

DE KLOOF OVERBRUGGEN

J.I. Dijkhuis



Faculteit Natuur- en Sterrenkunde
Universiteit Utrecht

DE KLOOF OVERBRUGGEN

Rede, uitgesproken bij de aanvaarding
van het ambt van bijzonder hoogleraar
in de laseroptica van halfgeleiders aan de
Universiteit van Utrecht op 3 maart 1993

door

J.I. Dijkhuis

Typewerk: mw. C.L. Derks
Ontwerp omslag: L.A.C. Derks

De kloof overbruggen

Dames en heren van het bestuur en leden van het Utrechts Universiteitsfonds,
Dames en heren, leden van de Universitaire Gemeenschap en voorts u allen die mij door uw aanwezigheid hier in de aula van deze Universiteit een blijk van belangstelling schenkt,

Zeer gewaardeerde toehoorders!

De onderzoeker is niet tevreden met de wereld. Hij laat de verschijnselen niet zomaar over zich heen komen, maar gaat zich vragen stellen waarom de verschijnselen zijn zoals hij ze ziet: Hij wil meer weten van de wereld die op z'n bord gelegd wordt, hij wil achter de schermen kijken. Om dat te kunnen doen gaat hij de wereld observeren, hij neemt afstand van de wereld en in die positie vraagt hij: "Hoe zit dit alles in elkaar?" Hij wil de chaotische stroom van gewaarwordingen, die zonder regelmaat op hem af lijken te komen, "Die Rhapsodie der Wahrnehmungen" zoals Kant, de filosoof, het uitdrukte, ordenen. Maar hoe moet hij dat doen? Moet hij zich uitsluitend richten op wat hem via zijn zintuigen bereikt, en via die weg de kennis van de wereld verwerven? Of moet hij zijn zuivere denken volgen en zo tot de kern van de wereld doordringen? Deze twee benaderingen staan diametraal tegenover elkaar en worden in de filosofie het Empirisme en het Rationalisme genoemd. Tussen het waarnemen en denken gaapt een kloof.

Immanuel Kant zag het waardevolle van beide stromingen in en trachtte ze te integreren tot één consistente beschouwing. Geïnspireerd door Newton's studie van de mathematische natuurwetenschap, definieerde hij zogenaamde *a priori* elementen van de kennis. Deze zijn zeker buiten alle ervaring om en behoeven op zich zelf geen empirische toetsing, maar zijn wel voorwaarden tot het verwerven van ervaringskennis. Hoe weten we nu of kennis zeker, dan wel een illusie is? Indien wij deze *a priori* elementen via het denken toepassen op een concreet geval en zo komen tot een synthese die klopt met de waarneming, dan is er sprake van 'zekere' kennis. Interessant is dat Kant de zaak op z'n kop zet: de kennis richt zich niet naar de dingen, maar de dingen richten zich naar de kennis. Deze stelling is even revolutionair als de conclusie dat niet de zon om de aarde draait, maar de aarde om de zon, en wordt de Copernicaanse wending in de filosofie genoemd. De waarneembare waarheid volgt uit een synthese die naar algemeen geldende wetten wordt voltrokken via het denken. Het denken én de waarneming, vorm en inhoud, zijn beiden nodig volgens Kant.

Het boek "Kritik der reinen Vernunft" waarin Kant deze ideeën uitwerkt is meer dan tweehonderd jaar oud [1] maar nog steeds zeer actueel. Dat geldt zeker voor de natuurkunde, waar de spanning tussen ratio en empirie zo voelbaar is. De één kan niet zonder de ander. De theoreticus en de experimentator zitten in hetzelfde schuitje en Kant is de kapitein.

Neem bijvoorbeeld de "Theorie van Alles", de unificatie van alle fysische wetten waar we naar op zoek zijn. Die bepaalt toch hoe de ervaarbare wereld er uit kan zien? De rest is onwaar en een illusie. De meest veelbelovende theorie op dit gebied is die van de "supersnaren". Dit zijn onvoorstelbaar kleine eenheden, zo klein dat zij zelfs niet met de grootst denkbare versnellers op aarde aantoonbaar danwel falsificeerbaar zijn [2]. Maar dat vindt men geen probleem: supersnaren behoeven geen experimentele toetsing om zinvol te zijn en om de waarneembare werkelijkheid te kunnen bepalen. Is deze supersnaar niet hét *a priori* element?

Computereperimenten zijn een ander voorbeeld. Daarover sprak Daan Frenkel in zijn oratie [3]. Je zou kunnen zeggen: de computer maakt de waarheid uitgaande van de vaststaande natuurwetten, niet de natuur zelf. De computer rekt een systeem van deeltjes gewoon door met als resultaat een grootheid, bijvoorbeeld de druk zoals die afhangt van de temperatuur van het systeem. De conventionele meting is helemaal overbodig. De lijfspreuk van de Leidse fysicus Kamerlingh Onnes: "Door meten tot weten" kan hier omgedraaid worden: "door weten tot meten"! Slaat de computereperimentator niet de brug tussen ratio en empirie? Is hij Kant niet in een modern jasje?

Het lijkt erop dat Kant succesvol is geweest en het Empirisme met het Rationalisme verenigd heeft. Gesterkt door Kant, meent de fysicus, als een ware monist, de veelheid van de verschijnselen terug te kunnen brengen tot een strikte eenheid; hij ziet gewoon geen kloof. Maar was Kant een monist? Neen! Hij voelde zich gedwongen grenzen van de kennis te erkennen om de persoonlijke vrijheid en verantwoordelijkheid van het individu, waar hij sterk in geloofde, te redden. Hij was van de regen in de drup geraakt. De besloten natuurcausaliteit waar geen enkele speling meer in zit en waarin de wereld tot passiviteit gedoemd lijkt te zijn riep hij weliswaar op met zijn "Copernicaanse wending", maar wenste hij toch niet te accepteren. Daarom brak Kant de kloof weer open en lanceerde een 'deus ex machina': *Das Ding an sich*. Dit is kennis waarvoor de mens niet geëquipeerd is om die te verwerven. Helaas, de veelheid van verschijnselen is door ons toch niet tot eenzelfde laatste eenheid te herleiden. Er zijn namelijk twee essentieel verschillende principes volgens Kant: een ervaarbaar gebeuren waarin iedere menselijke daad volkomen door causale regels bepaald wordt en het niet-ervaarbare *Ding an sich* waarvan de mens geen weet kan hebben. Kant is een dualist.

Of de moderne fysicus nu een dualist is of moet zijn dan wel een monist, is terug te voeren op de vraag: bestaat de Vrije Wil wel of niet? De titel van een recent televisieprogramma "Een schitterend ongeluk" [4] geeft een negatief antwoord op deze vraag. De mens is slechts een toevallige, zij het briljante, fluctuatie in de evolutie. De noodzaak om grenzen van de kennis te postuleren zoals Kant deed, wordt niet gezien. De moderne natuurwetenschapper is zo gefascineerd geraakt van het succes van de brug die Kant geslagen heeft, dat hij, in tegenstelling tot Kant, de vraag van de Vrije Wil zinloos vindt. Tekenend is het antwoord van één van de geïnterviewde geleerden, Oliver Sacks, een neuroloog, in dit programma: "Laten we maar doen alsof we een Vrije Wil hebben."

Dames en heren, door ons met de fundamenteën van de wetenschappelijke benadering van de wereld bezig te houden, iets waar je toch eigenlijk niet omheen kunt als onderzoeker, komen we op vragen die ons boven het hoofd dreigen te groeien. Standpunten verkondigen over deze materie is je begeven op zeer glad ijs, waar de waarschuwing past, "schoenmaker blijf bij je leest". Daar moet, naar mijn mening, de fysicus z'n grenzen beseffen en zich niet pretentieus maar pragmatisch opstellen. We komen gemakkelijk terecht in "een partijtje tennis zonder net", zoals de filosoof Daniël Dennett het in bovengenoemd programma ongeveer uitdrukte [4]. Voor antwoorden op dit soort penibele kwesties hebben we toch filosofen, in Utrecht de unieke vakgroep "Geschiedenis en grondslagen van de wiskunde en natuurwetenschappen", of anders, zoals mijn dochter voorstelde, slaan we het nieuwe boek van Mulisch erop na: "De Ontdekking van de Hemel". Op dit moment is het aardig om Mulisch' antwoorden te verkennen. In zijn *magnum opus* figureert Max Delius, een sterrenkundige, die op zoek is naar de "Theorie van Alles". Na enige flessen roze champagne genuttigd te hebben, geraakt Delius, geobsedeerd als hij is door mysterieuze waarnemingen die door middel van de radiotelescoop verricht zijn, in zijn schuurtje in Westerbork in een zodanige geestestoestand dat hij de talloze computeruitdraaien met betrekking tot Quasar MQ 3412 als bij toverslag weet te combineren tot een inzicht dat direct leidt tot de "Theorie van Alles". Hij mijmert reeds hoe hij straks de Nobelprijs van de Zweedse koning in ontvangst zal nemen. Dit wordt de Engelen in de hemel te gortig. Zij steken er een stokje voor en zenden een vuistdikke meteoriet naar de aarde om Max Delius te verdampen. Er blijft niets van Max en z'n theorie over. Max is over de schreef gegaan. De Engelen konden het niet toestaan dat hij de kloof overbrugde en bereidden hem een roemloos einde, opdat de ontdekking van de hemel niet zou blijken. Mulisch heeft een slimme oplossing: de kloof is te overbruggen maar de Hemel zorgt ervoor dat je het niet kunt navertellen.

Dames en heren, de wetenschappelijk onderzoeker neemt de weg van de meeste weerstand: hij creëert een kloof tussen hem en de wereld door een waarneming te doen. Hij wil de verschijnselen begrijpen door een vraag, een probleemstelling, te formuleren en die vervolgens te beantwoorden. Hier worden risico's, kosten noch moeite gespaard. Waarom getroost de onderzoeker zich al die inspanning, waarom accepteert hij het risico om, na het bereiken van de top, op de afdaling het loodje te leggen, zoals Max Delius? Dat is als vragen aan een alpinist waarom hij berge beklimt, hij zal antwoorden: "Omdat zij er nu eenmaal zijn!"

Nu wil ik uw gids zijn en u leiden langs de kloven die de natuurkunde zo boeiend maakt. De opgave die ik mij stel is u meevoeren naar het landschap van de halfgeleiderfysica met als leidraad een bekend fysisch verschijnsel, de resonantie.

Ik wil beginnen met de beschrijving van een stuk speelgoed dat ik als tienjarige had en u, geachte toehoorder, wellicht ook gehad heeft. In die tijd werden walkie-talkies alleen in het leger gebruikt. Wij, als vindingrijke kinderen zonder veel zakgeld, commu-

niceerden ook op afstand maar gebruikten daarvoor slechts twee lege conservenblikjes met een klein gat middenin de bodem waardoor een koord bevestigd werd. Bij een voldoende strak gespannen koord bleek het, tot onze verbazing, mogelijk om gesproken boodschappen zoals 'Hallo, hallo wie trekt daar zo, het mannetje van de radio' van het ene blikje naar het andere te sturen, via dat koord. Dat laatste vermoedden we toen al. Het conservenblikje als zender en ontvanger. Later leerde je op school dat golven zich voortplanten op een snaar, en dat hierop de werking van onze conservenblikcommunicatie berustte.

Veel subtieler maar in essentie op identieke wijze laat de violist zijn muziek klinken. Met zijn strijkstok brengt hij de snaren van zijn viool in trilling, maar zorgt er tegelijkertijd voor dat de juiste plaatsing van zijn vingers op de snaren slechts de gewenste tonen doet klinken, de demping doet de rest. Dat uitdempen door destructieve interferentie van golven zoals dat heet, is een basisverschijnsel in de natuurkunde, evenals de constructieve interferentie, de resonantie.

Het wonder van dit resonantieverschijnsel kan tegenwoordig ook met behulp van licht gedemonstreerd worden. Stel dat wij de bundel licht van een argonlaser - u weet wel dat gekke spikkelige groene licht dat tegenwoordig gebruikt wordt om disco's op te luisteren - nu eens nuttig aanwenden en loodrecht in laten vallen op een spiegel. Dan zal een kleine fractie, bijvoorbeeld vijf procent doorgelaten en de rest gereflecteerd worden. Zetten we op enige afstand eenzelfde spiegel, parallel aan de eerste, dan zal, zou je kunnen denken, de doorgelaten fractie nog kleiner zijn namelijk vijf procent van vijf procent, dus slechts 0.25%. Fout! Er treedt interferentie op. Daarom wordt in het algemeen nog minder licht doorgelaten. Maar veel interessanter is dat bij zekere afstanden tussen de spiegels, namelijk als het licht kan dansen tussen de spiegels als een toon op een vioolsnaar, de lichtbundel zo goed als ongestoord de barrière van de twee spiegels kan nemen: Het licht "weet" al bij de eerste spiegel dat de tweede "goed" staat om te kunnen resoneren. Licht is dus een golfverschijnsel, net als geluid.

Heeft Newton, die stelde dat licht bestaat uit deeltjes, dan geen gelijk? Daar zag het in het begin van deze eeuw wel naar uit. En dat kwam omdat ons oog net niet gevoelig genoeg is, om de proef met de spiegels ook met een zeer lage lichtintensiteit uit te kunnen voeren. Dat kan nu wel met een fotomultiplicatorbuis die veel gevoeliger dan het oog is maar evenals het oog, lichtenergie omzet in een meetbaar elektrisch signaal. Wanneer we nu de proef met de resonerende spiegels herhalen, blijkt bij heel lage intensiteit dat de detector elektrische *pulsjes* afgeeft van *constante* grootte maar op volstrekt willekeurige momenten, zoals hagelstenen kunnen tikken op je paraplu. De onafwendbare conclusie is: licht bestaat uit deeltjes. We noemen ze fotonen. Newton had toch gelijk!

Wij worden hier plotseling geconfronteerd met een paradox, namelijk het dualistisch karakter van licht: om de spiegels te passeren moet er resonantie zijn, een typisch golfverschijnsel, en om de "tikken" op de detector te verklaren moet er sprake van deeltjes zijn. Dit raadselachtige fenomeen is een manifestatie van de quantummechanica, die een onoverbrugbare kloof vormt voor "klassieke" wezens zoals wij zijn. Deze kloof

overbruggen we niet, daar wennen we aan.

Het wordt nog gekker als we massadeeltjes beschouwen, bijvoorbeeld het negatief geladen elektron en het positief geladen veel zwaardere proton. Samen kunnen zij een waterstofatoom vormen, het eenvoudigste atoom dat wij kennen. Het proton en het elektron zullen elkaar aantrekken, zoals de aarde de maan aantrekt. Het resultaat is echter totaal anders en dat komt niet omdat in het éne geval een elektrische kracht en in het andere de zwaartekracht werkt. In het waterstofatoom blijkt het elektron slechts in heel bepaalde toestanden te kunnen voorkomen, vergelijkbaar met de toestand van de ronddansende lichtgolf tussen de spiegels. De maan mag echter elke baan bezetten mits voldaan wordt aan de klassieke wetten van Kepler. De maan kan daardoor eb en vloed op aarde geven, maar moet wel haar baan steeds kleiner maken al is het maar een beetje. Het elektron daarentegen kan alleen van precies de éne toestand naar precies de andere springen, waarbij het energieverschil in de vorm van een foton opgenomen of afgestaan wordt. Het golfkarakter van massadeeltjes speelt dus een cruciale rol, maar doorgaans alleen in de microscopische wereld. Newton's klassieke mechanica is nog altijd goed. De golflengte van deze orator bijvoorbeeld bedraagt ongeveer 10^{-24} m, vreselijk veel kleiner dan het waterstofatoom maar veel groter dan de supersnaar, en als u de orator wazig ziet, ligt dat aan wat anders.

We hebben gezien: licht kan resoneren tussen twee vlakke spiegels en elektronen kunnen in een atoom van de éne energietoestand naar de andere springen, waarbij resonant licht uitgezonden wordt: de spectraallijn. Deze twee resonantie-effecten kunnen wij combineren. Er blijkt iets heel wonderlijks te kunnen gebeuren zodra wij én een voldoende grote hoeveelheid atomen in een hoge energie, de aangeslagen toestand weten te brengen én plaatsen tussen de parallelle spiegels. Het door de atomen uitgezonden licht kan tussen de spiegels en mét de nog aangeslagen atomen gaan resoneren en zo een zeer sterk gerichte lichtbundel vormen, de laserbundel. De laser is het quantummechanische analogon van de vioolsnaar, je zou kunnen zeggen "de supersnaar uit de moderne optica". En dan te bedenken dat er een laser in de CD-speler zit, en een vioolconcert van Bach kan aftasten en doen klinken. Het basisidee van de laser bestond al sinds 1917, toen Einstein zijn theorie voor spontane en gestimuleerde emissie van fotonen gaf. De essentie is dat fotonen de neiging hebben om bij elkaar te kruipen, het zijn gezelligheidsdieren, ze willen allemaal in dezelfde toestand zitten. In 1960, slaagde Maiman erin aan een robijnkristal voor het eerst de geheimzinnige bundel van tot in de puntjes georganiseerde fotonen te ontlocken. Was de laser eerst een oplossing voor een probleem dat nog gezocht moest worden, tegenwoordig doordringt *light amplification by stimulated emission of radiation* ons dagelijks leven.

Bestaat iets dergelijks ook voor elektronen? Het antwoord is: Ja en nee. Nee, omdat elektronen zich anders gedragen dan fotonen. Ze zijn géén gezelligheidsdieren, maar eerder Einzelgänger: Het zogenaamde Pauliverbod zegt dat elektronen nooit in precies dezelfde energietoestand mogen zitten. Ja, omdat elektronen ook golven zijn en vrij kunnen resoneren in een kristal. We zullen een zeer simpel beeld schetsen hoe de

elektrische geleiding en het elektrisch isolerend vermogen van vaste stoffen begrepen kunnen worden uit het golfkarakter van de valentie-elektronen. Wat zijn valentie-elektronen? Neem bijvoorbeeld het natriumatoom. In plaats van één elektron zoals in het waterstofatoom, moeten we nu elf elektronen onderbrengen rond de natriumkern. Nu kunnen deze elektronen niet allen dezelfde laagste energietoestand bij de positieve kern opzoeken, want elektronen zijn immers sociaal! Daarom pakt het zo uit dat het elfde elektron nogal los gebonden is aan de natriumkern met de overige tien elektronen stevig eromheen. Dat elfde elektron is het enige valentie-elektron van natrium.

Beschouwen we nu een natriumkristal, waar de natriumatomen in de ruimte samengepakt zijn, zoals knikkers in de zogenaamde 'dichtste-bol stapeling'. Er is dan een eindeloze herhaling van hetzelfde patroon in de ruimte, die lijkt op wat je ziet in een kamer waarvan de wanden, het plafond en de vloer totaal spiegelen wanneer je er een gloeilamp in plaatst. In een natriumkristal kunnen de valentie-elektronen energie winnen door zich los te maken van het moederatoom en uit te vliegen over het gehele kristal. Dat doen ze dan ook. Consequent als ze zijn, zullen ze erop staan hun unieke plaats in het metaalkristal te bemachtigen. Hun 'pincode' is dan een bepaalde golflengte die resonanceert tussen de wanden van het metaalkristal. Naarmate er meer elektronen in het kristal ondergebracht moeten worden, zal deze golflengte steeds korter worden. In het natriumkristal is de kortste golflengte, de Fermi-golflengte genaamd, nog altijd behoorlijk groter dan de afstand tussen de atomen in het kristal. Het mooie is dat dan de elektronen nu vrijwel ongehinderd de positief geladen natriumionen kunnen passeren. (Voor de fijnproevers: licht neemt de barrière van eindeloos veel, equidistante parallelle zeer zwak reflecterende spiegels ook moeiteloos mits de onderlinge afstand flink kleiner is dan één golflengte.) De elektronen kunnen stroom geleiden, natrium is een metaal.

Nu kun je je af vragen: wat gebeurt er als de golflengte van de elektronen korter wordt en gaat passen tussen de atomen van het kristal, zoals de grondtoon op een violsnaar? Dan krijg je een tweede resonantie, maar net iets anders dan op een snaar! Gelukkig, het zou bijna saai worden! Bij een trillende snaar krijg je altijd een knoop bij de vaste uiteinden en één of meer buiken er tussenin. In het geval van valentie-elektronen in vaste stof kan er óf een knoop bij de positief geladen atomen voorkomen óf een buik. Alle andere situaties dempen uit. In het eerste geval zit het elektron relatief ver verwijderd van de positieve lading, in het andere geval juist dichtbij. In het éne geval spreken we van een anti-bindend elektron met grote energie, en in het andere geval van een bindend elektron, met kleine energie; er tussenin is een verboden gebied, de energiekloof. De bindende elektronen kunnen slechts de kloof overbruggen en anti-bindend worden, als zij daar voldoende energie voor hebben, anders gaat het feest niet door. Deze energiekloof zorgt ervoor dat wij elektrische isolatoren, halfgeleiders, en doorzichtige materialen kennen. In dit soort materialen zijn er precies genoeg elektronen om alle bindende toestanden te bezetten, terwijl de anti-bindende toestanden leeg en ervan gescheiden zijn door de kloof. Laten we een voorbeeld geven.

Silicium, dat vier valentie-elektronen heeft, kan kortere elektrongolflengtes bereiken. De bindende toestanden in de valentieband zitten vol en de anti-bindende toestanden

in de geleidingsband zijn leeg. In die situatie kan silicium geen stroom geleiden, immers dan zou het elektron versneld moeten kunnen worden door het elektrische veld, wat elektronen niet mogen van Pauli, althans in aanwezigheid van de kloof. Silicium is elektrisch isolerend. Dat verandert als om een of andere reden een elektron de kloof overbrugt en in de geleidingsband komt waarbij een gat valt in de volle valentieband. We hebben dan een negatief elektron in de geleidingsband dat wél versneld kan worden door een elektrisch veld, en op de koop toe is er een positief gat, namelijk een ontbrekend negatief geladen elektron, dat ook versneld kan worden maar de andere richting op. Silicium geleidt dan de elektrische stroom. Het materiaal zit tussen een metaal en een isolator in, het is een halfgeleider.

Waarom is een halfgeleider zo belangrijk voor toepassingen? Dat komt omdat het geleidingsvermogen van een halfgeleider te sturen is van totale isolator tot goede geleider. Wij regelen gewoon de concentratie van elektronen in de geleidingsband en gaten in de valentieband. Dit is het geheim van de halfgeleidersmid en heeft geleid tot bijvoorbeeld de constructie van een transistor en een efficiënte laser die ons leven ingrijpend veranderd hebben. De transistor is de basis van de chip, de halfgeleiderlaser het hart van de CD-speler. Wij schrijven straks geen brieven meer maar sturen een E-mail, wij telefoneren nu al met laserlicht dat ons via de glasvezelkabel bereikt. Georganiseerde sprongen van elektronen over de kloof tussen valentieband en geleidingsband in halfgeleiders helpen de communicatiekloof tussen mensen te verkleinen en maken ons leven comfortabeler en gemakkelijker. Leve de micro-elektronica en de opto-elektronica! Hoe is dit alles begonnen?

Michael Faraday [6] ontdekte al in 1833 dat zilverchloride een zeer ongewone temperatuurafhankelijkheid van de elektrische geleiding vertoont. Hij schreef: "the conduction increases with the heat". Dit verschijnsel kon pas een eeuw later, toen de quantummechanica ver genoeg ontwikkeld was, verklaard worden: de warmtebeweging van de atomen stoot het elektron over de kloof. Ook in de vorige eeuw, ontdekte men bij soortgelijke stoffen fotogeleiding en het fofovoltaïsch effect waar we nu de zonnecellen aan danken. Dit zijn manifestaties van licht dat de elektronen in de geleidingsband brengt. Men had er veel moeite mee deze materialen te classificeren, omdat de verschijnselen te maken hadden met wat Pauli ooit minachtend "Schmutz Physik" noemde: geringe hoeveelheden verontreinigingen en onregelmatigheden hebben zeer belangrijke effecten op de eigenschappen. Elektronen vinden in de verboden kloof vrijplaatsen bij deze onzuiverheden en wel zó dicht bij de geleidingsband dat deze gemakkelijk, met een klein stootje bereikt kan worden. Op dezelfde wijze vinden gaten een opstapje om de valentieband te bereiken. Wij spreken dan van n-type en p-type halfgeleiders. Onregelmatigheden aan oppervlakken bezorgen de elektronen zelfs vluchtplaatsen diep in de kloof, waarop ze energie kunnen winnen en neerstrijken. Hierdoor ontstaan grote statische elektrische velden aan het oppervlak van de halfgeleider waaraan Braun zijn ontdekking in 1874 te danken had van de gelijkrichtende werking van een metaalloodsulfide contact. Al deze curieuze eigenschappen werden nog, voordat men ze goed en wel begreep, gewoon toegepast. In de tweede wereldoorlog werd de zogenaamde *cats*

whisker, de puntcontactdiode bijvoorbeeld gebruikt voor radar.

Na de oorlog zinde men op iets groters of liever gezegd iets kleiner: het construeren van een vaste stof versterker om de kwetsbare en omvangrijke radiobuizen te vervangen. De succesvolle filosofie van de Bell Laboratoria in de Verenigde Staten heeft tot de ontdekking van de transistor geleid [7]: Men zette de beste fysici op een praktisch probleem om eerst fundamenteel theoretisch inzicht te verwerven en gaven hen daartoe alle ruimte. De aldus vergaarde kennis werd direct aangewend om tot een werkende oplossing te komen. Een brug slaan tussen theoretisch fysici enerzijds en experimentatoren en technologen anderzijds is nog steeds de kracht en het succes van de huidige halfgeleiderfysica en halfgeleiderstechnologie. *Concordia res parvae crescunt*. Het schoolvoorbeeld is de uitvinding van de transistor.

De theoretisch fysicus Bardeen [8] en de experimentator Brattain sloegen de handen ineen en hebben in zeer korte tijd een werkende transistor gecreëerd. Bardeen bestudeerde steevast de ruwe experimentele gegevens uit de labjournalen, nog niet door interpretaties vervormd. Door zorgvuldige analyse van vele experimenten aan metaal-halfgeleider grensvlakken en met een beetje geluk, kwam Bardeen tot de conclusie dat minderheidsladingsdragers - dus gaten in n-type of elektronen in p-type materialen - in de halfgeleider geïnjecteerd konden worden. Dit basisidee werd door Brattain op geniale wijze omgezet in een werkende transistor. Bardeen meldde bij terugkomst van het lab onderkoeld aan z'n vrouw toen hij z'n auto in de garage had gezet en de keuken binnen wandelde: "We discovered something today" en ging over tot de orde van de dag. Deze uitvinding van de transistor, vlak voor kerst 1947, markeert de geboorte van de moderne elektronica. Kort daarop in 1951 verliet Bardeen de Bell Laboratoria, volgens sommigen omdat hij geen theoriegroep op mocht zetten, volgens Philip Anderson omdat hij "the need for freedom from transistorites" voelde. Bardeen en Brattain kregen samen met Shockley, hun baas, voor de uitvinding van de transistor in 1956 de Nobelprijs. Bardeen ontving later als hoogleraar aan de Universiteit Illinois z'n tweede Nobelprijs voor de theorie van supergeleiding, een effect dat door Kamerlingh Onnes in 1911 door meten was ontdekt.

Dames en heren, ik hoop u er niet van te overtuigen dat de moderne elektronica en optoelektronica van het grootste maatschappelijk belang zijn en werkgelegenheid hebben geboden en nog steeds bieden aan velen, ook afgestudeerde en gepromoveerde fysici. Alhoewel er een toenemende belangstelling is bij de industrie voor de ontwikkeling van systemen, is er in de halfgeleiderstechnologie nog onverminderd sprake van een forse *market pull*. De transistoren moeten enerzijds nog kleiner en nog sneller of anderzijds goedkoper en kamerbreed geleverd kunnen worden. In het eerste geval wil men de natuur overtreffen door geheel nieuwe materialen te maken van een ongekende zuiverheid en precies gecontroleerde opbouw en regelmaat, en kan men zo langzamerhand atomen stuk voor stuk neer leggen waar men ze hebben wil. Aan de andere kant bestaat de tendens om amorfe, glasachtige materialen te fabriceren met acceptabele halfgeleidende eigenschappen. Geen glazuur maar een zonnecel op je dakpan!

De eerste trend is die van de micro-elektronica en "band-gap engineering", werktuigbouw met atomen. Hier leidt de extreem doorgevoerde controle over materialen tot de constructie van nieuwe, kristallijne structuren met ongekennde eigenschappen en mogelijkheden. De submicrontechnologie confronteert ons met twee-, een- en zelfs nuldimensionale elektronen en gaten, die als coherente golven de artificiële structuren vullen, en ons volstrekt nieuwe verschijnselen voorschotelen, zoals bijvoorbeeld het quantum Hall effect, een ontdekking van de Nobelprijswinnaar Von Klitzing. De optica met elektronen in halfgeleiders, zoals dit nieuwe vakgebied wel genoemd wordt, lijkt in een stadium waarin Huygens' optisch onderzoek in de zeventiende eeuw was: lenzen, tralies, interferometers, spleten, alles moet nog ontwikkeld worden tot praktische gereedschappen. De tweede trend, is het ontwikkelen van de fysica en de technologie van amorfe materialen. Dit is een eerste en gedurfde stap op een ongewisse weg die je oneerbiedig zou kunnen omschrijven als het doorgronden van de "fysica van de baksteen". In wanordelijke halfgeleiders zoals bijvoorbeeld amorf silicium, kunnen elektronen en gaten voorkomen als vrij bewegende golven die elektrische stroom kunnen voeren of als gelocaliseerde deeltjes die geen stroom geleiden. Dit raakt één van de belangrijkste onderwerpen uit de moderne vaste stof fysica: Hoe gedragen golven zich in een wanordelijk medium? Hoe begrijpen we bijvoorbeeld universele geleidingsfluctuaties van elektronen of localisatie van licht?

Dames en heren, ik heb u meegenomen op een trektocht door het land van de fysica. Wij zijn van een trilling op een snaar, via interfererende lichtgolven tussen vlakke spiegels en de laser gestoten op de fundamentele begripskloof van de quantummechanica: De natuur laat zich *beschrijven* als continue golven maar *manifesteert* zich zodra de mens ingrijpt door een meting te verrichten, als deeltjes. De golf functie blijft als "Ding an sich" verborgen voor de waarnemer. Onder toezien oog van Pauli heeft het golfkarakter van elektronen ons gevoerd langs de structuur van het atoom en via de geleiding van een metaal naar de kloof tussen valentieband en geleidingsband in een halfgeleider. Ik gaf u uitzicht op een vakgebied waarin theoretici én experimentatoren eendrachtig als "Schmutz Physiker" van de nood een deugd maken en fundamentele toepassingen realiseren. Iedereen, ook de fysisicus à la Pauli, doet hier z'n voordeel mee. Tenslotte wees ik u enige belangrijke nog onbedwongen toppen in mijn vakgebied aan.

Er is geen tijd om u te vertellen over de "optica met excitonen" die wij in Utrecht doen en hoe wij binnen éénmiljardste milliseconde een ijskoud, tweedimensionaal exciton, het "waterstofatoom van de halfgeleider", creëren en bestuderen met behulp van femtoseconde lasers, en zo een bijdrage hopen te leveren in de ontwikkeling van ultrasnelle optische computers. Ik moet u onze nieuwste lichtverstrooiing resultaten onthouden, die ons een blik gunnen achter de schermen van de dynamica van geluidsgolven in amorfe halfgeleiders, en die een steentje bij kunnen dragen voor de uiteindelijke verbetering van de kwaliteit van een zonnecel gebaseerd op amorf silicium. Evenmin kan ik u mijn fascinatie meedelen over het feit dat wij quantumsprongen, een lang betwist onderwerp in de quantummechanica, kunnen waarnemen met behulp van elektrische

ruismetingen, en daardoor fundamentele ruiseigenschappen van submicrontransistoren zoals $1/f$ -ruis beter begrijpen. Ik heb u niet kunnen schetsen welke hoogstandjes onze technici gerealiseerd hebben om alle experimenten mogelijk te maken. Als u meer wilt weten of zien bent u welkom op ons laboratorium, maar niet allen tegelijk.

Dames en heren, ik hoop dat ik iets overgebracht heb van mijn enthousiasme voor het vak en de kick die het geeft om een veelheid van verschijnselen tot oeffecten te herleiden. Dit bepaalt mijn drijfveer als onderzoeker maar inspireert mij ook als docent. Daarom voel ik mij thuis op deze Universiteit waar onderzoek en onderwijs elkaar vinden en voeden. De brug tussen onderzoek en onderwijs moet blijven, ook bij de invoering van de onderzoekscholen. Een gunstig teken is dat in onze faculteit de kortgeleden benoemde hoogleraar "onderwijs natuurkunde" ook zitting heeft in de Debye Onderzoekschool.

Dames en heren, ik heb de bijzondere leerstoel "Laseroptica van halfgeleiders" aanvaard. Ik weet dat deze leeropdracht weinigen iets zei en zelfs voor sommigen nauwelijks te onthouden viel. Ik hoop dat mijn betoog daar iets in veranderd heeft. Ik heb willen aantonen dat in mijn vakgebied zeer boeiende, fundamentele fysica constructief kan interfereren met de maatschappelijke toepassing, dat moet toch studenten trekken!

Tot slot wil ik enige korte woorden van dank uitspreken.

Allereerst betuig ik mijn erkentelijkheid aan de Vereniging Utrechts Universiteitsfonds voor het feit dat zij mij op deze leerstoel benoemde. Ik aanvaard deze benoeming met bijzonder veel genoegen en zal mijn uiterste best doen aan haar verwachtingen te voldoen.

Ook dank ik de Curatoren van de leerstoel, en het Bestuur en het College van Dekanen van deze Universiteit voor de verleende medewerking. Om nu als hoogleraar op deze Universiteit te mogen werken "tussen ivoren toren en grootbedrijf" is mij zowel een uitdaging als een groot voorrecht.

Mijn promotor, de hooggeleerde De Wijn, curator van de leerstoel heeft mij geleerd dat de worsteling van het kritisch en gedetailleerd toetsen vooraf moet gaan aan het exact formuleren van een resultaat. Pas als je het echt begrijpt, kun je het onder woorden brengen. Begrip condenseert in woorden. Harold, na twee jaar bedrijfsleven keerde ik terug naar deze Universiteit om mij in jouw Vaste Stof groep te wijden aan onderzoek en onderwijs. Daar heb ik nooit spijt van gekregen. Nu ik een "quantumsprong" gemaakt heb van isolatoren naar halfgeleiders, voel ik mij, gelijk een elektron in de geleidingsband, vrij en mobiel, al laat ik een gat achter en lijkt er een kloof te gapen. Dat laatste is pijnlijk maar tegelijkertijd natuurlijk: Kinderen groeien op, promovendi worden prof, werelden lijken gescheiden te worden maar vragen om een *nieuwe* brug gebaseerd op gelijkheid.

Hooggeleerde Blasse, beste George, zonder jouw doortastendheid was deze leerstoel er niet gekomen. Dat geldt wel voor meer zaken, het Debye Instituut bijvoorbeeld. Het interdisciplinaire karakter van de Utrechtse Vaste Stof groep heeft mijn wetenschappelijke carrière bepaald en mij een uiterst prettige werkring bezorgd. Jouw rol in de groep kan nauwelijks onderschat worden. Op cruciale momenten stond je waar je staan moest. Ik hoop iets van je opgestoken te hebben.

Hooggeleerde Van der Weg, curator van deze leerstoel, beste Werner, onze paden kruisen elkaar steeds vaker, hetgeen ik als zeer stimulerend ervaar. Onze gezamenlijke projecten op het gebied van ruispectroscopie en picoseconde Ramanverstrooiing aan amorfe modelsystemen vormen twee van de vier poten onder mijn leerstoel.

Hooggeleerde Zijlstra, beste Rijk, ook als emeritus heb je ons regelmatig deelgenoot willen maken van jouw enorme kennis van ruisverschijnselen. Dat stel ik zeer op prijs.

Mijnheren promovendi en oud-promovendi, ik beschouw het als één van de grootste voorrechten van een baan op de Universiteit om met zoveel jonge talentvolle onderzoekers samen te mogen werken en het avontuur van het onderzoek aan te gaan. Ik besef dat ik het de laatste twaalf jaar wel bijzonder getroffen heb en zal alles wat in mijn vermogen ligt, inzetten om dit zo te houden.

Dames en heren studenten, u bent het waarvoor wij hier in de allereerste plaats zitten. Wij willen de denkwijze en technieken van de natuurkunde aan u leren in de vaste overtuiging dat dezen van onschatbare waarde zijn voor u als individu en voor de maatschappij als geheel. Natuurkunde studeren heeft iets Darwinistisch: "survival of the fittest". Wij zullen uithoudingsvermogen verlangen bij de worstelingen en ontberingen die nodig zijn opdat ieder z'n grenzen ontdekt en verlegt. Wij zullen u uitdagen om de stap over uw barrières te zetten in de schitterende wereld die natuurkunde heet. Als u nu niet afgeschrikt of ingedommeld bent, wil ik graag uw gids en tochtgenoot zijn.

Zeergeleerde Dijkhuis, beste Geert, jij hebt me niet kunnen afschrikken om natuurkunde te gaan studeren, integendeel. Komende uit een ingenieursfamilie leek Delft dé keuze. Maar jij zei: "Ga naar Utrecht, daar zitten de beste profen." Ik hoop dat je dat nog vindt.

Tenslotte wil ik Ietje, mijn vrouw bedanken. De ontmoeting met jou zorgde ervoor dat ik van extreem rotsklimmer, gelukkig huisvader en bergwandelaar werd. Toch nemen we beiden ieder op onze eigen manier de weg van de meeste weerstand. Jij, als psychotherapeut, leeft je in, neemt afstand en spiegelt opdat de ander inzicht in zichzelf krijgt. Ik, als fysicus, doe dat eerste ook, maar verzin een experiment dat het object naar mij toe spiegelt opdat ik de fysica begrijp. Ik draag deze rede aan jou op.

Dames en heren, ik dank u voor uw aandacht en uw uithoudingsvermogen.

- [1] Kritik der reinem Vernunft, Immanuel Kant, 1781
- [2] Supersnaren, F.A. Bais, NTvN-1991/8, p 107
- [3] Computerspelletjes: de post-moderne wetenschap, D. Frenkel, oratie, Utrecht, 1989
- [4] Een schitterend ongeluk, T.V.-programma van Wim Kayzer, uitgeverij Contact, 1993
- [5] De Ontdekking van de Hemel, Harry Mulisch, De Bezige Bij, Eerste druk, 1992
- [6] Solid State Science, edited by D.L. Weaire and C.G. Windsor, Adam Hilger, Bristol, 1987
- [7] Crystals, electrons, transistors, from scholar's study to industrial research, Michael Eckert and Helmut Schubert, AIP, New York, 1990
- [8] Physics Today, april 1992