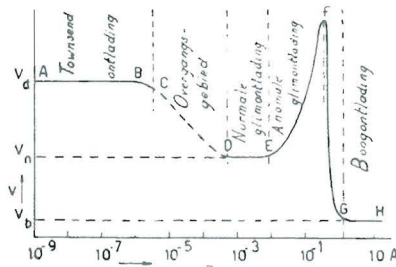
figuur 5
ontladingsbuis
volgens Penning



Ontladingsbuis *B* met vlakke elektroden (*K* = kathode, *A* = anode) en een grote voorweerstand *R*, ter opwekking van een Townsendontlading

figuur 6
IV-karakteristiek van
een gasontlading
volgens Penning

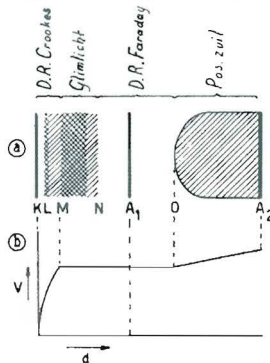
Als we de spanning over de buis laten toenemen, zal er op een bepaald moment een stroom gaan lopen: we hebben de doorslag bereikt. In de volgende figuur staat de stroom-spanningskarakteristiek van een gasontlading weergegeven. Ook dit plaatje komt uit het boek van Penning.



Schematische karakteristiek van een zelfstandige gasontlading, lineaire schaal voor de spanning V , logarithmische schaal voor de stroom i . $V_d =$ doorslagspanning, $V_a =$ normale kathodeval, $V_b =$ boogspanning

Het is gebruikelijk om in dit soort figuren de stroom horizontaal uit te zetten en de spanning verticaal. Het gebied A-B is het regime van de zogenaamde Townsend-ontlading, vernoemd naar de bekende Britse gasontladingspionier J.S. Townsend. In dit regime geeft de ontlading nauwelijks licht en is nog vrij uniform. Na een overgangsgebied (C-D) bereiken we het regime van de glimontladingen (D-E-F). Als de stroom toeneemt in de normale glimontlading, dan heeft dat tot gevolg dat het glimlicht zich over een steeds groter stuk van de kathode uitstrekt. De spanning blijft in dit gedeelte van de karakteristiek constant. Zodra de kathode helemaal bedekt is met glimlicht, wordt de glimontlading anomaal: de spanning neemt weer toe. Als de stroom een kritische waarde overschrijdt (bij F) dan daalt de spanning weer drastisch: we betreden het regime van de boogontlading. In dit gebied kan, bij nagenoeg gelijkblijvende spanning, de stroom fors toenemen. Nu wordt ook het gas warm. In het gedeelte A-F zijn alleen de elektronen heet, maar de gasmoleculen warmen nauwelijks op. De bliksem is feitelijk een ontlading die in dit diagram helemaal naar rechts is doorgeschoten tot ver buiten het bereik van het plaatje

De ruimtelijke structuur van de gasontlading is te zien in de volgende figuur, wederom van Penning.



Glimontlading tussen de kathode K, en twee verschillende standen van de anode (A₁ resp. A₂). D.R. = donkere ruimte. a) schematische voorstelling der lichtverschijnselen; de dichtheid der arcering geeft de lichtsterkte aan; b) verloop van de potentiaal tussen kathode en anode. In dit hoofdstuk wordt alleen het gedeelte KA₁ besproken; voor de positieve zuil zie Hfdst. X

figuur 7
structuur van een
glimontlading
volgens Penning

Bij het oversteken van de kathode naar de anode, komen we achtereenvolgens tegen: de donkere ruimte van Crookes, het negatieve glimlicht, de donkere ruimte van Faraday en ten slotte de positieve zuil. Alleen het negatieve glimlicht en de positieve zuil zenden licht uit: de overige gebieden zijn donker. De lichtgevende gebieden zijn quasi-neutraal, hetgeen wil zeggen dat de dichtheden van de negatieve ladingsdragers (elektronen) en de positieve ladingsdragers (positieve ionen) vrijwel gelijk zijn. De elektrische veldsterkte in deze gebieden is zeer klein. Vrijwel de gehele ontladingspotentiaal valt over de donkere gebieden, waar zich een forse ruimtelading bevindt.

Het quasi-neutrale deel van de gasontlading wordt *plasma* genoemd. Deze term is geïntroduceerd door Irving Langmuir, een van de aartsvaders van de gasontladingsfysica, die leefde van 1881 tot 1957. Na zijn studies in Göttingen bij de wiskundige Felix Klein en de natuurkundige Walther Nernst keerde hij in 1904 naar de Verenigde Staten terug en na een teleurstellende periode in het onderwijs legde hij in 1909 de basis voor een briljante carrière als industrieel onderzoeker op het laboratorium van General Electric te Schenectady. Op de vraag van de directeur van het Research Laboratory van de



General Electric Company, dr. Whitney, of hij plezier in zijn werk had, antwoordde Langmuir: “Ik heb er erg veel plezier in, maar ik vraag mij af of dat voor General Electric wel goed is”. Whitney antwoordde: “Dat zijn jouw zorgen niet, zolang je maar werkt aan hoogvacuüm en wolfram kun je rustig je gang gaan.” Langmuir zelf haalt deze herinnering op, eraan toevoegend: “Er bestond geen plan, het werk kon zich ontwikkelen, geleid door nieuwsgierigheid en enthousiasme van de onderzoeker en het was fundamenteel. Het was mede zo succesvol omdat er geen planning was.” Hoewel het waarschijnlijker is dat het werk zo succesvol was omdat het verricht werd door Irving Langmuir, is deze anekdote een aardige illustratie van een researchopvatting die langzamerhand tot de folklore gerekend kan worden. Het opvallende is dat een en hetzelfde onderzoek door de onderzoeker als fundamenteel wordt beschouwd, maar door zijn directeur als toegepast.

Het zojuist gememoreerde gesprek vond plaats omstreeks 1912. Langmuir heeft in 1932 de Nobelprijs voor scheikunde gekregen voor zijn werk op het gebied van de oppervlaktechemie. Dit had slechts zijdelings te maken met zijn werk op het gebied van de gasontladingen en kwam voort uit zijn experimenten over de absorptie van diverse gassen aan wolframdraden, die in lampen als gloeidraad dienst deden. Langmuir maakte zich niet druk over het onderscheid tussen chemie en fysica. Sprekend over de aard van de krachten die optreden tussen atomen en moleculen aan het grensvlak van de gasfase en de vaste fase merkte hij op: “Het onderscheid betreft niet zozeer de aard van de krachten als wel de traditionele geesteshouding van fysici en chemici.” Feitelijk stond Langmuir aan de basis van de hedendaagse plasmafysica: de tegenwoordig zo veelvuldig in de maatschappij voorkomende toepassingen van gasontladingen hebben alles te maken met processen in de ontlading zelf, maar zeer zeker ook met de processen die zich afspelen aan alle oppervlakken die het plasma raken. Fysica en chemie gaan hand in hand, geheel in de geest van Langmuir.

Geschiedenis

De eerste tientallen jaren van het vakgebied – eind negentiende, begin twintigste eeuw – werden vooral gekenmerkt door fundamenteel onderzoek naar de elementaire processen die zich in de ontlading afspelen. In deze periode werden vele fundamentele ontdekkingen gedaan, die de basis hebben gelegd voor de hedendaagse natuurkunde. Gasontladingen speelden bij enkele van die ontdekkingen een grote rol. Als eerste noem ik *J.J. Thomson*, die in 1906 de Nobelprijs voor natuurkunde ontving voor de experimenten waarmee hij het bestaan van het elektron aantoonde. De titel van de rede die hij hield bij het in ontvangst nemen van de prijs was *Carriers of Negative Electricity*. Uit zijn betoog citeer ik: *“In this lecture I wish to give an account of some investigations which have led to the conclusion that the carriers of negative electricity are bodies, which I have called corpuscles, having a mass very much smaller than that of the atom of any known element and are of the same character from whatever source the negative electricity may be derived.”* Dit citaat geeft uitstekend aan waar het in de natuurkunde van die dagen over ging. Belangrijk is de nadruk die de auteur legt op het corpusculaire karakter van de negatieve elektriciteit. Hiermee kiest hij partij in de aan het einde van de negentiende eeuw nog steeds oplopende tegenstelling tussen deeltjes- en stralingsmodellen van de werkelijkheid: de kathodestralen blijken te bestaan uit deeltjes. Voorts is van belang de nadruk die hij legt op de als extreem klein ervaren massa en het universeel voorkomen van de deeltjes. Thomson trekt zijn conclusies uit diverse proeven waarmee hij de kathodestralen onder invloed van elektrische en magnetische velden laat afbuigen. Uit dit alles blijkt dat de verschijnselen die optreden bij de geleiding van elektriciteit in gassen een essentiële rol hebben gespeeld in de ontwikkeling van zijn denken. Naar mijn mening is zijn werk op dit terrein als de eerste fundamentele studie van elementaire processen in gasontladingen te beschouwen. Een tweede Nobelprijs die zonder plasmafysica niet mogelijk was geweest ging in 1923 naar *Robert Andrews Millikan*. Deze werd toegekend voor de bepaling van de verhouding tussen de grootte van de lading van het elektron en de massa ervan. Dit klassieke experiment – nog heden ten dage ter lering uitgevoerd in vele collegezalen en natuurkundige



practica – is onderdeel van de experimentenreeks waarbij met behulp van een ontladingstechniek de basis van de atoomtheorie is gelegd. De titel van de rede van Millikan, gehouden bij de uitreiking, was *The electron and the light-quant from the experimental point of view*. Ook hier geef ik een naar mijn mening essentieel citaat uit de acceptatiespeech: “*But the electron itself, which man has measured, is neither an uncertainty nor a hypothesis. It is a new experimental fact that this generation in which we live has for the first time seen, but which anyone who wills may henceforth see*”. De geschiedenis leert dat Millikan het met deze uitspraak bij het rechte eind heeft gehad.

De laatste Nobelprijs voor de natuurkunde, toegekend voor werk op dit vakgebied, is in 1925 uitgereikt aan *James Franck* en *Gustav Hertz*. De proef waaraan hun naam is verbonden, behoort ook tot de klassieke proeven uit de moderne natuurkunde en vervult, net als de zojuist beschreven proef van Millikan, tot op de dag van vandaag nog een belangrijke rol bij het onderwijs in de atoomfysica op practica en colleges. Ook hier wordt een ontladingstechniek benut en wel om na te gaan hoe in een elektrisch veld versnelde elektronen hun snelheid in botsingen met gasatomen kunnen verliezen. De uitkomsten van deze proeven konden verklaard worden met de atoomtheorie van Bohr en vormden de eerste experimentele ondersteuning daarvan die niet met spectroscopische middelen verkregen was.

Vanaf het midden van de twintigste eeuw kwam een nieuwe toepassing van plasma's sterk naar voren: *de beheerste kernfusie*. Dit proces vindt plaats door de versmelting van lichte kernen, bijvoorbeeld van deuterium en tritium. Bij deze kernreacties komen gigantische hoeveelheden energie vrij, maar voorwaarde voor het plaatsvinden van de reactie is dat de kernen met zeer grote snelheden op elkaar botsen. Dit is nodig om de afstotende elektrische krachten te overwinnen. Op de zon zijn de condities daarvoor gunstig, maar in het laboratorium stuiten de onderzoekers op grote problemen bij hun pogingen om temperaturen te realiseren die overeenkomen met de temperaturen in het binnenste van de zon.

De concepten die in de jaren voor de Tweede Wereldoorlog in de gasontladingsfysica tot stand zijn gekomen hebben als grondslag gediend voor de opbouw van wat men als nieuwe discipline is gaan zien: *de thermonucleaire plasmafysica*. Naast de evenwijdige sporen van de atoomfysica en de gasontladingsfysica ontstond dus een derde. De relatie tussen deze vakgebieden is aanwijsbaar in de belangstelling



die de onderzoekers uit de diverse disciplines aan de dag leggen bij conferenties. Mede dankzij de onderzoeksschool CPS, het Centrum voor Plasmafysica en Stralingstechnologie, is het beseft dat deze disciplines voor de ontwikkeling van elk gebied afzonderlijk elkaar op wetenschappelijke noemer moeten kunnen vinden springlevend. De wederzijdse belangstelling tijdens de jaarlijkse voorjaarsvergaderingen van de onderzoeksschool in Lunteren is daar een overtuigend bewijs van. Was in de jaren vijftig de ontwikkeling van de kernfusie de oorzaak van een renaissance van de ontladingsfysica, in de jaren zestig kwam daar de ontwikkeling van de gaslaser bij. De eerste in het zichtbare gedeelte van het spectrum opererende laser had als actief medium de positieve kolom van een ontlading in een mengsel van neon en helium. De voor laserwerking fundamentele eis dat er een inversie van de evenwichtsbezetting van stralende atoom- of molecuultoestanden moest bestaan, sloot prachtig aan op het fundamenteel niet in evenwicht verkeren van ontladingen. Vroeg men zich in de jaren zestig nog af welke ontlading als actief medium kon worden benut, later kwam daarvoor in de plaats de vraag welke ontladingen eigenlijk géén laserwerking vertonen.

In vele, vooral industriële laboratoria startte in de tweede helft van de twintigste eeuw een aantal onderzoekslijnen in het gebruik van plasma's voor verlichting: de reeds genoemde gasontladinglampen. De grote bastions daarbij waren de laboratoria van General Electric, GTE, Sylvania en Westinghouse in de Verenigde Staten. Aan deze zijde van de Atlantische Oceaan lag het brandpunt in Eindhoven. Binnen het Natuurkundig Laboratorium bestond een wereldvermaarde gasontladingengroep waarin een fors aantal gasontladingspioniers werkzaam was. We kunnen dan denken aan namen als Penning, Druijvestein, Kruithof, Elenbaas en Vriens. Het werk dat in die groep werd gedaan had een uitstraling naar vele productdivisies van Philips, maar toch vooral een heel grote naar de divisie Licht. Helaas werd op een bepaald moment besloten de gasontladingengroep op te heffen. De mensen waaierden uit over het hele bedrijf, waardoor de in de gloriejaren opgebouwde kennis en expertise gelukkig niet geheel voor het bedrijf verloren gingen.

Vanaf ongeveer 1975 begon een ontwikkeling die een associatie oproept met de door Langmuir al opgemerkte vage scheidslijn tussen chemie en fysica: het gebruik van plasma's voor het vergroten van de mogelijkheden van de chemische technologie. Zojuist zagen wij dat door het fundamentele niet-evenwichtskarakter plasma's zeer geschikt zijn voor lasertoepassingen. Dezelfde eigenschap maakt plasma's geschikt om in de chemie nieuwe reactiepaden te openen en reactieprocessen te versnellen. Dit vakgebied maakt momenteel een stormachtige ontwikkeling door, niet op de laatste plaats door de mogelijkheden om ontladingen te benutten voor oppervlaktemodificatie in de IC-technologie en bij de productie van zonnecellen. De technologen en systeemontwerpers blijken grote behoefte te hebben aan fundamentele ontladingskennis. De hernieuwde belangstelling voor bijvoorbeeld radiofrequente ontladingen en streamerontladingen als corona's en bogen, waaraan ook in ons laboratorium wordt gewerkt, is daarvan het gevolg.

Men kan concluderen dat op dit moment de plasmafysica als vakgebied een zekere staat van rijpheid heeft bereikt. Dat was voor mij ook de aanleiding om deze oratie tot nu toe de vorm van een hoorcollege te geven. De explorerende fase die het onderzoek aan het begin van de twintigste eeuw kenmerkte is echter inmiddels overgegaan in een fase waarin gericht gewerkt wordt aan specifieke aspecten van de ontlading en zijn omgeving, en de wisselwerking tussen die twee. We staan op een keerpunt: tegelijkertijd dienen zich nieuwe wetenschappelijke uitdagingen aan doen zich nieuwe toepassingsmogelijkheden voor. Daarom zal ik de rest van deze oratie wat meer de vorm van een voordracht geven.

Allereerst de wetenschappelijke uitdagingen. Ik zal deze puntsgewijs behandelen, en daarna op één ervan uitvoeriger ingaan.

1 De afmetingen van de gasontlading

Op dit punt heeft zich in mijn wetenschappelijke loopbaan een voortdurende schaalverkleining voorgedaan. Mijn promotiewerk, in het midden van de jaren tachtig, ging over een gelijkstroomplasma met een inhoud van ongeveer roo liter. Daarna is de afmeting van de plasma's waarmee ik werkte afgenomen tot pakweg een halve liter. Deze fase duurde tot ongeveer vier jaar geleden.

Nu werken we veel met plasma's die een volume beslaan van enkele kubieke centimeters, en we gaan stevig door in die ingeslagen richting door ons spervuur te werpen op plasma's met een inhoud van hooguit een kubieke millimeter. Als we het gemiddelde uitrekenen van deze voortdurende schaalverkleining, dan komen we uit op een reductie van het plasmavolume met ongeveer een factor 3 per jaar. Feitelijk is het een factor $\sqrt{10}$, maar 3 is een goede benadering. Dit volgt uit een vuistregel die ik mijn studenten altijd voorhoud als er afschattingen gemaakt moeten worden: $\pi = e = 3 = 4 = \sqrt{10}$

Deze volumeverkleining heeft grote gevolgen voor met name de diagnostieken. De dagelijkse praktijk van een gasontladingsfysicus bestaat namelijk vooral uit het bedrijven van diagnostieken in het

plasma, om op die manier de diverse plasmaparameters die van belang zijn te weten te komen. In onze groep zijn die diagnostische meetmethodes van oudsher veelal optisch van aard.

Het grote voordeel van *optische technieken* is dat ze de ontlading niet of nauwelijks verstoren, wat niet gezegd kan worden van veel andere methodes zoals bijvoorbeeld de in veel andere groepen gebruikte Langmuir-sondes. Veel optische methodes zijn gebaseerd op het bestuderen van de (optische) reactie van het plasma op het inschieten van een laserbundel: de zogenaamde *actieve spectroscopie*. Bij dit soort technieken is het zaak om de laserbundel gedeeltelijk te laten samenvallen met de detectietak.

Dit brengt ons meteen bij de grote complicatie van de schaalverkleining: de *ruimtelijke resolutie*. Als men een plasma van 100 liter wil analyseren, dan is het vrijwel altijd voldoende om een kleinste waarneembare volume-eenheid, het zogenaamde detectievolume, aan te houden van een kubieke millimeter. Als het totale plasmavolume niet meer bedraagt dan zo'n kubieke millimeter, zoals nu steeds vaker het geval is, moet men het natuurlijk anders aanpakken. De inhoud van het detectievolume moet aanzienlijk verminderen, tot ongeveer een kubieke micrometer.

Als u iets van optica afweet, dan weet u ook dat we nu snel tegen een fundamentele grens aanlopen. De kleinste diameter waartoe men een optisch systeem kan focuseren komt bij benadering overeen met de golflengte van het gebruikte licht. Wij gebruiken tot nu toe vooral licht in het zichtbare, het ultraviolette of het infrarode deel van het spectrum. Golflengtes van die soorten licht zijn van de orde van een micrometer. Het moet dus allemaal nog net kunnen.

Deze fundamentele limiet legt nu wel een bom onder de voortdurende schaalverkleining. Als we nog verder willen komen dan we nu doen, kunnen we het plasma niet meer ruimtelijk oplossen met "normale" golflengtes: we zullen dan naar het extreme UV- of zachte röntgendomein toe moeten.

Mocht het zover komen, dan zullen we tegen die tijd eens moeten kijken of we de fotonen kunnen betrekken van collega Van der Wiel, die onlangs in zijn oratie uiteenzette wat het langetermijndoel van zijn groep is: het genereren van licht met een golflengte die precies in het domein ligt dat wij nodig hebben.

2 De tijdschaal

Het plasma van 100 liter waarmee mijn carrière begon was een gelijkstroomontlading: tijd speelde totaal geen rol. De plasma's van een halve liter waren in het algemeen radiofrequente ontladingen. Hier begint de tijd dus een rol te spelen. Toch waren dit soort ontladingen nog wel stationair: behalve bij de effecten die samenhangen met de radiofrequente modulatie speelde tijd nog altijd een ondergeschikte rol. De nieuwe plasmageneratie, met een inhoud van een kubieke millimeter, is over het algemeen volstrekt instationair: het betreft meestal *gepulste ontladingen*. De tijdschaal waar we het over hebben ligt in de orde van nanosecondes.

Dit brengt ons in een nieuw regime: beproefde concepten om het plasma te beschrijven gaan niet meer op. De energieverdeling van de elektronen in het plasma gaat sterk afwijken van de evenwichtssituatie die beschreven wordt met een Maxwellse snelheidsverdeling. (Deze energieverdeling is een goede maat voor hoe "braaf" het plasma is: hoe braver, hoe Maxwellser.) Er kan plotseling opbouw van ruimtelading optreden die even later weer wordt afgebroken. Verschijnselen als *foto-ionisatie*, die in stationaire plasma's nauwelijks een rol spelen, worden ineens belangrijk. De klassieke beschrijving volgens het zogenaamde drift-diffusiemodel, dat ervan uitgaat dat de elektronenbevolking in evenwicht is met het elektrische veld, gaat niet meer op.

Met andere woorden: de plasmafysische doos van Pandora gaat open. We zullen alle zeilen moeten bijzetten en zowel op het gebied van diagnostieken als op het gebied van de modellering alles uit de kast moeten halen om dit soort plasma's goed te kunnen begrijpen. Nog veel meer dan de verkleining van de afmetingen dwingt de verkorting van de tijdschaal ons ertoe nieuwe meettechnieken te ontwerpen en nieuwe modelconcepten op te stellen.

3 De wisselwerking tussen het plasma en een oppervlak

Als een oppervlak het plasma raakt, dan zal dat oppervlak blootgesteld worden aan allerlei deeltjes die vanuit het plasma worden aangevoerd. Men kan daarbij denken aan ionen, elektronen en fotonen. Met deze deeltjes kan men het oppervlak modifieren, men kan het etsen, of men kan een coating aanbrengen. De mechanismes van deze *plasma-oppervlaktewisselwerking* zijn nog altijd, ook na tientallen jaren onderzoek, slechts zeer ten dele bekend.

Ik zal over dit onderwerp niet al te veel vertellen: dat zal waarschijnlijk

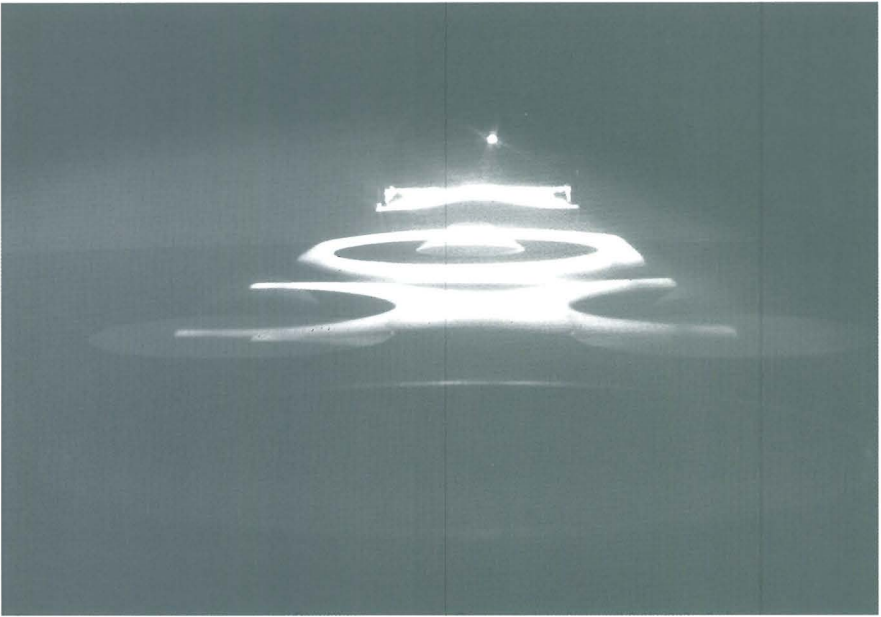


uitgebreider aan de orde komen als mijn collega Richard van de Sanden ooit zijn oratie uitspreekt. Ik wil volstaan met hier op te merken dat zich op dit gebied recentelijk een volledig nieuwe uitdaging aandient: de wisselwerking tussen een plasma en levende materie. Welke invloed kan men met het oorlogsarsenaal aan reactieve deeltjes dat in een plasma geproduceerd wordt op levend weefsel uitoefenen? We betreden hier een nagenoeg onontgonnen terrein: alle kennis zal van de bodem af aan moeten worden opgebouwd.

4 De aanwezigheid van poederdeeltjes

Als een macroscopisch deeltje, bijvoorbeeld een stofje, in het plasma wordt gebracht, dan zal het over het algemeen een negatieve elektrische lading krijgen. Dit wordt veroorzaakt door de grote beweeglijkheid van de elektronen in het plasma. Elektronen zijn veel kleiner en lichter dan ionen en zullen dus zo'n stofdeeltje het eerst bereiken. De aanvoer van negatieve lading gaat door tot er een evenwichtssituatie is bereikt. Zoals we in de figuren van Penning gezien hebben, wordt een gasontlading omgeven door een gebied waarin de elektrische veldsterkte naar de wand toe is gericht. Als de stofdeeltjes dit gebied betreden, worden ze door het elektrische veld teruggedreven: ze zijn feitelijk opgesloten in het plasma en kunnen de wand nooit bereiken.

In het begin van de jaren negentig van de twintigste eeuw kwam men er in de halfgeleiderindustrie achter dat dit verschijnsel enorm hinderlijk was. Plasmareactoren werden toen ook al, zoals ik al eerder kort noemde, gebruikt voor het etsen en aanbrengen van lagen op bijvoorbeeld IC's. Toen de afmetingen van de structuren op die IC's steeds kleiner werden en in de buurt van de afmetingen van stofdeeltjes kwamen, moest men uitgebreide voorzorgen nemen om alles uiterst schoon te houden: de zogenaamde *clean room* deed zijn intrede. Toch bleek dat er, hoezeer men ook probeerde de productieruimtes schoon te houden, altijd een zeker percentage IC's bleef die tijdens de productie een stofdeeltje hadden "gevangen". In het laboratorium van IBM ontdekte men dat het plasma de boosdoener was: de stofdeeltjes werden door het plasma gevangen en vervolgens opgesloten. Na uitschakelen van het plasma vielen de stofdeeltjes op de siliciumplakken en het kwaad was geschied.



figuur 8

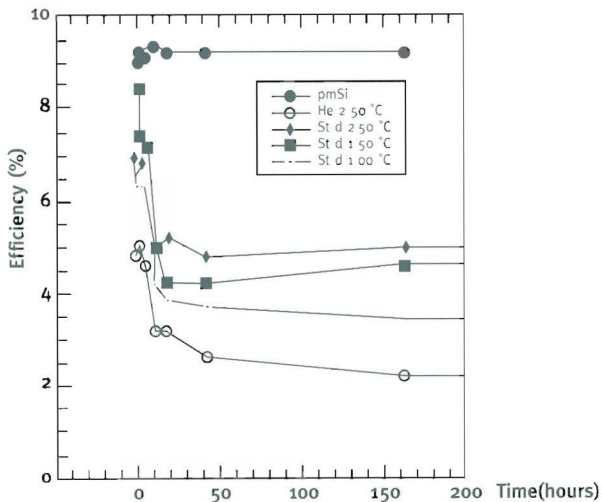
Weergave van een stofwolk die door het plasma is verzameld. Onderaan, op de elektrode, drie siliciumplakken. Het plasma verzamelt alle stof dat in de reactor aanwezig is en laat het, na uitschakelen, op de siliciumplak vallen. Figuur afkomstig van Dr. G.S. Selwyn, IBM Research

De eerste jaren was dit nieuwe vakgebied, dat in het Engels de naam *dusty plasmas* kreeg, volledig gericht op het verwijderen van het stof uit de ontlading. Hoe kon men bijvoorbeeld de elektrodegeometrie zo aanpassen dat het stof naar de pompen werd afgevoerd?

Vanaf 1996 begon duidelijk te worden dat stofdeeltjes in bepaalde gevallen ook juist zeer positieve effecten konden hebben. Een markant voorbeeld hiervan vindt men bij plasma's die gebruikt worden voor het produceren van *zonnecellen* op basis van amorf, gehydrogeneerd silicium (afkorting a-Si:H). Zonnecellen die van dit materiaal zijn gemaakt zijn veel goedkoper dan de klassieke zonnecellen, die van kristallijn silicium gemaakt zijn. Ze hebben echter één nadeel: hun efficiëntie zakt snel in met ruwweg een factor 2, nadat ze aan licht worden blootgesteld. Dit effect kreeg de naam *Staebler-Wronski-effect*.

In de plasma's die voor de productie van a-Si:H gebruikt worden, in het algemeen radiofrequente ontladingen in het gas silaan (SiH_4), vindt onder bepaalde condities spontaan *stofvorming* plaats. Dit stof 'groeit' op negatieve ionen die in het plasma aanwezig zijn. In het

begin probeerde men natuurlijk deze condities te vermijden: stofdeeltjes kunnen zonnecellen kortsluiten en zo de werking van een zonnepaneel nadelig beïnvloeden. Op een – achteraf gezien – gelukkig moment werd er aan de Ecole Polytechnique in Parijs een zonnecel van a-Si:H gemaakt waarin per ongeluk toch stofdeeltjes aanwezig waren, zij het hele kleine (met een diameter van enkele nanometers). Deze deeltjes bleken kristallijn te zijn. Toen de efficiëntie van de resulterende zonnecel werd gemeten bleek tot ieders verrassing dat het Staebler-Wronski-effect verdwenen was.



figuur 9

Eliminatie van het Staebler-Wronski-effect door inbouwen van stof in het materiaal van de zonnecel. De bovenste curve komt overeen met een zonnecel met ingebouwd stof, de andere met zonnecellen zonder ingebouwd stof.

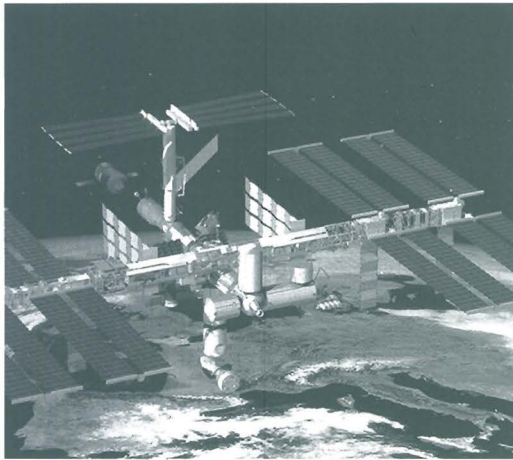
Ineens werd het interessant om niet te proberen het stof te vermijden, maar juist om het te produceren en op te sluiten!

Vrijwel gelijktijdig werd er in het Max Planck Instituut voor Extraterrestrische Fysica te Garching in Duitsland ontdekt dat stofdeeltjes in een plasma zich spontaan gaan ordenen in kristalstructuren. Dit komt doordat de deeltjes elkaar onderling allemaal afstoten door hun elektrische lading terwijl de gehele wolk in het plasma is opgesloten. Men kan de individuele stofdeeltjes zichtbaar maken door ze met een laser te beschijnen en vervolgens te filmen met een videocamera. Daarvan zal ik nu een video laten zien.

De stofwolk kan nu gebruikt worden als een beeld van de vaste stoffen, vloeistoffen en gassen die we allemaal kennen: fase-overgangen kunnen op microscopisch niveau worden gevolgd. Een groot probleem is dat de zwaartekracht ook aan de stofdeeltjes trekt, waardoor de wolk wordt samengeperst tot een platte pannenkoek. Wil men dit vermijden – het doel is tenslotte om modellen te maken voor driedimensionale structuren – dan zal men de zwaartekracht moeten uitschakelen. Op de aarde kan dit slechts zeer kort, bijvoorbeeld tijdens parabolische vluchten in een vliegtuig: op de top van de parabool is het hele toestel ongeveer 20 seconden gewichtsloos. Dit is echter niet voldoende: we willen langdurig experimenten kunnen doen.

Daarom wordt er nu met man en macht gewerkt aan het installeren van een plasmareactor met stofdeeltjes erin in het International Space Station. Dit is een internationaal project, dat ondersteund wordt door de NASA, de ESA, de Russische en de Japanse ruimtevaartorganisaties. Doel van dit langdurige en onvoorstelbaar kostbare project is het verzamelen van informatie over het gedrag van stofdeeltjes in plasma's en het blootleggen van de wisselwerkingsmechanismes. Ik ben er trots op dat we aan dit project mogen deelnemen: de Technische Universiteit Eindhoven gaat het wereldruim in: donder en bliksem voorbij!

figuur 10
impressie van het
International Space
Station waarin een
plasmareactor zal
worden opgesteld



Ten slotte wil ik even stilstaan bij de toepassingen van de lage-temperatuurplasmafysica. Tot voor kort werden gasontladingen vooral toegepast bij het modificeren en bewerken van oppervlakken. Te denken valt dan aan IC's, zonnecellen, slijtvaste lagen, textielbehandeling en dergelijke. Daarnaast was er natuurlijk al de toepassing in gasontladingslampen. Op dit moment dient zich een scala aan nieuwe mogelijkheden aan. Vele daarvan liggen op het terrein van de *duurzame technologie*. Te denken valt aan verbeterde en goedkopere zonnecellen, katalyse, heldere bronnen van UV- en röntgenstraling die nodig zijn voor de IC-lithografie van de toekomst, nieuwe en zuinigere lampen, platte beeldschermen (de zogenaamde *plasma display panels*, PDP's), het reinigen van afvalwater en rookgas, nieuwe behandelingsmethodes voor hartchirurgie, DNA-chips, en nog veel meer. Voor veel van die toepassingen is het gebruik van kleine, intense en veelal gepulste ontladingen noodzakelijk.

We verkeren in de gelukkige omstandigheid dat de eerder genoemde wetenschappelijke uitdagingen, maar ook de infrastructuur en de expertise die noodzakelijk zijn om die uitdagingen daadwerkelijk aan te kunnen gaan, zich op hetzelfde moment aandienen als het uitgebreide arsenaal van nieuwe toepassingen. Dit biedt uitstekende kansen voor uitdagend onderzoek dat bij uitstek geschikt is om studenten en promovendi aan deze Technische Universiteit op te leiden. De fundamentele kennis die we nodig hebben zal deels aan deze, deels aan gene zijde van donder en bliksem worden vergaard. De toepassingen zullen vooral aan deze zijde (dat wil zeggen op aarde) plaatsvinden en kunnen daar grote positieve gevolgen hebben voor de samenleving en het milieu. Daarnaast zou plasmatechnologie ook een rol kunnen gaan spelen bij de energieopwekking en ecosystemen voor ruimteschepen, ruimtestations en nederzettingen op hemellichamen. Dan zouden we voor de tweede maal donder en bliksem voorbijgaan.

Dankwoord

Allereerst wil ik hier mijn ouders noemen, die gelukkig beide in deze zaal aanwezig zijn. Zij hebben mij in alle fasen van mijn leven van harte ondersteund met raad en daad. Nooit deed ik vergeefs een beroep op hen. De toga die ik nu draag is een geschenk van hen, zowel letterlijk als figuurlijk. Pa en ma, ik hoop dat we onze verbondenheid ondanks jullie hoge leeftijd nog geruime tijd kunnen voortzetten.

Ook van groot belang voor mijn persoonlijk welbevinden was de aanwezigheid van Ellen en Jelle in mijn directe omgeving: niet alleen gaven jullie me veel levensvreugde, maar ook zorgden jullie ervoor dat ik regelmatig herinnerd werd aan de ware prioriteiten in het bestaan van de mens. Ik hoop dat ik nog lang zal mogen genieten van deze opwekkingsimpulsen.

Hooggeleerde heren De Hoog en Schram, beste Frits en Daan. Jullie hebben mij op het rechte plasmafysische spoor gezet en gehouden. Gedurende bijna twee decades waren jullie mijn leermeesters op velerlei gebied. Voor de rol die jullie beiden in mijn carrière gespeeld hebben ben ik jullie zeer erkentelijk. Vooral jou, Frits, mijn voorganger als leerstoelhouder, ben ik dank verschuldigd. Je liet een gezonde en goed draaiende groep achter die voor mij een perfect startpunt was. Voorts wil ik je bedanken voor het grootmoedig ter beschikking stellen van de tekst van je eigen door ziekte nooit uitgesproken oratie: er zijn mij vele lichten opgegaan.

Beste deelnemers en begeleiders van de managementleergang van Han Looten, waaraan ik heb deelgenomen: jullie hebben met zijn allen ervoor gezorgd dat ik het hogeleraarsbestaan in het juiste perspectief ging zien en jullie hebben me menig middel aangereikt om dit werk goed te kunnen doen.

Een cruciale rol in mijn carrière werd gespeeld door de Stichting Technische Wetenschappen, kortweg STW. Op voordracht van deze stichting ben ik in 1996 benoemd tot NWO-Pionier. Deze benoeming vergrootte niet alleen de financiële armslag, zodat de infrastructuur van onze groep fors kon worden uitgebreid, maar had ook een zodanig uitstralingseffect dat de toekomst van onze groep veiliggesteld werd.

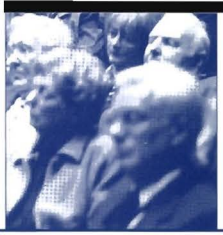
En nu naar de toekomst gericht: Hooggeleerde Van de Sanden, beste



Richard. We zullen er samen voor verantwoordelijk zijn de synergie tussen onze beide groepen verder te doen bloeien totdat we in feite één grote groep zijn, iets dat in de perceptie van de buitenlandse collega's gelukkig al zo is. Ik heb op dit punt alle vertrouwen in de toekomst en zie uit naar een ongetwijfeld vruchtbare samenwerking.

Mijnheer de rector magnificus, dames en heren: het doet mij bijzonder veel genoegen dat we zo dadelijk deze zaal niet verlaten zoals gebruikelijk aan de achterkant richting Senaatszaal, maar aan de voorkant, de kant die leidt naar de hal van het Auditorium, om te kunnen genieten van een bespeling van het TU/e-orgel. De universiteitsorganist, Ruud Huijbregts, zal de *Suite Gotique* van Léon Boëlmann ten gehore brengen. Vóór het orgel zal u een glas champagne aangeboden worden. Daarna vindt de receptie plaats in de University Club in het Hoofdgebouw: waarlijk een passende locatie voor deze gelegenheid. Ik wil u nog vriendelijk verzoeken om tijdens de korte wandeling naar het orgel en tijdens de orgelbespeling uw stem te dempen en relatieve stilte te betrachten. Met name het derde deel van het orgelwerk, de *Prière à Notre Dame*, verliest al zijn schoonheid als er te veel achtergrondgeluid in de zaal is. Laten we het instrument en zijn bespeler het respect betuigen dat hun toekomt.

Ik heb gezegd.



Referentie

F.M. Penning,
Electrische gasontladingen, 1955,
Servire N.V., Den Haag

Curriculum Vitae

Gerrit Kroesen werd op 10 mei 1958 geboren in Heerlen. In 1977 behaalde hij het diploma Atheneum B aan het Eijkhagencollege te Schaesberg, tegenwoordig gemeente Landgraaf. Hij studeerde Technische Natuurkunde aan de voorloper van de TUE, de Technische Hogeschool Eindhoven, en rondde deze studie in 1983 af.

Aansluitend begon hij zijn promotiewerk, dat handelde over een nieuwe methode voor plasmadepositie waarin gebruikgemaakt werd van een expanderend thermisch plasma. In 1986 werd hij aangesteld als universitair docent. In 1988 promoveerde hij aan de Technische Universiteit Eindhoven. Promotoren waren prof. dr. ir. D.C. Schram en prof. dr. F.J. de Hoog.

In 1990 bracht hij een sabbatsjaar door bij het IBM-laboratorium te Yorktown Heights in de Verenigde Staten, waar hij nauw samenwerkte met dr. Gottlieb Oehrlein. Daarna concentreerde hij zich op radiofrequente gasontladingen, met name op de elementaire processen die zich afspelen in chemisch actieve ontladingen. Vanaf 1992 richtte hij zich op de zogenaamde *dusty plasmas*.

Op voordracht van de Stichting Technische Wetenschappen (STW) werd hij in 1996 door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) benoemd tot Pionier-onderzoeker.

In 1997 bracht hij een aantal sabbat-maanden door aan de Universiteit van Kyoto in Japan, waar hij werkte met prof. dr. Kunihide Tachibana.

Gerrit Kroesen is lid van diverse wetenschappelijke adviesraden van instellingen in binnen- en buitenland. Op 1 mei 2000 werd hij aan de Technische Universiteit Eindhoven benoemd tot gewoon hoogleraar met als leeropdracht experimentele plasmafysica.

Colofon

Fotografie:
Rob Stork, Eindhoven

Vormgeving:
Plaza ontwerpers, Eindhoven

Drukwerk:
Drukkerij Lecturis, Eindhoven

ISBN: 90-386-1162-5

TU/e

technische universiteit eindhoven

Postbus 513
5600 MB Eindhoven
Telefoon (040) 247 91 11

