



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Onder de lens: de wetenschap van een scherper beeld

Tromp, R.M.

Citation

Tromp, R. M. (2007). *Onder de lens: de wetenschap van een scherper beeld*. Leiden: Universiteit Leiden. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/12647>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/12647>

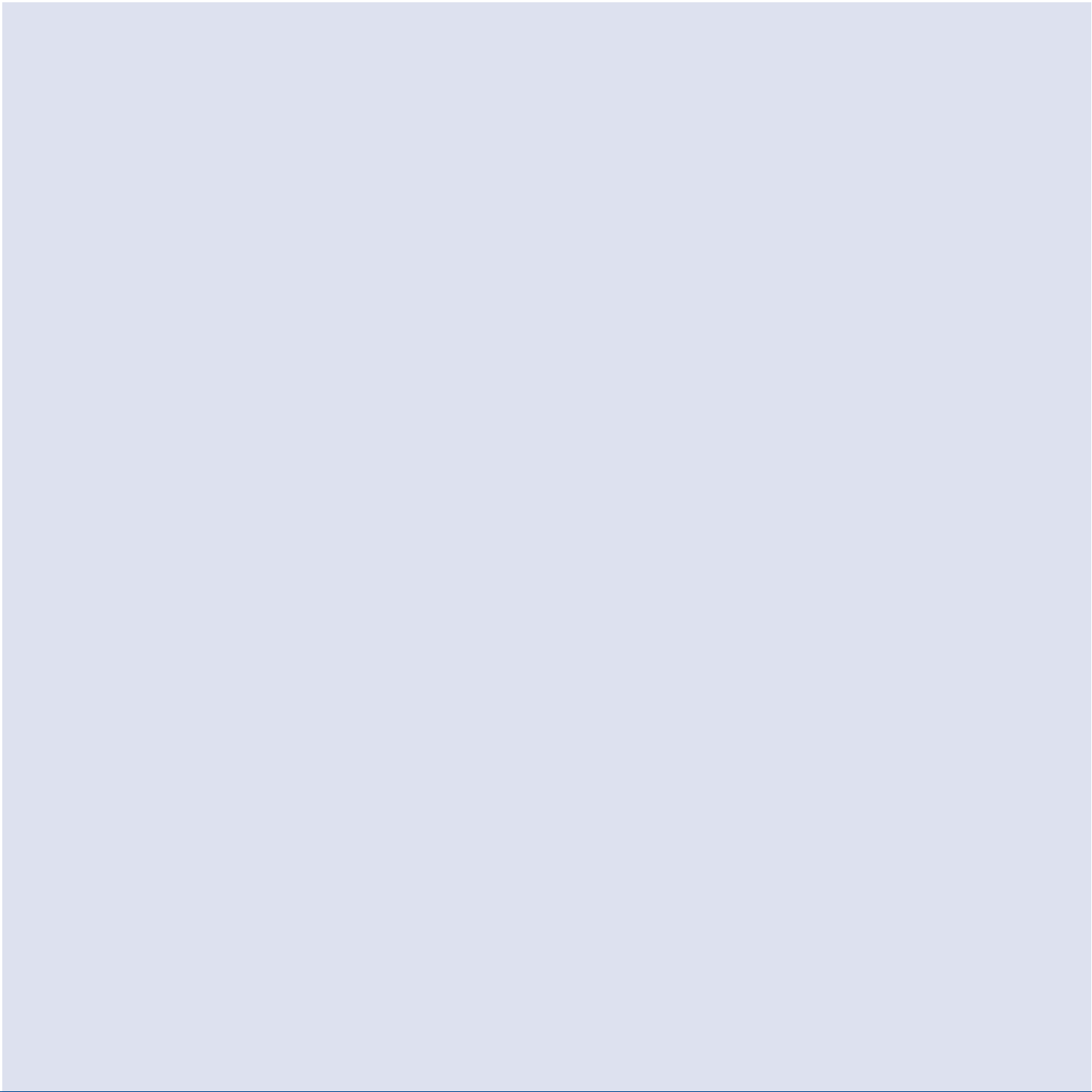
Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Prof.dr.ir. R.M. Tromp

Onder de lens: de wetenschap van een scherper beeld



Universiteit Leiden



Onder de lens: de wetenschap van een scherper beeld

Oratie uitgesproken door

Prof.dr.ir. R.M. Tromp

bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar op het gebied van de
Fysica van Oppervlakken en Materialen
aan de Universiteit Leiden
op vrijdag 22 juni 2007



Universiteit Leiden

Zeer geachte decaan, beste toehoorders, lieve familie en vrienden,

1632 was een opmerkelijk jaar. Op 24 oktober, niet ver hier vandaan in Delft, werd Antony van Leeuwenhoek geboren. Een paar dagen later volgde Johan Vermeer. Op 24 november zag in Amsterdam Baruch de Spinoza voor de eerste keer het daglicht. In Florence publiceerde Galileo Galilei zijn *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Voor het einde van het jaar werd hij in Rome ter verantwoording geroepen, en zijn boek zou pas in 1835 van de Index van Verboden Boeken verwijderd worden. In Amsterdam produceerde de Blaeu familie een luxueuze atlas van de wereld, in navolging van Ortelius en Mercator. Niet alleen de wereld, maar ook de mens werd in kaart gebracht. Rembrandt schilderde de Anatomische Les van Dr. Nicolaes Tulp. Newton werd in 1643 geboren, Leibniz in 1646, Johan Sebastiaan Bach in 1685.

Antony van Leeuwenhoek was niet de uitvinder van de microscoop. De samengestelde microscoop, bestaande uit een oculair en een objectief, wordt aan Hans en Zacharias Janssen toegeschreven, rond 1590 in Middelburg. Er waren natuurlijk andere vroege gebruikers van dit revolutionaire instrument: Jan Swammerdam, geboren in Amsterdam en een student in Leiden met een levendige belangstelling voor insecten en anatomie, Pieter van Musschenbroek, alom bekend voor zijn uitvinding van de Leidsche Flesch, Robert Hooke ('*ut tensio sic vis*'), Galileo, en vele anderen. Zelfs Spinoza, die ons inzicht in God, Mens, en Natuur zocht te verhelferen, was een lenslijper, en overleed aan een longziekte die waarschijnlijk het gevolg was van langdurige inhalatie van fijne glasdeeltjes. Van Leeuwenhoek was een lakenkoopman, die een vergrootglas gebruikte om de kwaliteit van de stoffen, die hij verhandelde, beter te beoordelen. Het moet hem goed gegaan zijn, want

in 1665 las hij de *Micrographia* van Hooke, een kostbaar boek geïllustreerd met prachtige gravures van de bijna onzichtbare wereld om ons heen: de haren op de pootjes van een vlo, de uit duizenden lenzen bestaande ogen van een vlieg. Het inspireerde Van Leeuwenhoek om zelf eens door een lens naar de wereld om hem heen te gaan kijken. Maar bestaande microscopen waren niet erg goed, en konden een vergroting geven van misschien een factor 10, niet veel beter. Voor meer vergroting waren kleinere lenzen vereist, met een kortere brandpuntsafstand, maar het was ook veel moeilijker om zulke kleine lenzen te slijpen met de precisie die nodig was voor een scherpe afbeelding. Van Leeuwenhoek liet iedereen geloven dat hij eindeloze uren besteedde aan het slijpen van zulke lenzen, en dat het allemaal erg hard werken was. Maar in werkelijkheid had hij een trucje gevonden. In een vlam kon hij uit een stukje glas een lange draad trekken. Als hij die draad afbrak en het einde voorzichtig weer bij de vlam hield, dan smolt het einde van de draad en maakte een klein, perfect bolletje. De diameter van dit glasbolletje kon hij goed in de hand houden door meer of minder van de glasdraad te laten smelten. En dit kleine glasbolletje, in een handomdraai vervaardigd, was een uitstekende lens voor een microscoop, die gemakkelijk een vergroting van 100x of meer kon leveren. Met dit geheime recept in de hand ging Van Leeuwenhoek de wereld van het onzichtbare binnen en werd hij de eerste beoefenaar van de microbiologie. Hij stuurde verslagen van zijn waarnemingen naar Robert Hooke van de Royal Society in Londen. Maar toen hij de Engelse geleerden op de hoogte stelde van zijn ontdekking van kleine diertjes die hij tussen zijn eigen tanden en die van zijn huisgenoten gevonden had, diertjes die in het speeksel levendig en met grote vaart heen en weer bewogen, toen werd het de heren in Londen te gortig. De ontdekking van eencellige organismen en bacteriën werd met groot scepticisme

en ongeloof onthaald. Zozeer zelfs, dat de Royal Society een onderzoekscommissie naar Delft stuurde om daar eens te bezien waar meneer Van Leeuwenhoek nu eigenlijk mee bezig was. Ze reisden beleerd en bekeerd terug naar Londen. Maar er was toch nog een probleem met die microscoop, en dat was een probleem dat niet zomaar met een trucje door een slimme Delftenaar kon worden opgelost. En het was ook geen nieuw probleem. Leonardo DaVinci had het al opgemerkt in zijn studies van een bolvormige spiegel. Geen enkele lens, zelfs niet een absoluut, mathematisch perfecte bol, geeft een perfecte afbeelding. De afbeelding wordt bedorven door wat we nu lens aberraties noemen. Sferische aberraties leiden ertoe dat stralen die dicht bij de optische as lopen niet op dezelfde plaats worden afgebeeld als stralen die verder van de optische as verwijderd zijn. En bovendien heeft de lens voor verschillende kleuren in het licht een verschillende brandpuntsafstand. Dat wordt chromatische aberratie genoemd. Door de effecten van chromatische en sferische aberratie zou de verdere vervolmaking van de lichtmicroscoop nog een goede 200 jaar op zich laten wachten. In het midden van de 19de eeuw bouwde Carl Zeiss in Jena in Duitsland een bedrijf op rond de ontwikkeling en verkoop van microscopen. Hij was een goede vakman, en in 1866 verkocht hij zijn duizendste microscoop. Maar nog steeds verhinderden de oude problemen van lens aberraties verdere vooruitgang. Aan de universiteit van Jena was een jonge professor, Ernst Karl Abbe, 32 jaar oud toen hij in 1872 met Carl Zeiss in contact kwam. Samen stortten ze zich op het aberratie probleem, en vonden de nodige doorbraak. Abbe ontwikkelde de mathematische fundering voor een aberratievrije microscoop. In plaats van zuiver empirisch te proberen zijn instrumenten te verbeteren, wist Zeiss nu precies welke kant hij op moest. Maar hoewel de theorie nu in handen

was, bleek het juiste glas dat de theorie in praktijk kon omzetten, helaas niet te bestaan. Wederom arriveerde een jonge wetenschapper, de pas in Jena gepromoveerde Otto Schott, juist op tijd. Hij vertelde Abbe over zijn werk aan nieuwe theorieën en methoden voor de fabricage van glas. Met Schott's kennis en ervaring kwam het glas, dat Abbe en Zeiss nodig hadden, nu spoedig beschikbaar. In 1886 kwam de eerste volledig aberratiegecorrigeerde microscoop op de markt. Het was bijna 300 jaar na de uitvinding van de samengestelde microscoop door Hans en Zacharias Janssen. En net zoals de eenvoudige maar voor zijn tijd uitstekende microscoop van Van Leeuwenhoek hem in staat stelde om de deur naar de microbiologie te openen, zo zouden de uitmuntende Zeiss microscopen de ontwikkeling van de wetenschap in tal van gebieden mogelijk maken en versnellen.

Nog was het einde niet in zicht. Lichtdeeltjes of fotonen gedragen zich niet alleen als deeltjes, maar ook als golven, en hebben een amplitude en een fase. In 1953 ontving Fritz Zernike, in 1888 in Amsterdam geboren en hoogleraar in Groningen, de Nobelprijs voor de ontwikkeling van fasecontrast microscopie. Dit was gebaseerd op een ontdekking die hij in 1930 deed in zijn onderzoek aan spectraallijnen. Fasecontrast microscopie zou pas gedurende de tweede wereldoorlog tot bloei komen na een langdurige en wat haperende samenwerking tussen Zernike en de Zeiss fabriek in Jena. Zernike was niet zo enthousiast over de samenwerking. Hij beklaat zich in zijn Nobellezing over het feit dat de navolgers van Zeiss en Abbe de mening waren toegedaan, dat alles wat de moeite waard was in de ontwikkeling van een betere microscoop reeds door Zeiss en Abbe gedaan was. Als er iets nieuws te ontdekken zou zijn, dan zou dat zeker al lang geleden in Jena ontdekt zijn.

Zernike schreef (en ik vertaal naar het Nederlands): ‘Zeiss in Jena, die met zo weinig enthousiasme begonnen waren, gingen langzaam door met de methode. Na nog weer een paar van mijn bezoeken, na een paar jaren waarin ze te gecompliceerde instrumenten ontwikkelden, en na nog meer vertraging door de Oorlog, kwamen ze in 1941 met fase contrast objectieven en toebehoren uit.’ Zernike ontwikkelde later ook nieuwe mathematische methoden voor de analyse van lens aberraties, en de zogenaamde Zernike polynomen zijn nog steeds in gebruik.

Terwijl Zernike in Groningen fase contrast microscopie ontdekte, gebeurde er in Berlijn iets heel anders, wat de hele wereld van de microscopie in een enorme stroomversnelling zou storten. Het was een uitvloeisel van de quantum revolutie die nog steeds in volle gang was. In 1906 had J.J. Thomson, Cavendish hoogleraar in Cambridge, de Nobelprijs in de Natuurkunde ontvangen voor de ontdekking van het elektron, een subatomair deeltje met de lading van een proton, en een massa 1836 maal kleiner dan een proton. Samen vormen een proton en een elektron een waterstof atoom. Eenendertig jaar later, in 1937, ontving zijn zoon, Jean Paget Thomson, samen met Clinton Joseph Davisson van Bell Labs, de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor hun wederzijds onafhankelijke experimentele demonstratie (in 1927) dat het elektron zich niet alleen als een deeltje, maar ook als een golf kan gedragen. Thomson deed dit door hoge energie elektronen door een dun preparaat heen te schieten, een voorloper van de Transmissie Elektronen Microscopie. Davisson liet veel lagere energie elektronen van een oppervlak terugkaatsen, een voorloper van de Lage Energie Elektronen Microscopie, waar ik later op terug zal komen. Dat een elektron zowel deeltje als golf kan zijn was al in 1924 voorgesteld door Louis de Broglie, in zijn proefschrift

Recherches sur la théorie des quanta, goed voor de Nobelprijs in de natuurkunde in 1929.

Dus zowel elektronen als fotonen gedragen zich niet alleen als deeltjes, maak ook als golven. Naarmate de energie van een foton groter is, is de golflengte korter. Een rood foton heeft een grotere golflengte dan een blauw foton, en dat heeft weer een grotere golflengte dan een ultraviolet foton. Zelfs met de beste lenzen is het erg moeilijk om met een microscoop afbeeldingen te maken van objecten die veel kleiner zijn dan een halve golflengte van het licht. Blauw licht heeft een golflengte van zo'n 400 nanometer (nm), veertiende van een duizendste van een millimeter. Ter vergelijking: de diameter van een haar is ongeveer 200 keer de golflengte van blauw licht. Hemoglobine, de drager van zuurstof in ons bloed, heeft een diameter van ongeveer 6 nm, bijna 100 keer kleiner dan de golflengte van blauw licht. Een optische microscoop kan daarom een prachtige afbeelding maken van een haar, maar hemoglobine is voor zo'n microscoop volstrekt onzichtbaar.

Als elektronen zich als golven kunnen gedragen, dan hebben ze dus ook een golflengte. Bijvoorbeeld, een elektron met een bewegingsenergie van 1 elektronvolt (de energie die het elektron krijgt als het vanuit rust versneld wordt met een elektrische spanning van 1 Volt) heeft een golflengte van 1.23 nm. Een elektron met een energie van 200.000 elektronvolt heeft een golflengte die nog eens 500 keer kleiner is. Weer ter vergelijking: de afstand tussen twee koolstofatomen is ongeveer zestig keer groter dan de golflengte van een 200.000 elektronvolt elektron. Als we nu een microscoop konden bouwen die elektronen gebruikt in plaats van fotonen (licht), dan zouden we dus gemakkelijk die koolstofatomen moeten kunnen zien. Dat is nu precies waar ze in Berlijn mee bezig waren. Max Knoll en zijn student Ernst Ruska bouwden in 1931 de eerste elektronenmicroscoop. In 1933 toonden ze aan dat

zo'n microscoop ook in de praktijk een beter oplossend vermogen kon hebben dan een lichtmicroscoop. Ruska verdedigde zijn proefschrift in 1934, en ontving de Nobelprijs in de Natuurkunde in 1986, twee jaar voor zijn overlijden. De opwinding over de elektronenmicroscoop was uiteraard niet gering. Maar al snel bleek dat ook in een elektronenmicroscoop lens aberraties roet in het eten gooien. Zelfs vandaag is het oplossend vermogen van de allerbeste elektronenmicroscopen niet beter dan 0.05 nm, 20 keer groter dan de golflengte van het elektron. In 1936 publiceerde de 28-jarige Otto Scherzer, hoogleraar in Darmstadt, een artikel met de schijnbaar onschuldige titel: Über einige Fehler von Elektronenlinsen. Voor de brildragers onder mijn toehoorders, u weet wel dat als u verziend bent, uw brillenglazen convergent (positief) zijn, terwijl bijziende patiënten divergente (negatieve) lenzen dragen. Positieve lenzen zijn bol, negatieve lenzen hol. Positieve lenzen hebben positieve aberratie coëfficiënten, negatieve lenzen hebben negatieve aberratie coëfficiënten. Abbe en Zeiss hadden laten zien, dat in een goed ontworpen microscoop de bij elkaar opgetelde aberraties van positieve en negatieve lenzen tot nul gereduceerd kunnen worden. Elektron lenzen zijn, helaas, altijd convergent, en het is niet mogelijk om de aberraties tot nul te reduceren. Dat is wat Scherzer 'enige tekortkomingen van elektronenlenzen' noemde. En de aberraties van elektronenlenzen zijn uiterst beroerd. Het is alsof Antony van Leeuwenhoek (in een historisch wat vertrokken perspectief) de wereld door de bodem van een Coca-Cola flesje ging bekijken. Aanvankelijk was het allemaal niet zo'n groot probleem. De elektronenmicroscoop was beter dan een lichtmicroscoop. Toepassingen in de biologie, natuurkunde, materiaalkunde, geneeskunde, archeologie, en zelfs de schone kunsten, lagen voor de hand. Ernst Ruska's broer, Helmut, was een van de eersten die elektronenmicroscopie zou gebruiken

voor biologische en medische problemen. En gedurende de eerste 50 jaar ging alles wel goed. De resolutie van de Transmissie Elektronen Microscoop (TEM) werd stukje bij beetje verbeterd, en het werd zelfs mogelijk om atomen te zien – min of meer- gebruik makend van Zernike's fasecontrast, maar nu voor elektronen. Er werden twee verschillende strategieën gevolgd. De eerste was Van Leeuwenhoek's strategie: voor een betere afbeelding heb je een sterkere, dat is kleinere, lens nodig. In een magnetische lens kan het magneetveld sterker gemaakt worden door de poolschoenen dichter naar elkaar toe te brengen, en de opening die de elektronen doorlaat te verkleinen. Maar uiteindelijk wordt het magneetveld zo sterk, dat het magnetische materiaal het niet langer goed omsloten kan houden, de magneet raakt verzadigd. Bovendien heb je een beetje ruimte nodig voor het preparaat en de preparaathouder, dus ook daar ligt een begrenzing. Ten tweede kun je, net als met lichtmicroscopen, de golflengte van de elektronen kleiner maken, ofwel de energie van de elektronenbundel verhogen. Enorme instrumenten werden gebouwd, een paar verdiepingen hoog, met versnellingen van twee miljoen Volt. Het oplossend vermogen van deze machines werd beter, zoals verwacht, maar de hoogenergetische elektronen veroorzaakten snel schade in de preparaten. Deze microscopen werden dus veelal gebruikt voor studies aan stralingsschade in materialen. Leuk, maar niet helemaal wat iedereen nodig had. Rond 1990 was het einde bereikt, en de situatie was vergelijkbaar met die waarin Carl Zeiss zich een eeuw eerder bevonden had. Er was evenwel een belangrijk verschil. Terwijl Zeiss voor zijn samenwerking met Abbe geen idee had wat hij nog kon doen om vooruitgang te maken, wisten de elektronoptici in 1990 precies wat ze moesten doen. Dat wisten ze al sinds 1947 toen Scherzer een nieuwe publicatie het licht deed zien onder de

titel 'Sphärische und chromatische Korrektur von Elektronenlinsen'. Hierin stelde hij vier verschillende methodes voor waarmee het aberratie probleem mogelijkerwijs kon worden opgelost, waaronder het gebruik van niet-cilindrische lenzen of multipolen; en de combinatie van een lens met een elektronenspiegel. De race begon onmiddellijk na Scherzer's tweede artikel. Reeds in 1951 probeerde Seeliger de multipool oplossing, maar het was allemaal te gecompliceerd. Het was een beetje als Fermat's beruchte en nu beroemde laatste stelling. Iedereen droomde ervan de oplossing te vinden, maar om werkelijk een poging te wagen betekende een grote investering van tijd en kapitaal met als waarschijnlijke uitkomst een teleurstellend resultaat. Hoewel de experimenten geen doorbraak leverden, werd de theoretische situatie langzaam beter. Scherzer stelde multipolen voor, maar niet de precieze configuratie. Theoretici, in Leningrad, Darmstadt, en Cambridge, kwamen met specifieke voorstellen en berekeningen. De obstakels waren niet gering. Het aantal optische elementen was enorm, met zo'n 80 elektromagnetische spoelen, die allemaal met hoge mechanische nauwkeurigheid en stabiliteit vervaardigd en gemonteerd moeten worden. De elektrische stromen door die spoelen moeten stabiel zijn tot een niveau van beter dan 1 deel op een miljoen, en in de nieuwste ontwerpen zelfs nog een factor 100 beter. Tenslotte moeten al die optische elementen bekrachtigd worden met uiterst precies gecontroleerde stroomsterkten die juist de aberraties opheffen. Zelfs als je alles gebouwd hebt, precies zoals het moet, dan zijn er nog altijd 80 parameters in te stellen. Dit doet me denken aan een vroeg model Philips kleurentelevisie dat mijn tante Rie me in 1978 cadeau deed, nadat zij een nieuwer model in haar huiskamer had geïnstalleerd. Die vroege televisies kwamen, net als een elektronenmicroscop, met een service contract. Elke paar

maanden kwam er een Philips technicus op bezoek om de televisie opnieuw af te stellen. Achter een esthetisch verantwoorde afdekplaat onder het beeldscherm bevond zich een indrukwekkende verzameling van kleine draaiknopjes. Ik schat dat er misschien twintig van die knopjes waren. Om een helder en scherp beeld te krijgen moesten al die knopjes optimaal worden ingesteld. De instelling veranderde over de tijd, en dit moest dus regelmatig gedaan worden. Na enige oefening had ik geleerd hoe dit in zijn werk ging, en na vele uren gepruts had ik een mooi beeld. Op een middag kwam een goede vriendin met haar kleine zontje op bezoek, terwijl ik niet thuis was. De aanblik van al die kleine knopjes was voor het jongetje teveel om te negeren, en gretig draaide hij naar hartenlust al die knopjes naar links en naar rechts, totdat hij iets anders vond om zich op uit te leven. De tv was nu zover ontregeld, dat ik daarna nooit meer in staat geweest ben om een fatsoenlijk beeld te krijgen, en uiteindelijk heb ik het apparaat aan een verzamelaar van historische elektronica overgedaan die het waarschijnlijk ook nooit meer helemaal in orde gekregen heeft. De elektronica voor de multipool corrector heeft niet 20, maar 80 knopjes. Succes arriveerde uiteindelijk tussen 1995 en 2000. In Darmstadt en Julich waren het Max Haider en collega's, en in Cambridge Ondrej Krivanek en medewerkers die er in slaagden om de sferische aberraties van een transmissie elektronenmicroscop te corrigeren. Wat het uiteindelijk mogelijk maakte was niet betere theorie of betere optische elementen, maar betere computers. Door systematisch te meten hoe goed de correctie werkt, en daaruit te berekenen welke knopjes bijgesteld moeten worden, en daarna weer te meten hoe goed het werkt, etcetera, kan een computer in een paar uur gedaan krijgen wat menselijk onmogelijk is. Phil Batson in IBM, een paar deuren van mijn lab verwijderd, was de eerste microscopist die met een door

Ondrej Krivanek ontwikkelde corrector een elektronenbundel maakte met een diameter kleiner dan 0.1 nm, om precies te zijn 0.07 nm, een wereldrecord, waarmee hij individuele goudatomen op een dun koolstoflaagje kon zien rondrennen. De opwinding was enorm, en iedereen begreep onmiddellijk dat dit niet zomaar een technisch hoogstandje was, maar het begin van een nieuw tijdperk. Nu, slechts een paar jaar later, bieden alle grote microscoopfabrikanten aberratie gecorrigeerde instrumenten aan, met prijskaartjes van 3-5 miljoen euro, en ze verkopen als warme broodjes. Al met al is het oplossend vermogen in een 200 keV elektronenmicroscop nu ongeveer 20 keer de golflengte van het elektron. Helaas zijn sferische en chromatische aberratie slechts de laagste orde aberratie termen in een microscoop, gevolgd door een oneindige reeks van hogere orde aberraties die nu het oplossend vermogen beperken. De vijfde orde aberraties kunnen nog gecorrigeerd worden, maar daarna valt er verder niet meer veel aan te doen.

In mijn eigen onderzoek werk ik met een zogenaamde lage energie elektronen microscoop, waar de energie niet in honderdduizenden elektronvolts gemeten wordt, maar niet verder komt dan hooguit 100 eV, en meestal niet meer dan 10 eV. De elektronen worden niet door het preparaat heen geschoten zoals in een transmissie microscoop, maar ze kaatsen van het oppervlak terug, zoals in Davisson's experiment. Zulke langzame elektronen zijn daardoor uiterst gevoelig voor wat er zich in de buitenste paar atomaire lagen van het preparaat afspeelt, en we kunnen video's maken van hoe een kristal groeit, hoe de structuur van de buitenste kristallaag verandert, hoe nanodraden en quantumdots ontstaan, hoe chemische reacties werken. Vergeleken met transmissie elektronen microscopie staat deze techniek nog in zijn kinderschoenen. De eerste LEEM was gebouwd door

Ernst Bauer in Clausthal, na een langdurig ontwikkelingsprogramma dat zich over 25 jaar zou uitstrekken. In 1985 kregen Bauer en zijn student Wolfgang Telieps de machine tenslotte aan het werk. Ik hoorde een lezing van Bauer waarin hij een video liet zien van de faseovergang van het beroemde geordende $\text{Si}(111)(7\times 7)$ oppervlak naar het ontordende (1×1) oppervlak. Ik had zelf al een paar jaar besteed aan het bepalen van de structuur van het (7×7) oppervlak, en ik was zeer onder de indruk van deze video. Toen ik terugkeerde van de conferentie vroeg mijn manager, Joe Demuth, ook een oppervlakte fysicus, of ik iets nieuws en interessants had gehoord. Ik vertelde hem over Bauer's video. Joe, Bob Hamers, toen een postdoc bij IBM, en ikzelf waren dag en nacht bezig om onze eerste scanning tunneling microscoop aan het werk te krijgen, en in 1985 publiceerden we een artikel in Physical Review Letters waarin we voor de eerste keer siliciumdimeren in een $\text{Si}(001)$ oppervlak afbeelden, een jaar later gevolgd door STM afbeeldingen van de atomair opgeloste elektronische orbitals van het (7×7) oppervlak. De resultaten waren uiterst opwindend, en we hadden geen tijd om ergens anders over na te denken. We gaven over de hele wereld lezingen voor steeds vollere zalen. Maar naarmate de zalen voller liepen, en zich meer en meer wetenschappers op de STM stortten, werd hij voor mij persoonlijk steeds minder interessant om hier mee door te gaan. Ik werk niet graag in een gebied waar duizenden anderen zich mee bezig houden. Na twee fantastische STM jaren ging ik terug naar Medium Energy Ion Scattering, mijn oude AMOLF liefde, met het doel om kristalgroei van dunne lagen te begrijpen en te verbeteren. We slaagden erin om het klonteren van dunne germanium laagjes op silicium te voorkomen met de ontwikkeling van 'surfactant mediated epitaxial growth', waarin een enkele atoomlaag van arsenicum als een vel op het oppervlak drijft, en het onderliggende germanium in bedwang houdt.

Maar onderhand was ik al andere plannen aan het maken. Die video van Ernst Bauer was in mijn hoofd blijven doorspelen. In de zomer van 1988 ging ik op bezoek in Clausthal om Bauer's machine met eigen ogen te bekijken. Wolfgang Telieps, de promovendus die het allemaal aan het werk had gekregen, was met zijn splinternieuwe sportauto kort na zijn promotie verongelukt. Gedurende mijn bezoek werkte de LEEM niet, maar ik had wel de gelegenheid om te zien hoe de microscoop was opgebouwd. De praktische ingenieursopleiding in Twente, en de traditie van instrumentatieontwikkeling op AMOLF kwamen nu goed van pas, en stelden me in staat om zowel de zwakke als de sterke punten in het ontwerp te vinden. Terug in New York vertelde ik Joe Demuth dat ik zelf een LEEM wilde bouwen. Hij stuurde me naar mijn directeur, Praveen Chaudhari, die ook wel te vinden was voor een project met hoog risico, en zo werd zonder enig papierwerk besloten om een LEEM te bouwen. Dat ik nog nooit een elektronen-microscoop had aangeraakt, laat staan een lens van binnen had gezien of ontworpen, was geen punt van discussie. Ik las een paar boeken over elektronenoptiek en ontwierp een microscoop. Binnen twee jaar hadden we de machine aan het werk, de tweede LEEM in de wereld. Op 2, 3, en 4 juli 1991 gaf ik mijn eerste publieke LEEM voordrachten, op het AMOLF instituut in Amsterdam, op het Philips Natlab, en in Twente. In 1992 publiceerden Arnoud van der Gon, vers van AMOLF, Mark Reuter, en ik vier LEEM artikelen in Physical Review Letters, het begin van een lange reeks die nog steeds in volle gang is.

Het vermogen om video opnamen te maken van oppervlakken bij hoge temperatuur blijkt niet onbelangrijk te zijn. Denk bijvoorbeeld aan een atomaire stap in een oppervlak. Een kristallijn oppervlak is als een ouderwetse klinkerstraat. Alle klinkertjes liggen keurig in het gelid, en de straat is mooi vlak.

Maar stel nu dat we midden in de straat een nieuwe laag klinkers beginnen te leggen, bovenop de bestaande straat. We krijgen dan een stap in de straat die precies een klinker hoog is. In een oppervlak van een kristal liggen alle atomen ook netjes in het gelid, net als de klinkerstraat, maar hier en daar begint er een nieuwe laag, die precies een atoom hoog is. Aan de rand van die nieuwe laag is een atomaire stap. Bij lage temperaturen bewegen die stappen niet. Maar bij hoge temperaturen beginnen de stappen te fluctueren. Aanvankelijk zijn de fluctuaties langzaam en met een lage amplitude, alsof er kleine golfjes over het water glijden. Maar naarmate de temperatuur hoger wordt worden de fluctuaties wilder en wilder, alsof er een storm over het water woedt. Voor het Si(001) oppervlak hebben we die fluctuaties over een groot temperatuursinterval gemeten uit video opnamen van atomaire stappen. Uit een totaal van 30 miljoen metingen van stap posities als een functie van tijd en temperatuur hebben we kunnen bepalen hoeveel energie een atomaire stap kost vergeleken met een volmaakt glad oppervlak. Dit is een belangrijke thermodynamische grootte als we proberen kristalgroei te begrijpen. Een nog fundamenteelere thermodynamische grootte is de energie van een atoom dat eenzaam over een volmaakt glad oppervlak aan het wandelen is. Ook die energie hebben we met de LEEM kunnen meten. Door deze metingen te combineren met video opnamen van een kristal dat langzaam groeit, atoomlaag na atoomlaag, zijn we uiteindelijk in staat geweest om die groei kwantitatief te beschrijven met een simpele thermodynamische theorie. Voorheen was dat onmogelijk omdat de belangrijkste thermodynamische grootheden volstrekt onbekend waren.

Van die eerste LEEM machine bouwden we drie kopieën die vandaag in academische laboratoria in gebruik zijn. In 1998

voltooiden we de eerste versie van een meer geavanceerde machine die nu door SPECS GmbH in Berlijn op de markt wordt gebracht. Momenteel ben ik bezig met het ontwerp en de constructie van een aberratie correctie module voor deze microscoop.

Met mijn huidige microscoop is het oplossend vermogen voor 10 eV elektronen 5 nm, 13 keer de golflengte van het elektron. Dat is voor veel dingen genoeg, maar voor andere niet. Neem bijvoorbeeld een koolstof nanobuis. Dit is een van die modieuze nanomaterialen waar de kranten regelmatig over schrijven. Het is een buisje waarvan de buitenwand bestaat uit een enkele atomaire koolstoflaag, en dus ook de binnenwand is. Zo'n buisje kan zowel metallisch als halfgeleidend zijn, afhankelijk van de exacte structuur. Ongeveer 1/3 van de buisjes zijn metallisch, de rest is halfgeleidend. Voor elektronische toepassingen zijn we het meest geïnteresseerd in de halfgeleidende versie, zodat we er transistoren van kunnen maken. Transistoren vormen de belangrijkste componenten in een microprocessor. De IBM chip in uw Sony Playstation 3 heeft ongeveer 234 miljoen transistors. Een koolstof nanobuis transistor werkt het best, als het buisje een diameter heeft tussen 1.5 en 2 nm. Het oplossend vermogen van de LEEM is 5 nm. Niet goed genoeg, dus. En graag zouden we niet alleen zo'n buisje willen zien, maar ook defecten daarin, en of het halfgeleidend of metallisch is. In Duitsland is sinds 1992 een team van theoretici en instrumentbouwers bezig met de ontwikkeling van een aberratie gecorrigeerde LEEM, die ze de SMART machine noemen. Deze machine maakt geen gebruik van multipolen, maar van een elektronenspiegel. Gedurende de LEEM conferentie in Japan vorig jaar september liet de leider van het SMART team, Thomas Schmidt, de eerste resultaten zien die erop kunnen duiden dat de resolutie verbeterd is met de elektronenspiegel. SMART is een enorm gecompliceerde

machine, en Zernike's klacht over het bouwen van te gecompliceerde machines komt terug in onze gedachten. Ik heb dit project gedurende de afgelopen 15 jaar met veel interesse gevolgd, maar ik ben ook al die tijd vastbesloten geweest dat dit eenvoudigweg te moeilijk is, voor mij althans. In 2000-2001 werkte ik een jaar als consultant voor IBM's technologische adviesraad, die advies geeft aan de CEO over nieuwe technologische ontwikkelingen en strategie. Met weinig tijd voor mijn eigen onderzoek, en geen tijd in het lab, maar druk bezig met vergaderingen en het samenstellen van PowerPoint presentaties, hadden mijn gedachten genoeg tijd om wat rond te dwalen. Het resultaat was een tweetal ideeën om het allemaal een stuk eenvoudiger te doen, waarvoor nu twee patentaanvragen zijn ingediend. Het ontwerp voor deze vereenvoudigde machine is dit voorjaar voltooid, en constructie is in volle gang. We hopen voor het einde van dit jaar de machine voor de eerste keer aan te zetten en uit te vinden of mijn ideeën goed genoeg zijn. We verwachten een oplossend vermogen te realiseren van 2 nm, slechts een paar keer de golflengte van het elektron, beter dan enige andere elektronenmicroscoop.

Als de geschiedenis, en mijn eigen ervaringen over de jaren een goede leidraad zijn, dan zal deze nieuwe microscoop nieuwe onderzoeksgebieden open leggen waarvan we nu nog weinig weet hebben. Vaak zijn de experimenten die we van te voren bedenken voor onze nieuwe instrumenten achteraf de minst interessante. Toen Van Leeuwenhoek voor de eerste keer door zijn microscoop keek, had hij geen idee van bacteriën. Maar hij had de goede smaak om tussen zijn tanden te schoffelen en te zien wat daar huis hield.

Hier sta ik dan, een industriële wetenschapper in hart en nieren, gehuld in een traditioneel academisch gewaad, om het

ambt van hoogleraar aan de oudste universiteit in Nederland te aanvaarden. De namen van sommige van mijn voorgangers zijn al genoemd. Andere namen, Lorentz, Kamerlingh-Onnes, Ehrenfest, hoeven hier nauwelijks genoemd te worden. En wellicht zullen sommigen onder U, onder de studenten, onder hun ouders, zich afvragen wat zo'n industriële man nu moet bij zo'n keurige universiteit als Leiden. Willen we de zuivere wetenschap niet in ere houden, is dat niet wat universiteiten doen? Is het niet de taak van een hoogleraar om de grenzen van de wetenschap te verleggen, en jonge wetenschappers op te leiden, die die nieuwverworven kennis en ideeën met zich meenemen, de maatschappij in? Is het bedrijfsleven niet al te zeer bezig met de korte termijn, de volgende aandeelhoudersvergadering, de nieuwste muizenval? Dat zijn goede vragen die een goed antwoord verdienen. Ik ben het met die vragenstellers eens, wanneer ze betogen dat een universiteit niet de juiste plaats is om een nieuwe, enigszins verbeterde muizenval te ontwikkelen, zelfs al is dat van belang voor de muizenvalindustrie. Mijn eerste antwoord is van de ja-maar variant: Ja, maar Leiden heeft een rijke traditie van praktisch ingestelde onderzoekers. Kamerlingh-Onnes was een apparaatbouwer, ga maar kijken in het Lorentz-Instituut waar zijn creaties nog steeds in de hal staan. Ehrenfest zelf pleitte voor het instellen van een hoogleraarschap in de industriële fysica. Mijn goede vriend Joost Frenken is altijd bezig iets te bouwen wat eigenlijk niet kan, en dan bouwt-ie het toch. Maar een ja-maar antwoord ontloopt altijd de eigenlijke vraag. Dus hier is een beter antwoord, in de vorm van een anekdote. Een paar jaar terug kreeg ik in IBM de leiding over het onderzoek op het gebied van de moleculaire en koolstofnanobuis elektronica. Het zal u misschien wat verbazen dat we daar onderzoek aan doen, gezien het feit dat niemand gelooft dat daar in de komende tien jaar geld aan te verdienen valt. Daarover later.

Het was mijn eerste taak om een strategie voor dit onderzoeksgebied te formuleren. Dit is waar ik begon: het doel van dit programma zou zijn om binnen vijf jaar een eenvoudige geïntegreerde schakeling te fabriceren. Heel praktisch, heel 'industriële'. Er was een gezonde hoeveelheid tegenstand. We hadden immers geen idee hoe we zoiets moesten doen. In Delft hadden Cees Dekker en anderen een aantal nanobuistransistors aan elkaar vastgeknoopt en een ringoscillator gecreëerd die met een frequentie van 5 Hertz (Hz) oscilleerde. Een goede siliciumvariant werkt een miljard keer sneller. We wisten inderdaad echt niet hoe we zoiets moesten doen, maar we wisten na enige discussie wel waarom we het niet wisten. Dus we werkten onze weg terug van ons doel naar de problemen die we moesten oplossen als we ons doel wilden bereiken. Het resultaat was een breed geformuleerd programma van zuiver wetenschappelijk onderzoek. Hoe vindt ladingoverdracht plaats tussen een uitwendig molecuul en een koolstof nanobuis? Hoe bewegen elektronen zich van een metaal naar de nanobuis en terug? Waar komt ruis vandaan in een nanobuis? Hoe groeien die nanobuizen eigenlijk, en kunnen we dat beter controleren? Waarom geven nanobuizen licht, en wat heeft dat te maken met defecten in de nanobuis? We gingen dit onderzoekprogramma te lijf, en tegelijkertijd probeerden we te zien of de resultaten ons dichterbij ons doel brachten. Binnen twee jaar konden we de vooruitgang benutten in de vervaardiging van een ringoscillator die met een frequentie van 80 MHz werkte, 16 miljoen keer sneller dan de Delftse versie. Dit waren niet een aantal transistoren die extern aan elkaar vastgeknoopt waren, maar een hele schakeling geïntegreerd op een enkele koolstofnanobuis. Er zijn nog steeds massa's fundamentele problemen die opgelost moeten worden voordat u dit soort elektronica in uw PlayStation zult vinden, maar een ding is zeker. Zonder fundamenteel onderzoek zal dit

nooit gebeuren. Het is dit soort problemen waar een universiteit belangrijke bijdragen kan leveren, en hier ligt, denk ik, een van de meest vruchtbare raakvlakken tussen universiteit en industrie, het niemandsland tussen wat we vandaag weten en kunnen, en wat we in de voorzienbare – maar niet onmiddellijke - toekomst nodig hebben, ook en vooral als we niet weten wat dat is. Een ander en steeds urgenter wordend voorbeeld van dit soort onderzoek ligt op het gebied van energie en klimaat. Hier liggen enorme mogelijkheden voor een breed geformuleerd fundamenteel onderzoekprogramma. De maatschappelijke urgentie neemt gestaag toe, en zal dat blijven doen, totdat vernieuwbare energie een industriële werkelijkheid is, niet een idealistisch toekomstvisioen. De technologische, economische, intellectuele, politieke, en culturele vitaliteit en stabiliteit van onze maatschappijen vereisen dat we deze problemen aanpakken

Zoals de ruim 400 jarige geschiedenis van de ontwikkeling van aberratie correctie in de microscopie duidelijk gemaakt zal hebben, is wetenschappelijk onderzoek een zaak van de lange baan. En de ontwikkeling van nieuwe technologieën en instrumenten die daaruit is voortgekomen, heeft wederom een diepe invloed gehad op vele andere takken van wetenschappelijk onderzoek. Het valt daarbij op dat de wetenschappers in hun oorspronkelijke doelstelling meestal niet zoveel zicht hadden op waartoe hun onderzoek zou leiden. Van Leeuwenhoek had geen idee van het enorme toekomstige belang van de microbiologie. Abbe, Zeiss, en Schott vielen door een gelukkig toeval van tijd en plaats in elkaars schoot, en zonder dit toeval zou hun onderzoek waarschijnlijk een veel bescheidener rol gespeeld hebben. Davison en de Thomson's waren bezig met de esoterische fysica van het elektron, en konden de ontwikkeling van de elektronen microscoop niet

voorzien. Zernike's interesse in spectraallijnen was niet gemotiveerd door een visie van een fase contrast microscoop. Enzovoort. In al deze gevallen kwam de toepassing na de ontdekking, maar de ontdekking zelf was niet door de toepassing gemotiveerd. Dr. Heinrich Rohrer, die de Nobelprijs in de Natuurkunde ontving voor de ontwikkeling van de Scanning Tunneling Microscoop, zei onlangs in een keynote speech voor een Education Summit in Tokyo: 'Discovery means finding the unanticipated. Discovering, however, does not simply come easy; it is usually the unexpected result of a serious effort. It is also not just playing roulette. As Pasteur said: "Chance favors only the prepared mind". A prepared mind is a most important asset of a very good scientist and it requires the scientist's utmost freedom in many respects. It requires the freedom to venture into whatever a scientist considers worth the risk, the freedom to interact with any scientist he deems appropriate, the freedom and the obligation to make available his results to the scientific community; and in particular the freedom to make mistakes.'

Ik zou daaraan willen toevoegen dat de wetenschapper de verantwoordelijkheid heeft, om deze vrijheid gepaard te doen gaan met een diep begrip van zijn of haar maatschappelijke verantwoordelijkheid, dat wil zeggen een begrip van en een ontvankelijkheid voor die problemen waaraan zijn of haar onderzoek een bijdrage kan leveren. Als de wetenschapper zich terdege van deze verantwoordelijkheid bewust is, dan verliest de eindeloze discussie over zuiver versus toegepast wetenschappelijk onderzoek zijn betekenis. Er ligt niet voor elke ontdekking een toepassing te wachten, en sommige toepassingen wachten op een ontdekking die misschien morgen, misschien volgend jaar, of misschien helemaal nooit gedaan zal worden. Maar een wetenschapper met een 'prepared mind' is in de beste positie om eigen of andermans

ontdekkingen in te zetten voor het oplossen van de problemen waar de samenleving mee kampt. Van tevoren specificeren waartoe een onderzoek moet leiden, verraadt een wanbegrip van wat de wetenschap vermag.

Leiden heeft een trotse traditie van grensverleggend, zelfs revolutionair onderzoek. Ik denk dat ik me hier goed thuis zal voelen, en ik hoop en verwacht dat Leiden zal weten gebruik te maken van het industriële perspectief dat mijn onderzoek in zich meedraagt.

Tenslotte is een woord van dank op zijn plaats.

Mijn dank aan het College van Bestuur voor het vertrouwen dat zij met deze benoeming in mij heeft gesteld. Mijn dank aan Frans Saris, die zijn pogingen om mij tenminste gedeeltelijk naar Nederland terug te brengen over de laatste 24 jaar niet heeft opgegeven, en die niet ophoudt zowel een mentor als een voorbeeld te zijn. Dank ook aan mijn nieuwe collega's in de faculteit natuurkunde, die misschien net zo nieuwsgierig zijn als ik om uit te vinden hoe dit experiment gestalte zal krijgen. Dank tenslotte aan mijn familie en vrienden.

Aan mijn ouders voor hun aanmoediging, steun, en geloof in mijn toekomst. Ik ben gelukkig dat mijn moeder hier aanwezig is, en mijn vader is in onze gedachten. En tenslotte zeg ik dank je tegen Henny, Emmy, David, en Mattias. Het is niet altijd gemakkelijk om met een fysicus te leven, die dikwijls in gedachten of persoon niet thuis is. Zonder jullie onverstoorbare pogingen om me van het rechte pad af te leiden zou ik al lang geleden zijn verdwaald.

Ik heb gezegd.

In deze reeks verschijnen teksten van oraties en afscheidscolleges.

Meer informatie over Leidse hoogleraren:
Leidsewetenschappers.Leidenuniv.nl

PROF.DR.IR. R.M. TROMP



- 1976-1983: FOM Instituut voor Atoom en Molecuul Fysica (AMOLF), Amsterdam Doctorsgraad in Wis- en Natuurkunde, Cum Laude, Utrecht 1982 ('The Structure of Silicon Surfaces') Promotor: Prof. Dr. F.W. Saris / Co-Promotor: Prof. Dr. M.J. Sparnaay
- 1983-heden: Research Staff Member, IBM T.J. Watson Research Center
- 1987-2000: Manager Interface/Analytical Science
- 2000-2001: Consultant, IBM Corporate Technical Strategy Development
- 2002: IFCAM Professor Tohoku University, Sendai, Japan
- 2002-2004: Manager Molecular Assemblies and Devices
- 2004-2006: Senior Manager Nanoscale Materials and Devices
- 2006-heden: Hoogleraar Fysica van Oppervlakken en Materialen, Universiteit Leiden

Mijn onderzoek richt zich op het begrijpen van de structuur en de evolutie van oppervlakken en grensvlakken. Verschijnselen als twee-dimensionale fase overgangen, epitaxiale groei, chemische reacties aan oppervlakken, de formatie van quantumdots en nanodraden, en de fysische, chemische, en elektronische eigenschappen van oppervlakken en grensvlakken nemen daarbij een centrale plaats in. Mijn werk is enerzijds dat van een wetenschapper, proberend om de natuur te doorgronden, en anderzijds dat van een ingenieur, proberend om de doorgronde natuur tot nut te maken. Dat de grenzen niet altijd scherp gemarkeerd zijn, spreekt voor zich. Ten tijde van het aanvaarden van de benoeming tot Hoogleraar ben ik bezig met het ontwerp en de constructie van een aberratie-gecorrigeerde Lage Energie Elektronen Microscop, met het doel om daarmee structurele, elektronische, en chemische afbeeldingen van oppervlakken en grensvlakken te maken, met een plaatsoplossend vermogen van 2 nanometer.



Universiteit Leiden